

ICS xx.xxx
P xx

中华人民共和国水利行业标准

SL/T XXX—20XX

全断面岩石掘进机法 水工隧洞工程技术规范

Technical code for hydraulic tunnel project applying
full face rock tunnel boring machine

(征求意见稿)

请将你们发现的有关专利的内容和支持性文件随意见一并返回

20xx-xx-xx发布

20xx-xx-xx实施

中华人民共和国水利部 发布

前 言

根据水利技术标准制修订计划安排,按照 SL1-2014《水利技术标准编写规定》的要求,
编制 SL ***-****《全断面岩石掘进机法水工隧洞工程技术规范》。

本标准共 12 章和 5 个附录,主要技术内容有:

- 地质勘察;
- 隧洞布置与设计;
- 掘进机选型和技术要求;
- 施工组织设计;
- 掘进机施工;
- 不利地质洞段掘进施工;
- 安全监测;
- 掘进信息化管理系统;
- TBM 施工安全。

本标准批准部门:中华人民共和国水利部

本标准主持机构:中华人民共和国水利部水利工程建设司

本标准解释单位:中华人民共和国水利部水利工程建设司

本标准主编单位:中国水利水电科学研究院

本标准参编单位:水利部水利水电规划设计总院

江河水利水电咨询中心

本标准出版、发行单位:中国水利水电出版社

本标准主要起草人:刘志明,王玉杰,陈祖煜,邵剑南,刘立鹏,等。

本标准技术内容审查人：

本标准体例格式审查人：

本标准在执行过程中，请各单位注意总结经验，积累资料，随时将有关意见和建议反馈给水利部国际合作与科技司(通信地址：北京市西城区白广路二条2号，邮政编码：100053；电话：010-63204533；电子邮箱：bzh@mwr.gov.cn)以供今后修订时参考。

目 次

1	总则.....	1
2	术语与符号.....	1
2.1	术语.....	1
2.2	符号.....	2
3	基本规定.....	4
4	地质勘察.....	6
4.1	一般规定.....	6
4.2	区域地质与地震勘察.....	6
4.3	工程地质勘察.....	7
4.4	勘察方法.....	9
4.5	超前地质预报方法.....	10
4.6	TBM 施工适应性围岩分类.....	10
5	隧洞布置与设计.....	14
5.1	一般规定.....	14
5.2	隧洞线路设计.....	15
5.3	隧洞断面.....	16
5.4	水力计算.....	18
5.5	隧洞结构与支护.....	19
5.6	隧洞灌浆、防渗和排水.....	21
5.7	风险分析与评估.....	22
6	掘进机选型和技术要求.....	29

6.1	一般规定.....	29
6.2	设备选型和配置.....	29
6.3	技术要求.....	31
6.4	出厂验收.....	32
7	施工组织设计.....	33
7.1	一般规定.....	33
7.2	施工总体规划.....	33
7.3	施工通道、工业广场及辅助洞室.....	35
7.4	掘进机组装、检修、转场及拆卸.....	37
7.5	掘进、支护与衬砌.....	37
7.6	施工出渣和物料运输.....	38
7.7	施工通风、防尘及防有害气体.....	40
7.8	施工供水、供电.....	41
7.9	施工防排水.....	42
7.10	施工交通、施工工厂及施工总布置.....	43
7.11	施工总进度.....	44
8	掘进机施工.....	46
8.1	一般规定.....	46
8.2	施工准备与组织.....	46
8.3	TBM 设备制造和运输.....	47
8.4	设备组装、调试与步进.....	47
8.5	掘进与控制.....	52

8.6	超前地质预报.....	58
8.7	施工运输.....	61
8.8	支护与衬砌施工.....	64
8.9	保养与维修.....	67
8.10	转场与拆卸.....	69
8.11	质量检查.....	71
9	不利地质洞段掘进施工.....	73
9.1	一般规定.....	73
9.2	断层破碎带.....	73
9.3	大变形围岩.....	74
9.4	岩溶（岩溶管道、溶腔）.....	75
9.5	突涌水（泥）.....	76
9.6	岩爆.....	77
9.7	超硬岩.....	78
9.8	高地温.....	79
9.9	有害气体.....	80
9.10	放射性物质.....	80
10	安全监测.....	48
10.1	一般规定.....	48
10.2	隧洞周边环境监测.....	48
10.3	洞内监测.....	49
10.4	特殊地质洞段防控监测方法.....	52

10.5	监测成果与信息反馈.....	53
10.6	控制值与预警.....	54
10.7	巡视检查及监测频次.....	55
11.	掘进信息化管理系统.....	56
11.1	一般规定.....	56
11.2	系统技术要求.....	56
11.3	掘进信息采集及预警.....	57
11.4	数据存储.....	58
11.5	信息安全要求.....	59
11.6	TBM 掘进智能化.....	60
11.7	系统维护.....	60
12	TBM 施工安全.....	56
12.1	一般规定.....	56
12.2	安全管理.....	56
12.3	劳动安全.....	57
12.4	工业卫生.....	60
12.5	避险、逃生及救援.....	63
12.6	警告标志.....	64
附录 A	超前地质预报方法选用及规定.....	61
A.1	地震波法.....	61
A.2	电法.....	61
附录 B	围岩变形量和护盾摩阻力的计算方法.....	63

附录 C TBM 信息化施工电子化日志.....	64
附录 D 运输设备相关参数计算.....	65
D.1 有轨运输设备主要参数计算.....	65
D.2 带式输送机功率理论计算法（资料性附录）.....	66
D.3 带式输送机功率经验计算法.....	67
附录 E 掘进机施工设备运行信息基本数据.....	68
条文说明	72

1 总则

1.0.1 为规范采用全断面岩石掘进机法施工的隧洞的勘测、设计、施工和监测等工作，统一其技术标准，以保证工程质量和施工安全，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于新建的采用全断面岩石掘进机法施工的隧洞。隧洞的建筑物级别应根据 SL 252《水利水电工程等级划分及洪水标准》中的有关规定确定。对于特别重要、条件复杂或有特殊要求的水工隧洞应进行专门研究。

1.0.3 采用全断面岩石掘进机法施工的隧洞的勘测、设计、施工和监测应做到安全适用、技术先进、经济合理、节能环保。

1.0.4 采用全断面岩石掘进机法施工的工程宜成立建设、设计、监理、设备、施工、监测等多方为一体的现场项目组，快速决策处理现场出现的各类问题。

1.0.5 全断面岩石掘进机施工应实时收集各类掘进信息和监测资料，建立有关掘进信息和监测资料的共享机制，应用信息化、智能化技术，为分析评价掘进状态和及时采取应对措施提供技术支撑。

1.0.6 在勘测、设计、施工和监测等工作中，应积极慎重地采用新方法、新技术、新工艺、新材料、新设备。

1.0.7 本规范主要引用以下标准。

GBZ 1 工业企业设计卫生标准

GB 6722 爆破安全规程

GB 8978 污水综合排放标准

GB 14050 系统接地的型式及安全技术要求

GB 16423 金属非金属矿山安全规程

GB/T 16823.2 螺纹紧固件紧固通则

GB 18218 重大危险源辨识

GB 18306 中国地震动参数区划图

GB/T 18314 全球定位系统（GPS）测量规范

GB 18871 电离辐射防护与辐射源安全基本标准

GB/T 28181 公共安全视频监控联网系统信息传输、交换、控制技术要求

GB/T 31496 信息技术 安全技术 信息安全管理体系实施指南

GB 50021 岩土工程勘察规范

GB 50026 控制工程测量规范

GB 50086 岩土锚杆与喷射混凝土支护技术规范

GB 50157 地铁设计规范

GB/T 50218 工程岩体分级标准

GB 50384 煤矿立井井筒及硐室设计规范

GB 50431 带式输送机工程设计规范

GB 50487 水利水电工程地质勘察规范

GB 50653 有色金属矿山井巷工程施工规范

GB 50706 水利水电工程劳动安全与工业卫生设计规范+

GB 50915 有色金属矿山井巷工程设计规范
SL 191 水工混凝土结构设计规范
SL 252 水利水电工程等级划分及洪水标准
SL 279 水工隧洞设计规范
SL 303 水利水电工程施工组织设计规范
SL 377 水利水电工程锚喷支护技术规范
SL 378 水工建筑物地下开挖工程施工规范
SL 629 引调水线路工程地质勘察规范
SL 642 水利水电地下工程施工组织设计规范
SL 677 水工混凝土施工规范
SL 764 水工隧洞安全监测技术规范
DL/T 620 交电气装置的过电压保护和绝缘配合
DL/T 5368 水电水利工程岩石试验规程
JBJ 80 建筑物施工高处作业安全技术规范+
JGJ 46 施工现场临时用电安全技术规范
JTG 3370 公路隧道设计规范
TB 10109 铁路隧道辅助坑道技术规范
TB 10120 铁路瓦斯隧道技术规范

1.0.8 采用全断面岩石掘进机法施工的水工隧洞，在进行勘测、设计、施工和监测时应符合本规范规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语与符号

2.1 术语

2.1.1 全断面岩石掘进机 full face rock tunnel boring machine (TBM)

用于岩石地质结构内,采用旋转并推进刀盘,通过滚刀破碎岩石而使隧洞整个断面一次成型的机器。全断面岩石掘进机主要具有掘进、出渣、导向及支护等四项基本功能,一般可分为敞开式和护盾式两大类。

2.1.2 敞开式掘进机 open type tunnel boring machine

没有完全封闭的护盾、不采用管片支护的岩石掘进机,其特点是利用支撑机构撑紧洞壁以承受掘进反力及扭矩。

2.1.3 护盾式掘进机 shield tunnel boring machine

在整机外围设置直径相一致的圆筒形防护结构以利于掘进破碎或复杂岩层的全断面岩石掘进机。一般包括单护盾式和双护盾式掘进机。

2.1.4 双模式掘进机 double mode tunnel boring machine

根据不同地质条件可以调整掘进模式的掘进机。

2.1.5 岩石磨蚀性 rock abrasiveness

岩石对破岩工具磨损的影响。

2.1.6 岩石磨蚀性指数 cerchar abrasivity index (CAI)

反映岩石对隧洞掘进机刀盘和刀具磨损的程度,由试验得到的测试值,用以表征坚硬岩的磨蚀性。

2.1.7 不利地质条件 adverse geological condition

断层破碎带、大变形围岩、岩溶地层、突涌水(泥)地层、高地应力岩爆地层、高磨蚀性硬岩地层、高地温地层、含有害气体和放射性物质地层等不利于掘进机施工的地质条件及其组合的统称。

2.1.8 岩爆 rockburst

岩体在开挖或其他外界扰动下,聚集的弹性变形势能突然释放,导致岩体爆裂、弹射的现象。

2.1.9 施工通道 construction passage

连接地表与地下隧洞,具备施工期人员交通、石渣和物料运输、通风、供电、供气、供排水;运行期检修等功能的施工通道。按照倾角(洞轴线与水平面的夹角)划分为平洞、斜井、竖井三种型式。

2.1.10 施工平洞 construction adit

倾角小于 8° ,为隧洞施工而开挖的可行驶无轨胶轮车的通道(或缓斜井)。

2.1.11 施工斜井 construction inclined shaft

倾角 $8^{\circ} \sim 75^{\circ}$,为隧洞施工而开挖的直线式倾斜通道。包括明斜井和盲斜井。

2.1.12 施工竖井 construction vertical shaft

倾角大于 75° ,为隧洞施工而开挖的铅垂或陡直井筒,一般为圆形断面。包括明竖井和盲竖井。

2.1.13 工业广场 industry square

为全断面硬岩掘进机施工服务而布置的建筑物、构筑物及有关施工设备设施的场地。掘进机地下工业广场一般结合掘进机组装、检修、拆卸洞室布置。

2.1.14 掘进机步进 tunnel boring machine stepping

掘进机利用支撑行走机构换步或滑行到工作面的过程。

2.1.15 掘进机转场 tunnel boring machine transferring

掘进机设备及其附属施工系统在完成前一施工段掘进及支护工作后,转移至下一工作面,亦称为掘进机施工的中间转场。

2.1.16 水仓 drain sump

用以汇存、沉淀隧洞、施工通道的涌水并与排水泵站配套的集水洞室。

2.1.17 贯入度 penetration (ρ)

刀盘每旋转一圈所掘进的长度或刀盘在单位循环下的贯入尺寸,单位为 mm/rev。

2.1.18 掘进速度 penetration rate (Pr)

一次连续掘进过程的掘进长度除以相应的工作时间,单位为 m/h 或 mm/min。有时也称为净掘进速度。

2.1.20 施工速度 advance rate (AR)

掘进机设备在每天或者每班内的推进长度,单位为 m/d 或 m/shift。有时也称为平均掘进速度。

2.1.21 设备利用率 machine utilization index (U)

掘进机掘进破岩的时间与总当班时间的比值。一般描述每个工作班次或者每天内时间的利用效率。

2.1.22 现场贯入指标 field penetration index (FPI)

掘进机单刀推力与贯入度的比值。代表了岩石单位切深所需的滚刀推力。

2.1.23 扭矩贯入指标 torque penetration index (TPI)

掘进机单刀扭矩与贯入度的比值。一般描述刀盘扭矩的破岩效率。

2.2 符号

A ——要求出碴生产率;

AR ——施工速度;

C ——圆周力计算系数;

CAI ——岩石磨蚀指数;

E_i ——岩石的弹性模量;

F ——单刀推力;

F_p ——TBM 护盾摩阻力;

F_T ——TBM 极限推力;

F_μ ——圆周力;

F_{s1} ——特种主要阻力;

F_{s2} ——特种附加阻力;

FPI ——现场贯入指标;

f ——模拟摩擦系数；
 g ——重力加速度；
 H ——提升高度；
 J_p ——起动加速度；
 k_1 ——空载运行功率系数；
 k_2 ——物料水平运行系数；
 k_3 ——附加功率系数；
 K ——功率备用系数、矿车车充盈系数、延迟时间系数、功率备用系数；
 K_e ——石碴松散系数；
 L ——带式输送机长度、列车制动距离、护盾长度、超过 3m 的导料槽长度；
 L_0 ——循环进尺；
 L_n ——水平带式机机长；
 L_i ——不同行速段运距；
 M ——矿车组数；
 m_1 ——Hoek-Brown 常数；
 n_1 ——每列斗车数量；
 P ——电机功率；
 $\overset{\circ}{a} P$ ——附加功率；
 P_T ——掘进速度；
 P_A ——传递滚筒轴功率；
 p_c ——机车粘着重；
 p ——贯入度、机车自重；
 P_0 ——原岩应力；
 Q ——额定输送能力；
 Q_c ——重车上坡起动最大牵引能力；
 Q'_c ——重车下坡制动的最大能力；
 Q''_c ——重列车上坡运行最大牵引能力；
 q_{RO} ——承载分支托辊每米长旋转部分质量；
 q_{RU} ——回程分支托辊每米长旋转部分质量；
 q_B ——每米长输送带的质量；
 q_C ——每米长输送物料的质量；
 q_G ——附加阻力；
 R ——线中曲线半径、隧洞半径；
 R_b ——岩石饱和单轴抗压强度；
 ER ——围岩预留变形量；
 RPM ——刀盘转速；
 S ——设计断面面积；

S' ——允许超挖断面面积；
 S'' ——由于施工工艺所引起的附加超挖断面面积；
 T ——围岩总评分、单刀扭矩；
 T_c ——列车往返循环时间；
 TPI ——扭矩贯入指标；
 t_0 ——在工作面、途中及卸碴停顿时间；
 UI ——设备利用率；
 u ——围岩变形量；
 v ——允许最高行车速度、输送带速度；
 V_{ai} ——不同地段平均行速；
 V_c ——矿车容积；
 V_g ——设计断面开挖量（实方）
 V_m ——每米松散石碴量；
 $V_{循}$ ——每一循环开挖石碴量；
 W_0 ——重车运行时基本阻力；
 W' ——允许超挖量（实方）、重车起动基本阻力；
 W'' ——施工工艺附加超挖量（实方）；
 W_i ——坡度阻力；
 α ——TBM 选型系数；
 η ——传动效率；
 μ ——静摩擦力系数；
 σ_{cm} ——岩体抗压强度；
 σ_m ——围岩最大主应力；
 φ_0 ——运行时粘着系数；
 φ_b ——制动时粘着系数；
 φ_0 ——起动时粘着系数。

3 基本规定

- 3.0.1** 在进行前期地质勘察时，除应满足 GB 50487 及现行相关规范的技术要求外，尚应根据掘进机的施工特点开展勘察工作。
- 3.0.2** 应根据勘察揭露的地质条件，开展掘进机法施工适应性评价，必要时，针对特殊地质段开展专题研究。
- 3.0.3** 隧洞的选型和选线除应满足 SL 279 及现行相关规范的技术要求外，尚应根据掘进机的施工特点进行设计。
- 3.0.4** 隧洞的施工方法选择应根据隧洞的长度、埋深、洞轴线布置、断面形式、地形地质条件、工程布置、施工条件、征地、生态环境影响、投资等因素进行技术经济比较。
- 3.0.5** 掘进机的选型应根据掘进机施工适应性围岩分类和预测的不利地质条件分布情况等条件，经技术经济比较后确定。
- 3.0.6** 掘进机法的施工组织设计应以方便掘进机运输、组装、运行维护，保障掘进施工安全高效，节能生态环保为原则。
- 3.0.7** 针对不利地质条件段的施工，应做到在前期设计中，对可能遇到的不利地质条件进行预测，提出针对性处理措施或预案；在施工掘进过程中，应开展超前地质预报工作，及时对隧洞掘进和处理措施进行调整，实行动态设计、动态控制。
- 3.0.8** 做好地质、设计、施工、监理现场配合，加强现场地质条件确认、掘进机状态评估工作，施工中出现掘进异常和紧急情况时，建设各方应协同合作，及时采取应对和处理措施。
- 3.0.9** 掘进机施工应结合隧洞的围岩条件、施工环境、隧洞结构型式、施工方法与进度要求，制定合理可靠的监测方案，监测仪器与设施应做到技术先进、耐久适用、经济合理，并宜永临结合。

3.0.10 在施工过程中，应对监测数据进行定期综合分析，及时提出意见和建议。

3.0.11 应针对掘进机工作特点，对影响劳动安全和工业卫生的各类危险有害因素进行分析，并采取相应的防护措施或工程措施。针对深埋长隧洞施工，还应研究其他特殊的防护措施或预案。

4 地质勘察

4.1 一般规定

4.1.1 工程地质勘察应查明或基本查明隧洞工程地质条件，评价工程地质问题，为隧洞设计、TBM 施工的适宜性评价、TBM 选型和施工等提供地质资料。

4.1.2 在开展野外地质勘察工作之前，应收集和分析已有地质资料，进行现场踏勘，了解自然条件和工作条件，结合工程设计方案和勘察任务要求，编制工程地质勘察大纲。

4.1.3 隧洞工程地质勘察应根据设计要求分阶段进行，并应保证勘察周期和勘察工作量，各阶段勘察精度应满足 GB 50487 和 SL 629 的要求。勘察工作过程中，应保持与相关专业的沟通和协调。

4.1.4 隧洞工程地质勘察应采用综合勘察方法，应加强影响 TBM 施工的大断层破碎带、岩溶、软岩、膨胀岩、蚀变岩、高磨蚀性硬岩、高地应力、高地温、放射性元素、有害气体等不利地质条件的勘察工作；对于重大工程地质问题，应列专题进行研究和勘察工作。

4.1.5 应根据隧洞工程地质条件，结合 TBM 施工特点，提出进行专门超前地质预报的建议。

4.1.6 TBM 施工过程中应及时收集各种掘进参数，分析掘进效率与隧洞围岩地质条件的关系，为确定不同围岩条件下的掘进参数提供依据。

4.2 区域地质与地震勘察

4.2.1 区域地质与地震勘察应包括下列工作内容：

- 1 研究隧洞工程沿线区域地质背景。
- 2 研究隧洞工程沿线区域性断层的活动性。
- 3 研究隧洞工程沿线地震活动特征。
- 4 评价隧洞工程沿线区域构造稳定性，确定地震动参数。

4.2.2 区域地质背景研究应调查研究区域地形地貌、沉积建造、岩浆活动、变质作用、现代构造应力场,地层岩性特征及其分布和组合接触关系,区域性断裂的分布特征及其活动性,主要富水构造和水文地质单元等。

4.2.3 区域构造稳定性研究应在区域地质背景研究的基础上,主要研究影响隧洞工程安全的区域断裂的分布和活动特征、地震活动特征以及构造应力场特征。

4.2.4 断层活动性研究应包括地貌、地质构造、地层切错情况、地震、测年资料、地壳形变以及地球物理和地球化学特征等内容。活断层的判定应符合 GB 50487 的有关规定。

4.2.5 隧洞场地地震动参数可按照 GB 18306 确定。

4.2.6 区域构造稳定性评价应根据活断层的分布、地震活动特征、地震动峰值加速度及区域重磁异常等因素进行综合评价。

4.3 工程地质勘察

4.3.1 对于一般埋深隧洞,应查明其工程地质与水文地质条件,主要包括以下内容:

1 隧洞沿线地貌类型及分布,河流、水库等地表水体的分布、水位、流量、规模等。

2 隧洞沿线地层分布、岩性,重点查明软岩、膨胀岩、岩溶、蚀变岩、高磨蚀性硬岩等特殊岩类的分布及工程地质性质。隧洞进出口段、浅埋段、过沟段应查明覆盖层的成因类型、厚度和物质组成。

3 隧洞沿线褶皱、断层、裂隙密集带的分布、产状、规模、组合关系等。重点查明区域性宽大断层的分布位置、性质、产状、延伸长度、破碎带及其影响带宽度、构造岩性状特征及其渗透性,断层与地表水体的连通情况等。

4 隧洞进出口段岩体风化、卸荷深度,滑坡、崩塌、泥石流的分布、规模,评价隧洞进出口边坡的稳定性。

5 隧洞沿线地下水类型、分布、补排条件和水化学特征,含水层、储水构造分布、规

模和富水程度，隧洞围岩渗透性、强透水带的分布和规模，划分水文地质单元，估算隧洞涌水量。

6 可溶岩地层岩溶发育规律，主要洞穴的发育范围、深度、规模、连通与充填情况；岩溶水文地质结构类型、地下水动力条件、动态规律和分带特征；划分岩溶水文地质单元，预测隧洞发生突泥、突水的可能性，评价隧洞排水对周边地下水环境的影响。

7 进行岩石（体）试验，提出岩体及结构面的物理力学参数建议值。

8 放射性元素的生成、聚集条件，辐射强度，评价放射性元素对人体健康和输水水质的影响。

9 可能产生有害气体的煤系地层及油气地层的分布、厚度，有害气体浓度，评价对人体健康和 TBM 施工的影响。

10 进行隧洞围岩工程地质分类，评价隧洞围岩稳定性，围岩工程地质分类及稳定性评价应符合 GB 50487 规定。

11 根据不利地质条件对 TBM 掘进效率和安全的影响程度，进行 TBM 施工适应性围岩分类。

4.3.2 对于深埋隧洞勘察，应基本查明其工程地质与水文地质条件，勘察内容除 4.3.1 的相关规定外，还应包括以下内容：

1 划分水文地质单元，研究隧洞水文地质条件的垂直分带性；主要富水构造及可能产生高外水压力、突水突泥的水文地质条件，提出外水压力折减系数。

2 隧洞沿线应力场特征。地应力大小、方向、变化规律等应力场特征，地应力异常区分布特征及成因，对围岩大变形、岩爆进行评价。

3 隧洞区地温梯度及变化规律，地热异常区分布规律及成因，地下热水的补给、径流、排泄特征，进行高地温分级，确定热害类型。

4.4 勘察方法

4.4.1 隧洞工程地质勘察应综合利用遥感解译、地质测绘、物探、钻探、硃探、取样试验、现场测试及观测等方法。

4.4.2 遥感解译宜利用多平台、多波段、多时相及三维真彩色遥感数据，进行复合图像处理 and 综合解译，对于重要的地质现象应进行现场地质调查、复核。

4.4.3 工程地质测绘范围应包括隧洞及相关地段，隧洞进出口、浅埋段、岩溶发育洞段等应进行专门工程地质测绘。

4.4.4 物探工作应符合下列规定：

1 应沿隧洞轴线布置物探剖面，必要时，可布置辅助物探剖面。

2 物探方法可根据地质条件、现场工作环境等确定，条件具备时宜采用多种方法互相验证。对于深埋隧洞应布置大地电磁测深剖面。

4.4.5 勘探工作应符合下列规定：

1 应沿隧洞轴线布置主要勘探剖面。

2 隧洞进出口、浅埋段、过沟段及地质条件复杂洞段等应布置钻孔，钻孔深度进入设计洞底以下不应小于 10m。必要时，可布置平洞。

3 对于深埋隧洞，宜根据地质测绘和物探成果，选择对 TBM 施工有重大影响的不良地质体发育洞段布置深钻孔，钻孔深度可根据需要确定。

4.4.6 隧洞穿越的主要岩层及特殊岩层应取样进行室内试验，试验内容应包括矿物成分、石英含量、物理性质、抗压强度、抗拉强度、弹性模量、膨胀性、磨蚀性、可钻性等。必要时，进行现场岩体抗剪强度和变形试验。

4.4.7 应进行钻孔压（注）水试验或抽水试验，岩溶发育洞段宜进行连通试验。

4.4.8 宜选择合适的钻孔或平洞进行地应力、地温、放射性元素及有害气体测试。

4.5 超前地质预报方法

超前地质预报方法选用及规定见附录 A。

4.6 TBM 施工适应性围岩分类

4.6.1 TBM 施工适应性围岩分类应在隧洞围岩基本分类的基础上,充分考虑岩体可掘性以及表 4.6.1 所列的五类不利地质条件对 TBM 施工的影响,按公式(4.6.1)表示并确定:

$$X_{A_i, B_i, C_i, D_i, E_i} \quad (4.6.1)$$

式中 X ——围岩基本类别,范围为大写罗马数字 I~V 类,应根据 GB 50487

确

定;

A, B, \dots, E ——不利地质条件分类;

i ——不利地质条件对应的 TBM 施工适用性等级,取 $i=1, 2, 3, 4,$

分

别表示一般、中、差和极差。

表 4.6.1 TBM 施工适应性围岩分类考虑的不利地质条件

分类符号	类别
A	超硬岩
B	岩爆
C	断层破碎带
D	大变形围岩
E	突涌水(涌泥)

4.6.2 超硬岩 TBM 施工适应性等级划分应以岩石饱和单轴抗压强度 R_b 和岩石磨蚀指数 CAI 为判据,对 GB 50487 规定的 I 和 II 类围岩进行细分,并应符合表 4.6.2 的规定。

表 4.6.2 TBM 施工适应性围岩分类:超硬岩

等级	判定依据
A ₃	$150\text{MPa} \leq R_b < 200\text{MPa}$ 、 $CAI \geq 4.0$
A ₄	$R_b \geq 200\text{MPa}$

4.6.3 岩爆 TBM 施工适应性等级划分应在勘察设计阶段和施工阶段分别进行,并应符

合下列要求：

1 勘察设计阶段，应采用岩石强度应力比来判定岩爆等级，划分标准应符合表 4.6.3 - 1 的规定。

表 4.6.3 - 1 TBM 施工适应性围岩分类：岩爆（勘察设计阶段）

等级	判别阈值
B ₁	$4 < R_b / \sigma_m < 7$
B ₂	$2 < R_b / \sigma_m < 4$
B ₃	$1 < R_b / \sigma_m < 2$
B ₄	$R_b / \sigma_m < 1$
注： R_b —岩石饱和单轴抗压强度，MPa； σ_m —围岩最大主应力，MPa。	

2 施工阶段，岩爆 TBM 施工适应性等级划分因素应考虑现场岩爆发生时的声响特征、围岩破裂特征、爆坑最大深度和支护破坏程度等因素，有微震监测的，还应考虑岩爆辐射能量，其划分标准应符合表 4.6.3 - 2 的规定。

表 4.6.3 - 2 TBM 施工适应性围岩分类：岩爆（施工阶段）

等级	划分依据				
	声响特征	围岩破裂特征	爆坑最大深度	支护破坏程度	岩爆辐射能量
B ₁	无明显声响或微弱有啞啞、撕裂声响，无机械噪声时人耳偶然可听见。	围岩表层有爆裂脱落、剥离现象，以薄片状或梭状岩片为主，断口新鲜，厚度在几个厘米，未剥离岩片发生轻微鼓胀，一般无弹射现象，区段内可成片连续发育。	小于 0.3m	初期支护混凝土喷层局部隆起，为少量开裂纹，开裂变形持续时间较长；锚杆（砂浆锚杆或水涨式锚杆）轴力缓慢增加	小于 10 ² J
B ₂	有清脆的似子弹射击声或雷管爆破的爆裂声，人耳常可听到围岩内岩石的撕裂声。	围岩爆裂脱落现象较严重，以片状和碎块状为主，断口新鲜，厚度在 5~20cm 之间，完整岩体内爆坑呈现“V”字型或碗状，有少量弹射，有轻度震感，破坏多发生在开挖断面的局部区域，区段内可连续发育。	0.3 m ~ 1.0m	初期支护混凝土喷层和挂网脱落，破坏区内可见有锚杆悬于岩壁，杆体无或存在小量弯曲变形现象	10 ² J ~ 10 ⁵ J
B ₃	有似炸药爆破的爆裂声，声响强烈。	围岩大片爆裂脱落、抛射强烈，有较强的震动发生，伴有岩粉喷射现象，快速充满开挖空间；岩块块度较大，厚度一般在 20~40cm 左右，断口新鲜，完整岩体内爆坑呈现“V”字型，可揭露结构面或以结构面为破坏边界，破坏多发生在开挖断面的较大范围内，偶尔会波及整	1.0 m ~ 3.0m	初期支护或系统支护混凝土喷层和挂网大面积垮落或爆裂破坏；破坏区内可见大部分锚杆被拔出或拉断，有部分锚杆悬于岩壁，杆体常有严重弯曲和变形；有钢拱架或钢	10 ⁵ J ~ 10 ⁷ J

		个开挖断面，区段内一般不连续发育，但同一破坏位置可发生多次破坏。		筋拱肋支护时，拱架有较大变形，局部接合点断裂。	
B ₄	有低沉的似炮弹爆炸声或闷雷声，声响剧烈。	围岩大面积爆裂垮落，岩块瞬间涌入开挖空间内，甚至封闭开挖断面，岩粉喷射瞬间充满开挖空间；岩块块度分选差，大块体与小岩片混杂；破坏区形态复杂，甚至开挖区段内均发生破坏，破坏区连成一体，可揭露结构面或以结构面为破坏边界；破坏会波及整个开挖断面，发生频次较低。	大于 3.0m	系统支护混凝土喷层和挂网大面积垮落或爆裂破坏严重；破坏区内支护已大部分已经被破坏，失去支护能力，甚至被爆落岩块所掩埋	大于 10 ⁷ J

4.6.4 断层破碎带 TBM 施工适应性等级划分应符合表 4.6.4 规定。

表 4.6.4 TBM 施工适应性围岩分类：断层破碎带

等级	宽度 / m
C ₁	<2
C ₂	2~15
C ₃	15~30
C ₄	>30

4.6.5 大变形围岩 TBM 施工适应性等级划分应以围岩变形量 u 与预留变形量 ΔR 的大小关系为围岩变形判据，以护盾摩阻力 F_p 与 TBM 极限推力 F_T 的大小关系为护盾受力判据，划分标准应符合表 4.6.5 的规定。TBM 施工围岩变形量 u 和护盾摩阻力 F_p 按附录 B 计算。

表 4.6.5 TBM 施工适应性围岩分类：大变形围岩

等级	判别条件
D ₁	$u < \Delta R$
D ₂	$u \geq \Delta R, F_p \leq F_T$
D ₃	$u \geq \Delta R, F_T < F_p \leq 2F_T$
D ₄	$u \geq \Delta R, F_p > 2F_T$

4.6.6 突涌水（泥）TBM 施工适应性等级划分应符合表 4.6.6 的规定。等级为 E₃~E₄ 级时，应开展地震波法及电法等（详见附录 A）的超前地质预报。

表 4.6.6 TBM 施工适应性围岩分类：突涌水（泥）

等级	主要因素			次要因素		
	含导水构造及其与隧洞相对位置	围岩可溶性	地下水位与隧洞底板高差	地表负地形发育情况	裂隙发育情况	隧洞围岩类别

E ₁	隧洞附近不存在可致突水的含导水致灾系统	隧洞处于非可岩溶层	高差 $h < 0\text{m}$	地表无负地形	裂隙不发育	I、II
E ₂	隧洞附近底板上方有小型含导水致灾系统，或隧洞附近底板下方有小型承压含导水致灾系统	隧洞处于弱岩溶层	高差 $0\text{ m} \leq h < 30\text{m}$	地表有小型负地形	裂隙弱发育	III
E ₃	隧洞附近底板上方有中型含导水致灾系统，或隧洞附近底板下方有中型承压含导水致灾系统	隧洞处于中等岩溶层	高差 $30\text{m} \leq h < 60\text{ m}$	地表有中等负地形	裂隙中等发育	IV
E ₄	隧洞附近底板上方有大型含导水致灾系统，或隧洞附近底板下方有大型承压含导水致灾系统	隧洞处于强岩溶层	高差 $h \geq 60\text{m}$	地表有大型负地形	裂隙强发育	V

注：满足主要因素中 1~2 条即可划分对应等级，次要因素仅影响在既有分级中的风险程度而不影响等级划分。当同时满足不同等级划分条件时，最终按照最危险分类方式划分，最终确定为高级别分类。

5 隧洞布置与设计

5.1 一般规定

5.1.1 除应满足 SL 279 及现行相关规范、规程的技术要求外，尚应根据隧洞地形、地质、生态环境、沿线水工建筑物布置、水力计算、施工及交通、运行维护等各种因素，通过技术、经济、工期等综合比选确定隧洞布置。

5.1.2 敞开式、护盾式、混合式掘进机适宜的开挖直径为 3m ~ 15m、单洞掘进长度宜大于 10km；硬岩单轴饱和抗压强度大于 200MPa、极软岩底拱承载能力小于 0.5MPa 时采用 TBM 掘进施工应进行充分论证。

5.1.3 对于深埋长隧洞净空断面要留有余地，除满足设计过流能力外，还要满足掘进机施工不良地质洞段净空侵限处理后的过流能力要求。

5.1.4 开挖预留变形量应满足施工过程中一次支护和围岩变形要求，主要考虑地应力大小、岩性及围岩类别、施工富余量等因素确定。

5.1.5 选用的掘进机应具备精确的导向、调向和纠偏能力。

5.1.6 应向掘进机设备制造厂商提供详细的地质资料，可能遇到的主要工程地质条件和地层岩性，以及坚硬岩磨蚀性、石英含量等指标。

5.1.7 应根据可能遇到的不利地质条件，结合掘进机施工的特点，在主机制造和设备配置时进行针对性设计。

5.1.8 隧洞掘进过程中，应根据地质预报（预测）或超前勘探情况适时调整或动态修改设计参数。

5.1.9 隧洞掘进后，设计人员应及时掌握隧洞开挖部位地质条件的变化情况，及时复核相关设计；对可能危及施工和运行安全的不良地质问题应进行专门研究。

5.1.10 敞开式掘进机施工隧洞宜根据不同的地质情况，可设计为不衬砌与锚喷衬砌，

现浇混凝土衬砌，隧洞底拱结构可采用现浇形式，如底拱采用预制块混凝土，接缝的连接与防渗应进行充分论证。

5.1.11 护盾式掘进机宜采用预制钢筋混凝土管片衬砌，在不良地质洞段的预制混凝土管片可掺纤维材料，在局部极为复杂的地质洞段可使用钢管片。当外水存在腐蚀性，可依据腐蚀等级，采用防腐水泥灌浆封堵地下水，管片混凝土应采用同样防腐措施。

5.1.12 输水隧洞管片的分块方式、连接方式可进行标准化设计，小于 6m 净洞径的隧洞可采用六边形管片，净洞径大于 6m 可采用梯形、矩形等形状的管片。

5.1.13 预制混凝土管片设计中应验算其养护、脱模、翻转、吊装、运输、洞内安装、与二次衬砌整体受力等工况。

5.1.14 对于掘进机施工采用不衬砌或喷锚衬砌洞段，宜在隧洞合适部位设置积石坑，可结合检修通道布置。

5.2 隧洞线路设计

5.2.1 隧洞线路布置应满足下列要求：

1 隧洞线路宜选择直线，如为避开不利地形、地貌，生态环境制约或不良地质条件等情况也可采用弧线布置，其转弯半径应满足掘进机主机及后配套最小转弯半径要求。

2 隧洞线路轴线方向宜与最大水平地应力的方向有较小夹角，并宜避开有强烈或极强岩爆风险或深埋软弱围岩等特殊洞段。

3 隧洞沿线遇有断裂构造、不利构造面、不整合接触带、蚀变带、膨胀、崩解、泥化软弱围岩时，应考虑地下水的影响，洞线宜避开地表有明流的冲沟。

4 隧洞无法避开而须通过大断层区域地质构造等不良地质条件时，应研究适宜的施工方法和措施，制定施工预案和保障措施。

5 洞线布置遇有较大沟谷时，可根据地形、地貌、水文地质和施工条件，合理选择跨

沟方案及工程措施。

6 洞线布置宜避开土洞，或缩短土洞的长度；隧洞进出口应避免产生偏压，对不稳定边坡应进行加固处理。

7 洞线布置应结合掘进机的安装、检修、拆机洞室、施工通道、对外交通洞等因素进行合理施工分段。

8 当洞线无法避开而须通过较长的坚硬高磨蚀硬岩地质条件时，应研究应对措施，如优化掘进参数、刀具技术攻关、优化设备结构、引入新型材料等，以及提前制定岩爆的防控措施。

5.2.2 隧洞纵坡布置除应满足 SL 279 及现行相关规范的技术要求外，尚应满足如下要求：

1 纵坡设计坡度不宜大于 3%；洞径小于 6m 时，顺坡掘进用渣料斗车出渣时，纵坡设计坡度不宜大于 1%。

2 结合施工进度、掘进机方向的调控能力、防溜车、排水能力等要求进行针对性的功能设计。

5.2.3 根据以上的隧洞布置要求，综合考虑地形地貌、工程地质与水文地质、生态环境、隧洞结构与布置、掘进机安装与检修、对外交通、施工要求、工期和投资等因素，通过技术经济比较，确定隧洞线路布置。

5.3 隧洞断面

5.3.1 隧洞横断面形状与尺寸应满足下列要求：

1 隧洞开挖横断面型式宜采用圆形，可用于有压或无压明流隧洞。隧洞衬砌后的断面，有压隧洞宜采用圆形断面，无压隧洞可采用圆形或平底圆形断面。

2 敞开式掘进机开挖隧洞直径大小，应在满足过流要求的隧洞内径基础上，考虑一次

支护、二次衬砌厚度、预留变形量、施工富余量（含施工蛇形误差等），经技术经济比选后确定。

3 护盾式掘进机开挖隧洞直径大小除应满足本条第二款外，还应考虑盾尾间隙和盾壳钢板厚度。

5.3.2 根据围岩类别，TBM 施工的无压输水隧洞可采用多种支护及衬砌结构型式，但过流内径不同的衬砌型式变化不宜过多、过频繁，断面间衔接应设渐变段平顺过渡；对有压输水隧洞，经技术经济分析，可采用统一过流内径的衬砌断面型式。

5.3.3 敞开式掘进机辅助洞室断面设计应符合下列要求：

1 有条件的宜优先选择洞外组装、洞外拆机方式，可避免设置安装洞、步进洞等辅助洞室，节省工程投资。

2 辅助洞室包括安装洞、步进洞、始发洞、拆机洞等，采用钻爆法预先开挖施工。辅助洞室断面尺寸应满足掘进机组装、调试、步进、始发要求，并综合考虑皮带机出渣系统、通风系统布置等因素确定。

3 安装洞断面尺寸在满足掘进机组装、调试基本要求外，还应综合考虑皮带机出渣系统布置、通风系统布置、皮带硫化、存储、施工物资转运、暂存等因素确定。安装洞一般可采用城门洞形或蘑菇头形。

4 步进洞一般采用斜曲墙形或城门洞形，断面尺寸应满足掘进机步进通过要求，两侧、洞顶预留不低于 20cm 富余量。

5 始发洞一般可采用锁芯形断面，其长度应根据撑靴与刀盘间距离确定，两侧、洞顶预留富余量应控制在 15cm 以内。

6 安装洞、步进洞和始发洞底板应设厚度不低于 25cm 的现浇混凝土平板。

7 拆机洞室长度根据主机及其配套设置长度确定，断面尺寸根据掘进机直径和起吊设

备尺寸、起吊高度，并考虑一定富余量确定。

5.3.4 护盾式掘进机辅助洞室断面设计应符合下列要求：

1 护盾式掘进机可采用起始环方式始发，也可设置反力钢架方式始发，始发洞长度依据护盾长度及顶撑油缸行程，并留一定富余量确定。

2 护盾式掘进机其他辅助洞室断面尺寸可按 5.3.3 要求进行设计。

5.4 水力计算

5.4.1 掘进机施工的水工隧洞水力计算应包括过流能力、上下游水面衔接、水头损失、压坡线、水面线、充放水等内容。

5.4.2 沿程水头损失、局部水头损失和过流能力计算应符合下列要求：

1 沿程水头损失计算中糙率值选取，可依据具体的水流流动形态、衬砌情况、工程类比、水工模型试验，以及 SL 279-2016 附录 A 有关要求等综合分析后选定。

2 局部水头损失计算可采用的局部水头损失系数，可按 SL 279-2016 附录 A 选定，必要时通过水工模型试验确定，对不衬砌隧洞蛇形变量产生的水头损失应进行水力阻力专门研究。

3 有压隧洞应按管流计算，应进行专门的水力过渡过程研究。

4 无压隧洞一般可按明渠（槽）均匀流计算，但对于局部短洞段、体型变化段和纵坡或阻力系数改变段则应按非均匀流进行计算。

5.4.3 无压隧洞水面线计算应符合下列要求：

1 根据纵坡、流量、槽身形状和糙率等确定水面曲线类型。

2 计算水面线时，必须从控制断面处的控制水深开始。

3 急流状态时，由上游控制水深开始向下游分析计算；缓流状态时，由下游控制水深开始向上游分析计算。

5.4.4 高流速的防空蚀设计可按 SL 279 相关要求执行。

5.5 隧洞结构与支护

5.5.1 隧洞结构与支护应考虑加固围岩形成承载结构，并与支护体系联合承载。应提高围岩防渗能力，防止围岩长期暴露、外部环境等因素对围岩的不利影响。结合隧洞稳定和防渗要求，必要时对不良地质洞段进行固结灌浆处理。

5.5.2 隧洞衬砌结构与支护参数，应根据围岩地质条件，结合断面尺寸、施工方法等通过分析计算或工程类比，从技术、安全、经济等方面比较后确定。

5.5.3 敞开式掘进机施工隧洞宜采用复合式衬砌，即一次支护以锚喷网钢架联合支护，二次衬砌采用现浇混凝土或钢筋混凝土衬砌，隧洞底拱结构可采用预制或现浇混凝土结构形式。

5.5.4 护盾式掘进机施工隧洞宜采用预制钢筋混凝土管片衬砌，局部需拆除时可考虑钢管片衬砌，不良地质洞段可采用掺纤维材料的预制钢筋混凝土管片衬砌。根据隧洞直径选择合适的管片型式（六边形、梯形、矩形等），隧洞仰拱管片宜设置底座。隧洞内水压力大于外水压力时，可设置二次现浇混凝土衬砌。

5.5.5 隧洞结构计算应符合下列规定：

1 隧洞混凝土衬砌结构应采用极限状态设计法，在规定的材料强度和荷载取值条件下，采用在多系数分析基础上以安全系数表达的方式进行设计，并应符合 SL 191 的相关规定。

2 永久荷载包括衬砌自重、围岩压力、地应力、预应力等；可变荷载包括正常运用条件下的内水压力、外水压力、灌浆压力、温度变化的附加荷载、岩爆的冲击力、设备运输、安装荷载和辅助液压缸的推力（护盾机施工）等；偶然荷载为地震力、落石冲击力、校核洪水水位时的内水压力、内水骤降形成的相应外水压力等。承载能力极限状态设计应按基本荷载组合和偶然荷载组合进行，并符合 SL 191 的规定；正常使用极限状态验算应按永久荷载与

可变荷载标准值的荷载效应组合进行。

3 敞开式、混合式掘进机施工隧洞采用复合衬砌的结构计算可按 SL 279 的有关规定执行。

4 护盾式掘进机施工隧洞，当为管片衬砌时，宜采用惯用法、修正惯用法、多铰环法、梁弹簧法、等效刚度圆环模型、衬砌边值法、有限元法等计算方法，并应考虑管片间的拼装缝型式和连接型式；当内水压力较高设置有二次衬砌时，宜按叠合构件进行结构计算。

5.5.6 管片衬砌及仰拱块设计应符合下列规定：

1 护盾式掘进机管片环形式有六边形、梯形、矩形或平行四边形等多种型式，应根据管片受力要求、防水效果、掘进机设备、管片拼装、管片运输等因素合理确定。当隧洞直径大于 6m 时宜采用矩形管片。

2 敞开式或混合式掘进机施工隧洞底板采用预制结构时，预制块结构设计应考虑：顶面布置轨道满足施工运输要求，中心设置水沟，两侧与二次现浇混凝土衬砌合理连接，底部预留注浆回填高度，预制块自身预留注浆孔、吊杆、钢拱架安装槽、承轨槽、道钉预留孔、止水带安装槽、水沟接头防水处理槽等。

3 管片或仰拱块分块应根据结构受力要求、防水效果、掘进机设备、管片或仰拱块拼装与运输等因素合理确定。

4 管片厚度一般为管片环外径的 $1/20 \sim 1/30$ ，应结合隧洞所处地质条件、埋置深度、隧洞直径、管片材料、施工工艺等条件，通过工程类比并经结构分析验算后确定。

5 管片环宽应综合考虑隧洞曲线、防水、运输及组装等因素合理选择，宜取 1200mm ~ 2000mm，一般小直径隧洞取小值，大直径隧洞取大值。

5.5.7 复合式衬砌设计应符合下列规定：

1 采用敞开式掘进机施工的隧洞，当二次衬砌在贯通后施作时，其初期支护以锚喷网、

钢架进行联合支护，必要时辅以灌浆加固措施，应保证掘进机在贯通之前初期支护的安全稳定性；当隧洞直径较大时，二次衬砌宜跟进支护，以确保隧洞整体安全。

2 当隧洞遇到高外水压力等极为复杂地质条件，应采用超前地质钻孔封堵地下水和加固围岩，同时可适时设置二次衬砌或不良地质洞段内衬钢拱架锚喷网或模筑混凝土衬砌；隧洞底部结构可采用现浇混凝土形式。

3 掘进机施工隧洞钢架宜为全圆设置，考虑围岩变形因素，钢架宜设计为可伸缩的结构。

4 当底部设有预制块时，应充分考虑二次衬砌与底部预制块的整体受力要求，宜设置榫槽，必要时钢筋过缝连接。

5.6 隧洞灌浆、防渗和排水

5.6.1 应根据隧洞沿线围岩的工程地质、水文地质、支护衬砌型式等设计条件，以及环保、水质、运行等要求，综合分析确定防渗和排水措施。

5.6.2 敞开式掘进机施工隧洞灌浆防渗和排水应符合下列规定：

- 1 隧洞灌浆、防渗和排水设计原则与 SL 279 相同。
- 2 现浇混凝土衬砌顶拱、预制仰拱块底必须进行回填灌浆。
- 3 仰拱块之间及其与后浇混凝土之间应满足防水要求。

5.6.3 护盾式掘进机施工隧洞防渗应符合下列规定：

1 管片衬砌设计遵循“以防为主、多道设防、因地制宜、综合治理”的原则，以管片接缝防水为重点，必要时辅以二次衬砌防水。

2 管片结构防渗措施，包括管片自防水、接缝防水、螺栓孔和注浆孔防水等。管片接缝密封垫在设计水压和接缝最大张开错位下不得渗漏。

- 3 管片结构与围岩间间隙需进行豆砾石充填灌浆或水泥砂浆或细石混凝土充填，应满

填满灌；28天芯样抗压强度不宜低于10MPa；注浆结石体的抗渗性能应满足设计要求。

4 豆砾石应沿洞轴线方向，自下而上、阶梯对称吹填，可在底拱90°灌注水泥砂浆，其他270°范围灌注水泥浆液或其他稳定浆液。

5 对于易膨胀泥化崩解的软弱围岩、豆砾石吹填量小于设计量的不良地质洞段，宜进行浓浆二次灌浆，二次灌浆应结合对围岩的固结灌浆一并进行；加固范围及灌浆参数应满足设计要求。

5.7 风险分析与评估

5.7.1 风险分析与评估应遵循以下原则：

1 对于全断面岩石掘进机法施工的水工隧洞，应将隧洞建设过程可能发生的各类风险降低至合理、可接受的水平，进行系统的风险分析与评估，实现工程建设的安全目标、质量目标、工期目标、环境目标、投资目标。

2 应将隧洞风险分析与评估贯穿于工程建设的全过程，包括初步设计阶段、施工图阶段和施工阶段。

3 应将风险评估成果纳入初步设计、施工图等设计阶段，开工前应提交施工阶段的风险管理报告。

4 应建立参建各方的风险管理沟通机制。

5 对于工程建设中的极高风险，应进行风险监测。

5.7.2 隧洞风险分级和接受准则应符合下列规定：

1 隧洞风险分级包括事故发生概率的等级标准、事故发生后果的等级标准和风险的等级标准。

2 事故发生概率的等级分成五级，见表5.7.2-1。

表 5.7.2 - 1 事故发生概率等级标准

概率范围	中心值	概率等级描述	概率等级
> 0.3	1	很可能	5
0.03~0.3	0.1	可能	4
0.003~0.03	0.01	偶然	3
0.0003~0.003	0.001	不可能	2
< 0.0003	0.0001	很不可能	1

注 1：当概率值难以取得时，可用频率代替概率。
注 2：中心值代表所给区间的对数平均值。

3 事故发生后果的等级分成四级,各种后果的等级标准见表 5.7.2 - 2 ~ 表 5.7.2 - 6 :

1) 经济损失是指风险事故发生后造成工程项目发生的各种费用的总和，包括直接费用和事故处理所需的各种费用，见表 5.7.2 - 2。

表 5.7.2 - 2 经济损失等级标准

后果定性描述	特别重大事故	重大事故	较大事故	一般事故
后果等级	4	3	2	1
直接经济损失	1 亿元以上	5000 万元以上 1 亿元以下	1000 万元以上 5000 万元以下	1000 万元以下

2) 人员伤亡是指在参与施工活动过程中人员所发生的伤亡，依据人员伤亡的类别和严重程度进行分级，见表 5.7.2 - 3。

表 5.7.2 - 3 人员伤亡等级标准

后果定性描述	特别重大事故	重大事故	较大事故	一般事故
后果等级	4	3	2	1
人员伤亡数量 / 人	$F \geq 30$ 或 $S \geq 100$	$10 \leq F < 30$ 或 $100 > S \geq 50$	$3 \leq F < 10$ 或 $50 > S \geq 10$	$F < 3$ 或 $10 > S$

注：F——死亡人数；
S——重伤。

3) 工期延误是指工程风险事故引起的工程建设时间延长。对不同性质的工程和建设工期，采用不同的绝对延误时间，见表 5.7.2 - 4。

表 5.7.2 - 4 工期延误等级标准

后果定性描述	特别重大事故	重大事故	较大事故	一般事故
后果等级	4	3	2	1
事故处理所需合理工期（月）	>6	>3 或 ≤6	>1 或 ≤3	≤1

4) 事故处理影响是指工程事故处理后对工程功能和寿命影响等, 根据其影响程度进行分级, 见表 5.7.2 - 5。

表 5.7.2 - 5 事故处理影响等级标准

后果定性描述	特别重大事故	重大事故	较大事故	一般事故
后果等级	4	3	2	1
环境影响描述	影响工程正常使用, 需限制条件运行	不影响正常使用, 但对工程寿命有较大影响	不影响正常使用, 但对工程寿命有一定影响	不影响正常使用和工程寿命

5) 环境影响是指工程施工对周围建(构)筑物破坏或损害、环境污染等, 根据其影响程度进行分级, 见表 5.7.2 - 6。

表 5.7.2 - 6 环境影响等级标准

后果定性描述	特别重大事故	重大事故	较大事故	一般事故
后果等级	4	3	2	1
环境影响描述	永久的且严重的	永久的但轻微的	长期的、临时的但严重的	临时的且轻微的
注 1: “临时的”含义为在施工工期以内可以消除。 注 2: “长期的”含义为在施工工期以内不能消除, 但不会是永久的。 注 3: “永久的”含义为不可逆转或不可恢复的。				

4 根据事故发生的概率和后果等级, 将风险等级分为四级, 见表 5.7.2 - 7。

表 5.7.2 - 7 风险等级标准

等级		一般事故	较大事故	重大事故	特别重大事故
		1	2	3	4
很可能	1	高度	高度	极高	极高
可能	2	高度	高度	高度	极高
偶然	3	中度	高度	高度	极高
不可能	4	低度	中度	高度	高度
很不可能	5	低度	低度	中度	中度

5 隧洞风险接受准则与采取的风险处理措施见表 5.7.2 - 8。

表 5.7.2 - 8 风险接受准则

风险等级	接受准则	处理措施
低度	可忽略	此类风险较小, 不需采取风险处理措施和监测。
中度	可接受	此类风险次之, 一般不需采取风险处理措施, 但需予以监测。
高度	不期望	此类风险较大, 必须采取风险处理措施降低风险并加强监测, 且满足降低风险的成本不高于风险发生后的损失。
极高	不可接受	此类风险最大, 必须高度重视并规避, 否则要不惜代价将风险至少降低到不期望的程度。

5.7.3 初步设计阶段风险分析与评估应符合下列规定：

1 初步设计阶段应结合本阶段的勘察资料和设计原则，对掘进机法施工的塌方、有害气体、突涌水（涌泥）、岩爆、大变形、卡机、适应性等及自然因素、施工技术因素和管理因素等全面开展风险分析与评估。

2 应对识别的风险进行全面评估，优化设计方案，提出切实可行的工程处理措施和管理措施。

3 应对地质勘察手段、方法、工作内容及数量、室内试验等方面进行评估。

4 应根据隧洞地质条件分段评估风险因素，确定初始风险等级，提出相应的设计措施，进行再评估，确定残留风险，提出风险管理工作建议。

5 应及时将风险分析与评估提出的控制措施纳入设计文件。

5.7.4 施工图阶段风险分析与评估应符合下列规定：

1 施工图阶段应根据初步设计审查意见，对方案重大修改的隧洞进行评估。

2 应结合初步设计审查意见，对风险评估内容进行细化，重点对特殊处理措施的施工方案、实施方法、施工工艺、注意事项、监控等进行细化和明确。

3 施工图阶段的风险评估应作为下一阶段评估的重要依据和基础。

5.7.5 施工阶段风险分析与评估应符合下列规定：

1 施工阶段应在施工图阶段的风险分析与评估结果基础上，结合实施性施工组织设计，进行风险管理。对施工图提出的风险因素进行核对，对施工方案和地质条件有重大变化的进行评估，并提出相应的施工措施。施工管理、措施评价和落实为本阶段重点。

2 采用掘进机法施工的隧洞，对掘进机适应性、工期、掘进等典型风险进行分析与评估。

3 施工单位为施工阶段风险分析与评估的主体单位，负责风险管理的全过程。应按照

分级管理、分级负责的模式开展。

4 施工阶段风险评估应结合现场地质条件进行动态识别及评估。

5 施工阶段应主要对地质条件、处理措施实施方案及方法、施工工艺、TBM 设备、材料、施工进度等内容，开展风险管理工作。

6 在全面掌握风险因素、处理措施及相关资料的基础上，对参与人员进行风险分析技术交底。

7 风险评估的主要工作为：编制风险评估计划；核对风险因素；评估新出现风险；制定风险管理实施细则及预案；风险公告及人员培训；动态评估；落实风险控制措施；提出风险管理工作建议。

8 施工阶段掘进机风险因素识别可参照表 5.7.5 - 1 进行。

表 5.7.5 - 1 掘进机施工风险因素核对表

风险因素		风险事件	
		设备风险	掘进风险
施工准备情况	见表 5.7.5 - 2	★	★
施工地质勘查	见表 5.7.5 - 3	★	★
设备情况	刀头、刀盘	-	★
	主轴承	-	★
	液压系统	-	★
	控制系统	-	★
	其他	-	-
掘进机选型	主要技术参数	★	-
	适应性	★	-
	可靠性	★	-
	其他	-	-
机械操作	姿态控制	-	★
	止水注浆	-	★
	预加固	-	★
	其他	-	-
支护情况	掌子面处理	-	★
	支护形式	-	★
	支护时机	-	★
	支护质量	-	★
	管片后注浆	-	★

	其他	-	-
监控量测	速度	-	★
	变形及沉降情况	-	★
	线型	-	★
	其他	-	-
施工管理	见表 5.7.5 - 4	★	★
隧洞特征	见表 5.7.5 - 5	★	★

9 掘进机施工风险因素核对表中的施工准备情况、施工地质勘察、施工管理、隧洞特征的风险因素见表 5.7.5 - 2 ~表 5.7.5 - 6。

表 5.7.5 - 2 施工准备情况风险因素核对表

施工准备情况	气象调查
	与施工有关法令调查
	设计文件的核对情况
	实施性施工组织设计
	其他

表 5.7.5 - 3 施工地质勘察风险因素核对表

施工地质勘察	资料收集情况
	常规地质法情况（地质素描）
	超前地质预报情况
	其他

表 5.7.5 - 4 施工管理风险因素核对表

施工管理	培训情况
	检测情况
	应急预案情况
	人员管理情况
	施工队伍状况
	机械装备程度
	施工质量
	施工经验辅助工法的掌握与应用
	监理情况

	其他
--	----

表 5.7.5 - 5 隧洞特征风险因素核对表

隧洞特征	埋深
	断面大小
	长度
	坡度
	施工支洞
	其他

10 隧洞其他风险因素识别可参照表 5.7.5 - 6 进行。

表 5.7.5 - 6 其他风险因素核对表

交通事故	司机
	运输设备
	交通管理
	道路状况
	通风照明情况
	洞外天气
	其他
用电事故	用电设计
	施工组织
	设备状况
	用电管理
	其他
火灾事故	火源及传播途径
	消防教育
	消防措施
	消防器材
	人员管理
	其他
其他	

6 掘进机选型和技术要求

6.1 一般规定

- 6.1.1** 适用于全断面岩石掘进机施工的隧洞开挖直径和掘进长度宜参照 SL 378 执行。
- 6.1.2** 掘进机选型时，应依据水工隧洞的工程地质及水文地质资料，全面分析各种因素，选择技术可行、安全可靠、针对性强及经济合理的掘进机机型。
- 6.1.3** 掘进机选型应考虑水工隧洞的运行条件和结构设计，应考虑机型对工期的影响。
- 6.1.4** 掘进机选型宜在成熟机型（敞开式、单护盾和双护盾掘进机）中选取，当上述机型不满足工程特别需要时，经专题研究可选用其他机型，如敞开-护盾双模式掘进机。
- 6.1.5** 应根据水工隧洞各洞段主要地质特性逐段选择掘进机机型。
- 1** 掘进机选型应以隧洞段主要地质特性为基础，局部洞段不适用于掘进机施工时可辅以钻爆法施工，掘进机选型不受其影响。
 - 2** 掘进机选型应根据拟掘进洞段各主要地质特性综合考虑各影响因素后选取。
- 6.1.6** 掘进机选型应提出针对应对掘进洞段主要地质问题的设计要求。

6.2 设备选型和配置

- 6.2.1** 主机选型应遵循以下原则：
- 1** 隧洞围岩以坚硬、较完整的硬岩为主，宜选用敞开式掘进机。
 - 2** 隧洞围岩以中硬及其以下岩石为主，宜选用护盾式掘进机。
 - 3** 不衬砌隧洞和现浇钢筋混凝土衬砌隧洞，宜选用敞开式掘进机。
 - 4** 隧洞运行期最大内水压力较大时，若选用护盾式掘进机应进行专题研究。
 - 5** 若根据本规范表 4.6.2 确定的隧洞 I ~ III 类围岩的超硬岩等级为 A₃ 和 A₄ 的洞段长度之和与拟掘进隧洞总长度之比较大时，宜选用敞开式掘进机。
 - 6** 若根据本规范表 4.6.3 - 1 确定的隧洞 I ~ III 类围岩的岩爆等级为 B₃ 和 B₄ 的洞段长

度之和与拟掘进隧洞总长度之比较大时，宜选用护盾式掘进机，其中 B₄ 洞段不宜直接采用掘进机施工。

7 若根据本规范表 4.6.4 确定的隧洞 V 类围岩的断层破碎带等级为 C₃ 和 C₄ 的洞段长度之和与拟掘进隧洞总长度之比较大时，宜选用护盾式掘进机。

8 若根据本规范表 4.6.5 确定的隧洞 IV ~ V 类围岩的大变形围岩等级为 D₃ 和 D₄ 的洞段长度之和与拟掘进隧洞总长度之比较大时，宜选用敞开式掘进机。

9 根据本规范表 4.6.6 确定的掘进机施工适应性围岩分类的突涌水（涌泥）等级与机型相关关系相对较弱，掘进机选型可不考虑其影响，但设备配置应考虑针对性的应对措施。

10 当掘进机拟掘进段地质条件较为复杂，根据掘进机施工适应性围岩分类等级的单一不利地质条件的选型结果互为矛盾时，应综合考虑本规范第 4 章所列各种不利地质条件的影响后选取。

6.2.2 主机配置应遵循以下原则：

- 1** 主机配置应充分考虑掘进机施工适应性围岩分类等级，有针对性地配置设备。
- 2** 隧洞断面允许时，掘进机宜配置超前钻机。
- 3** 敞开式掘进机 L₁ 区应配置锚杆钻机和喷混凝土系统。
- 4** 护盾式掘进机宜按管片端面允许顶力设计值配置推进油缸，以提高其护盾卡机时的自行脱困能力。
- 5** 掘进机宜配置 2 套以上物探设备，其中应有一套超前探水物探设备，I ~ II 类围岩的岩爆等级达 B₃ 以上时，宜配置微震监测系统。

6.2.3 后配套选型及配置应遵循以下原则：

- 1** 掘进机各种机型均可采用门架式和台车式后配套。
- 2** 掘进机施工采用矿车出渣，可采用移车装渣式和卸料小车装渣式。

- 3 隧洞施工采用单线运输时，后配套尾部宜配置移动式加利福尼亚错车平台。
- 4 敞开式掘进机 L₂ 区应配置至少 1 台喷混凝土机械手。

6.3 技术要求

6.3.1 掘进机性能应满足以下基本要求：

- 1 掘进长度大于 10km 的隧洞宜采用全新掘进机。
- 2 掘进机主轴承、大齿圈、主密封、驱动电机、减速器设计寿命宜不低于 15000h。
- 3 掘进机脱困扭矩应不低于 1.5 倍额定扭矩。
- 4 掘进机最小水平转弯半径、最小竖曲线半径应不大于 500m。
- 5 掘进机换步时间应不大于 5min。
- 6 掘进机在 0℃ ~ 50℃环境温度应能正常工作。
- 7 掘进机长距离扩挖能力沿直径方向应不小于 100mm。
- 8 护盾式掘进机的护盾应采用台阶式设计，盾体上应预留超前注浆导孔，孔径不小于 100mm。护盾式掘进机正常掘进时撑靴最大接地比压不宜大于 3MPa。
- 9 主驱动电机宜采用变频电机，掘进机逆坡掘进时主驱动电机防护等级应不低于 IP65，顺坡掘进时主驱动电机防护等级应不低于 IP67。
- 10 敞开式掘进机钢拱架安装器宜可同时安装钢管片。
- 11 掘进机高压电缆卷筒有效工作长度宜不低于 300m。
- 12 连续带式输送机皮带仓容带量宜不低于 500m。
- 13 单节通风管长度宜不低于 200m，通风管胀破安全系数宜不低于 3.0，新通风管百米漏风率宜不高于 3.5‰。

6.3.2 掘进机施工适应性围岩分类较差时，掘进机性能应满足以下要求：

- 1 若根据本规范表 4.6.4 确定的隧洞 V 类围岩的断层破碎带等级为 C₃ 和 C₄ 的洞段长

度之和与该拟掘进隧洞总长度之比较大,敞开式掘进机宜采取措施增加撑靴面积或设置辅助推进系统。

2 若根据本规范表 4.6.5 确定的隧洞Ⅳ~Ⅴ类围岩的大变形围岩等级达 D_4 ,护盾式掘进机的长距离扩挖能力应不小于 200mm(直径方向),单护盾掘进机宜采用较短护盾。

6.4 出厂验收

6.4.1 掘进机验收内容应包括掘进机设备整机质量、安全设施、设计布局、功能及性能等主要方面。

6.4.2 出厂验收前,应根据相关标准、合同、纪要等编制验收大纲,明确验收通过的标准。

7 施工组织设计

7.1 一般规定

7.1.1 掘进机法隧洞施工组织设计应根据工程地形地质条件、设计方案、工程特点、施工条件等因素进行编制。

7.1.2 应重视掘进机法隧洞施工组织设计所需要基本资料的收集和分析。

7.1.3 掘进机法隧洞施工组织设计应从工程地形地质、施工技术和设备能力、施工条件以及环境影响等方面，充分研究掘进机法施工方案的地质适应性、设备可靠性及施工能力。

7.1.4 应对突涌水、高地温、高地应力（岩爆）、超硬岩及有害物质等不利地质条件做专项研究，开展风险分析和评估，并编制专门的处理措施和预案。

7.1.5 宜开展掘进机法开挖洞渣料的资源化利用研究。

7.1.6 本章未涉及的施工组织设计其他内容及要求应按 SL 303 和 SL 642 中的相关规定执行。

7.2 施工总体规划

7.2.1 隧洞施工分段、施工方案选择、施工通道型式和工业广场位置等施工规划宜结合地形地质、工程布置、隧洞特性、设备能力、施工条件及工程所在地区社会的自然条件和环境保护等因素，通过技术经济比选后确定。并统筹规划准备期和主体工程施工期的施工装备、施工交通、施工总布置及各种配套临时设施。

7.2.2 长隧洞施工分段应遵守下列原则：

1 应根据施工方案及其地质适应性确定施工分段。

2 施工分段长度应满足施工设备能力及施工工期等方面的要求，并留有一定余地。

3 施工分段进出口通道位置应符合地形地质、工程布置、工程征占地、环境保护及施工方案等方面要求。

7.2.3 长隧洞宜采用全断面岩石掘进机为主，钻爆法为辅的施工方法。严重影响施工安全、进度和投资等方面的不良地质洞段应采用扩挖法、超前预加固或管棚等处理措施。

7.2.4 隧洞掘进机开挖方向、起止位置及工作状态宜根据地形地质、施工分段、施工方案及洞室布置等因素综合分析确定。水文地质条件复杂或可能发生突涌水的隧洞，掘进机应逆坡掘进，必须顺坡掘进时，应加强地质预报，加强排水措施并做好排水预案。

7.2.5 隧洞掘进机组装和拆卸场地宜选择在洞外。必须选择在洞内时，施工通道及辅助洞室的型式、布置及断面尺寸应满足掘进机组装、拆卸及运输的要求。

7.2.6 隧洞掘进机转场方案应结合地形地质条件、施工通道和工业广场的布置、掘进机检修要求、工程工期和投资等方面，通过技术经济比选后确定。

7.2.7 掘进机工业广场及辅助洞室应根据地形地质条件、掘进机规格、出渣和物料运输设备、储带仓、车场布置和材料转运堆放等系统规划。并应符合下列要求：

- 1 两台掘进机共用的地下工业广场和辅助洞室布置应论证确定。
- 2 地下工业广场及辅助洞室宜位于施工通道与隧洞交叉口附近。

7.2.8 施工通道的位置和型式应根据工程条件、施工分段、施工方案、设备检修要求及工程投资等因素，经技术经济比选确定。并应符合下列要求：

- 1 施工通道的型式应与隧洞出渣、物料运输及施工通风等装备相匹配。
- 2 为掘进机服务的施工通道，宜优先选择平洞。
- 3 与掘进机转场配套的施工通道宜布置在隧洞掘进段中部。
- 4 相向掘进的两台掘进机界面附近宜设置施工通道。

7.2.9 长距离施工平洞的施工方案应通过掘进机法和钻爆法技术经济比较后确定。

7.2.10 隧洞与施工平洞采用同一台全断面岩石掘进机的施工方案应通过论证后确定。

并应符合下列规定：

- 1 平洞长度合适，且平洞长度与隧洞掘进长度之和不应超出掘进机的掘进能力。
- 2 隧洞的断面尺寸应满足平洞施工装备的布置要求。
- 3 施工平洞和隧洞交叉段宜布置在较好围岩洞段。

7.3 施工通道、工业广场及辅助洞室

7.3.1 施工通道和辅助洞室建筑物级别及设计标准应按 SL 252 确定。

7.3.2 施工通道、工业广场及辅助洞室的设计应遵守下列原则：

- 1 洞口或井口及沿线的地形地质条件较好。
- 2 洞口或井口布置应与周边自然环境相协调，不占或少占农田林地。
- 3 满足施工装备的布置要求，施工运行安全，投资经济。

7.3.3 施工通道的布置应遵守下列规定：

1 施工平洞、斜井洞线宜与隧洞正交；必须斜交且与隧洞不采用同一台掘进机施工时，其与隧洞轴线交角不宜小于 45° 。

2 施工平洞布置应符合下列要求：

- 1) 洞线、交叉口应满足带式输送机、运输线路的最小转弯半径要求。
- 2) 平洞限制坡长大于 150m、纵坡大于 9%、局部最大纵坡大于 14%时，应进行充分论证。
- 3) 采用单车道时，每 200m ~ 300m 左右宜布置一个错车洞，错车洞应与缓和坡段结合布置。

3 斜井井身不宜变坡与转弯，最大倾角宜小于 25° 。

4 竖井可布置在隧洞上方或其一侧。当布置在隧洞一侧时，其与隧洞的岩壁净距宜为 15m ~ 20m。

5 平洞、斜井应设置宽度不小于 0.7m 的人行道，竖井应设置人行梯子间。

7.3.4 施工通道和辅助洞室的断面型式及尺寸应满足工程安全、施工装备、重大件运输、出渣运输、人行道、排水沟、各种管路和电缆等方面的要求。

7.3.5 断面装备之间的安全间距应遵守下列规定：

1 平洞：断面装备之间的安全间距不应小于表 7.3.5 中的规定。

表 7.3.5 平洞装备之间的安全间距

单位：mm

运输方式	运输设备之间	运输设备与风管、皮带机及管线等固定设备之间	运输设备与支护之间
有轨运输	300	300	300
无轨运输	-	600	600

2 竖井和斜井：建井期、运行期应分别按 GB 50915 和 GB 50653 中的相关规定执行。

7.3.6 工业广场应结合车场、辅助洞室、施工装备等布置统一规划。并按下列规定执行：

1 车场应根据掘进机组装场地、物料堆放转运及调车、编组、装卸和检修作业线路等要求布置。有轨运输宜铺设双道。错车线的有效长度应符合最长列车运行的要求。

2 辅助洞室宜布置在Ⅲ类以上围岩洞段。

3 连接洞室和组装洞室的长度应满足带式输送机驱动系统和储带仓等设备布置要求；步进洞室的长度宜满足掘进机整机布置要求；始发洞室的长度宜满足掘进机主机布置要求；检修洞室和拆卸洞室的长度不小于掘进机主机段长度，一般不宜小于 25m。

4 组装洞室、检修洞室、拆卸洞室的断面型式和尺寸应综合围岩条件、组装和拆卸方案及支护结构等因素确定。

5 步进洞室和始发洞室与掘进机刀盘顶部及两侧之间净距不宜小于 20cm。

7.3.7 施工通道及辅助洞室支护设计按 SL 377 中的相关规定执行；结构和防排水等其他设计：平洞、竖井、斜井和辅助洞室分别按 JTG 3370、GB 50915 和 SL 279 中的相关规定执行。

7.3.8 平洞和辅助洞室施工技术设计按 SL 303 和 SL 378 中的相关规定执行；竖井和斜井施工技术设计按 GB 50653 中的相关规定执行。

7.4 掘进机组装、检修、转场及拆卸

7.4.1 掘进机组装应满足下列要求：

- 1** 掘进机组装宜采用分部组装方式，合理安排组装程序。
- 2** 掘进机吊装方法和设备型式宜通过技术经济比选后确定。吊装设备的能力应满足重大件的安装要求。
- 3** 掘进机组装应在组装场（洞室）土建工程施工完毕后进行，并应合理安排掘进机安装进度计划，尽量缩短安装工期。
- 4** 掘进机刀盘宜在工厂内制作。当交通运输条件允许时，刀盘应整体制作、运输及安装；当交通运输条件不允许时，应尽量减少刀盘分块数量。

5 掘进机宜在进场前进行整机预组装。

7.4.2 掘进机检修应满足下列要求：

- 1** 掘进机宜每日进行不少于 4h 的检查保养。
- 2** 掘进机掘进长度超过 10km 后宜进行系统检测并维修。
- 3** 检修洞室吊装设备的能力应根据需检修、更换的最大件重量及物料转运要求确定。

7.4.3 掘进机转场前应充分做好转场准备工作，制定详细的转场计划，缩短转场工期。

7.4.4 掘进机拆卸宜尽量保持部件的完整性，洞内拆卸方案应通过技术经济比较后确定。

7.5 掘进、支护与衬砌

7.5.1 掘进和步进应符合下列规定：

- 1** 掘进机设备配置及掘进能力应根据工程地质条件、劳动卫生、施工方案和进度计划等方面的要求确定。

2 掘进机应根据具体地质情况选择合适的掘进参数和工作模式。

3 敞开式掘进机宜采用滑板式步进，护盾式掘进机宜采用滑轨式滑行。

7.5.2 支护、衬砌应符合下列规定：

1 掘进机支护系统或预制管片安装、回填及注浆设备的施工能力应满足掘进机最高掘进速度的要求。

2 隧洞支护应紧跟掘进工作面实施。

3 采用现浇混凝土衬砌的隧洞，一般掘进与衬砌可顺序作业。隧洞开挖断面合适时，底板或边顶拱衬砌宜与掘进机掘进同步施工。

4 圆形断面的长隧洞根据断面尺寸、结构及施工等方面要求，采取全断面衬砌或底板及边墙和顶拱二次衬砌方式。

5 隧洞衬砌方案应根据结构型式和当地施工条件，满足施工质量、施工安全、施工进度及环境保护等要求确定。

7.5.3 隧洞的回填灌浆、固结灌浆及回填豆砾石宜与衬砌平行或交叉作业。

7.6 施工出渣和物料运输

7.6.1 长隧洞出渣运输宜选择带式输送机方式；物料运输宜选择机车牵引的轨道运输方式。

7.6.2 隧洞出渣和物料运输系统的能力应满足掘进机最高生产能力的要求。

7.6.3 隧洞出渣和物料运输方式改变时应设置转渣设施或堆存场地，并考虑一定容量。

7.6.4 带式输送机的适用条件、型式、系统布置和主要参数选择应符合下列规定：

1 带式输送机适用的条件：

1) 隧洞开挖断面直径不宜小于 4m。

2) 洞线平直或平面转弯半径不小于 500m。

- 3) 运输物料的最大倾角上行不宜大于 16° ,严寒地区或富水区隧洞不宜大于 14° ;
下行不宜大于 12° 。特种带式输送机不受此限制。
 - 4) 垂直带式输送机提升高度不宜大于 200m。
- 2 隧洞内应采用连续带式输送机。如隧洞与施工通道交叉口设转渣设施时 ,施工通道内应采用固定带式输送机。
 - 3 带式输送机系统的布置方式、设备配置、输送带规格 (宽度、强度等) 及速度及高峰负荷等主要参数 ,应通过技术经济比选确定。
 - 4 带式输送机系统的输送速度不宜低于 3m/s。

7.6.5 轨道运输系统应符合下列规定 :

- 1 当采用机车牵引时 :
 - 1) 运输坡度不大于 4% ;最小转弯半径不应小于机车轴距的 15 倍。
 - 2) 机车型式应通过技术经济和环境要求等方面论证后确定。
 - 3) 编组列车正常运行速度不宜大于 10km/h ~ 15km/h ,当通过进洞口、主支交叉口、作业地段、曲线段、道岔和掘进机等处时 ,其运行速度不大于 5km/h。
 - 4) 两辆机车或者两列列车在同一轨道同一方向行驶时 ,间距不得小于 100m。
 - 5) 有条件时宜设双线轨道 ;如设单车道时 ,每隔 3km ~ 5km 宜设置一处会车道岔。
 - 6) 根据施工需要 ,车场应设调车、卸车及检修等作业线路。
- 2 当采用提升机或绞车提升时 :
 - 1) 适用斜井。宜布置两套提升系统。
 - 2) 建井期采用提升机或绞车和箕斗运输 ;隧洞施工期采用带式输送机运输。矿车或无轨胶轮车辅助。
 - 3) 应选用大型提升设备单级提升。

7.6.6 无轨运输方案应符合下列规定：

1 无轨运输方式和机械化设备应根据工程布置、断面型式和尺寸及运输强度等因素确定。

2 圆形断面长隧洞内的错车洞（道）和回车洞间距宜为 200m~300m。圆形断面尺寸合适时，错车道可采取垫渣方式。

7.6.7 竖井运输系统应符合下列规定：

1 竖井物料运输采用罐笼等方式；出渣运输采用吊桶和箕斗方式。

2 建井期和隧洞施工期提升系统设备设施应前后兼顾，充分利用，其施工能力应满足运输强度的要求。

3 提升系统宜选用与凿井提升机配套的定型井架。

4 建井期和隧洞施工期提升系统的其他要求分别按 GB 50653 和 GB 50384 中的相关规定执行。

7.7 施工通风、防尘及防有害气体

7.7.1 隧洞施工作业环境氧气含量、粉尘和有害气体浓度及噪声等卫生标准应符合 SL 378 和 SL 642 中的相关规定。相对湿度不宜高于 80%。

7.7.2 掘进机法施工宜采用风管压入式通风方式。

7.7.3 施工通风风量和风速应符合下列规定：

1 隧洞掘进机工作面附近的最小风速不宜小于 0.5m/s。

2 通风管道漏风系数可根据每 100m 平均漏风率及通风管道长度计算，其中每 100m 平均漏风率不大于 0.6%。

3 隧洞施工人员主要作业区范围的平均气温超过 28℃，风速应做专项研究。

4 隧洞工作面附近的通风量计算及校核应符合 SL 303 中的相关要求。

7.7.4 通风系统设计应符合以下规定：

- 1** 施工通风系统应通过技术经济比选确定。
- 2** 结合工程区海拔高程，当施工通风距离较长时，应考虑接力式通风方案。
- 3** 隧洞施工通风宜选用变频高压轴流式风机，并采用在较高效率区运转的风机型号。
- 4** 隧洞施工通风所需风压较高时，宜选用型号与功率相同的多台风机串联运行。
- 5** 在隧洞施工断面布置允许的前提下，宜选择较大直径风管。
- 6** 压入式通风一般选用强度高、摩阻系数小和漏风少的柔性风管。
- 7** 单节风管长度不宜小于 200m，接头方式应简单、严密。

7.7.5 防尘和防有害气体处理措施应符合 SL 378 中的相关规定，防辐射应符合 SL 642 中的相关规定。

7.8 施工供水、供电

7.8.1 施工供水应符合下列规定：

- 1** 施工用水、生产用水、生活用水及消防用水应满足施工水质、水压、用水指标及用水量方面的要求，并按 SL 303 中的有关规定执行。
- 2** 掘进机用水水质、水压及指标可根据工程经验、环境保护和节约用水等要求确定。
- 3** 掘进机宜采用施工用水和生产用水的废水作为循环再利用的水源。
- 4** 施工供水系统应通过技术经济比较后确定。
- 5** 供水水温不超过 25℃。

7.8.2 施工供电及照明应符合下列规定：

- 1** 掘进机供电应优先采用网电，可按双回路设计，并具备应急备用电源。
- 2** 掘进机施工供电系统应根据工程区电网分布情况，通过技术经济论证，确定合理的供电方案。

- 3 掘进机供电的变压器宜独立设置。
- 4 掘进机供电电压不低于 10kV，供电长度 15km 以上时宜采用 20kV。
- 5 供电方案的用电安全应满足 JGJ 46 要求。
- 6 临时备用电源不得设置在洞内。
- 7 系统接地应满足 DL/T 620 和 GB 14050 的要求。
- 8 照明系统应满足下列要求：
 - 1) 施工照明宜采用节能光源，其照度应满足隧洞施工作业要求。
 - 2) 作业地段照明电压一般不得大于 36V，其他地段可采用 220V。

7.9 施工防排水

- 7.9.1 隧洞防排水应遵循“预防为主，防排结合，综合治理”的原则。
- 7.9.2 施工防水应遵守下列规定：
 - 1 对于可能发生突涌水的隧洞部位，宜采用超前预注浆等方式封堵地下水。
 - 2 防水方案及其注浆材料、主要工艺和参数应通过现场试验确定。
 - 3 注浆材料宜以水泥基材料为主，必要时采用化学浆液。
- 7.9.3 隧洞工作面排水量宜为预测的最大涌水量；总排水量为隧洞工作面最大涌水量与洞身堵水后的涌水量之和。
- 7.9.4 施工排水系统的排水方式、布置及水泵配置应符合下列规定：
 - 1 施工排水系统应通过技术经济比较确定。
 - 2 掘进机逆坡掘进时，隧洞应采用机械和自流相结合的排水方式；掘进机顺坡掘进时，隧洞应采用机械排水方式。
 - 3 地下排水泵站应满足下列要求：
 - 1) 应设置工作水泵和备用水泵，工作水泵的排水能力应能在 20h 内排出洞内 24h

最大涌水量。

2) 当工作水泵数量为 3 台及 3 台以下时,宜设 1 台备用水泵,多于 3 台时,宜设 2 台备用水泵。

3) 应设置工作管路和备用管路,工作管路的排水能力应配合工作水泵能在 20h 内排出洞内 24h 最大涌水量。

4) 水泵和管路宜采用一泵一管。

5) 地下排水泵站水仓容积:竖井、斜井井下泵站水仓容积按 1.5h 设计排水量计算;平洞地下泵站水仓容积按 10min~15min 设计排水量计算。

4 隧洞工作面排水应根据最大涌水量,结合掘进机设置工作水泵、备用水泵及管路,并留有一定的备用容量。

5 施工排水系统应根据工程地质与水文地质条件,制定应急排水预案,并充分准备。

7.9.5 施工废水应根据环境要求进行处理,处理后的水质应符合接纳水体环境功能区规划规定的排放要求,或遵守 GB 8978 的规定。

7.10 施工交通、施工工厂及施工总布置

7.10.1 施工交通分为对外交通和场内交通,应符合下列规定:

1 对外交通和场内交通运输能力以及道路、桥涵及隧洞的等级、标准和主要技术指标应满足掘进机重大件的运输要求。

2 掘进机重大件运输方案应进行专题研究。

7.10.2 施工工厂设施应符合下列规定:

1 混凝土生产系统的规模应满足掘进机混凝土喷护小时高峰强度或混凝土浇筑和预制混凝土管片安装高峰月强度的要求。

2 预制混凝土管片厂的布置应符合下列要求:

1) 宜与钢筋加工厂、模板加工厂和混凝土生产系统联合布置。

2) 宜存放高峰时段月平均强度 30 天~50 天的管片数量。

7.10.3 施工总布置应符合下列规定：

1 有条件时，低温季节施工期的混凝土生产系统宜布置在隧洞内。

2 掘进机备品备件库、刀具检修车间及堆存转运场地宜布置在洞口或井口附近。其占地面积应满足掘进机堆存、装卸作业及交通运输方面的要求。

7.11 施工总进度

7.11.1 施工总进度宜按同类工程近期平均先进水平合理安排工期，地质条件复杂或环境敏感的隧洞工程工期安排应适当留有余地。

7.11.2 工程建设准备期和主体工程施工期分界界面为洞外地面工业广场或施工通道施工结束；主体工程施工期和完建期分界界面为隧洞具备通水条件或工程开始发挥效益的节点。

7.11.3 施工总进度中应明确准备工程开工和关键隧洞段施工通道具备运行条件及掘进机始发和转场、隧洞通水和工程完工等日期。

7.11.4 施工总进度应采用关键路线法确定隧洞各施工段的施工项目、施工程序及工期。明确工程关键隧洞段施工期关键路线及施工项目，包括场内外交通、施工供电、施工通道等准备工程项目，以及掘进机和配套系统采购、运输、安装、步进、调试、始发、掘进（含试掘进）、转场、检修及拆卸，混凝土浇筑、灌浆及封堵等关键项目的起始和完工日期。

7.11.5 筹建及准备工程施工进度应符合下列规定：

1 统筹安排筹建及准备期工程规划设计、施工准备项目、掘进机和配套系统采购和进场、工程招投标、工程移民和占地等工作及其施工进度计划。

2 临时工程项目施工工期宜根据工程实际情况，采用工程类比或有关规定分析确定。

7.11.6 正常条件下，地下工程隧洞掘进和衬砌速度指标应采用循环作业进尺分析和工

程类比法综合确定，并应符合下列规定：

- 1 掘进机掘进速度 P_r 、施工速度 AR 、贯入度 ρ 、刀盘转速 RPM 等指标应根据岩石强度、围岩完整性及开挖直径、掘进机性能、掘进时间及工作班制等因素确定。
- 2 掘进机及其配套系统施工期设备利用率 UI 不宜低于 30%。
- 3 掘进机试掘进隧洞段进尺指标应适当降低。

7.11.7 在隧洞掘进过程中，宜分析设备运行参数信息，总结现场贯入指标 FPI 和扭矩贯入指标 TPI 破岩特征指标，作为围岩质量分类的参考参数。上述两个指标应对一定掘进长度的相关数据通过线性回归后确定，回归系数 R^2 表征对该掘进段的力学指标进行线性回归的适用性。一般取 $R^2 > 0.6$ 的相应成果作为有效数据。

在隧洞掘进过程中，根据工程地质和岩石力学的其它力学性能指标和同类工程的类比，提出根据 FPI 和 TPI 评价岩体质量和可掘性的定量标准。

7.11.8 隧洞施工进度中应结合地质条件和施工方案等因素，按工程类比法明确断层破碎带、大变形围岩、涌水突泥、高地应力岩爆、高磨蚀性硬岩和与坚硬岩或超硬岩、岩溶（岩溶管道、溶腔等）、高地温、有害气体和放射性物质等地质隧洞段的处理工期。

7.11.9 掘进机和配套系统及吊装设备的采购、组装、步进、转场、拆卸和运输等项目工期宜按工程类比法确定。

8 掘进机施工

8.1 一般规定

8.1.1 掘进机法施工的隧洞应根据施工组织设计和施工条件，建立安全、质量和环境保护体系，做到节能降耗、保护环境和文明施工。

8.1.2 掘进机施工内容应包括：施工准备与组织、TBM 设计联络、设备监造、出厂验收与运输、设备组装、调试与步进，掘进与控制、地质超前预报、施工运输、支护与衬砌、转场与验收及质量检查等。

8.1.3 隧洞工程施工应根据规定的测量精度及导向系统选择施测方法，并建立复核制度，保证隧洞的轴线符合设计要求和相关标准规定。

8.1.4 隧洞工程施工过程中应收集原始数据及资料，做好施工记录。隧洞竣工后应编写施工技术总结。

8.1.5 复杂地质条件下的掘进机施工按本规范第 9 章相关要求实施。

8.2 施工准备与组织

8.2.1 施工准备应包括临时设施及场地、供应系统、技术文件、信息化管理与施工和人员培训等准备。

8.2.2 TBM 施工临时设施及场地布置应符合下列要求：

1 应本着“节约用地，施工必需”的原则进行布置，并注意环境保护和水土保持工作。

2 与 TBM 相配套的临时设施应满足不同时期 TBM 施工的要求。

3 应留有足够的场地满足运输装卸、组装、出碴倒运、材料供应、混凝土拌合运输、电力供应及环保需要等施工占地要求。

8.2.3 供应系统准备应符合下列要求：

1 供水系统：洞口水池、供水管提供的供水量应满足 TBM 连续施工综合用水要求，

水质及水压应满足 TBM 设备使用要求。

2 通风系统：应满足相关规范和设计对通风系统的要求，保证 TBM 后配套上的风流压力满足施工要求。

3 供电系统：施工供电系统应满足洞内 TBM 施工和洞外生产管理综合用电需求。

8.2.4 技术文件准备应包括以下内容：

- 1 工程地质和水文地质勘查报告。**
- 2 施工所需的设计图纸资料和工程技术要求文件。**
- 3 TBM 运输道路的地形和设施核查资料。**

8.2.5 工地信息化管理和施工组织系统应完备可靠，符合信息化施工需求。

8.2.6 所有参加施工的人员，应执行“先培训，后上岗”的原则。对于涉及国家规定特殊工种的行业，应执行“持证上岗”的规定。

8.3 TBM 设备制造和运输

8.3.1 在 TBM 设备选型、设备生产单位和项目施工单位确定以后，宜由业主、设计、监理、施工及设备生产单位共同参与 TBM 设计联络会。设计联络会可以根据情况一次或多次召开，设计联络时应根据施工调查、补勘资料及实施性施工组织设计，进一步对 TBM 的设计参数及配置予以完善。

8.3.2 设备在工厂组装调试结束后，应由设备生产单位提出出厂验收申请，由设备采购单位组织业主、施工、设计和监理单位按照设备验收大纲参与设备验收。

8.3.3 应对运输路况（包括路基承载力、隧洞净空、高空管线、周围建筑物、曲线半径、桥梁的承载力、地下埋设物等）详细考察、认真分析，制定详细的运输计划，并对 TBM 零部件分块设计及分类运输。

8.4 设备组装、调试与步进

8.4.1 TBM 组装准备应符合收下要求：

- 1** TBM 组装、调试和步进应编制专项方案，经评审后方可执行。
- 2** 安装区域底部结构应具有足够的刚度和承载力，其他区域应具有足够的强度，满足 TBM 大件设备安装、存放和运输的要求。
- 3** 吊装设备选择和安装应符合相关规定，安装后经检验合格方可投入使用。
- 4** TBM 组装及重要部件的存放应设置防护措施。
- 5** 由设备单位与施工单位联合成立设备组装与调试人员组织机构，做好职责分工，并完成相关人员的技术交底及培训。

8.4.2 TBM 组装应符合以下基本技术要求：

- 1** TBM 宜采取分段组装，边步进边组装的方式，主机组装前应绘制主机组装场地布置图，各主机部件按照组装区域和规划的位置依次存放。
- 2** 电气与液压件的组装，严格按照设计图纸进行。
- 3** 专用设备和工具应严格按照说明书操作，保证安装设备的精确性和可靠性。
- 4** 验收拆箱时应保持其原有设计尺寸，避免损伤结构件原有加工精度。
- 5** 所有设备的固定安装必须根据螺栓的级别按正确的顺序与扭矩紧固。
- 6** 螺栓紧固扭矩和预紧力应符合 GB/T 16823.2 的相关要求。

8.4.3 刀盘拼装应满足以下要求：

- 1** 刀盘现场拼装及焊接应在具有防风和保温功能的独立区域内作业，避免与其他工序造成位置干涉。
- 2** 待焊接处以及待焊处周边 100mm 范围内的油漆应打磨干净，露出金属光泽为宜。
- 3** 刀盘分块连接螺纹孔装配前应使用丝锥重新过孔、清洗并逐个检验螺栓旋入长度是否满足装配要求。检查螺栓孔有无损伤，若有损伤，可使用丝锥重新攻丝并清洗。

4 刀盘拼装时掘进面朝上，并使用垫块调整高度，使用经纬仪找平，平面度误差小于等于 5mm。

5 螺栓预紧应从中间向外侧逐步进行，两边对称预紧。螺栓分两次预紧，第一次按照预紧力的 80% 紧固，第二次按照预紧力的 100% 紧固。所有焊接完成后，再将所有螺栓按照 100 % 预紧力重新检查。

6 对分块刀盘的对接处公差及连接面间隙应按以下标准检验：

1) 分块处面板的连接处公差小于等于 3mm、背板连接处公差小于等于 3mm、大圆环连接处公差小于等于 4mm 以及椎板连接处公差小于等于 4mm。

2) 分块连接板面之间小于等于 0.5mm 的间隙占整个连接线长度比例不少于 70%。

3) 其余分块连接板面间隙小于等于 2mm ,且间隙大于 1.5mm 时应填塞垫板处理。

4) 与主驱动连接的法兰面连接处公差小于等于 0.1mm ,存在错台应进行打磨处理。

8.4.4 刀盘焊接应满足以下要求：

1 焊接部位施焊前应预热至 100℃ ~ 150℃，预热区应在焊缝两侧，每侧宽度不应小于焊件厚度的 2 倍且不小于 100mm。

2 选用合理的焊接参数进行焊接，不允许超大电流焊接。

3 所有焊缝不允许在拐角处起弧及收弧，需采用绕焊的方式施焊且确保接头位置错开拐角处 30mm 以上。

4 气体保护焊除根部和盖面层，坡口焊缝每层厚度不应超过 5mm，平焊、横焊焊层的宽度不应超过 12mm，立焊焊层的宽度不应超过 18mm，超过以上参数宜采用多层多道焊。

5 多层多道焊各层道相连接的部位必须相互错开 30mm 以上，禁止在同一断面起弧及收弧。

6 对接接头及 T 形接头息弧处熔合不良的焊缝采用气刨方式刨除，刨除焊缝长度大于等于 50mm，深度为焊缝横截面厚度。刨除过程中留出错边焊接位置，采用工艺要求的焊接参数补焊，并且小电流收弧，将弧坑填满，收弧处严禁存在缺陷。

7 焊接过程中使用风铲逐层逐道敲击焊缝，减少焊接应力，并清除焊渣等杂物。

8 焊后应采用保温措施对焊缝进行缓冷保温。

9 结构件焊缝以及刀座焊缝使用风铲敲击或者超声冲击逐层逐道消除焊接应力。

10 焊接质量应符合 GB 6416 有关要求。

11 刀盘焊接完成后应进行探伤检测。

8.4.5 机械件、连接件（螺栓）和重要接触面组装技术要求应符合以下规定：

1 主机重要部件连接螺栓安装前应进行清洗并做好保护，待组装时使用。

2 设备生产单位应提供设备安装螺栓紧固力矩表，螺栓拧紧时必须按照拧紧力矩操作。

3 主机关键部件的高强度螺栓及垫片必须严格进行去毛刺检查。

8.4.6 液压组装技术要求应符合以下规定：

1 必须确保安装环境的清洁，严禁使用棉纱擦洗管接头和外露的阀平面。

2 确保所有的堵头、管密封和塑料帽随着安装的进程逐步拆除。

3 系统安装之前必须对各元件逐个进行检查和试验，未经试验的元件严禁投入装配。

4 软管布置应井然有序、分层布置，软管弯曲半径不允许超过最小允许值。

5 液压管路的装配应尽量避免软管的扭转，应确保软管在工作时在本身重量作用下各个拉应力消失，在软管悬空的位置应安装托架。

6 安装的测量仪表必须经过检验校对，以保证其准确性和可靠性。

8.4.7 电气组装技术要求应符合以下规定：

1 接线端子箱内接线正确、规整。

2 应按照设计图纸敷设电缆，敷设时应遵循先长后短的原则，电缆敷设前对电缆进行检查合格后方可使用。

3 电缆敷设应不影响机械运动、不与液压管路、水和气管路干涉。

4 动力电缆与控制电缆在桥架内分开敷设，避免信号干扰，并将电缆捋顺固定。

5 有相对移动的机械部件之间的电缆应在两者之间预留适当长度（具体长度由最大相对位移来确定）；电缆不应承受挤压力和拉力，电缆拐弯处对线槽打磨平滑，避免割伤电缆。

6 电缆标识应清晰，标识距离线端宜为 300mm 左右。

7 高压电缆必须单独敷设，转弯处用管夹固定，进出电缆孔必须做密封处理。

8 所有电缆尽量采用下进下出的方式；侧进侧出的电缆进各箱盒处应向下弯曲一个弧度，进出电缆接头的地方不应处于电缆接线端的最低点。

9 所有电线中间不允许有接头，长度不够时必须重新更换线路；如果自带电缆的传感器件的电缆长度不够，则必须用工业连接插件延长其电缆而进行连接。

10 所有的电机在接线前，测试电机各绕组以及各相绕组与机壳之间的绝缘电阻，其绝缘电阻应大于 20MΩ。接线时电机接线螺栓必须紧固到位。

8.4.8 整机调试分为空载调试和负载调试，空载调试完成后在试掘进阶段进行负载调试。负载调试在试掘进过程中完成。空载调试内容如下：

1 电气系统应采用“先高压，再动力，后控制”的顺序，依次检查各高压柜带电指示，确认供电电压正常。送电顺序应按照各级电压等级从上到下依次合闸。

2 电气系统应进行液压管路和阀组的检查。依次启动各泵站，观察运行情况，确认空载运行状态。

3 系统运行过程中，应根据程序设计的相互联动和联锁功能依次进行实验检测，确保各项联锁和安全系统满足设计要求。

4 安全确认完毕后，可对各分系统机构的功能进行功能调试。主驱动、推进、拼装、管片输送小车、注浆、泥浆泵及油脂系统等所有活动部件依次进行功能调试，必须满足设计功能要求及施工需要。

8.4.9 TBM 步进应符合以下要求：

- 1 TBM 组装和调试完成后，即可步进。
- 2 设备制造应提供设备步进原理图、说明书和必要的计算说明。
- 3 支撑步进的地面基础结构应由设计单位根据设备的步进原理、步进机构及地质情况进行详细设计，必须满足 TBM 设备步进的支撑反力和导向要求。

8.5 掘进与控制

8.5.1 试掘进和正式掘进前应做好以下准备：

- 1 人员培训与交底。
- 2 地质预报。
- 3 洞轴线测量。
- 4 支护材料或管片。
- 5 施工辅助材料。

8.5.2 不同机型的 TBM 应分别按其设计原理及控制模式要求操作，设备制造商应在其设备使用说明书中详细说明。双护盾 TBM 施工一般情况下采用双护盾掘进模式，在有挤压倾向的不良地质条件下以单护盾模式掘进。

8.5.3 掘进机一般有自动扭矩控制、自动推力控制和手动控制三种模式，自动扭矩控制适用于均质软岩，自动推力控制适用均质硬岩，手动控制模式适用于变化的各种地质。

8.5.4 掘进参数主要由推进速度、扭矩、刀盘转速和推进力四个指标来表示，应综合考虑 TBM 撑靴稳定、滚刀及刀盘保护与高速掘进等因素确定，掘进参数必须随围岩条件的变

化而调整，各因素之间必须相互匹配。

8.5.5 应根据试掘进段或同类型地质条件选择合适的掘进参数，可按以下要求选择：

1 对于均质高硬岩地层，宜采用大推力、小贯入度、高刀盘转速、中等扭矩和小推进速度。

2 对于均质中等硬岩地层，宜采用较大推力、较小贯入度、高刀盘转速、中等扭矩和小推进速度。

3 对于硬软岩过渡地层，宜采用中等偏大推力、中等贯入度、中高刀盘转速、中等偏大扭矩和中等推进速度。

4 对于均质软岩地层，宜采用中等推力、大贯入度、中低刀盘转速、较大扭矩和中等推进速度。

5 对于断层破碎带，宜采用低推力、小贯入度、低刀盘转速、大扭矩和低速推进。

8.5.6 试掘进应符合以下要求：

1 试掘进应分为两个阶段，第一阶段应由设备制造商的工程师进行操作，施工单位指定人员学习；第二阶段应由施工单位指定人员操作，设备制造商派工程师指导。

2 应在试掘进期间完成 TBM 的各个系统负载调试，使各个系统的协调性和稳定性达到一个较为理想的状态，试掘进期间发现问题必须及时解决。

3 若在试掘进长度范围内不能完成 TBM 的各个系统负载调试，应增加试掘进段长度。

8.5.7 正常掘进应符合以下要求：

1 正常的 TBM 掘进启动、掘进、换步和停机应均在 TBM 主控室内操作完成，必须经过专业培训且由掌握正确操作规程的人才能担任主司机。

2 交接班及 TBM 掘进启动前应详细了解上一班运转情况及遗留问题，观察各仪表显示是否正常，检查风、水、电及润滑系统的供给是否正常，观察分析围岩类别，选择合理掘

进参数，掌握上一班开挖中线标高偏差情况，掌握上一班支护完成情况。

3 应按启动主泵站、通风除尘系统、皮带输送机，待主电机全部运转正常后，启动转动刀盘的顺序操作 TBM 掘进。

4 正常情况下的停机，应与启动时的操作相反。先停止掘进，后退刀盘 20mm ~ 30mm，刀盘空转 1min 左右后停止转动，停止电机转动，停止皮带机，调整掘进方向，换步进行下一循环的作业。

5 当出现如下紧急情况时需停机检查：

1) 发生安全事故或皮带断裂时必须按紧急停机按钮立刻停机；

2) 发现刀具金属件损坏脱落、卸碴斗出现故障、液压系统出现故障或脂润滑故障等非安全事故时，应立刻停止掘进，后退刀盘 20mm ~ 30mm，立即停止刀盘转动，依次停止各系统的工作，对故障部位进行检查。

6 掘进中应监测和记录掘进机运转情况、掘进参数变化情况、围岩软硬情况和出渣状况，必须及时分析反馈，调整掘进参数和控制掘进姿态。有条件的应采用智能自动记录设施，并及时反馈至信息中心进行分析、处理和保存，直至整个施工结束。

7 刀盘、刀具检查频次应根据围岩磨蚀性与掘进参数变化情况实时调整。

8.5.8 掘进姿态应符合以下要求：

1 掘进机推进过程中应严格控制推进轴线，使掘进机的运动轨迹在设计轴线允许偏差范围内。

2 掘进机滚转角不宜过大，掘进过程中应随时调整。

3 护盾式 TBM 曲线段施工应考虑管片安装调向对轴线控制的影响。

4 护盾式岩石掘进机纠偏过程中严格控制油缸压力，不得损坏管片，偏差较大时宜安装异型管片。

8.5.9 方向控制与纠偏应符合以下要求：

- 1** 应根据设备原理及其使用说明书规定程序及要求来进行调向和纠偏操作。
- 2** TBM 掘进通过隧洞轴线测量与 TBM 搭载的导向系统进行方向控制。
- 3** 控制测量按照 GB 50026 及 GB/T 18314 相关规定执行。洞轴线测量应满足以下

要求：

1) 测量洞内控制测量应执行三级测量复核制度。洞内平面控制测量应按国家二等导线要求施测，水准测量达到二等水准测量精度。

2) 洞内一级控制每掘进 1000m 左右精测一次，二级控制 500m 左右精测一次，三级控制 500m 以内中线和水准的延伸测量一次。

3) 掘进施工隧洞轴线偏差控制标准：水平向小于 $\pm 150\text{mm}$ ，竖直向小于 $\pm 150\text{mm}$ 。

4 掘进机姿态应根据导向系统实时调整，严禁大幅度调向。

5 偏离设计轴线时宜逐环、小量纠偏。掘进偏离设计轴线过大时，应编制纠偏方案。

6 导向系统配置应能够实时动态测量和显示掘进机掘进位置与姿态，其要求如下：

1) 宜采用激光靶式或棱镜式导向系统，全站仪测角精度不应低于 $2''$ 。

2) 应具有设计轴线管理功能和数据库轴线坐标列表导出功能。

3) 应具有空间位置检测功能，包括相对设计轴线的水平和高程偏差。实际掘进姿态偏离设计轴线最大限差时，导向系统应具有报警功能。

4) 应具有姿态角度检测功能，包括掘进机前盾和支撑护盾的滚动角、俯仰角、方位角及相对设计轴线的方位角偏差和坡度偏差。

5) 应配置工控机，具有图形显示功能，包括掘进机空间位置和姿态角度的实时数据。

6) 应具有测量基点检核功能。

- 7) 应具有与掘进机控制系统通信的功能。
- 8) 应具有测量数据的历史查询、导出和报表功能。
- 9) 应满足导向系统在直线段有效使用距离大于 200m 的要求。
- 10) 应采取减振措施。

7 必须保证在 TBM 导向系统正常工作状态下掘进施工，禁止盲打。

8 司机通过主机室上位机导向系统姿态控制显示屏提供的 TBM 位置状态来进行纠偏和调向操作，纠偏时应控制单次纠偏量，应小量纠偏，不得过量纠偏。纠偏应满足以下要求：

- 1) 每次调向动作不能使边刀移动量超过 3mm。
- 2) TBM 的导向角控制在 10mm/m 以内。
- 3) 每次调向的导向角变化量控制在 2mm/m 以内，硬岩地段导向角变化量还应适当减小，以防造成边刀的损坏。
- 4) 应避免过度调向，导致洞壁上产生屋脊状表面。

8.5.10 施工日志应符合以下要求：

- 1 当日操作班组的施工进展必须据实记录。
- 2 按时、真实和详细记录，中途发生人员变动，应当办理交接手续，保持施工日志的连续性及完整性。
- 3 当日的主要施工内容一定要与施工部位相对应。
- 4 施工过程中对掘进里程、注浆等工艺进行记录。
- 5 详细、准确完成 TBM 掘进记录表。

对于采用 TBM 信息化施工的工程制作电子化日志，电子化表格的基本样式宜参照附录 C。

8.5.11 掘进过程中遇到下列情况之一时，应及时处理：

- 1 掘进机前方围岩发生坍塌或遇有障碍。
- 2 掘进机壳体滚转角达到 3°。
- 3 隧洞轴线偏离设计轴线水平超标。
- 4 掘进机推力与预计值相差较大。
- 5 掘进机掘进扭矩发生异常波动。
- 6 喷射混凝土或其他支护系统发生故障。
- 7 动力系统、密封系统和控制系统等发生故障。

8.5.12 TBM 掘进施工时应尽量避免卡机现象，在通过断层破碎带时，掘进前应进行超前地质预报，以确定破碎带边缘、长度、破碎程度及含水情况等。每个断层破碎带通过前均应执行提前设备检修和维护，材料准备及组织动员等，采取加强观测，不长停机快速施工，一次性通过的原则，当某种原因出现卡机现象时，采取以下原则和要求进行卡机脱困处理：

1 敞开式 TBM 在通过断层破碎带时，掘进前进行超前地质预报，以确定破碎带边缘、长度、破碎程度及含水情况等。每个断层破碎带通过前均执行提前设备检修和维护，材料准备及组织动员等，采取加强观测，不长停机快速施工，一次性通过的原则，若某种原因导致 TBM 被卡，在撑靴部位围岩反力足够的条件下，可通过 TBM 设备的护盾收缩、大扭矩和后退功能处理 TBM 轻微卡机现象。

2 若无法采用 TBM 设备自身的卡机脱困功能脱困，宜停机采用人工凿出部分被卡部位或清除卡机障碍。

3 若属于在塌方破碎带或突水突泥带由于刀盘内进入过多泥渣被卡，则应先处理不良地质的超前支护和固结，再人工清理刀盘内泥渣，然后使用 TBM 设备自身的卡机脱困功能脱困。

4 若在大变形段或大塌方导致严重卡机，无法采用 TBM 设备自身的卡机脱困功能脱

困,也无法通过人工凿出部分被卡部位处理卡机脱困时,宜研究采取绕洞方案全面开挖处理。

8.6 超前地质预报

8.6.1 超前地质预报应对与掘进参数选择和掘进机施工安全等有关的地质因素进行预报,

应包括以下主要内容:

- 1 掌子面前方岩土体含水情况。
- 2 施工掌子面前方有无暗河或暗沟等不良地质体(带)的分布位置。
- 3 断层及其影响带和节理密集带的位置、规模和性质。
- 4 软弱夹层(含煤层)的位置、规模及其性质。
- 5 岩溶发育位置、规模及其性质。
- 6 不同岩性间的接触界面与位置。
- 7 采、废弃矿巷分布及其与隧洞的空间关系。
- 8 不同风化程度的岩性分界位置。
- 9 岩爆的可能性与区域。
- 10 其他不良地质体位置。

8.6.2 掘进机法施工的隧洞地质调查应开展下列工作:

1 开展地质条件复杂和重点预报段采样工作,记录采样位置、岩性、埋深、方式、采样时间及采样人等信息,并进行室内判别和测试,确定洞身围岩的岩性组合特征和风化程度,以及不良地质的性质、结构特征等。

- 2 采取素描、摄影或录像等手段,记录不良地质体位置和特征等。
- 3 统计地表和洞内岩体节理裂隙。
- 4 确定地层分界面位置。
- 5 记录、分析不同地层掘进参数。

8.6.3 超前地质预报应遵循以下原则：

1 适应性原则：应根据已有的工程地质、水文地质资料及 TBM 施工现场环境条件进行超前地质预报设计，选择的预报方法应与预报目标和实际条件相适应。

2 动态设计原则：当掘进机施工作业环境发生变化或地质条件与原设计不符，或预报结果与实际开挖揭示不一致时，应相应调整超前地质预报设计方案。

3 长短结合原则：应遵循长距离预报与短距离预报相结合原则，长距离预报方法包括地震法等，短距离预报方法包括激发极化法和超前钻探法等。

8.6.4 超前地质预报方法选择：

1 宜循环采用地震波法长距离探测破碎带及断层等不良地质构造的位置，激发极化预报方法短距离探测不良地质构造的地下水的赋存情况。

2 宜结合 TBM 岩渣分析及 TBM 掘进参数进行综合预报结果解释。

3 必要时可根据超前地质预报结果开展超前钻探预报法，可利用超前钻孔进行孔内物探预报。

8.6.5 预报方法及技术要求应符合以下规定：

1 地质调查法及超前钻探法及物探法等预报方法和要求应符合国家和行业相关标准的规定。

2 掘进机法施工的隧洞可根据地质条件、工程复杂程度和实际需要等确定掘进机施工的高风险段落，结合施工环境，采取超前地质钻探、地震波法及电法等一种或两种综合物探法进行超前地质预报。

3 超前地质钻探是利用钻机在隧洞开挖工作而进行钻探获取地质信息的一种超前地质预报方法。根据钻探的深度又分为短距离、中距离和长距离地质超前钻探，按下列规定进行划分：

- 1) 短距离：钻探深度小于等于 6m，主要选择加深炮孔探测方法。
- 2) 中距离：钻探深度 6m~30m，主要选择潜孔锤钻机设备。
- 3) 长距离：钻探深度 30m~150m，主要选择快速超前水平钻机设备。
- 4 地震波法应采用主动源和破岩震源预报方法。使用爆破震源时不得影响掘进机安全。

观测系统布置应符合以下要求：

- 1) 根据掘进机结构及现场施工情况，设计合适的观测系统，确定检波器和震源点位置。
- 2) 观测系统宜布置在掌子面后方 10m ~ 70m 范围内的隧洞轮廓上，条件允许时宜优先采用震源和检波器在隧洞轴向、水平和竖直三个方向上均具有一定偏移距的布置形式。
- 3) 观测系统可采用一点激发、多点接收或多点激发及一点接收的方式。
- 5 电法可根据掘进机施工环境和探测要求选用电阻率法和激发极化法等。电法预报应符合以下要求：

符合以下要求：

- 1) 每次预报长度宜小于 30m。
- 2) 连续预报时前后两次预报范围的搭接长度应不小于 5m。地质条件复杂时，相邻两次预报范围的搭接长度应不小于 10m。
- 3) 所用电极宜选用柔性接触电极，应与掘进机绝缘。激发极化法的测量电极应选用不极化电极。
- 4) 电极安装位置应根据掘进机机型选定，可在掘进机刀盘和护盾设计适当位置开孔。

8.6.6 预报信息管理与处置应符合以下要求：

- 1 超前地质预报信息化应纳入施工工序，对各种地质预报信息系统和规范管理并及时

处置。

2 预报信息管理与处置系统选择应满足超前地质预报工作的相关要求，并遵循功能全面、展示直观和智能便捷原则。

3 预报信息管理与处置系统功能宜包括超前预报质量管理、超前预报数据共享、安全控制决策、虚拟地质与可视化和预报成果展示等。

8.7 施工运输

8.7.1 施工运输方式应满足以下要求：

1 TBM 施工运输方式可采用无轨运输、有轨运输、带式运输、绞车运输以及几种方式的综合运输等。

2 施工运输方式应根据隧洞长度、断面大小、运输能力、基底形式、材料重量与尺寸以及转换作业便捷性等因素综合比选确定，运输能力应满足掘进与支护的最高施工强度要求。

3 施工运输方式选择遵循以下原则：

1) 运输道路满足装车、会车及调头等条件的隧洞一般采用无轨运输。

2) 交通坡度不大于 3%的隧洞可采用有轨运输。

3) 带式运输一般用于出渣运输。

4) 交通坡度大于 15%的隧洞宜采用绞车运输。

8.7.2 无轨运输应满足以下要求：

1 无轨运输宜采用仰拱块、底管片、箱涵或现浇底板方式。

2 无轨运输作业应遵守以下规定：

1) 运输设备应配备刹车安全装置，并加强检查。

2) 施工作业地段的行车速度不得大于 15km/h，成洞地段不得大于 25km/h。

3 高海拔、严寒及寒冷地区无轨运输配套应符合以下要求：

- 1) 发动机、电动机及配套设施应根据海拔高度选择，并参照相关标准修正。
- 2) 设备不宜长时间处于满负荷运转状态。
- 3) 宜采用封闭式驾驶室并配置应急供氧设备。
- 4) 设备运转所用油品及冷却液等应适用于高海拔、严寒及寒冷地区。
- 5) 设备存放应设置保温棚。

8.7.3 有轨运输应满足以下要求：

1 有轨运输编组应根据单循环出渣量和支护材料用量配置，应按附录 D.1 进行相关参数计算配置。

2 有轨运输轨道铺设宜采用仰拱块或底管片方式。

3 有轨运输应符合以下安全规定：

- 1) 有轨运输转弯半径不宜小于 50m。
- 2) 轨道铺设应控制轨距和线间距，线路应平直。
- 3) 列车编组应配置刹车保护装置和防溜车措施。
- 4) 同一轨道两组列车编组间距不得小于 100m。
- 5) 直线段重车洞内运行速度不宜大于 15km/h，空车洞内不宜大于 20km/h。
- 6) 作业区或施工干扰段运行速度不宜大于 10km/h，转弯段、道岔段及坡度范围在 1%~3%的下坡段不宜大于 5km/h。
- 7) 轨道两侧不宜堆放材料，如需临时堆放应预留足够安全距离并控制堆放高度。

4 根据隧洞的洞径和运输量要求选择轨线布置方式，可设计为单线、四轨三线或复合式轨线等形式，布置原则如下：

- 1) 洞径较小及隧洞较短的采用单线轨道布置。
- 2) 洞径较小及隧洞较长的选择单线和会车点的复合式轨线布置。

3) 洞径较大及运输量大的选择四轨三线制布置。

5 有轨运输牵引机车可采用电力机车、内燃机车及电瓶车等形式，选择原则如下：

1) 长大隧洞一般选择内燃机车，但应配置尾气净化装置。

2) 小断面、短距离及运输能力要求不高的隧洞，可以优先选用电瓶车。

8.7.4 带式运输应满足以下要求：

1 带式运输系统一般由张紧装置、驱动装置、尾部滚筒、托辊架、辊子、滚筒、滑轮、清扫器、皮带和储存仓等组成。

2 连续皮带机参数应根据隧洞曲线、运输距离、掘进断面和掘进速度等确定，应按附录 D.2 和 D.3 进行相关参数计算确定。

3 皮带宜选择有钢丝内芯的橡胶皮带，皮带储存仓容量不宜小于 500m，皮带接长应采用硫化工艺。

4 带式运输出渣应遵守以下安全规定：

1) 皮带机驱动和储带仓基础应牢固。

2) 主驱动、辅助驱动、储带仓、分渣设施等重要部位应设专人监控，其他部位按 1 人/km 设置专人巡视。

3) 严寒及寒冷地区使用连续皮带机时应采用耐寒阻燃皮带，洞外皮带机及分渣设施应设置保温棚，并配置供暖设施。

8.7.5 原材料和半成品在施工方案中尽量避免二次倒运，如需场内倒运可采用吊装设备配合装卸。

8.7.6 TBM 掘进各工序应尽量紧密组织，有轨运输应加强列车运行组织与调度，应做好以下三个方面要求：

1 应加强有轨运输工作的计划性。

2 应建立健全运输调度规章制度，并加强日常运输管理。

3 应加强运输车辆的保养维修。

8.8 支护与衬砌施工

8.8.1 锚喷支护施工应符合以下要求：

1 锚喷支护一般包括钢筋排、钢拱架、锚杆、挂网及喷射混凝土，应根据设计要求及现场围岩情况采用相应方式。

2 敞开式掘进机应配置满足锚喷支护质量和进度要求的支护设备。

3 掘进机锚喷支护的施工及质量要求除应满足 SL 377 的有关规定外，还应满足以下规定：

1) 锚喷支护施工布置应在支护设备可施工的范围。

2) 锚杆与岩壁的角度应着重锚杆钻机打设角度。

3) 钢筋排材料宜选择直径为 16mm ~ 25mm 的钢筋，间距及型号应根据围岩状况及钢拱架间距合理选择，以不漏渣以及钢筋排不发生弯曲为宜。

4 钢筋网应与锚杆或其他固定装置连接牢固，并应符合下列要求：

1) 撑靴以上部位的钢筋网应在围岩出露护盾后立即安装。

2) 撑靴及以下部位的钢筋网可在撑靴通过后进行安装。

3) 钢筋排安装范围内应取消钢筋网，钢拱架段钢筋网不宜设纵向搭接。

5 钢拱架施作应满足以下要求：

1) 钢拱架纵向连接筋可与相邻钢拱架外侧翼板焊接连接，不良地质段钢拱架纵向连接可采用型钢等刚性材料。

2) 钢筋排背后存在的空腔和松散体，应预埋注浆管注浆或回填混凝土密实。

8.8.3 二次衬砌混凝土施工宜采取模筑方式，应满足以下规定：

1 模筑混凝土衬砌施工应按照设计及施工组织要求，根据监控量测结果适时施作二次衬砌。

2 不良地质和特殊岩土段应及时进行模筑衬砌施工。

3 拱墙衬砌时，仰拱块与现浇混凝土接触面应清理干净并保持湿润。

4 多模板台车编组施作时，宜结合衬砌断面大小顺序布置，先施作的衬砌断面净空应满足后续衬砌台车通过要求。

5 采用带式运渣的隧洞，衬砌模板台车结构布置应考虑带式运输空间要求。

8.8.4 预制混凝土管片衬砌生产和安装应满足以下规定：

1 混凝土预制管片应采用工厂化生产，其生产规模和储存能力应满足 TBM 最大掘进速度的管片使用需求。

2 混凝土预制管片质量应满足表 8.8.4 要求：

表 8.8.4 混凝土预制管片质量要求

序号	项目		允许偏差 / mm
1	外型尺寸	宽度	±1
		弦长弧长	±1
		厚度	+2
2	螺栓孔孔径及孔位		±1
3	混凝土强度		> 设计标号
4	混凝土抗渗		> 设计标号

3 管片运输应遵守以下规定：

1) 宜采用专用运输车，管片应安放平稳及固定牢靠。

2) 管片运输车进入 TBM 内部时，应遵守调度指令。

- 3) 不应超载运输管片。
- 4 管片拼装作业应遵守以下规定：
- 1) 管片拼装应由培训合格的专人操作。
 - 2) 管片拼装前应确认管片吊机、喂片机和拼装机性能良好及作业区域安全。
 - 3) 管片安装前，管片操作手应检查和确保液压管路处于非运动干涉及强行曳拖状态，明确管片安装辅助作业人员位置。
 - 4) 管片进行安装作业时，非管片操作人员不得进入管片安装作业区域。
 - 5) 管片拼装次序应为：仰拱起始块、左右块交替对称及封顶块。
 - 6) 管片拼装就位后，应及时用辅推油缸将管片顶紧或紧固好螺栓，在脱离盾尾后应对管片连接螺栓进行二次紧固。
 - 7) 拼装机停机时，宜将抓取装置停止在隧洞正下方位置。
 - 8) 单环管片拼装作业完成后，管片操作手应将遥控器放回主控室。
- 5 豆砾石充填作业应遵守以下规定：
- 1) 吹填作业开始前，应确认豆砾石泵及空压机的工作状况完好，检查吹填喷射头安装牢固和管路连接可靠。
 - 2) 吹填作业时，吹填喷射头区域 5m 范围内不应有人员滞留。
 - 3) 吹填作业中，应实时监测泵的压力变化，调整风压和风量，控制下料吹填速度。
 - 4) 豆砾石回填量应根据地质条件及施工状况综合确定，单位长度回填量不宜大于理论回填量的 85 %。
- 6 管片背后注浆应符合以下要求：
- 1) 应根据隧洞围岩和地下水赋存状况选择合适的注浆材料，注浆终压宜为 0.25MPa。
 - 2) 每 10 环宜设置一道止浆环，止浆环的环宽、配比、参数及压力等应根据现场试验

确定。

- 3) 应连续进行灌浆，若因故中断超过 30min，应清洗至原孔深后恢复灌浆。
- 4) 灌浆结束后，待孔内浆液初凝，应排除孔内积水和污物。
- 5) 豆粒石灌浆应进行压水试验和钻孔取芯检查。

8.9 保养与维修

8.9.1 设备维修保养应符合以下要求：

- 1 维修保养措施应根据作业区海拔及地温等环境因素综合制定。
- 2 施工过程中应安排专职人员对设备的运转状况进行巡视。
- 3 设备保养宜采用日常保养和定期保养相结合的方式，并符合以下要求：
 - 1) 日常保养时间不应低于 4h/d。
 - 2) 掘进长度达到 1000m 或每季度应进行定期保养，保养内容包括主机和后配套的结构件、部件、附属设施及存在的问题。
 - 3) 整机保养应采取清洁、润滑、紧固、调整及防腐等措施。
 - 4 液压系统维修保养前应关闭相应的阀门并做泄压处理。
 - 5 各项维保工作必须在机器停止掘进时才能进行。
 - 6 液压系统的维护保养必须注意清洁，严禁使用棉纱等易起毛的物品清洁管接头内壁、油桶及油管等。

8.9.2 刀盘刀具管理应符合以下要求：

- 1 应制定刀盘刀具检查维修制度，编制维修方案，经评审后方可执行。
- 2 刀盘刀具维保前必须确认 TBM 已停止掘进，方可检查刀盘，且采用点动旋转刀盘的方式对刀具进行检查。
- 3 检查刀具前，刀盘应退离掌子面至少 200mm。

4 刀盘检查内容主要包括裂纹、磨损、耐磨件脱落、刀座变形及喷水故障等。

5 刀盘检查周期应为每个轮班至少要检查一次，如地质条件发生了变化须对刀盘进行一次全面检查。

6 刀具检查内容主要包括外观、轴承及密封、紧固件和磨损量等。

7 施工过程中出现异常或围岩条件变化时，应及时进行刀盘刀具检查。出现以下情况应更换刀具：

1) 滚刀刀圈断裂、偏磨、崩刃或刀圈磨损量超限。

2) 刀具漏油或挡圈断裂脱落。

3) 刀具紧固件损坏及掉刀。

4) 铲斗齿变形、开裂、松动或磨损量超限。

8 滚刀检修应符合以下要求：

1) 刀具检修应配置专用检修车间和设备，检修工作应由专职人员负责。

2) 刀具检修后应检查油液状况、气密性和启动扭矩。

9 刀具更换人员应经过技术培训合格后，严格按照操作规程操作。在新刀安装之前，应对刀座进行彻底的清洁和检查。

8.9.3 液压系统管理主要包括推进支撑系统、齿轮油系统、护盾系统和皮带机系统，其维护与检查应包括液压阀组、泵站、管路、接头和油缸的日常检查。

8.9.4 油液管理应符合以下要求：

1 减速机投入使用达到 100h 后，应更换一次齿轮油；减速机正常运行后，每 2000h 更换一次齿轮油。

2 油液检测应执行相关标准，常规油液检测可自检或委托有资质的检测单位进行。

3 油液自检应符合以下要求：

- 1) 具有检测试验室及油液检测设备。
- 2) 检测人员应由有资质的检测单位培训，考核合格后上岗。
- 3) 油液取样应在设备运转 30min 后抽取样品。液压油应在回油管路取样，润滑油和润滑油脂应在两零部件间构成的摩擦副之后、滤清器之前取样。
- 4) 油样瓶和取样管应采用一次性用品，单次取样量不应小于 200ml。
- 5) 油液检测报告应包含检测结果、分析结论及建议等。

8.9.5 设备整机维修应符合以下要求：

1 设备整机维修应包括以下内容：

- 1) 刀盘、主机结构、护盾和撑靴的磨损、裂纹及变形等修复或更换。
- 2) 主驱动内外密封、跑道及主轴承修复或更换。
- 3) 电机、变频器、减速机、液压泵及油缸等部件修复或更换。
- 4) 更换各种齿轮油及液压油。

2 掘进距离达到 5000m 或主轴承运转时间达到 3000h 应进行设备整机状态评估，评估需要整修时，制定整修方案并实施。

8.10 转场与拆卸

8.10.1 应按设计规划方案进行转场，以安全经济的原则编制实施性转场方案。

8.10.2 TBM 施工转场一般包括以下项目：

- 1 TBM 设备转场。
- 2 皮带机转场。
- 3 有轨运输系统转场。
- 4 供水、通风及供电等供应系统的转场。
- 5 临建及弃渣场等转场。

8.10.3 转场设备设施尽可能重复使用。

8.10.4 同一 TBM 施工相邻掘进段的转场宜采用步进或滑行等方式；其他项目一般应拆除重新安装。

8.10.5 TBM 设备阶段性的大修、检查及维护可安排在转场期间完成。

8.10.6 转场阶段重要部件经过更换和大修的 TBM 设备及皮带机系统，应经调试合格后才能转入始发掘进施工。

8.10.6 TBM 拆卸应按设计规划方案进行，并编制 TBM 拆卸实施性计划。有条件的应尽量采用洞外拆机方案。

8.10.7 拆机准备应符合下列要求：

1 编制 TBM 拆卸运输专项安全方案，应严格按照方案内容执行。

2 拆卸前应检查吊耳的焊接质量。

3 委托专业的大件拆卸单位进行拆吊作业，拆卸单位应提供吊车的合格证及整车的检验报告。

4 拆卸前应准备好吊拆索具，确认符合方案规定的要求。

8.10.8 洞内拆机应符合下列要求：

1 拆机洞室及储存场地：提前进行拆机洞室外形尺寸的设计及施工，同时根据 TBM 设备解体后的外形尺寸及重量进行起吊设备的选型和制作。当洞外储存狭小，不能满足拆出的设备及材料存放，要及时进行存储场地规划准备。

2 TBM 拆解一般包括拆机的总体思路和拆解顺序安排、辅助工装加工、吊点设置、吊具加工购置、分块大小编排、下落翻身设计及运输组织等，宜按照“先电器系统，后液压系统，再机械结构”的原则拆卸 TBM。

8.10.9 TBM 及配套设备零部件拆解后，安排专人进行设备的清理和保养，对设备部件

连接的结合面涂抹黄油进行保护，小型贵重件按类别存放在集装箱内，按照主机、后配套结构部件、电气设备、液压阀体管路、皮带系统及通风系统等对储藏环境的不同要求进行分类存储，确保各部件存储安全可靠。

8.11 质量检查

8.11.1 开挖质量检查应符合以下要求：

1 TBM 施工应采用全站仪每 200m~500m 作一次洞轴线复核检查。

2 敞开式 TBM 开挖施工质量的合格条件如下：

1) 隧洞轴线允许偏差水平向允许偏差 $\pm 100\text{mm}$ ，垂直向允许偏差 $\pm 50\text{mm}$ 。

2) 不良地质洞段处理应符合设计要求。

3) 洞室壁面围岩整体性良好段落不允许有松动岩块。

3 护盾式 TBM 开挖施工质量合格条件如下：

1) 隧洞轴线允许偏差水平方向允许偏差 $\pm 150\text{mm}$ ，垂直方向允许偏差 $\pm 150\text{mm}$ 。

2) 不良地质洞段处理应符合设计要求。

8.11.2 锚杆、喷射混凝土施工质量检查按 SL 377 要求开展，其质量应满足 SL 377 相关条款及本规范第 8.8 节要求。

8.11.3 管片安装质量检查应符合以下要求：

1 预制混凝土施工质量应按 SL 677 相关条款及工程设计特殊要求进行质量控制。

2 隧洞衬砌用的预制混凝土管片外形尺寸、强度等级、钢筋配置及其他性能要求等应遵守设计图纸规定。

3 管片安装合格应符合以下条件：

1) 管片不得有内外贯穿裂缝、宽度大于 0.2mm 的裂缝及混凝土剥落现象。

2) 管片防水密封质量、螺栓质量及拧紧度应符合设计要求。

- 3) 管片拼装过程隧洞轴线允许偏差水平方向允许偏差 $\pm 100\text{mm}$ ，垂直方向允许偏差 $\pm 100\text{mm}$ 。
- 5) 管片拼装衬砌环椭圆度允许偏差 $\pm 8\%$ ，衬砌环内错台允许偏差 $\pm 8\text{mm}$ ，衬砌环间错台允许偏差 $\pm 5\text{mm}$ 。
- 6) 粘贴管片防水密封条前应将管片密封槽清理干净，粘贴后的防水密封条应牢固、平整严密，不得有起鼓和缺口现象。
- 7) 螺栓孔橡胶密封圈安装应符合设计要求，不应遗漏，且不宜外露。
- 8) 管片嵌缝防水应符合设计要求。

9 不利地质洞段掘进施工

9.1 一般规定

9.1.1 掘进机通过不利地质洞段时，应提前进行补充勘察、超前地质预报和现场监测，分析不利地质洞段的详细情况，进行掘进机施工风险评估和分级，制定不同施工风险等级下的专项施工预案。

9.1.2 在采用超前钻孔或超前管棚等注浆堵水和加固围岩时，掘进机仍无法通过，可采用钻爆法或人工开挖方式掘进和支护，掘进机步进通过。

9.2 断层破碎带

9.2.1 断层破碎带施工期补充勘察、超前地质预报和超前钻探应包含下列内容：

- 1 分析断层破碎带的空间位置、展布范围、产状和性状。
- 2 分析断层破碎带物质的组成、破碎程度及富水和导水等情况。
- 3 在深埋高地应力区，宜通过现场测试和反演分析，分析断层破碎带区域内的应力分布规律和围岩体物理力学性质参数。

9.2.2 断层破碎带超前地质预报应遵循“地质与物探相结合，长短距离相结合”的原则，并符合下列要求：

- 1 以地质调查法为基础。
- 2 以物探法为主，物探法主要包括地震波法、电阻率法与激发极化法。
- 3 选择两种物探方法并相互验证，必要时采用超前钻探法。

9.2.3 掘进机在断层破碎带中施工时应符合下列规定：

1 当断层破碎带等级为 C_1 时，调整掘进参数不间断连续通过，采用常规支护技术，加强监测工作。

- 2 当断层破碎带等级为 C_2 时，进行超前小导管注浆等进行超前加固；刀盘进行适当

扩挖；调整掘进参数，适当减缓掘进速度和刀盘转速；开挖后加强支护，可综合采用钢筋排、型钢支架、锚杆、钢筋网、喷射混凝土支护和注浆/中空注浆锚杆。

3 当断层破碎带等级为 C_3 时，采用下列围岩加固措施：

1) 若撑靴部位接地比压不满足掘进机掘进要求，应采用换填混凝土及注浆等加固措施。

2) 若护盾和刀盘上方围岩不稳定时，应进行超前加固处理，第一层可采用中空注浆锚杆，在开挖轮廓线外，超前化灌加固围岩；第二层可采用超前小导管或超前管棚注浆加固围岩。

3) 若掌子面不稳定可采用玻璃纤维锚杆化学灌浆加固围岩。若洞室开挖产生缩径侵限，应将刀盘进行适当扩挖；开挖后立即加强支护，多次超前支护应进行搭接，可采用钢筋排、钢拱架、 L_1 区锚杆、钢筋网、喷射混凝土支护、注浆或中空注浆锚杆等措施。

4 当断层破碎带等级为 C_4 时，如采取超前管棚注浆等措施后，掘进机仍难于通过时，考虑调整掘进方案，将由掘进机掘进改为钻爆法或人工掘进，待穿越该断层破碎带后再恢复为掘进机掘进，钻爆法地段可采用分步联合支护技术进行围岩稳定控制。

9.2.4 敞开式掘进机应加强围岩变形监测，护盾式掘进机应对护盾挤压变形和围岩挤压应力进行实时监测。掘进过程中应密切监测掘进机推力及扭矩等主控掘进参数的变化，及时反馈调整掘进施工方案。

9.3 大变形围岩

9.3.1 大变形围岩补充勘察、超前地质预报和超前钻探应包含但不限于下列内容：

1 分析大变形围岩区域地层岩性、岩石矿物成分、地质成因和地质构造。

2 分析大变形围岩区域节理、裂隙和断层发育情况。

3 通过现场、室内测试和反演分析，分析大变形围岩区域的岩石物理力学特性。

4 通过现场测试和反演分析，分析大变形围岩区域应力场。

9.3.2 掘进机在大变形围岩中施工时应符合下列规定：

1 当大变形围岩等级为 D_1 时，采用常规掘进参数和常规支护技术通过，必要时采取超前支护措施，加强监测工作。

2 当大变形围岩等级为 D_2 时，采用“适当扩挖+预应力锚杆+钢拱架+钢筋排喷射混凝土”的控制技术。

3 当大变形围岩等级为 D_3 时，采用稳定型分步联合控制技术，即超前锚杆或超前小导管+小变径扩挖预留变形量+匀速不间断掘进快速通过，减轻时效变形影响+掘进后可及时施作“ L_1 区（预应力锚杆+钢拱架+钢筋排喷射混凝土）+ L_2 区（预应力锚索）”。

4 当大变形围岩等级为 D_4 时，采用稳定型分步联合控制技术“大变径扩挖+掘进参数调整+分步联合支护”控制技术，即人工扩挖旁洞、开挖超前导洞更换刀盘进行大变径扩挖+启动脱困电机、降低刀盘转速等措施提高刀盘扭矩和主驱动推力+“超前预注浆加固+钢筋排+可缩式钢拱架+预应力锚杆+分步注浆+预应力锚索”支护。

9.3.3 掘进机施工通过加固后的大变形围岩段时应做好相关监测工作，具体要求见 9.2.4。

9.4 岩溶（岩溶管道、溶腔）

9.4.1 岩溶施工期补充勘察和超前地质预报应包含但不限于下列内容：

1 查明和分析岩溶的类型、空间位置、规模与发育程度、充填状况、分布范围和规律、形成原因及与地表水及地下水的联系。

2 查明岩溶富水和导水情况，分析其对隧洞掘进的影响程度。

9.4.2 岩溶地段掘进机施工应符合下列规定：

1 岩溶水的处理可按 9.5.3 进行处理；

2 应根据查明的溶洞规模及填充物的情况对溶洞进行处理，以满足掘进机施工要求，

处理措施宜符合下列规定：

- 1) 小型溶洞，可采取回填混凝土、回填灌浆及固结灌浆等处理措施。
- 2) 有充填的大型溶洞，可通过掘进机超前钻探设备进行超前注浆处理，待掘进机通过后采用高压固结灌浆、施设锚杆等处理措施。
- 3) 无充填或少量充填的大型溶洞，可采取梁、拱或以桥型基础架设渡槽及箱涵等跨越措施。

3 在掘进过程中，应通过控制掘进参数控制掘进方向，减缓掘进速度，使掘进机在掘进时刀盘各部位受力尽量相同，减少刀具偏磨和掘进机姿态偏移等现象。

9.4.3 应加强对掘进机姿态、围岩变形及地下水情况等实时监测，并根据监测结果及时调整掘进参数和优化掘进施工方案。

9.4.4 对于岩溶发育地层可选用双模式掘进机施工，当遭遇大规模溶洞时切换掘进模式，封闭掌子面进行掘进。

9.5 突涌水（泥）

9.5.1 突涌水（泥）地段施工期补充勘察和超前地质预报应包含但不限于下列内容：

1 查明和分析突涌水（泥）地段中断层破碎带及岩溶等富水地层的位置、规模和发育情况；

2 查明突涌水（泥）地段的物质组成、富水和导水情况，以及水量和水压。

9.5.2 突涌水（泥）地段掘进机超前地质预报应结合表 4.6.6 中规定的突涌水（泥）灾害分级开展，在 9.2.2 条的基础上，加强电阻率法与激发极化法探测，必要时可结合地表跨孔电阻率、跨孔雷达等方法进行综合探测，在接近突涌水（泥）地段时宜采用超前钻探法。

9.5.3 突涌水（泥）地段掘进机施工应符合下列规定：

1 当预测突涌水（泥）分类等级为 $E_1 \sim E_2$ 级时，可采用排水孔进行放水处理并设置

钻孔防喷装置，掘进机带水作业；当预测突涌水（泥）围岩分类等级为 $E_3 \sim E_4$ 级时，应及时论证超前堵水的必要性，并制定详细的应急预案，当减压放水后仍无法达到施工条件时，应进行超前预处理封堵施工，经处理并达到掘进机施工条件后再掘进。

2 当预测前方可能发生涌泥时，为防止泥浆涌出给掘进机设备造成严重影响，应采用定域注浆及预加应力等超前灌浆技术进行封堵、加固，然后采用超前管棚注浆预加固，经评判具备掘进机施工条件后再掘进。

3 掘进机掘进通过突涌水（泥）地段后，应及时排除工作面积水、遮挡及引排侧壁漏水，并加强初期支护。

9.5.4 应加强对掘进机淹没状态、围岩变形及水量水压等的实时监测，并根据监测结果及时调整防排水措施。

9.6 岩爆

9.6.1 岩爆地层（区域）补充勘察应包含但不限于下列内容：

1 复核岩爆地层（区域）工程地质条件、地层岩性及地质构造。

2 宜测试岩石的脆性。

3 分析地质构造对岩爆的影响，确定造成局部应力集中且易诱发急剧能量释放的主控结构面。

4 根据开挖揭露的工程地质条件，动态测试岩体的物理力学特性。

5 宜开展岩爆地层（区域）的地应力测试，分析开挖后应力重新分布规律。

9.6.2 现场施工过程中，存在中等岩爆风险以上的施工现场应采用微震监测方法结合地质预报成果对岩爆进行监测预警，微震监测宜包含下列内容：

1 确定岩爆微震监测整体技术方案。

2 构建岩爆微震监测数据处理系统。

3 建立岩爆预测判据，评估岩爆灾害风险。

9.6.3 根据监测预报的岩爆等级，可采用表 9.6.3 处置措施。

表 9.6.3 不同岩爆等级的处置措施

岩爆等级	处置措施	
	工程处理措施	掘进参数调整
B ₁	以柔性支护为主。对出露围岩喷水并施做径向应力释放短孔，快速封闭围岩；并及时采用喷射混凝土、设置随机砂浆锚杆、设置局部轻型钢拱架、钢筋排、钢筋网，对护盾后围岩进行挂网喷护。	掘进参数与非岩爆段类似，宜选择高转速、高推力、低扭矩掘进参数。
B ₂	加强支护。对出露围岩高压喷水并施做径向应力释放短孔，并采用钢筋排喷射混凝土及时封闭，施工中加密轻型钢拱架、钢筋排支护；及时对岩爆塌腔部位采用喷射混凝土封闭；结构混凝土采用喷射纳米合成粗纤维混凝土、随机锚杆、系统锚杆、涨壳式预应力中空注浆锚杆以及钢筋网加强支护。	宜选择低转速、中推力、中等扭矩掘进参数；在可能发生 B ₂ 以上规模岩爆的地段，应严格控制掘进机掘进速度，待护盾后支护体系稳固之后再慢速定向推进。
B ₃	应力释放与加强支护综合处理： 1、敞开式掘进机 L ₁ 区采用涨壳式预应力中空注浆锚杆、中型或重型钢拱架或钢管片、钢筋排支护；L ₂ 区采用常规的砂浆锚杆，挂网喷射混凝土。采用喷掺纳米粗纤维混凝土和仿钢/钢纤维的混凝土封闭塌腔，对已破坏支护结构进行修复补强，可进一步采取超前应力释放孔或超前应力释放爆破 2、护盾式掘进机采用重型预制混凝土管片或钢管片，可进一步采取超前应力释放孔或超前应力释放爆破。必要时，采用消能锚杆与钢拱架缓冲岩爆冲击能量。	宜选择低转速、中推力、高扭矩掘进参数；B ₃ 及以上等级的岩爆地段一般需要停机进行支护。
B ₄	应实施超前应力解除爆破，评估掘进机继续施工的可行性：评估为可行时，按照 B ₃ 等级岩爆处理措施缓慢推进；评估为不可行时，开展专题研究，采用小导洞、平洞等方式降低应力集中，必要时，甚至全断面钻爆开挖后使掘进机安全步进通过高岩爆风险区域。	

9.6.4 在岩爆洞段施工应对人员和设备进行安全防护，制定专项应急预案，做好避险和安全防护准备。

9.7 超硬岩

9.7.1 应根据超硬岩等级采取如下措施：

1 对于 A₃ 等级围岩洞段，掘进机工作条件一般，应对滚刀材料、刀刃宽度和布置间距以及刀具防磨蚀措施进行专门研究。

2 对于 A₄ 等级围岩洞段，掘进机工作条件差，除采取针对 A₃ 等级围岩的措施外，还

应研究辅助破岩手段。

9.7.2 当掘进机在节理比较发育的块状硬岩中掘进时，应对刀盘刀具施加防冲击和防崩刃措施。

9.8 高地温

9.8.1 高地温补充勘察和监测分析，应包含下列内容：

- 1 分析高地温隧洞温度场的分布规律。
- 2 探明掌子面前方热泉情况。
- 3 实时监测洞内空气温度和岩壁温度。

9.8.2 掘进机施工隧洞高地温等级应根据隧洞内作业区空气温度和岩壁温度来划分，划分标准见表 9.8.2。

表 9.8.2 高地温等级划分

洞内空气温度/℃	岩壁温度/℃	高地温等级
$28 < T < 35$	$40 < T < 55$	T_1
$35 \leq T < 55$	$55 \leq T < 75$	T_2
$T \geq 55$	$T \geq 75$	T_3

注：洞内空气温度和岩壁温度中只要一个指标满足，即可判定为该高地温等级。

9.8.3 不同高地温等级宜采用下列降温措施：

1 T_1 等级采用非人工制冷降温：主要采用加强通风结合喷洒冷水及冷水喷雾方式实现洞内降温的措施。

2 T_2 等级采用人工制冷降温：在加强通风等不足以消除热害时，安装制冷机、固定或移动式空调、冷水循环及运送冰块等实现降温的措施。

3 T_3 等级一般不适宜采用掘进机，如确实需要采用掘进机施工，需要进行高地温掘进机掘进施工专项研究。

9.8.4 掘进机掘进高地温隧洞应制定专项施工方案，应包含下列内容：对降温措施及其组合形式的降温效果进行计算分析，进行合理的选用。掘进机选型阶段应针对高地温作业区

域设计降温系统。

9.9 有害气体

9.9.1 有害气体补充勘察和监测分析，应包含下列内容：

- 1 查明有害气体的性质和来源。
- 2 超前钻孔探明掌子面前方有害气体情况。
- 3 实时监测洞内有害气体种类和浓度。

9.9.2 掘进机施工隧洞有害气体等级划分见表 9.9.2，有害气体还应符合 SL 378 的有关规定。

表 9.9.2 有害气体含量等级划分

瓦斯 / %	<0.5	0.5 ~ 1	>1
H ₂ S / ppm	<6.6	6.6 ~ 15	>15
有害气体等级	G ₁	G ₂	G ₃
注：满足其中 1 条即可划分对应等级，当同时满足不同等级的划分条件时，最终按照最高级别等级划分。			

9.9.3 具有 G₁ 等级的洞段可对掘进机电和照明设备进行防爆设计，加大通风降低有害气体浓度，增加有害气体监测频率；具有 G₂ 等级的洞段应在防爆设计的基础上，在浓度达到 G₂ 等级后自动切断掘进机供电，有序撤出施工人员后采取措施降低有害气体浓度；具有 G₃ 等级的洞段应专门开展有害气体防治专项研究。

9.10 放射性物质

9.10.1 存在放射性风险的地层应查明放射性物质类型，测定环境地表γ辐射剂量率、隧洞工程中空气中氡浓度及氡离子体α潜能浓度和地表地下水中放射性核素浓度等项目。

9.10.2 放射性等级划分见表 9.10.2，放射性物质浓度还应满足 GB 18871 规定。

表 9.10.2 放射性等级划分表

辐射工作场所分区	监督区	控制区
放射性等级	R ₁	R ₂

9.10.3 不同放射性等级宜采用表 9.10.3 中的措施。

表 9.10.3 放射性处理措施

放射性风险等级	辐射工作场所分区	处理措施
R_1	监督区	定期监测并评价放射性水平
R_2	控制区	加强放射性项目监测频率；加强通风、洒水，降低放射性物质浓度；控制作业时间，对施工人员采取一定的防护措施

10 安全监测

10.1 一般规定

10.1.1 全断面岩石掘进机施工隧洞监测除满足本规范要求，还应满足 SL 764 的要求。

应根据隧洞的围岩条件、施工环境、结构形式、施工方法、进度要求以及运行要求等设置。

10.1.2 监测设计应具有针对性、适用性、经济性、科学性，宜采用新技术、新材料、新方法。监测仪器要求稳定、可靠、实用、先进，适合实现自动化监测。

10.1.3 隧洞应重点监测围岩、支护结构、进出口边坡的稳定性，以及交叉建筑物、相邻建筑物等的稳定性。

10.1.4 应结合隧洞工程主要地质问题、围岩结构、衬砌形式、受力状态、施工方法及支护参数等，选择最不利和具有代表性的洞段，布置监测断面。

10.1.5 监测仪器安装埋设应合理安排，在尽量降低与掘进机施工相互干扰的情况下，及时安装、埋设、观测和保护，并编制仪器档案。

10.1.6 监测项目、安装方法、观测方法、观测频次等应满足设计要求，做到监测资料连续，数据真实可靠。

10.1.7 监测数据应及时进行整理和分析，并反馈设计，验证和优化设计参数，监控施工和运行期安全，实现动态设计、信息化施工及智慧化运行。

10.1.8 施工期仪器安装后应尽快投入正常观测，具备条件后应采用自动化监测。

10.1.9 根据监测与巡查结果，对隧洞安全状态作出分析判断，若发现有影响工程安全的异常变化，应及时加固处理。

10.1.10 应定期对监测设施进行检查、维护和鉴定，监测设施不满足设计要求时应进行维修或更新。

10.2 隧洞周边环境监测

10.2.1 监测范围应包括：隧洞进出口边坡、交叉建筑物（铁路、公路、桥梁、油气管线等）、邻近建筑物、交叉河道、其它影响隧洞安全的不良地质环境。

10.2.2 应根据隧洞进出口边坡的等级、地质条件及边坡对隧洞安全运行影响程度等确定边坡的监测项目，一般布置表面变形、内部变形、地下水位等监测项目。如果边坡采用锚索、锚杆及抗滑桩等加固措施，应布置锚索测力、锚杆应力等应力应变监测设施。

10.2.3 应根据隧洞交叉建筑物的地质条件、覆盖厚度、与隧洞的交叉形式、交叉建筑物规模和重要性及结构特点，参考隧洞施工及运行对交叉建筑物影响的结构计算成果，结合洞内监测布置情况，在交叉建筑物上及隧洞影响区地表布置沉降位移、水平位移、倾斜等监测项目，必要时可以布置裂缝、应力应变等监测项目。

10.2.4 应根据邻近建筑物规模、结构特点、重要程度、与隧洞距离、覆盖厚度、地形地质条件等，布置邻近建筑物监测设施，宜布置地表沉降、建筑物沉降、倾斜及开裂等监测项目。

10.2.5 应根据河道和沟谷与隧洞交叉形式、覆盖厚度、地质条件等，并结合洞内监测布置确定交叉范围河道和沟谷的监测项目，宜布置地下水位、沉降、水平位移等监测项目，必要时对内部水平位移进行监测。

10.2.6 对影响隧洞安全的不良地质环境，应根据具体情况布置监测项目，宜布置地下水位、沉降等监测项目。

10.2.7 当隧洞施工期及运行期的地下水变化对生态环境有影响时，应设地下水位及水质监测项目。

10.2.8 结合枢纽或其它水工建筑物工程布置降雨量、气温等环境监测项目。

10.3 洞内监测

10.3.1 施工期监测技术应符合下列要求：

1 洞内施工期监测项目应结合运行期安全监测项目进行设计，布置变形、渗流、应力应变及温度等监测项目。

2 洞内施工期安全监测断面及测点布置，应根据地质条件、围岩结构、衬砌结构形式、受力状态等选择具有代表性的洞段或关键部位。

3 变形监测项目应包括围岩内部变形、收敛变形、顶拱下沉、底拱上抬等监测项目，TBM 施工期监测满足下列要求：

1) 敞开式、混合式 TBM 施工期应重点监测一次支护和围岩稳定情况，以一次支护结构体为主，采用单点或多点位移计等进行监测，如塌孔卡钻等造孔困难洞段，可采用阵列式位移计等监测钢拱架内缘位移；或采用钢板计等监测仪器。

2) 护盾式掘进机施工期应重点监测管片和围岩内部变形，以管片内外侧为主，采用单点或多点位移计、测缝计等监测。

4 渗流监测项目应包括涌水量、衬砌内外水压力、地下水位等监测项目，采用量水堰、流量计、渗压计等进行监测。

5 应力应变及温度监测项目应包括围岩压力、一次支护结构应力应变、管片结构应力应变等监测项目，TBM 施工期监测满足下列要求：

1) 敞开式、混合式 TBM 施工期应以布置一次支护结构体为主，宜采用土压力计、锚杆应力计、钢板应力计等进行监测。

2) 护盾式掘进机施工期应以布置管片内外侧及预埋管片内部为主，宜采用土压力计、钢筋计等进行监测。

6 围岩收敛监测应在施工期进行，监测施工安全，动态修正确定支护参数和支护时机，宜满足以下技术要求：

1) 宜布置在地质条件不良洞段，主要包括断层破碎带、膨胀岩、岩土过渡段、V

类围岩、高地应力、软岩等洞段，且在一次支护后应继续监测。

- 2) IV类围岩也宜布置收敛监测，工程量可相对减少。
- 3) III类围岩根据设计支护需要，可少量布置收敛监测断面。
- 4) I、II类围岩洞段可不进行收敛监测。
- 5) 顶拱下沉和底拱上抬应结合收敛监测断面布置。

10.3.2 运行期监测应符合下列要求：

1 洞内运行期监测项目及仪器应在施工期安装埋设，并入运行期自动化监测系统长期监测。监测项目包括围岩与支护接触缝开合度、沉降、倾斜、裂缝、外水压力、内水压力、围岩压力、钢筋应力、混凝土应变等。TBM 施工隧洞应满足以下技术要求：

- 1) 敞开式、混合式 TBM 施工隧洞监测仪器设施，应结合现浇钢筋混凝土衬砌设计要求埋设。
 - 2) 护盾式埋设的管片钢筋应力计等监测仪器设施，应在管片钢筋笼制作时进行安装，并做好标记和保护措施。
- 2 运行期洞内监测仪器设施重点布置在不良地质条件洞段，应满足以下技术要求：
- 1) 断层破碎带、膨胀岩、岩土过渡段、V类围岩、高地应力、软岩等洞段，应与围岩变形结合布置。
 - 2) I、II类围岩洞段可不布置结构监测。
 - 3) III、IV类围岩洞段宜监测断面，工程量可相对减少。
 - 4) IV、V类围岩洞段宜布置围岩与支护接触缝开合度、外水压力、内水压力、围岩压力、钢筋应力、混凝土应力应变等监测项目，应根据具体情况布置。
 - 5) 其它地质条件较好洞段应有针对性布置监测项目。
- 3 沉降、倾斜监测项目应主要布置在洞线出现下沉或结构出现明显问题的洞段；裂缝

监测布置在支护或衬砌出现明显裂缝的部位。

4 对覆盖较薄的洞段，宜在地面布置沉降变形测点和测斜管，监测地表沉降和围岩变形。

5 洞内围岩变形应与交叉建筑物、相邻建筑物监测结合布置。

10.4 特殊地质洞段防控监测方法

10.4.1 突涌水（涌泥）、塌方防控监测应遵守下列规定：

1 防控监测方法应使用长距离的隧洞地震波法等进行断层破碎带和岩溶等构造探测。

2 在异常段落应进行短距离的激发极化探测，综合判断前方岩体构造和含水体发育情况，并提前编制监控量测的专项方案。

3 采用防控监测方法综合判断为异常段时，应进行钻孔验证。

4 TBM 施工过程中应根据围岩变形对塌方灾害进行预警，还应对涌水量进行监测并综合围岩变形、破碎程度、涌水量的变化对突涌水灾害进行预警。

10.4.2 岩爆防控监测应遵守下列规定：

1 在地应力较高洞段，施工期应采用微震监测、声发射等技术对围岩进行必要监测，超前探测岩爆可能发生的位置及等级，采取泄压爆破技术超前释放地应力，降低岩爆等级和危害程度，并及时对预测有岩爆的位置加强支护，出护盾后立即进行收敛变形及应力等监测，并采取有效的防范措施。

2 合理控制掘进参数，如降低刀盘转速、加大刀盘扭矩以处理剥落型岩爆岩块；适当调整掘进速度和液压油缸推进力降低岩爆规模。

3 护盾式掘进机施工，应尽快安装管片、回填豆砾石及灌浆，以降低围岩切向应力，控制径向变形；根据岩爆轻微、中等、强、极强等级，旋转安装对应的轻、中、重型砼管片或重型钢管片等。

4 敞开式、混合式 TBM 施工，轻微岩爆采用轻型钢支撑支护；中等岩爆采用加密轻型钢支撑和钢筋排支护；强岩爆采用加密重型钢支撑和钢筋排等支护；极强岩爆采用重型钢管片支护。

10.4.3 TBM 施工应合理安排掘进进度、控制掘进参数，宜在进入预警段落之前提前检修，尽量不停机掘进通过。

10.4.4 敞开式、混合式 TBM 施工，出盾尾后宜根据围岩出露特征进行收敛变形、围岩压力、支护结构受力监测项目；护盾式 TBM 宜进行收敛、变形等监测。

10.5 监测成果与信息反馈

10.5.1 监测成果和计算应记录真实、标注明确、计算清楚和格式统一，并建立监测资料数据库。监测成果应包括巡视检查、变形、渗流、应力应变、环境量及专项监测等。

10.5.2 为保证监测数据的真实可靠及连续性，隧洞监测应满足以下要求：

- 1** 监测项目人员应相对固定，保证数据资料的连续性。
- 2** 监测仪器采用专人使用、专人保养、专人检校的管理。
- 3** 监测设备在使用前均应经过检校，合格后方可使用。
- 4** 监测项目在监测过程中必须严格遵守相应的实施细则。

10.5.3 监测资料整理应包括设计、埋设、观测、其他等资料，主要应该应包括下列内容：

- 1** 一次支护与二衬压力观测点布置图。
- 2** 埋设安装考证表。
- 3** 一次支护与二衬压力观测记录及报表。
- 4** 其他相关资料。

10.5.4 监测资料整编应包括成果统计表、测值过程线、初步分析等。

10.5.5 监测数据分析应包括趋势性分析、特征值分析、相关性分析、突变值判断等内容，如有异常，应检查计算有无错误和监测系统有无故障，经综合比较判断，确认监测物理量异常时，应及时上报，并应及时对工程进行相应的安全复核或专题论证。

10.5.6 监测数据应接入自动化系统自动观测，自动采集数据存入数据库，人工观测数据和监测档案应人工录入数据库，形成完整数据库。应编制监测月报、年报，并定期进行监测资料分析，分析成果及时上报。监测数据应接入整个工程自动化管理系统。

10.5.7 施工期应重点关注围岩稳定及其时空分布的关系，应对监测资料及时整理、分析、反馈，为优化设计、指导施工服务。运行期应重点分析支护结构应力和内外水压力，为隧洞结构安全评价提供依据。在充水试验、阶段验收、竣工验收、出现异常或险情状态时应进行资料分析，并提出资料分析报告；在充水试验、竣工验收时均应先做全面的资料分析，分别为充水试验、验收及运行提供依据。

10.6 控制值与预警

10.6.1 施工期隧洞周边允许位移相对控制值按表 10.6.1 中的数值执行。

表 10.6.1 施工期隧洞周边允许位移相对控制值（%）

围岩类别	埋 深 / m		
	< 50	50 ~ 300	300 ~ 600
III	0.10 ~ 0.30	0.20 ~ 0.50	0.40 ~ 1.20
IV	0.15 ~ 0.50	0.40 ~ 1.20	0.80 ~ 2.00
V	0.20 ~ 0.80	0.60 ~ 1.60	1.00 ~ 3.00

注 1：周边位移相对值指两侧点间实测位移累计值与两测点间距离之比或拱顶下沉实测值与隧洞高度之比。
注 2：硬质围岩的取表中较小值，软质围岩的取表中较大值。
注 3：本表所列数值可在施工过程中通过实测资料积累，并根据工程类比，对隧洞、洞室周边允许相对收敛值进行修正。

10.6.2 如果实测位移发展速度无明显下降，且实测位移相对值已接近表 10.6.1 中的规定数值，同时支护混凝土表面出现明显裂缝，或者实测位移速度出现急剧增长时，应立即采取措施，增加观测频次，必要时应增设监测断面。

10.6.3 围岩与支护结构的位移速度判别标准按以下规定执行：

- 1 位移速度持续大于 1.0mm/d 时，围岩与支护结构处于急剧变形状态。
- 2 位移速度为 0.2mm/d ~ 1.0mm/d 时，围岩与支护结构处于缓慢变形状态。
- 3 位移速度小于 0.2mm/d 时，围岩与支护结构达到基本稳定。

10.6.4 施工阶段设计单位宜根据 10.6.1、10.6.3 及 GB 50086，结合地形地质条件、设计成果，提出工程施工期变形和锚杆应力等控制指标和预警值，并根据实测资料积累进行控制指标的修正；施工阶段和试通水阶段，宜根据设计成果，并参考类似工程经验，对一些重要部位的永久监测项目提出设计预警指标。投入运行后，宜定期根据实测资料建立数学模型，提出或调整运行监控指标。

10.6.5 为确保敞开式、混合式掘进机施工不良地质洞段安全，应结合围岩变形监测、支护结构应力应变监测等监测项目，共同控制，相互验证，提前预警。

10.7 巡视检查及监测频次

10.7.1 TBM 施工隧洞巡视检查应建立完善的巡查管理制度，落实巡查人员名单，进行巡查内容交底。巡查内容和要求可参照 SL 764 执行。

10.7.2 隧洞围岩变形监测支护结构及围岩变形监测频次应按表 10.7.2 确定。

表 10.7.2 变形监测频次

变形速度 / (mm/d)	施工状况	测量频次
> 10	出盾尾	2 次/天
10 ~ 5	距盾尾 0.5 ~ 1.5 倍洞径	1 次/天
4 ~ 1	距盾尾 1.5 ~ 3 倍洞径	1 次/2 ~ 3 天
< 1	距盾尾 > 3 倍洞径	1 次/7 天

10.7.3 当隧洞掌子面接近地表交叉建筑物、相邻建筑物时，应监测地表沉降变化。若地表沉降变化较快时，应加密监测，直至掌子面远离建筑物，当地表沉降基本稳定时可减少监测频次。

11. 掘进信息化管理系统

11.1 一般规定

11.1.1 应建立岩石掘进机法隧洞工程信息化管理系统，对施工数据实施统一管理。

11.1.2 掘进信息化管理系统应具开放性、集成性、可扩充性、可维护性及系统兼容性，并有安全措施保障。

11.1.3 掘进信息化管理系统应至少实现以下基本功能：

- 1** 远程监控。
- 2** 数据存储与备份。
- 3** 数据统计。
- 4** 数据共享。
- 5** 异常数据报警。
- 6** 报表输出。

11.1.4 宜通过收集本工程或类似工程的历史工作数据、围岩数据及历史灾害数据，以实现掘进状态的风险判识。

11.1.5 宜通过对关键部件的健康评估、故障诊断、维保预测以及剩余寿命曲线等实现设备风险判识与评估。

11.1.6 宜对当前掘进机装备状态数据、施工操作参数、地质围岩情况对备件需求进行实时预测，动态优化备件调度与库存管理。

11.2 系统技术要求

11.2.1 掘进信息化管理系统应至少包括数据采集、数据监控、数据储存分析、数据管理四层结构。

11.2.2 掘进信息化管理系统应采用标准化、网络化、分布式的系统结构，具有可靠性

和安全性要求，同时符合 ISO/OSI 开放系统互联标准。

11.2.3 掘进信息化管理系统应具有供二次开发的标准接口及数据共享开放接口。

11.2.4 硬件平台应符合现代工业标准，具有一定市场销售规模的通用化、系列化的标准产品，并有可靠的维修服务支持，存在有其他替代品的可能。

11.2.5 掘进信息化管理系统应具备软硬件的扩充能力，支持系统结构的扩展和功能升级，并应有一定容错机制。

11.2.6 掘进信息化管理系统普通网线通讯电缆应符合超五类线电缆要求，电缆和通讯电缆应符合工业以太网专业通讯电缆要求。

11.3 掘进信息采集及预警

11.3.1 应收集下列工程基本信息：

- 1 施工单位工程建设信息。
- 2 隧洞设计线路（平面图、剖面图）。
- 3 施工区域地质报告及可能涉及的施工危险。
- 4 设备配置的适应性。
- 5 风险级别管控措施。
- 6 紧急处理方案及措施。
- 7 施工完成后的总结及其相关技术文件。
- 8 现场地质素描图。
- 9 施工日志。

11.3.2 应至少收集掘进机施工过程中的下列人员相关信息：

- 1 项目经理。
- 2 值班领导。

3 当班班长。

4 当班司机。

5 维护保障人员。

11.3.3 掘进机施工设备运行信息主要包括掘进机运行数据、掘进机导向数据、隧洞作业环境数据和项目施工数据等，基本要求见附录 E。

11.3.5 根据收集的地质勘探数据与掘进过程记录的地质数据对前期地质数据进行校对，搭建地质数据库，分析地质数据特征，统计可视化地质图。

11.3.6 宜针对各类典型地质条件，综合采用地质风险识别方法，建立典型地质条件的地质风险预警评价机制。

11.3.7 在设备主机主控室设置视频显示装置，视频显示的内容至少包括刀盘转速、贯入度、掘进速度、油缸压力、推力、扭矩等信息。

11.3.8 视频监控设备设置应符合 GB/T 28181 的要求，监控位置应至少涵盖掘进机主梁、撑靴、后支撑、钢轨敷设区、皮带机出渣口、后配套尾部六个部位。

11.3.9 数据采集频率应符合下列要求：

1 设备实时数据应至少 1s 采集一次(无论掘进机是否在推进，每天 24 小时不间断的采集)。

2 设备实时数据更新频次至少为 1min/次。

3 远程监控数据的传输频率，应至少每 5s 传输 5s 的全体数据。

4 远程监控页面数据更新频次至少为 30s/次。

5 数据实时采集通信延迟不高于 10s。

11.4 数据存储

11.4.1 数据存储管理应用接口应支持 HTTP 协议 (RFC 2616)。

11.4.2 数据存储类型应包括结构化数据存储、日志数据的存储、IoT 数据和文件数据的存储。

11.4.3 应对冗余、缺失数据作出标注和解释，并对掘进机司机频繁改变设定值等异常行为操作行为作出记录和说明。

11.4.4 数据存储周期不宜大于 1s。

11.4.5 数据库储存应分类存储，包括结构化数据库、非结构化数据库、分布式文件系统等类别，并设定时间节点形成信息记录。

11.4.6 应具备数据的备份和恢复功能，备份数据应与原数据具有相同的访问控制权限和安全储存要求。

11.4.7 应提供授权用户恢复数据功能，授权用户可自主选择特定时间节点的备份文件对数据信息进行有效恢复，储存数据时长不低于 30 天。

11.4.8 全部数据应采用电子文件形式存档，并作为竣工验收文件的一部分。

11.5 信息安全要求

11.5.1 信息安全方面应至少包括：设备安全、数据安全、内容安全和行为安全，应采用防火墙技术、信息加密技术、身份认证技术和用户权限管理来保证信息安全。

11.5.2 隧洞施工过程中掘进机参数设置、修改、查询及信息采集设置应进行权限管理。

11.5.3 掘进机系统信息数据传输应准确、可靠、有效。

11.5.4 掘进机系统应采用模块对用户的操作建立安全日志，为系统安全管理和系统故障维护工作提供依据。

11.5.5 掘进信息的储存应建立管理制度，分级保存并建立台账管理，做好相关记录。

11.5.6 掘进信息化管理系统应具备公安部信息安全等级保护管理办法规定的第三级安全保护等级。

11.6 TBM 掘进智能化

11.6.1 宜建立在线掘进参数、设备运行状态、异常工况处理专家系统，开展隧洞掘进施工远程专家咨询和讨论。

11.6.2 对于具有人工智能开发要求大数据，应根据大数据挖掘、模型训练等要求设定数据采集频率和其他特征参数的格式。

11.6.3 对掘进信息化管理系统进行智能化设计时，系统宜具有人-机-岩逻辑分析能力，主要包括以下几方面：

- 1** 围岩地质条件分析对比。
- 2** 掘进机关键部件的故障诊断、健康评估和性能预测。
- 3** 施工过程中合理优化施工衔接工序、调节作业调度及分配设备资源。
- 4** 应对故障的高效备件管理与设备管理。

11.7 系统维护

11.7.1 系统维护应至少包括以下内容：

- 1** 设备管理。对网络设备、服务器设备、操作系统运行状况进行监控，对各种应用支持软件及各种通用或特定服务的监控管理。
- 2** 数据、存储及容灾管理。对系统和业务数据进行统一存储、备份和恢复。
- 3** 信息安全管理。按 GB/T 31496 执行。

11.7.2 应建立系统的维护管理制度，包括日常管理和周期管理。

12 TBM 施工安全

12.1 一般规定

12.1.1 施工进场前，应设立安全生产管理机构，建立安全生产目标，制定和落实安全生产管理制度。

12.1.2 施工进场前，应分析工程特点、工程地质和水文地质概况，对不良地质条件、施工难度较大、风险高的洞段编制专项施工技术方案。

12.1.3 施工进场前，应根据全断面岩石掘进机的类型及特点编制相应的安全操作规程，并对操作人员进行针对性培训。

12.1.4 施工进场前，应结合工程施工方案编制 TBM 组装、检修、拆卸起重机设备的安全操作要求。

12.1.5 应急救援应以人为本，优先保护现场人员的人身安全。

12.2 安全管理

12.2.1 各参建单位应遵守本规范和其他有关安全生产的法律法规，围绕安全生产总目标，结合全断面岩石掘进机法隧洞工程特点，建立健全安全生产责任制和安全生产规章制度。

12.2.2 应根据工程所在地自然条件、工程环境、机电设备选型与布置等情况，确定 TBM 施工过程中劳动安全与工业卫生的主要危险因素和危害程度，制定针对性的安全生产措施、工业卫生措施及抢险应急预案。

12.2.3 掘进机施工前，应根据全断面岩石掘进机法隧洞工程施工特点，编制安全生产措施计划，建立管理人员、特种作业人员、企业员工安全生产教育培训制度，提高安全生产技能，增强事故预防和应急处理能力。

12.2.4 设计单位应根据隧洞工程特点、机电设备和新技术推广等情况，在设计中提出保障施工作业人员安全和预防生产安全事故的措施建议，并对施工单位和作业人员进行安全

技术交底。

12.2.5 施工单位必须设置安全生产管理机构或者配备专职安全生产管理人员，并履行

下列职责：

- 1 拟订本单位安全生产规章制度、操作规程和生产安全事故应急救援预案。
- 2 组织本单位安全生产教育和培训，如实记录安全生产教育和培训情况。
- 3 督促落实本单位重大危险源的安全管理措施。
- 4 组织本单位应急救援演练。
- 5 检查本单位的安全生产状况，及时排查生产安全事故隐患，提出改进安全生产管理的建议。
- 6 制止和纠正违章指挥、强令冒险作业、违反操作规程的行为。
- 7 督促落实本单位安全生产整改措施。

12.2.6 特种作业人员应按照《特种作业人员安全技术培训考核管理规定》，进行特种专业安全作业培训、资格考核，取得特种作业操作证书后方可上岗。

12.3 劳动安全

12.3.1 施工现场防机械伤害安全作业应符合以下规定：

- 1 对人员可能触及范围内有明露的传动、转动机件或有尖锐的棱、角、突起设备时，应装设防护装置、安全标志或设置安全运行区。
- 2 刀具检查或更换时，必须在检修人员进入刀盘前将操作室控制开关转换到本地控制并翻牌；刀具更换时禁止垂直交叉作业；拆卸刀具时应避开滚刀运动方向，装好夹具、挂好吊钩、谨慎操作。
- 3 管片吊装作业前，应检查钢丝绳是否完好，有断丝时及时更换；起重、吊运作业时臂下严禁站人。

- 4 喷混作业过程中，喷头、注浆管前方严禁站人。
- 5 皮带输送机出渣时作业人员不得从皮带输送机下面穿过或上面跨越。

12.3.2 施工现场防电气伤害安全作业应符合以下规定：

- 1 隧洞施工用电应布设规范、绝缘良好，严格执行“一机一闸一箱一漏保”的要求。
- 2 照明系统和动力系统用电应分别设置，严禁混合使用。
- 3 更换任何电气元件和电缆都应恢复原有电气符号标识，严禁不恢复或更换不同标识。
- 4 隧洞施工用电应充分考虑高温、防潮、防砸、防震、防火、防爆，选用特殊绝缘构造的加强型电器。
- 5 电气维保人员应正确穿戴电工专用防护用品，对电气柜、开关箱、电缆接头、接地、绝缘等是否完好，漏电过载、短路等保护装置是否灵敏可靠，要严格按照规定定期检查维护保养。
- 6 隧洞施工电器设备应按有关规程安装漏电保护器，避免因遇水短路造成人员伤害。

12.3.3 高压用电应符合以下规定：

- 1 高压区域应划出范围，做好围栏防护及安全牌提示。
- 2 高压用电应严密注意高压电缆中途破损与接头漏电，开闭所严禁关闭零序电流保护。
- 3 高压电缆悬挂离地距离不得低于 1.5m，接头应设立托挂装置，不得直接悬空。
- 4 拆卸高压接头前，操作人员应做好防护措施，须穿戴大于高压等级的绝缘靴、绝缘手套。
- 5 接头拆卸应作验电测试，且放电之后方可作业。
- 6 安排专人负责高压电缆的收放，避免掘进过程中拉断电缆，放出的电缆应及时挂于洞壁。
- 7 掘进机高压电缆应设置独立线槽，线槽拐角须做好防护，防止掘进过程中的机械振

动。

8 检查维护变压器时，应断开负载，切断环网柜高压开关，合上环网开关柜接地刀，挂好警示牌后方可开盖检查维护。

9 严禁在高压区域逗留休息。

12.3.4 施工现场防坠落伤害安全作业应符合以下规定：

1 高空作业人员和搭设高空作业安全防护设施的人员，应按照《特种作业人员安全技术培训考核管理规定》，进行高空作业安全教育培训，经考核合格后，方可持证上岗。

2 高空作业人员必须按规定配备个人劳动防护用品，并正确系戴。

3 高空作业所用工具、材料严禁投掷，多工种立体交叉作业的安全间距和安全隔离（防护）装置必须符合 JBJ 80 相关要求。

4 安装、拆除的钢模板、脚手架，严禁堆放在楼层边口或通道口。

5 通道口和上料口应搭设安全隔离棚或防护棚。

12.3.5 施工现场防洪、防淹安全作业应符合以下规定：

1 在洪水可能进入的设施、场地，应根据需要设置相应的防洪工程措施。

2 如遇突涌水时，施工作业人员应立即避开正面突水点，并迅速撤离至隧洞内设置的紧急避险场所，进行自救的同时使用急救通信设施向洞外人员呼救。

3 TBM 掘进过程中，要做好涌水超前预报，设排水孔引排地下涌水，并安排专人对排水沟、排水管路进行巡检，确保排水通畅。

12.3.6 隧洞内运输安全应符合以下规定：

1 机车司机的配备应遵循定人、定机、定岗原则，且必须经培训、资格考核后，持证上岗。

2 机车司机应熟悉线路状况、道岔位置以及安全警示标志。

- 3 应设专人对机车进行统一指挥调度，机车发车必须遵从调度安排。
- 4 应设专人负责运输轨道的巡检和维修。
- 5 维保人员应每天对车辆通讯设备、挂钩、制动装置等进行例行检查。
- 6 机车运行时乘车人员及携带的工具器材不得超出车厢，并严禁超载。
- 7 机车在进出洞或通过洞内临时施工地段时，必须减速鸣笛示警。
- 8 严格限制行车速度，机车在洞内作业地段、视线不良的曲线上、通过道岔和通过洞口平交道等处时，通过道岔时运行速度不宜超过 5km/h，其他地段在采取有效的安全措施后，最高速度不宜超过 20km/h。

12.3.7 施工现场防火防爆应符合以下规定：

- 1 应制定防火安全责任制，根据掘进机特点制定专门的防火预案。
- 2 易燃、易爆和可燃材料的存放场所与作业场地，应保持足够防火间距。
- 3 洞内应配设配备消防器材，消防器材应有专人管理，定期检验。
- 4 严禁采用易燃材料作为掘进机构件或铺设人行走道。
- 5 严禁在易燃、易爆环境中进行产生火花的施工和带电作业。

12.3.8 施工现场遭遇有毒有害气体地层应采取以下措施：

- 1 在关键部位设置有害气体监测仪及警报设施。
- 2 采取“以堵为主”的原则，防止其蔓延、扩散。
- 3 加强通风管理，降低隧洞内有毒有害性气体的浓度，严禁浓度超标施工作业。

12.4 工业卫生

12.4.1 应采取以下措施降低施工现场机械运转引起的噪声及振动：

- 1 液动力单元周围应安装隔声装置，锚杆钻机、风机等噪声较大的设备上应安装吸声、隔声、消声装置。

2 通风系统内，风机应配备消声器。

3 应加强设备管理，定期养护和润滑设备，避免设备运行异常时产生的噪声。

4 降噪、减振技术不能满足 GBZ 1 的有关规定时，应相应缩短作业时间或为作业人员配备有效的个人防护用品。

12.4.2 施工现场防电磁辐射伤害应符合以下规定：

1 应确保作业人员所受到的电磁辐射符合 GB 50706 及其他现行规范的有关规定。

2 作业人员进入超过最高容许量的地点或延长接触时间时，应按照规定穿戴好防辐射服装，佩戴好防辐射用具。

3 设备长时间暂停使用时，应及时关闭，避免产生辐射积累。

12.4.3 施工现场采光与照明应符合以下规定：

1 隧洞内作业场所应设置足够照明设施保证洞内的照明满足要求，并派专人进行定期检修，同时在易燃易爆工作区内照明设施还应满足防爆要求。

2 掘进机照明应分区域进行配电。

3 配备自带蓄电池的应急灯具或采用 EPS 应急电源供电，且能保证灯具在正常电源切断后自动点亮。

12.4.4 施工现场应设置通风和除湿设备，空气质量、温度、湿度标准应符合国家现行有关标准。

12.4.5 施工现场防水防潮控制应符合以下规定：

1 应根据实际情况，采取有效的洞内排水措施。

2 电气设备、控制站、变频柜、变压器应采取防水防潮湿工程措施，必要时配备除湿器。

12.4.6 施工现场防毒防泄漏控制应符合以下规定：

1 TBM 施工隧洞有害气体的控制标准应符合国家现行有关标准的有关规定。

2 施工中若发现有害气体时，应查明有害气体的性质和来源，超前钻孔探明掌子面前方有害气体情况，实时监测洞内有害气体种类和浓度。

3 应在 TBM 掘进机头架、连接桥、后配套等关键部位设置有害气体检测仪并安装警报。

4 当 TBM 掘进机通过含有气体的源岩和岩体时，应采取合理的措施，降低气体的释放和溢出。

5 应增加隧洞通风风机的风压，增加向洞内输送新鲜空气，加快洞内空气的流动性，降低有毒有害性气体浓度。

12.4.7 施工现场防放射性物质应符合以下规定：

1 放射性物质控制标准应按 GB 18871 相关规定执行。

2 存在放射性的地层应查明放射性物质类型，测定环境地表 γ 辐射剂量率、隧洞工程中空气中氡浓度及氡离子体 α 潜能浓度、地表地下水中放射性核素浓度等项目。

3 应定期监测并评价放射性水平，加强放射性项目监测频率，加强通风、洒水，降低放射性物质浓度，控制作业时间，对施工人员采取一定的防护措施。

4 工程使用的砂、石、水泥、商品混凝土等无机非金属建筑主体材料，其放射性指标限值应符合 GB 50706 的有关规定。

12.4.8 洞内防尘应符合以下规定：

1 隧洞内粉尘浓度不应超过国家标准限值要求。

2 有粉尘侵害的作业必须符合 GBZ 1 的有关规定，并制定好相应的防护措施。

3 岩石掘进机应配备通风和防尘设备，并确保除尘系统能在潮湿或干燥的空气条件下工作。

4 应加强设备改造，在 TBM 掘进机刀盘及传送皮带出渣位置增设降尘喷水装置，降低灰尘的扩散。

12.5 避险、逃生及救援

12.5.1 施工避险应符合以下规定：

- 1 隧洞洞口应设专人值班，建立隧洞进出人员动态管理制度。
- 2 进入施工现场的人员，必须按规定佩戴劳动防护用品。
- 3 施工现场危险部位，应设置明显的安全警示标志。
- 4 隧洞施工中，应按规定设置避难、急救场所。
- 5 避险、急救场所应设置防撞隔离栏和闪光红灯警示标志，及相应的通风、应急照明和通讯等设施。

12.5.2 安全逃生应符合以下规定：

- 1 隧洞施工应当设有符合紧急疏散要求，标志明显、保持畅通的出口。禁止锁闭、封堵施工场所的出口。
- 2 隧洞施工必须事先规划逃生路线，设置必要的应急救援通道和安全逃生通道，并配备逃生设备、救护器械和生活保障品等。
- 3 隧洞内交通道路及开挖作业等重要场所，必须设置事故应急照明、应急逃生标志及指示灯等应急照明系统。
- 4 应急照明应配备备用电源，并保证光照度符合要求。
- 5 隧洞施工期间通信系统必须保证畅通，必要时应采用远程监控系统，及时掌握现场情况，保证洞内外信息及时传达。

12.5.3 应急救援应符合以下规定：

- 1 参建各方必须建立应急组织机构及预警、指挥系统，指定专门的管理部门和人员负

责应急救援管理工作。

2 应当根据建设工程施工的特点、范围，对施工现场易发生重大事故的部位、环节进行监控，制定施工现场生产安全事故应急救援预案。

3 应与附近医院、消防队、临近施工队伍及其他救援组织建立正式的互助协议，并做好相应的安排预案，确保在应急救援中及时得到外部救援力量和资源的援助。

4 隧洞施工中必须配备救援物资和装备，并设专人管理，进行定期检查、维护和更新，确保应急救援物资和装备能随时投入使用。

5 根据现场实际情况，定期组织应急预案的桌面演练或模拟演练。演练前应结合施工环境改变和以往演练的情况制定计划，演练后应及时评审，并不断改进和完善应急救援体系。

6 隧洞内所有施工作业人员必须经过应急救援培训，严禁事故发生后违规指挥、冒险施救。

7 当隧洞施工中发生险情时，应迅速作出判断，确定相应的响应级别，并按响应级别启动应急救援程序，同时迅速开展事故的侦测、警戒、疏散、人员救助、工程抢险等有关应急救援工作。

8 事故抢救过程中应当采取必要措施，避免或者减少对环境造成的危害。

12.6 警告标志

12.6.1 隧洞内设置禁止标志应符合以下规定：

- 1 在易燃、易爆点必须悬挂禁止烟火、禁止吸烟等标志。
- 2 电气线路、设备必须悬挂禁止用水灭火等标志。
- 3 施工现场危险部位及不准行走通道位置，应悬挂禁止通行等标志。
- 4 施工机械启停按钮在检修过程中应悬挂禁止启动标志。
- 5 掘进机检修时应于主机室悬挂设备状态标志。

12.6.2 隧洞内设置警告标志应符合以下规定：

- 1** 施工现场、主要通道处应设置注意安全标志。
- 2** 在易燃、易爆点应悬挂当心火灾标志、当心爆炸标志。
- 3** 在用电设备的电路和有电危险部位应设置当心触电标志。
- 4** 在机械设备的传动、旋转、伸缩部位，应设置当心机械伤人的标志。

12.6.3 隧洞内设置其他标识应符合以下规定：

- 1** 洞内应设置交通安全标识和临时用电安全标识。
- 2** 应急物资仓库应设置应急物资标识。
- 3** 洞口应设置安全文明标识。
- 4** 生活区、油罐及材料库应设置安全标识，标明逃生通道。

附录 A 超前地质预报方法选用及规定

A.1 地震波法

A.1.1 地震超前预报方法采用了空间类观测方式，主要利用地震波反射信息来探测掌子面前方是否存在明显波阻抗差异的岩性变化、断层破碎带、溶洞等不良地质体。在钻爆法施工隧洞中，震源点与接收点的布置一般采用“前收后源”的空间阵列式观测方式，在条件允许时优先采用震源和检波器在隧洞轴向、水平和竖直三个方向上均具有一定间距的空间观测形式，有利于采集得到较全面的波场信息，结合数据处理中的联合滤波方法，能够实现前方反射信号的有效获取，提高探测效果。

A.1.2 地震波法超前预报应符合以下规定：

- 1 爆破激发应符合 GB 6722 的规定。
- 2 应根据现场测量数据计算每个炮点的偏移距，利用现场测量的接收探头套管或检波器姿态参数将三分量地震数据转换到建立的坐标系中。
- 3 应对处理后的地震信号进行能量均衡处理、倾角滤波处理，提取来自掌子面前方的反射波。
- 4 应进行纵横波分离处理，将 x、y、z 分量转换成 P、SH、SV 波进行反射处理。
- 5 应采用波速扫描对比分析方法，测算预报范围段的岩体波速、提高三位成像精度。

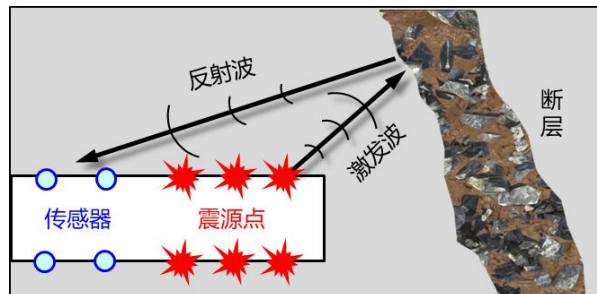


图 A-1 隧洞地震波法超前地质探测示意图

A.2 电法

A. 2. 1 激发极化超前预报技术是利用探测对象与周围介质之间的激电效应差异，通过观测和研究人工建立的激电场分布规律，进行含水构造超前探测的方法，而且不良地质与围岩激电效应差别越大，激电场改变越明显、越容易探测到，因此通过分析测量电极所探测到的电位变化，就可以了解到隧洞掌子面前方不良地质的位置和规模等情况。

与传统电阻率法不同，激发极化法用于探查隧洞掘进面前方含水异常等地质情况时，不仅受干扰较小，还可对含水率进行估算。根据现场条件不同，预报距离一般为 30m。

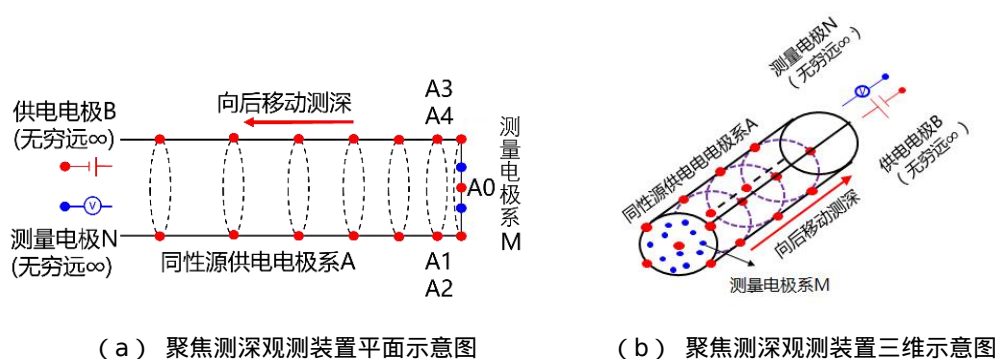


图 A-2 隧洞激发极化超前地质预报布置示意图

A. 2. 2 激发极化法超前预报应符合以下规定：

- 1 激发极化预报距离小于 10m 时，宜在掌子面四周均匀布置四个恒流供电 A 极，B 极应布置在隧洞出口方向，距 A 极的距离不应小于 10 倍最大测量距离，测量点宜在掌子面呈网状布置。
- 2 激发极化预报距离大于 10m 时，宜在距掌子面 0m、2m、6m、10m、20m 位置分别均匀布置四个恒流供电 A 极，B 极应布置在隧洞出口方向，距 A 极的距离不应小于 5 倍预报距离，测量点宜在掌子面呈网状布置。
- 3 TBM 掘进时，应将多个同源性供电电极 A 均匀搭载在 TBM 的护盾或边墙上，各电极间应进行电流屏蔽，测量电极应采用伸缩阵列方式布置在刀盘上。
- 4 TBM 停机探测时，TBM 刀盘应后退脱离掌子面，收起撑靴脱离边墙，减少干扰；
- 5 低电阻率、高极化率、长半衰时异常应为电阻率低、含水率高的破碎岩体或充水构

造和洞穴。

附录 B 围岩变形量和护盾摩阻力的计算方法

B. 0. 1 围岩变形量 u 可按下列公式计算：

$$u > 2R \left[\frac{\sigma_{cm}}{P_0} \right]^2 \quad (\text{B. 0.1-1})$$

式中 u ——围岩变形量，mm；

R ——隧洞半径，m；

P_0 ——原岩应力，MPa；

σ_{cm} ——岩体抗压强度，MPa，按以下公式计算。

$$\sigma_{cm} > \left\{ 0.0034 m_i^{0.8} R_b^{0.5} 1.029, 0.025 e^{(0.1 m_i)^{0.5}} \right\}^{(T. 5)} \quad (\text{B. 0.1-2})$$

式中 m_i ——Hoek-Brown 常数；

R_b ——岩石饱和单轴抗压强度，MPa；

T ——围岩总评分，按 GB 50487 取值。

B. 0. 2 护盾摩阻力 F_p 可按下列公式计算：

$$F_p > 228000 \alpha \mu \left(\frac{R L P_0}{6.35 R_b, 12.65(T. 5), 7.55 m_i, 32.85 E_1, 0.95 E R} \right)^{1.3} \quad (\text{B. 0.2})$$

式中 F_p ——护盾摩阻力，kN；

L ——护盾长度，m；

ER ——围岩预留变形量，mm；

E_1 ——岩石的弹性模量，MPa；

μ ——静摩擦系数，无润滑剂时取 0.45，有润滑剂时取 0.25；

α ——TBM 选型系数，单护盾取 1.0，敞开式取 1.2，双护盾取 0.6。

附录 C TBM 信息化施工电子化日志

表 C TBM 信息化施工电子化日志

工程名称：		TBM 编号：												
施工日期：		掘进班组：												
掘进环数		循环编号：												
本班进尺		开累进尺												
掘进桩号：		主司机：												
示例： 19:00~01:00 (07:00~13:00)	<p style="font-size: small; text-align: center;"> 换步 掘进 停机 19:31 20:31 21:31 22:31 23:31 00:31 </p>													
示例： 01:00~07:00 (13:00~19:00)	<p style="font-size: small; text-align: center;"> 换步 掘进 停机 01:31 02:31 03:31 04:31 05:31 06:31 </p>													
TBM 姿态记录														
掘进环数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
刀头	水平 mm(±)													
	垂直 mm(±)													
激光靶	水平 mm(±)													
	垂直 mm(±)													
水平趋势 mm/m(±)														
垂直趋势 mm/m(±)														
滚动角 mm/m(±)														
循环进尺(m)														
停机原因	A—刀盘	B—机械	C—电气	D—液压	E—润滑	F—皮带	G-其他							
	选项		原因说明											

附录 D 运输设备相关参数计算

D.1 有轨运输设备主要参数计算

D.1.1 洞室开挖石碴根据下式计算：

$$V_m > K_e(V_g, W, W^n) \quad (\text{D.1.1})$$

式中 V_m ——每米松散石碴量， m^3 ；
 K_e ——石碴松散系数，通常取 1.6；
 V_g ——设计断面开挖量（实方）， m^3/m ；
 W ——允许超挖量（实方）， m^3 ；
 W^n ——施工工艺附加超挖量（实方）， m^3 。

D.1.2 每一循环开挖石碴量根据下式计算：

$$V_{\text{循}} > K_e L_0(S, ES, ES^n) \quad (\text{D.1.2})$$

式中 $V_{\text{循}}$ ——每一循环开挖石碴量
 S ——设计断面积， m^2 ；
 ES ——允许超挖断面积，按实际计算 m^2 ；
 ES^n ——由于施工工艺所引起的附加超挖断面积， m^2 ；
 L_0 ——循环进尺， m 。

C.1.3 每列车矿车数量根据下式计算：

$$n_1 > \frac{1}{M \cdot 1} \frac{AT_c}{60K_c V_c} \quad (\text{D.1.3})$$

式中 n_1 ——每列斗车数量，辆；
 A ——要求出碴生产率，根据 TBM 的掘进速度计算， m^3/h ；
 T_c ——列车往返循环时间， min ；
 K_c ——矿车车充盈系数，通常取 0.95；
 V_c ——矿车容积，根据矿车规格计算 m^3 ；
 M ——矿车组数，组。

D.1.4 列车往返循环时间根据下式计算：

$$T_c = K \sum_{i=1}^g \frac{L_i}{V_{ai}}, t_0 \quad (\text{D.1.4})$$

式中 K ——延迟时间系数，列车起动、停车减速及中途其他因素引起未能全速行驶的系数，取 1.75；
 L_i ——不同行速段运距， m ；
 V_{ai} ——不同地段平均行速， m/min ；
 t_0 ——在工作面、途中及卸碴停顿时间， min 。

D.1.5 机车的牵引功率按如下规定计算：

1 重车上坡起动的最大牵引能力根据下式计算：

$$Q_c = \frac{1000\varphi_s P_c}{W', W_i, \frac{35}{\sqrt{R}} 110J_p} P \quad (\text{D.1.5 - 1})$$

式中 Q_c ——重车上坡起动最大牵引能力, tf ;
 φ_s ——动时粘着系数 ;
 P_c 、 P ——分别为机车粘着重及机车自重, 一般取 $\rho_c = \rho$;
 W' ——重车起动基本阻力, kgf/t ;
 W_i ——坡度阻力 (取最大纵坡千分数的绝对值), kgf/t ;
 R ——线中曲线半径, m ;
 J_p ——起动加速度, m/s²。

2 重车下坡制动的最大能力根据下式计算 :

$$Q'_c = \frac{1000\varphi_b P_c}{\frac{110v}{2L} \cdot W_0, W_i} P \quad (\text{D.1.5 - 2})$$

式中 Q'_c ——重车下坡制动的最大能力, tf ;
 φ_b ——制动时粘着系数 ;
 v ——允许最高行车速度, m/s ;
 L ——列车制动距离, m ;
 W_0 ——重车运行时基本阻力, kgf/t。

3 重列车上坡运行最大牵引能力根据下式计算 :

$$Q''_c = \frac{1000\varphi_0 P_c}{W_0, W_i, \frac{35}{\sqrt{R}}} P \quad (\text{D.1.5 - 3})$$

式中 Q''_c ——重列车上坡运行最大牵引能力, tf ;
 φ_0 ——运行时粘着系数。

D.2 带式输送机功率理论计算法 (资料性附录)

D.2.1 圆周力按以下公式计算 :

$$F_\mu = C f L g \left(q_{RO}, q_{RU}, \right) 2q_B, q_C \frac{v}{g}, q_C g H, F_{s1}, F_{s2} \quad (\text{D.2.1})$$

式中 F_μ ——圆周力, 单位为牛顿, N ;
 C ——圆周力计算系数 ;
 f ——模拟摩擦系数 ;
 L ——带式输送机长度, m ;
 g ——重力加速度, m/s² ;
 q_{RO} ——承载分支托辊每米长旋转部分质量, kg/m ;
 q_{RU} ——回程分支托辊每米长旋转部分质量, kg/m ;
 q_B ——每米长输送带的质量, kg/m ;
 q_C ——每米长输送物料的质量, kg/m ;
 q_C ——附加阻力, N ;

H ——提升高度，m；

F_{s1} ——特种主要阻力，托辊前倾摩擦阻力及导料槽摩擦阻力，N；

F_{s2} ——特种附加阻力，清扫器、卸料器及反转回程分支输送带的阻力，N。

D. 2. 2 传动滚筒轴功率按以下公式计算：

$$P_A = F_{\mu} \circ v / 1000 \quad (D.2.2)$$

式中 P_A ——传递滚筒轴功率，kW；

v ——输送带速度，m/s。

D. 2. 3 电机功率按以下公式计算：

$$P = K \circ P_A / \eta \quad (D.2.3)$$

式中 P ——电机功率，kW；

K ——功率备用系数；

η ——传动效率。

D.3 带式输送机功率经验计算法

D. 3. 1 传动滚筒功率按以下公式计算：

$$P_A = k_1 L_n V, k_2 L_n Q, 0.00273 Q H^* k_3, \mathring{a} P \quad (D.3.1)$$

式中 k_1 ——空载运行功率系数；

L_n ——水平带式机机长，m；

k_2 ——物料水平运行系数；

Q ——额定输送能力，kg/s；

k_3 ——附加功率系数；

$\mathring{a} P$ ——附加功率，kW。

D. 3. 2 当导料槽长度不大于 3m 时可忽略不计附加功率 $\mathring{a} P$ ，当导料槽长度大于 3m 时计算方法按以下公式计算：

$$\mathring{a} P = 0.09 \sim 0.115^* \circ L \quad (D.3.2)$$

式中 L ——为超过 3m 的导料槽长度值，m。

D. 3. 3 电机功率计算方法按以下公式计算：

$$P = K \circ P_A / \eta \quad (D.3.3)$$

式中 K ——功率备用系数；

η ——传动效率。

附录 E 掘进机施工设备运行信息基本数据

表 E 数据采集表

数据类型	采集数据		掘进机				备注
			敞开式岩石隧洞掘进机	单护盾岩石隧洞掘进机	双护盾岩石隧洞掘进机	硬岩/土压多模式掘进机	
一、掘进机运行数据	刀盘	转速 r/min	√	√	√	√	
		扭矩 kN·m	√	√	√	√	
		振动 m/s ²	○	○	○	○	
	土仓	压力 MPa	-	-	-	√	
	前闸门	状态 开关量	-	-	-	√	
	顶护盾	压力 MPa	√	-	-	-	
		行程 mm	√	-	-	-	
	侧护盾	压力 MPa	√	-	-	-	
		行程 mm	√	-	-	-	
	伸缩盾	压力 MPa	-	-	√	-	
		位移 mm	-	-	√	-	
	主驱动电机 (电驱)	电流 A	√	√	√	√	
		扭矩 kN·m	√	√	√	√	
		转速 r/min	√	√	√	√	
		温度 ℃	√	√	√	√	
	主驱动电机 (液驱)	压力 MPa	-	√	-	√	
	主驱动减速机	温度 ℃	√	√	√	√	
	主驱动润滑	温度 ℃	√	√	√	√	
		压力 MPa	√	√	√	√	
	集中润滑	流量 ml/min	√	√	√	√	
压力 MPa		○	○	○	○		

表 E (续)

数据类型	采集数据		掘进机				备注
			敞开式岩石隧洞掘进机	单护盾岩石隧洞掘进机	双护盾岩石隧洞掘进机	硬岩/土压多模式掘进机	
一、掘进机运行数据	主驱动密封	流量 ml/min	√	√	√	√	
		压力 MPa	○	○	○	○	
	楔块	压力 MPa	√	-	-	-	
	推进	压力 MPa	√	√	√	√	
		行程 mm	√	√	√	√	
		推力 kN	√	√	√	√	
		掘进速度 mm/min	√	√	√	√	
	辅助推进	压力 MPa	-	-	√	-	
		行程 mm	-	-	√	-	
		推力 kN	-	-	√	-	
		掘进速度 mm/min	-	-	√	-	
	后支撑	压力 MPa	√	-	-	-	
		行程 mm	○	-	-	-	
	螺旋输送机	转速 mm/min	-	-	-	√	
		扭矩 kN·m	-	-	-	√	
		压力 MPa	-	-	-	√	
	螺旋机后闸门	状态 开关量	-	-	-	√	
		开度 %	-	-	-	○	
	铰接	压力 MPa	-	√	√	√	
		铰接力 kN	-	√	√	√	
		行程 mm	-	√	√	√	
	盾尾密封	压力 MPa	-	○	○	√	
		流量 ml/min	-	○	○	○	
注浆	压力 MPa	-	√	√	√		
	注入量 m ³	-	√	√	√		

表 E (续)

	采集数据		掘进机				备注
			敞开式岩石隧洞掘进机	单护盾岩石隧洞掘进机	双护盾岩石隧洞掘进机	硬岩/土压多模式掘进机	
一、掘进机运行数据	豆砾石	空气压力 MPa	-	√	√	√	
	渣土改良	压力 MPa	-	-	-	√	
		流量 m ³ /h	-	-	-	√	
	给排水系统	温度 ℃	○	○	○	○	
		液位 mm	○	○	○	○	
		压力 MPa	○	○	○	○	
	稳定器	压力 MPa	-	○	√	-	
	液压站	温度 ℃	√	√	√	√	
		液位 mm	√	√	√	√	
		过滤器状态 开关量	○	○	○	○	
	压缩空气	压力 MPa	○	○	○	○	
	扭矩液压缸	压力 MPa	√	-	√	-	
		位移 mm	√	-	√	-	
	撑靴	压力 MPa	√	-	√	-	
		撑紧力 kN	√	-	√	-	
		行程 mm	√	-	√	-	
	管片拼装机	角度 °	-	○	○	○	
	主机带式输送机	带速 m/s	√	√	√	√	
	后配套带式输送机	带速 m/s	○	○	○	○	
主电机运行时间	h	○	○	○	○		
二、掘进机导向数据	里程	km	√	√	√	√	
	俯仰角	mm/m	√	√	√	√	
	滚动角	mm/m	√	√	√	√	
	机首水平偏移	mm	√	√	√	√	

表 E (续)

数据类型	采集数据		掘进机				备注
			敞开式岩石隧洞掘进机	单护盾岩石隧洞掘进机	双护盾岩石隧洞掘进机	硬岩/土压多模式掘进机	
二、掘进机导向数据	机首垂直偏移	mm	√	√	√	√	
	盾尾水平偏移	mm	√	√	√	√	
	盾尾垂直偏移	mm	√	√	√	√	
三、隧道作业环境数据	气体检测	浓度	○	○	○	○	
	超前地质预报	预报长度 m	○	○	○		
		电阻率 Ω·m	○	○	○		
		半衰时 s	○	○	○		
		地震波速 m/s	○	○	○		
		反射系数	○	○	○		
四、项目施工数据	项目	名称	√	√	√	√	
		地点	√	√	√	√	
		开始日期	√	√	√	√	
		地质情况	√	√	√	√	
	设备	生产厂商	√	√	√	√	
		类型	√	√	√	√	
		开挖直径	√	√	√	√	
		生产年份	√	√	√	√	
	施工	日进尺	○	○	○	○	
		月进尺	○	○	○	○	
		累计进尺	○	○	○	○	
		主轴承累计运行时间	○	○	○	○	

注：表中的√项为应监控参数，○为宜监控参数，-为不监控参数。

中华人民共和国水利行业标准

全断面岩石掘进机法
水工隧洞工程技术规范

Technical code for hydraulic tunnel project applying
full face rock tunnel boring machine

(征求意见稿)

SL 319 — 20XX

条文说明

目 录

1	总则.....	1
3	基本规定.....	3
4	地质勘察.....	5
4.1	一般规定.....	5
4.2	区域地质与地震勘察.....	5
4.3	工程地质勘察.....	6
4.4	勘察方法.....	7
4.6	TBM 施工适应性围岩分类.....	7
5	隧洞布置与设计.....	14
5.1	一般规定.....	14
5.2	隧洞线路设计.....	14
5.3	隧洞断面.....	15
5.4	水力计算.....	15
5.5	隧洞结构与支护.....	15
5.6	隧洞灌浆、防渗和排水.....	17
5.7	风险分析与评估.....	17
6	掘进机选型和技术要求.....	22
6.1	一般规定.....	22
6.2	设备选型和配置.....	22
6.3	技术要求.....	27
6.4	出厂验收.....	28

7	施工组织设计.....	29
7.1	一般规定.....	29
7.2	施工总体规划.....	30
7.3	施工通道、工业广场及辅助洞室.....	34
7.4	掘进机组装、检修、转场及拆卸.....	37
7.5	掘进、支护与衬砌.....	39
7.6	施工出渣及物料运输.....	41
7.7	施工通风、防尘及防有害气体.....	44
7.8	施工供水、供电.....	49
7.9	施工防排水.....	52
7.10	施工交通、施工工厂及总布置.....	54
7.11	施工总进度.....	57
8	掘进机施工.....	65
8.1	一般规定.....	65
8.2	施工准备与组织.....	65
8.3	TBM 设备制造和运输.....	66
8.4	设备组装、调试与步进.....	67
8.5	掘进与控制.....	67
8.6	超前预报.....	73
8.7	施工运输.....	75
8.8	支护与衬砌.....	76
9	不利地质洞段掘进施工.....	78

9.1	一般规定	78
9.2	断层破碎带	78
9.3	大变形围岩	80
9.4	岩溶（岩溶管道、溶腔）	81
9.5	突涌水（泥）	82
9.6	岩爆	82
9.7	超硬岩	88
9.8	高地温	89
9.9	有害气体	92
9.10	放射性物质	95
10	安全监测	97
10.1	一般规定	97
10.2	隧洞周边环境监测	97
10.3	洞内监测	97
10.4	特殊地质洞段防控监测方法	97
10.5	监测成果与信息反馈	98
10.6	施工期控制值与预警	99
10.7	巡视检查	100
11	掘进信息化管理系统	101
11.1	一般要求	101
11.2	系统技术要求	102
11.3	掘进信息采集及预警	102

11.4	数据存储.....	102
11.5	信息安全要求.....	102
11.6	水工隧洞掘进智能化.....	103
12	TBM 施工安全.....	105
12.1	一般规定.....	105
12.2	安全管理制度.....	106
12.5	避险、逃生及救援.....	106

1 总则

1.0.1 本条明确提出了本标准制定目的。

近年来，在水工隧洞施工中，全断面岩石掘进机的应用越来越多。对于大量的深埋长隧洞，采用全断面岩石掘进机法施工显示出了诸多优势。掘进机法与传统的钻爆法相比，开挖速度快、施工效率高，施工安全性好；掘进机法对隧洞围岩的扰动比较小，更有利于围岩的稳定；掘进机施工可采用较少的辅助支洞，对地下水等自然生态环境的改变与影响较小，也有利于生态环境的保护。在过去的 30 年中，中国的岩石掘进机应用经历了从依赖进口设备和国外企业施工到我国完全自主设计、自行制造、独立施工的跨越式发展历程，但是由于相关标准与规范的缺失，采用岩石掘进机法施工的水工隧洞在工程勘察、工程设计、施工设备选型、工程施工与不良地质处理、质量控制、隧洞运营期的监测等方面尚缺乏系统、统一的技术要求。

本技术标准的编制旨在建立采用岩石掘进机施工的前期地质勘探规范与标准，突出与常规钻爆法施工不同的勘察侧重点和围岩分类；建立不同地质条件下的开挖装备的选型和针对性技术要求；建立隧洞施工全生命周期的质量评价与管控体系，特别是在隧洞掘进机施工过程中遭遇复杂地质条件，如断层破碎带、软弱大变形围岩、突水突泥、高地应力与岩爆以及硬岩等，如何有效处置不良地质洞段，保证人员和设备安全；建立在隧洞运营期内实现隧洞的运营安全与健康状态诊断规范。

1.0.2 本条明确了本标准的适用范围和建筑物级别标准。对于特别重要、条件复杂或有特殊要求的水工隧洞的级别和有关设计标准应通过专门分析论证确定。

1.0.3 本条提出了采用全断面岩石掘进机法施工的水工隧洞在勘测、设计、施工时应遵循的基本原则。

1.0.4 本条结合掘进机法施工的特点，对水工隧洞现场施工提出了总体要求。

1.0.5 掘进机施工的顺利实施，必须建立在及时掌握和分析各类掘进信息和监测资料的基础上，本条对收集相关信息提出了原则要求。

1.0.8 本条说明了除本标准外的其他符合规范的申明。

3 基本规定

3.0.1 掘进机施工隧洞的勘察工作任务，一方面要为隧洞设计提供地质依据，另一方面要进行掘进机施工适应性评价，为掘进机选型和施工等提供地质资料。本条强调要根据掘进机的施工特点开展勘察工作。

3.0.2 特殊地质段指对掘进机施工安全有重大不利影响的大断层破碎带和岩溶发育洞段、严重突水突泥、岩爆、软岩大变形的洞段、存在高低温、放射性危害和有害气体的洞段等。

3.0.3 掘进机法与钻爆法的最大差别在于采用机械化非爆破开挖，掘进机施工可以实现开挖更长更深的隧洞，由于机械破岩与爆破破岩的差异，传统的隧洞设计一般是基于钻爆法开展的，而采用掘进机法施工的隧洞设计时就要考虑掘进机施工给设计带来的影响，例如在隧洞选线时宜尽量选择直线，进出口选址应考虑掘进机进场、组装的空间，隧洞的选型宜选用圆形断面。

3.0.4 隧洞施工方法选择是隧洞前期工作中需要进行比选的方案内容，不同的施工方法适用于不同的长度、断面、地形地质条件等情况，其工程投资、施工工期等也存在差异。钻爆法一般适用于各类围岩条件下长度不大的隧洞，各类断面形式都可以开挖；掘进机法一般适用于长度较大的隧洞，断面形式相对单一，地质条件的适应范围小，但掘进速度快、施工安全性好。采用钻爆法还是掘进机法施工，对隧洞设计方案影响较大，所以需要进行综合性技术经济比较。

3.0.5 在确定采用掘进机法施工后，还需要对采用哪种机型进行技术经济比较。考虑的主要因素包括围岩的物理力学特性、围岩分类、断层破碎带、围岩大变形、岩溶、高地应力、涌水突泥、有害气体等不良地质条件的分布情况以及需要采取的措施等。

3.0.6 掘进机法的施工组织设计也与钻爆法施工组织设计有所不同，尤其是在采用多台

掘进机施工的长隧洞工程中，需要考虑掘进机的进场运输、组装、检修、运行维护等所必须的施工条件，为保障掘进施工安全高效，供电、供水、通风、排水等条件也必不可少，同时还要考虑施工弃渣、排水对周边生态环境的影响。

3.0.7 在长隧洞施工中经常会遇到多种不利地质，掘进机应对不利地质条件的能力和措施将影响施工进度、质量和工程造价，为保障掘进机的顺利掘进，应在前期勘察设计中可能对遇到的不利地质条件进行细致的勘察和预测，制定处理各类不利地质条件措施预案。在许多情况下，尤其是对于深埋长隧洞工程中，前期工作中很难细致查清不利地质条件的真实情况，因此在施工掘进过程中需要对掌子面开展超前预报，进而对隧洞掘进和处理措施进行动态设计、动态控制。

3.0.9 隧洞的安全监测重点在施工期，采取适当的安全监测措施是为了保障隧洞施工人员、设备的安全，保障掘进施工的顺利进行。

3.0.10 建立掘进数据化信息分析系统可为分析人-机-岩的关系提供重要信息，对掘进信息的及时分析是保障隧洞施工安全、掘进顺利的重要手段。

3.0.11 针对深埋长隧洞和掘进机施工特点应开展相应的劳动安全与工业卫生设计，以保障劳动者在隧洞施工过程中的安全和健康。对于超长隧洞施工需研究采取必要的逃生、避险措施，制定合理的救援预案。

4 地质勘察

4.1 一般规定

4.1.1 本条规定地质勘察的目的。设计阶段应查明（对于深埋隧洞，应基本查明）隧洞基本地质条件，为设计提供依据，并提出 TBM 施工可能遇到的地质风险及部位；施工阶段应为保障 TBM 安全施工和减小地质风险提供地质资料。

4.1.2 工程地质勘察的前期准备工作十分重要。通过收集资料和现场踏勘，可以了解自然环境和工程条件，以便编制勘察大纲，合理组织勘察工作的实施。

4.1.3 本标准对 TBM 施工隧洞勘察工作提出总体要求，实际工作中要根据设计要求分阶段进行，各阶段地质勘察工作的精度应满足 GB 50487、SL 629 的要求。本条强调勘察过程中应加强与设计各专业协调和沟通，及时了解设计方案的变化并及时向设计专业反馈地质勘察的成果。

4.1.4 TBM 施工常常遇到塌方、岩爆、软岩大变形、突水突泥、高外水压力、有害气体等地质风险，对施工效率和施工安全影响较大。本条规定对于 TBM 施工可能遇到的重大工程地质问题，应开展专题研究和勘察工作。

4.1.5 本条要求根据勘察成果和 TBM 施工特点提出超前地质预报的建议，包括可能遇到地质风险的类型和程度、超前地质预报方法等。

4.2 区域地质与地震勘察

4.2.4 活断层是指晚更新世（10 万年）以来有活动的断层。

4.2.5 水工隧洞工程建筑物场地地震动参数的确定原则，系根据 GB 50487 的规定确定。

4.2.6 构造稳定性评价可参考表 4.2.6 - 1 和表 4.2.6 - 2。表 4.2.6 - 1 系根据《中国水利百科全书·水利工程勘测分册》（中国水利水电出版社，2004 年）的有关资料编制，表 4.2.6 - 2 系根据《水力发电工程地质手册》（中国水利水电出版社，2011 年）的有关资料

编制。

表 4.2.6-1 构造稳定性评价

参量	稳定性好	稳定性较差	稳定性差
地震动峰值加速度 a	$\leq 0.05g$	$0.1g \sim 0.3g$	$\geq 0.4g$
地震烈度 I	$\leq VI$	$VII \sim VIII$	$\geq IX$
活断层	8km 范围内无活断层	8km 范围内有长度小于 10km 的活断层, $M < 5$ 级地震的发震构造	8km 范围内有长度不小于 10km 的活断层, 并有 $M \geq 5$ 级地震的发震构造
地震及震级 M	$M < 5$ 级地震的活动	有 $5 \leq M < 7$ 级地震活动或不多于 1 次 ≥ 7 级的地震活动	有多次 $M < 7$ 级的强震活动
区域性重磁异常	无	不明显	明显

表 4.2.6-2 区域构造稳定性分级表

参量	稳定性好	稳定性较好	稳定性较差	稳定性差
地震动峰值加速度 a	$a < 0.09g$	$0.09g \leq a < 0.19g$	$0.19g \leq a < 0.38g$	$a \geq 0.38$
地震烈度 I	$\leq VI$	VII	$VIII$	$\geq IX$
活断层	近场区 25km 无活断层	8km 内无活断层	8km 范围内有长度小于 10km 的活断层, $M < 5$ 级地震的发震构造	8km 范围内有长度不小于 10km 的活断层, $M \geq 5$ 级地震的发震构造
地震与震级 M	$M < 4.75$	有 $4.75 \leq M < 6$ 的地震活动	有 $6 \leq M < 6.75$ 地震活动或不多于 1 次 $M \geq 7$ 地震活动	有多次 $M \geq 6.75$ 强地震活动
区域性重磁异常	无	不明显	较明显	明显

4.3 工程地质勘察

4.3.1 一般埋深隧洞的工程地质条件和水文地质条件包括隧洞沿线地形地貌、地层岩性、地质构造、物理地质现象、水文地质条件、岩石(体)物理力学性质等。隧洞塌方、突水突泥、岩爆、软岩大变形等是影响 TBM 施工安全和效率的重大地质风险,此外,高磨蚀性或超硬岩、高地温、放射性元素和有害气体也是影响 TBM 施工和人身安全的重要因素,需要进行重点勘察。

4.3.2 深埋隧洞地质条件复杂,前期勘察工作难度大,且目前勘察手段难以查明其工程地质条件。根据 GB 50487 规定,深埋隧洞的勘察深度要求做到基本查明其工程地质条

件，不遗漏重要地质问题和地质现象。此外，对于深埋隧洞，还需要对高地应力、高外水压力、高地温等进行勘察，评价高外水压力、突水突泥、岩爆、软岩大变形及高地温等对 TBM 施工的影响。

4.4 勘察方法

4.4.1 隧洞工程地质勘察要结合隧洞布置方案及各种勘察方法的特点、适用性，采用多种勘察方法进行综合勘察，各种勘察方法取得的成果要互相验证。

4.4.2 遥感解译具有宏观性、信息量丰富、快捷和成本低等优势，已成为工程地质勘察尤其是深埋长隧洞勘察的一个重要手段。对于遥感解译的重要地质现象要进行现场调查、复核。

4.4.4 每种物探方法都有其适用的地形地质条件，勘察时需根据隧洞埋深及具体的地质条件，选择合适的物探方法，并采用不同方法相互补充、相互验证。大地电磁测深法探测深度大，近年来，在深埋长隧洞勘察中应用广泛。

4.4.5 对于一般埋深隧洞，要求钻孔深度要达到隧洞底板以下一定深度；对于深埋隧洞，需要选择合适位置布置深钻孔对地质测绘和物探揭示的不良地质体进行验证，并尽可能在钻孔中进行各种测试工作。由于钻探难度大、成本高昂，深钻孔要布置关键部位，不要求所有钻孔深度都达到洞身位置。

4.4.6 本条在隧洞勘察常规岩石（体）物理力学性质试验基础上，提出了论证 TBM 施工地质条件适宜性的岩石（体）试验和测试项目。

4.6 TBM 施工适应性围岩分类

4.6.1 隧洞围岩质量的分级是水工隧洞设计和施工的重要基础条件，相关规范有 GB 50021《岩土工程勘察规范》、GB 50487、GB/T 50218《工程岩体分级标准》以及 SL 279，但以上规范涉及的围岩分类方法均是以隧洞围岩稳定性和支护措施为主要评判因素而提出

的,适用于以钻爆法为施工方式的隧洞,与掘进机法的施工原理与工作环境相差较大,难以满足掘进机法设计和施工围岩分类的需求。

在 GB 50487 中岩体基本分类的基础上,考虑掘进效率和不利地质条件对围岩分类的影响。一方面,与钻爆法施工相比,TBM 掘进施工对地质条件和岩体力学参数的依赖性较强、适应性较差,TBM 施工中遭遇岩爆、突涌水(泥)、塌方、大变形围岩等不利地质条件,会频繁导致掘进机卡机、损坏、报废甚至人员伤亡的重大事故;另一方面,对于在 GB 50487 中质量较好的 I 类或 II 类围岩,当出现岩石单轴抗压强度和磨蚀指数较高时(例如, $R_b > 150\text{MPa}$, $CAI > 4.0$),掘进机刀盘破岩是极其困难的,经常出现刀具磨损异常和频繁换刀,严重影响掘进效率,这是掘进机法施工必须要考虑的因素。因此,进一步考虑影响 TBM 施工的不利地质条件,能够凸显掘进机法施工过程中的不利影响因素,为施工风险评估和预防措施规划提供支撑。

TBM 施工围岩适用性分级是在 GB 50487 围岩分类的基础上,以下标的形式,根据岩石物理力学参数和地质信息,对不同种类的围岩进行关键因素强调,所列的五类不利地质条件对 TBM 施工的影响,按公式(4.6.1)表示并确定:

$$X_{A_i, B_i, C_i, D_i, E_i} \quad (4.6.1)$$

式中 A:超硬岩;

B:岩爆;

C:断层破碎带;

D:大变形围岩;

E:突涌水(泥)。

4.6.2 超硬岩

本规范采用岩石坚硬程度和磨蚀性来评价超硬岩对 TBM 掘进状态的影响程度。根据国

内外 TBM 掘进预测模型和典型工程案例实测数据，考虑岩石单轴抗压强度与 TBM 净掘进速度、现场贯入指标相关关系，同时兼顾岩石磨蚀性对 TBM 刀具磨损程度，提出了划分超硬岩类别的阈值。

依据伊朗 Karaj、Ghomrood、Zagross 输水隧洞工程、新加坡深层污水处理系统 (DTSS) 项目、引汉济渭输水隧洞工程、巴基斯坦 N-J 电站引水隧洞工程等 8 个工程的实际掘进数据，研究 $FPI=60\text{kN/cutter/mm/rev}$ 、 $70\text{kN/cutter/mm/rev}$ 、 $80\text{kN/cutter/mm/rev}$ 和 $Pr=0.5\text{m/h}$ 、 0.75m/h 、 1m/h 各对应的超硬岩 R_b 的大小范围 (表 4.6.2 - 1)，发现 R_b 虽有一定的离散性，但均值分布在 $150\sim 160\text{MPa}$ 或 $190\sim 200\text{MPa}$ 两个范围内，因此把 150MPa 和 200MPa 定为岩石强度分类阈值。

表 4.6.2 - 1 各指标值下案例模型 R_b 取值

指标	R_b / MPa		
	均值	最小值	最大值
$FPI=60\text{kN/cutter/mm/rev}$	159.23	93.9	249.84
$FPI=70\text{kN/cutter/mm/rev}$	175.76	117.67	258.08
$FPI=80\text{kN/cutter/mm/rev}$	188.37	141.37	265.01
$Pr=0.5\text{m/h}$	164.06	-	-
$Pr=0.75\text{m/h}$	207.12	118.23	296
$Pr=0.1\text{m/h}$	164.06	86.15	241.96

TBM 施工中当遇到玄武岩、花岗岩、石英岩等高强度、高磨蚀性岩体时，掘进速率会大大降低，根据表 4.6.2 - 2 和表 4.6.3 - 3 中的研究结果，对 TBM 掘进状态影响严重的高强度高磨蚀性岩体对应的 CAI 均在 4.0 以上，因此，取 $CAI=4.0$ 作为超硬岩磨蚀性的分类阈值。

表 4.6.2 - 2 国外的岩石磨蚀性 CAI 分级标准

磨蚀性分级	磨蚀指数 (CAI)			岩石示例	对 TBM 掘进状态影响
	挪威 Cerchar 研究所	NINU 模型	科罗拉多矿业学院 (CSM)		
无磨蚀性	<0.3	0.3 ~ 0.5	<1.0	有机材料	-
低磨蚀性	0.3 ~ 0.5	0.5 ~ 1.0	1.0 ~ 2.0	泥岩、页岩	轻微

中等磨蚀性	0.5 ~ 1.0	1.0 ~ 2.0	2.0 ~ 4.0	板岩、石灰岩	-
高磨蚀性	1.0 ~ 2.0	2.0 ~ 4.0	4.0 ~ 5.0	片岩、砂岩	一般
较高磨蚀性	2.0 ~ 4.0			玄武岩、石英岩	严重
极高磨蚀性	4.0 ~ 6.0	闪长岩、石英			
石英	6.0 ~ 7.0	6.0 ~ 7.0	5.0 ~ 6.0		非常严重

表 4.6.2-3 国内的岩石磨蚀指数 CAI 值分级标准

磨蚀值 / 0.1mm	磨蚀等级	磨蚀值 / 0.1mm	磨蚀等级
0.1 ~ 0.4	极低	3.0 ~ 3.9	高
0.5 ~ 0.9	非常低	4.0 ~ 4.9	非常高
1.0 ~ 1.9	低	≥5	极高
2.0 ~ 2.9	中等	-	-

综合分析岩石坚硬程度和磨蚀性对 TBM 施工的影响，提出了超硬岩划分标准：A₃ 类是由坚硬程度和磨蚀性共同决定的超硬岩，按 $R_b \geq 150\text{MPa}$ 且 $CAI \geq 4.0$ 确定，此时 TBM 施工适应性差。A₄ 类是单独由坚硬程度决定的超硬岩，按 $R_b \geq 200\text{MPa}$ 确定，此时 TBM 施工适应性极差；界定超硬岩有利于 TBM 施工进度安排、设备选型和刀盘刀具优化，为保障 TBM 高效施工和成本控制提供决策依据。

4.6.3 岩爆

本条为岩爆等级划分相关内容。主要依据为 GB 50487，根据该规范中岩爆等级的划分，将岩爆等级的划分为两个阶段，即勘察设计阶段和施工阶段。其中勘察设计阶段的岩爆等级根据 GB 50487 中的岩石强度应力比进行划分。设计阶段仍以 GB 50487 为基础，根据岩爆的不同特征进行划分，在本规范中对其进行了更细致的划分，将主要现象的描述分为围岩破坏特征、声响特征、爆坑深度和影响程度等因素；鉴于十多年来岩爆的研究，微震监测已经成为岩爆防治的重要手段，并在众多岩爆工程中得到了应用并取得了显著效果；基于锦屏 II 级水电站引水隧洞、川藏铁路巴玉隧洞、巴基斯坦 NJ 水电工程引水隧洞等国内外大型岩石工程微震监测成果经验，引入了岩爆辐射能量作为岩爆等级划分的依据之一，从更多角度描述不同等级岩爆特征（如表 4.6.3）。岩爆辐射能量是指岩爆发生时最大微震事件对应的微震辐射能。表 4.6.3 基于 GB 50487 较为全面对不同等级岩爆发生时对应的特征和

微震参数进行了表述，在前人的基础上又将岩爆等级的划分向前推进了一步。

表 4.6.3 岩爆等级划分标准

岩爆等级	划分依据、主要特征与现象
轻微岩爆	微震能量小于 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^3 \text{J}$ ； 围岩表层有爆裂射落现象，内部有噼啪、撕裂声响，人耳偶然可以听到。岩爆零星间断发生。一般影响深度 0.1~0.3m。对施工影响较小。
中等岩爆	微震能量 $1 \times 10^3 \sim 5 \times 10^5 \text{J}$ ； 围岩爆裂弹射现象明显，有类似子弹射击的清脆爆裂声响，有一定的持续时间。破坏范围较大，一般影响深度 0.3~1.0m。对施工有一定影响，对设备及人员安全有一定威胁。
强烈岩爆	微震能量 $5 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7 \text{J}$ ； 围岩大片爆裂，出现强烈弹射，发生岩块抛射及岩粉喷射现象，巨响，似爆破声，持续时间长，并向围岩深处发展，破坏范围和块度大，一般影响深度 1~3m。对施工影响大，威胁机械设备和人身安全。
极强岩爆	微震能量大于 $1 \times 10^7 \text{J}$ ； 洞室断面大部分围岩严重爆裂，大块岩片出现剧烈弹射，震动强烈，响声强烈，似闷雷。迅速向围岩深处发展，破坏范围和块度大，一般影响深度大于 3m，乃至整个洞室遭受破坏。严重影响施工，人财损失巨大。最严重者可能造成地面建筑物破坏。

针对不同微震监测系统可能存在辐射能量计算结果的差异，专题研究《引汉济渭工程秦岭输水隧洞岩爆能量对比试验报告》的成果表明：市场上常用的几种微震监测系统尽管在计算方法上有一定差异，但在辐射能量计算的结果上基本一致，没有出现量级差异，这对使用微震辐射能量进行岩爆等级的划分奠定了基础。

4.6.4 断层破碎带

TBM 掘进隧洞当遭遇断层破碎带，会在一定程度上加大开挖施工难度，由于断层破碎带岩体强度低完整性差，易出现塌方、变形、突泥突水等问题，存在较大的施工风险。根据工程经验，实际施工过程中多以断层破碎带宽度不同采取不同的施工措施，因此用其宽度来划分其对 TBM 施工的影响程度。当含断层破碎带宽度小于 2m 时，TBM 能顺利通过；当断层破碎带宽度为 10m~20m，TBM 掘进过程中具有一定的卡机风险，但采取预注浆加固围岩等方式能保证 TBM 顺利通过；当断层破碎带宽度为 15m~30m 时，TBM 具有较大的卡机风险，实际施工中采用注浆加固方式基本能处理卡机；当断层破碎带宽度大于 30m 时 TBM 施工状态急剧恶化，一般需人工开挖导洞、TBM 步进通过，必要时采用钻爆法开挖、

TBM 滑行方式通过。因此，依据将宽度作为 TBM 施工遭遇断层破碎带时施工适用性的划分依据。当宽度小于 2m、2m~15m、15m~30m、大于 30m 时，TBM 施工适用性分别为一般、中、差和极差。

4.6.5 大变形围岩

当掘进机遇到高应力软弱地层时，围岩变形速率快且变形量大，易造成围岩挤压大变形灾害；而且掘进机护盾对围岩变形的适应性差，易造成护盾卡机灾害。本条综合考虑围岩变形和护盾受力两方面因素，将大变形围岩的掘进机施工适应性划分为四个等级。

掘进机施工时，由于刀盘扩挖，会存在预留变形量，首先需要判别围岩变形量与预留变形量的关系。当 $u/ER < 1$ 时，说明围岩质量好或预留变形量充足，大变形分类为 C_1 ；当 $u/ER > 1$ 时，围岩将与护盾接触，此时判别的重点在于护盾受力大小。掘进机的推力用于克服围岩与护盾间的摩阻力，当 $F_p < F_r$ 时，说明掘进机推力足以克服护盾摩阻力，不会造成卡机灾害，大变形分类为 C_2 ；当 $F_r < F_p < 2F_r$ 时，说明护盾摩阻力略大于掘进机极限推力，可采用简单的措施辅助脱困；当 $F_p > 2F_r$ 时，说明护盾卡机严重，易造成重大损失，需预先采取专门的围岩加固措施。

4.6.6 突涌水（泥）

长深隧洞中不良地质、溶洞等致灾因素隐藏性高，施工过程中的扰动极易导致突涌水（涌泥）灾害发生。突涌水（涌泥）的发生将严重影响施工安全和施工进度，是影响 TBM 围岩分类的关键因素之一。在 TBM 围岩分类中考虑突涌水（涌泥）不良地质条件的影响，可以基于施工反馈信息动态修正和规避风险，是隧洞修建过程中减少损失和风险控制的有效途径。本条根据岩层倾角及地下水位与隧洞底板间的高差等指标将突涌水灾害等级分为四个等级。

大型含导水构造：大型管道及地下河型、溶洞溶腔型、富水断层型、导水断层型、阻水断层型、侵入接触型、不整合接触型、差异风化型等可能导致特大型（涌水量 $Q \geq 10000\text{m}^3/\text{d}$ ）

大型 ($1000 \leq Q < 10000 \text{m}^3/\text{d}$) 突涌水 (涌泥) 灾害的含导水致灾系统。

中型含导水构造：中型管道及地下河型、溶洞溶腔型、溶蚀裂隙型、富水断层型、导水断层型、阻水断层型、侵入接触型、不整合接触型、差异风化型、构造裂隙型等可能导致中型 ($100 \leq Q < 1000 \text{m}^3/\text{d}$) 突涌水 (涌泥) 灾害的含导水致灾系统。

小型含导水构造：小型管道及地下河型、溶洞溶腔型、溶蚀裂隙型、富水断层型、导水断层型、阻水断层型、侵入接触型、不整合接触型、差异风化型、构造裂隙型等可能导致小型 ($Q < 100 \text{m}^3/\text{d}$) 突涌水 (涌泥) 灾害的含导水致灾系统。

大型负地形：地表的地下水系统补给面积 $\geq 10 \text{km}^2$ 。

中型负地形： $5 \text{km}^2 \leq$ 地表的地下水系统补给面积 $< 10 \text{km}^2$ 。

小型负地形：地表的地下水系统补给面积 $< 5 \text{km}^2$ 。

裂隙强发育、裂隙中等发育、裂隙弱发育：按 GB/T 50218-2014《工程岩体分级标准》**岩体完整程度定性划分 (表 3.3.1)** 和**结构面结合程度划分 (表 3.3.2)** 标准进行裂隙发育程度划分：裂隙强发育指岩体破碎~极破碎，裂隙中等发育指岩体较破碎，裂隙弱发育指岩体较完整，裂隙不发育指岩体完整。

5 隧洞布置与设计

5.1 一般规定

5.1.1 掘进机施工的深埋长隧洞应结合进出口、沿线跨沟（河）等水工建筑物的布置，尽量避开掘进机不适宜的地层，无法避开时应采用钻爆法等适宜的施工方法提前处理，掘进机步进通过。

5.1.2 经技术、经济、工期、机型适宜性的洞径比选，一般大、中、小型断面适宜护盾式、混合式掘进机施工；大、中型断面隧洞适宜敞开式掘进机施工；单洞长度大于 10km、极软岩底拱基础承载力大于 0.5MPa、硬岩单轴饱抗压强度小于 200MPa、同时沿线不具备布置支洞、竖井的条件时，采用掘进机施工较为经济。

5.1.4 隧洞预留变形量可分为开挖预留变形量和施工富余量，开挖预留变形量即为开挖断面与设计断面外缘之间的预留量，满足施工过程中一次支护和围岩变形要求，作为确定掘进机刀盘尺寸的一个重要参数，主要考虑地应力大小、围岩属性、围岩类别、施工富余量（包括掘进机蛇形误差、贯通误差等）给出开挖预留变形量；结构尺寸预留量主要考虑不均匀沉降量、断层带软岩流变等情况的预留变形量；综合各种因素择优确定掘进直径。掘进直径应结合不同的地质条件、机型等参数确定。

5.1.11 在青海引大济湟调水总干渠引水隧洞掘进机施工进口段（约 12km）IV、V类围岩和不良地质洞段管片每立方混凝土中内掺 8kg 粗纤维，提高了混凝土的抗拉、抗冲击等性能，有效抑制了管片的表面裂缝，且能为管片的边、角提供有效保护，减少管片的破损率，外观质量好。

5.2 隧洞线路设计

5.2.3 隧洞沿线支洞、竖井的数目要综合分析主要工程地质条件，从投资、总工期控制等比选，择优确定；要考虑主支洞交叉段施工对主洞稳定的影响；不良地质较短时，一般采

用钻爆法施工，掘进机滑行通过，对可能出现的突发事件，制定应急预案。

隧洞建成后，为满足长隧洞补气、通风要求，一般每隔 10km~15km 的临时支洞（或竖井）可保留为永久检修支洞。

5.3 隧洞断面

5.3.1 掘进机开挖直径的确定，对工程投资、工期影响较大，应经过充分的技术经济比选、论证后确定。要考虑 TBM 施工中蛇形施工误差对过流能力的影响因素。对以 II、III 类围岩为主，采用敞开式掘进机的隧洞工程，往往 IV 类、V 类围岩段是确定开挖洞径的关键控制洞段，其支护、衬砌结构型式、厚度、配筋，应经认真计算、研究、论证后确定。

5.3.2 TBM 施工隧洞长度一般均超过 10km 以上，隧洞沿线地质条件变化频繁，从节省工程投资考虑，根据不同围岩类别，可选择多种衬砌型式，如内径不同的衬砌型式变化过多、过密，会增大隧洞局部水头损失，影响隧洞过流能力，应予以避免，必要时要分段合并衬砌型式。有压输水隧洞尤其要关注因断面型式频繁变化引起的局部水头损失增大、过流能力降低、汽蚀等问题，在工程投资增加不多的情况下，宜采用统一内径的衬砌断面型式。

5.4 水力计算

5.4.1 深埋长隧洞以沿程损失为主；无压明流隧洞分为长洞和短洞计算过流能力。

5.4.2 对不衬砌隧洞蛇形变量产生的局部水头损失进行水动力学专门研究，确定等值长度。

5.5 隧洞结构与支护

5.5.1 本条参照 SL 279 有关要求，隧洞结构与支护的目的是加固围岩，提高围岩的自承能力，保证围岩与结构稳定。同时说明了隧洞结构与支护应有的功能。

5.5.2 隧洞结构与支护参数选择是一个综合分析比较过程，条文中给出了选择隧洞结构与支护型式时需要考虑的主要因素，除计算分析外，工程类比也是常用的方法，同时应结合

信息化施工的要求，采用动态设计方法优化隧洞结构与支护参数。

5.5.3 敞开式掘进机施工隧洞一次支护主要采用锚喷网钢架联合支护，当围岩条件较好时，可不施作二次衬砌。当隧洞断面尺寸较大、围岩条件一般时，从工程长期安全运行的角度考虑，宜采用复合式衬砌。从方便施工考虑，隧洞底拱结构可采用预制结构，但应对其接缝防渗及接缝受力条件进行充分论证。

5.5.4 除分析内、外水压力条件对衬砌结构的影响，还应分析内水外渗对地下水环境、邻近边坡、邻近建筑物的影响，必要时设置二次现浇混凝土衬砌。

5.5.5 结构计算

1 水工隧洞混凝土衬砌结构，采用在多系数分析基础上以安全系数表达的方式进行结构计算，与 SL 279 的规定相同。

2 荷载和荷载组合的规定与 SL 279 相同。

3 敞开式、混合式掘进机施工隧洞采用复合衬砌时，其结构型式与常规钻爆法施工一致，因此其结构计算按 SL 279 的有关规定执行。

4 护盾式掘进机施工隧洞采用管片衬砌时，不同单位有不同的习惯，宜根据隧洞地质条件、管片接缝特点选用合适的计算方法。当有二次衬砌时，一般按叠合构件计算，应重点关注接缝薄弱部位对结构整体受力条件的影响。

5.5.6 管片衬砌及仰拱块设计

1 管片有多种类型，其中六边形具有成洞快但对软弱围岩段适应性差的特点。当直径较大时，因隧洞竖向荷载和水平荷载差异产生的弯矩较大，接缝容易张开，削弱结构整体性，因此建议隧洞直径较大时（一般大于 6m）时采用矩形管片。

2 敞开式或混合式掘进机施工隧洞底板采用预制结构的主要目的是方便施工，因此应密切考虑施工的要求。同时，其接缝防水和接缝受力是薄弱环节，应进行针对性设计。

4 管片厚度选取按经验取值，当围岩条件相对较好时，可取下限值，当隧洞埋深较大，存在软岩大变形问题时，宜取上限值。

5 管片环宽与设备能力、隧洞曲线布置等因素有关，隧洞直径较小时，其设备运输能力、管片拼装机的能力相对低，因此取较小值。大直径隧洞则取大值，可减少接缝数量，同时有利于加快掘进速度。

5.5.7 掘进机施工隧洞的复合式衬砌与常规钻爆法施工隧洞衬砌类同，要求基本一致。

从施工干扰方面考虑，跟进二次衬砌对隧洞掘进效率影响较大，在初期支护的安全稳定性在贯通之前能保证的前提下，一般可在掘进贯通后进行二次衬砌。对大断面隧洞，初期支护确保贯通前围岩及支护稳定的难度较大，因此建议二次衬砌跟进支护，如滇中引水工程香炉山隧洞，隧洞开挖直径 9.8m，隧洞内径 8.4m~8.5m，隧洞围岩条件较差，设计要求二次衬砌滞后初期支护长度不大于 400m。

5.6 隧洞灌浆、防渗和排水

5.6.2 敞开式掘进机开挖后的围岩非绝对平滑，底部还存在石渣、石粉，为保证预制仰拱块与围岩联合承载，因此要求预制仰拱块底必须进行回填灌浆。

5.6.3 护盾式掘进机要做好管片的纵环缝、螺栓孔和注浆孔封堵，以及豆砾石回填灌浆，条文对管片接缝防水、豆砾石充填灌浆等提出要求。

5.7 风险分析与评估

5.7.1 风险分析与评估应遵循的原则

2 本规范第一次将风险评估纳入水工隧洞建设，考虑到行业习惯及风险评估主要为解决工程实际问题，暂未对竣工后的风险后期评估进行规定，实施中可结合项目的具体特点进行规定。

3 为规避建设中的施工风险，要求施工方开工前对项目的风险进行系统分析，了解风

险源，制定对应措施，提交风险管理报告。

5 为有效掌控极高风险，要求对极高风险进行全过程监测。

5.7.2 隧洞风险分级和接受准则

等级标准主要参照了国际隧道协会 2004 年发布的《隧道风险管理指南》，并参考了我国铁路隧道工程建设特点和国内相关规定制定。

(1) 经济损失等级标准参照了《水利工程质量事故处理暂行规定(中华人民共和国水利部(1999)第9号)》和《生产安全事故报告和调查处理条例(国务院令(2007)第493号)》。鉴于我国社会经济的高速发展和施工技术的巨大进步，以及现代水利工程项目呈现出建设规模和投资规模不断扩大、技术复杂程度高等特点，1999年颁布的《水利工程质量事故处理暂行规定(中华人民共和国水利部(1999)第9号)》在经济损失参照上有时代的落后性，仅作为经济损失等级标准的参考，不作为主要依据。经济损失等级标准的主要采用2007年国务院颁布的《生产安全事故报告和调查处理条例(国务院令(2007)第493号)》作为依据，符合时代先进性和同步性。

(2) 人员伤亡等级标准参照了《生产安全事故报告和调查处理条例(国务院令(2007)第493号)》和国际隧道协会2004年发布的《隧道风险管理指南》。

(3) 工期延误等级标准参照了《水利工程质量事故处理暂行规定(中华人民共和国水利部(1999)第9号)》。

(4) 某些情况下需要考虑第三方损失，第三方经济损失是指由于工程施工活动引起的第三方直接经济损失和修复赔偿所需的各种费用。第三方人员伤亡是指与工程无关人员因施工活动引起的意外伤亡，采用人员伤亡的类别和严重程度进行分级。

由于第三方损失等级标准牵涉因素众多，如经济发展水平、地区差异、社会影响等，很难给出一个相对固定的等级划分标准，目前可供参考的仅有国际隧协《隧道风险管理指南》

推荐的第三方损失等级标准。为方便使用，本规程提供了仅供参考的第三方损失和伤亡等级标准，详见表 5.7.2 - 1 和 5.7.2 - 2，在实际应用中应根据我国国情和水利行业情况，结合具体工程情况进行调整。

表 5.7.2 - 1 第三方经济损失等级标准

后果定性描述	灾难性的	很严重的	严重的	较大的	轻微的
后果等级	5	4	3	2	1
第三方经济损失(万元)	> 100	30 ~ 100	10 ~ 30	3 ~ 10	<3

表 5.7.2 - 2 第三方人员伤亡等级标准

后果定性描述	灾难性的	很严重的	严重的	较大的	轻微的
后果等级	5	4	3	2	1
第三方伤亡数量(人)	$F > 1$ 或 $SI > 10$	$F = 1$ 或 $1 < SI < 10$	$SI = 1$ 或 $1 < MI < 10$	$MI = 1$	-
注：F——死亡人数；SI=重伤；MI=轻伤；					

在实际工程中采用绝对标准不能反映投资规模的相对风险，因此除绝对标准之外，还提供了部分相对标准作为参考，此相对标准尚不完善，有待于在实践中继续研究和调整。表 5.7.2 - 3 中的相对经济损失是经济损失与整个工程总投资的比值，相对工期延误时间是指延误时间与工程计划工期的比值，第三方相对经济损失是指第三方经济损失与第三方建(构)筑物当前价值的比值。

表 5.7.2 - 3 相对等级标准

后果定性描述	灾难性的	很严重的	严重的	较大的	轻微的
相对经济损失(%)	> 10	3 ~ 10	1 ~ 3	0.1 ~ 1	<0.1
相对工期延误时间(%)	> 10	4 ~ 10	1.5 ~ 4	0.3 ~ 1.5	<0.3
第三方相对经济损失 (%)	> 10	3 ~ 10	1 ~ 3	0.5 ~ 1	<0.5

(5) 环境影响标准参考了国际隧道协会 2004 年发布的《隧道风险管理指南》，只考虑影响时间及影响程度，此标准还有待于进一步研究。

(6) 以上各等级标准的制定主要参考了以下资料，如表 5.7.2 - 4 ~ 5.7.2 - 6：

表 5.7.2 - 4 国际隧协风险等级标准

第三方人员伤亡等级标准					
	灾难性的	很严重的	严重的	较大的	轻微的
伤亡数量(人)	$F > 1$ 或 $SI > 10$	$F = 1$ 或 $1 < SI < 10$	$SI = 1$ 或 $1 < MI < 10$	$MI = 1$	-

环境影响等级标准					
	灾难性的	很严重的	严重的	较大的	轻微的
环境影响描述	永久的且严重的	永久的但轻微的	长期的	临时的但严重的	临时的且轻微的

表 5.7.2 - 5 水利工程质量事故处理暂行规定（中华人民共和国水利部（1999）第 9 号）

1999 年 3 月 4 日施行

事故类别 损失情况		特大质量事故	重大质量事故	较大质量事故	一般质量事故
事故处理所需的 物质、器材和设备、人工等直接损失费（人民币万元）	大体积混凝土， 金结制作和机关 安装工程	> 3000	> 500 或 ≤ 3000	> 100 或 ≤ 500	> 20 或 ≤ 100
	土石方工程，混 凝土薄壁工程	> 1000	> 100 或 ≤ 1000	> 30 或 ≤ 100	> 10 或 ≤ 30
事故处理所需合理工期（月）		> 6	> 3 或 ≤ 6	> 1 或 ≤ 3	≤ 1
事故处理后对工程功能和寿命影响		影响工程正常使用， 需限制条件运行	不影响正常使用， 但对工程寿命有较大影响	不影响正常使用，但对 工程寿命有一定影响	不影响正常使用和工程 寿命

表 5.7.2 - 6 生产安全事故报告和调查处理条例（国务院令（2007）第 493 号）

2007 年 6 月 1 日起施行

后果定性描述	特别重大事故	重大事故	较大事故	一般事故
人员死亡数量(人)	$F \geq 30$	$10 \leq F < 30$	$3 \leq F < 10$	$F < 3$
人员重伤数量(人)	$S \geq 100$	$100 > S \geq 50$	$50 > S \geq 1$	$10 > S$
直接经济损失	1 亿元以上	5000 万元以上 1 亿 元以下	1000 万元以上 5000 万 元以下	1000 万元以下

(7) 风险事件后果与风险评估目标关系如表 5.7.2 - 7：

表 5.7.2 - 7 后果或损失与评估目标关系表

评估目标	后果或损失
安全风险	人员伤亡、经济损失、第三方人员伤亡、第三方经济损失、工期延误
工期风险	工期延误、经济损失
投资风险	经济损失、第三方经济损失
事故处理风险	经济损失、第三方经济损失
环境风险	环境破坏、经济损失、第三方经济损失

5.7.3 初步设计阶段风险分析与评估规定

3 为保证勘察成果的合理及准确，防止因勘察遗漏引起的设计及施工风险，要求对勘察过程、手段、方法等进行评估。

4 可按不同地质分段，对施工的设备、掘进、设计措施等典型风险进行评估，也可按不同风险因素进行分类评估。

5.7.4 施工图阶段风险分析与评估规定

3 施工图阶段是在初步设计审批意见的基础上，对初步设计风险评估成果进行核查和完善，如工程无重大变化，可不进行专项风险评估与审查工作。

5.7.5 施工阶段风险分析与评估规定

施工阶段的风险评估是在设计阶段风险评估的基础上，结合环境和地质条件、施工工艺、设备、施工水平、经验等，对新出现的风险进行辨识，对已辨识的风险进行检测。

施工阶段对风险实施动态管理，及时发现和处理未辨识的风险。动态管理的主要内容包
括：工程总体风险水平的变化、重大风险的发展趋势、处理措施的实施情况以及风险损失情
况等。对可能发生的重大突发风险事件，应立即采取相应的预案组织处理，同一时间报送各
参建单位。

6 掘进机选型和技术要求

6.1 一般规定

6.1.1 适用于全断面岩石掘进机施工的隧洞开挖直径和掘进长度，按 SL 378-2007 规定“隧洞断面为圆形、开挖直径为 3m~12m、掘进长度不小于 10km”的地下洞室采用全断面岩石掘进机开挖。迄今为止，绝大部分掘进机施工隧洞，其直径基本都在这一范围内。根据国内经济发展水平，把采用掘进机的隧洞长度定义为 10km 也是合适的。因此，本规范仍沿用这一条款。

6.1.2 本条主要强调掘进机机型的选择要技术可行、安全可靠、针对性强、经济合理。对某些工程而言（如深埋长隧洞），同时满足此四项要求是非常困难的，此时应按自前向后的优先顺序进行掘进机的选型。

6.1.4 本条强调在成熟的机型中进行掘进机选型。因掘进机是非标设备，每台设备均是为具体工程的定制设备，近年来也出现各种复合式机型，盾构和掘进机的界线也变得越来越模糊，相对而言，敞开式、单护盾和双护盾掘进机的工程应用历史长、技术成熟，其适用性也更广，因此宜优先从其中选取机型。但上述机型有时并不能完全满足工程需要，例如，不衬砌和管片衬砌交替出现的隧洞，此时可采用敞开-护盾双模式掘进机。

6.1.5 在需采用多台掘进机的隧洞工程中，因隧洞沿线工程地质条件的不均一性，各掘进机拟掘进洞段有时并不适用于同一种机型，因此应根据水工隧洞各洞段主要地质特性逐段选择掘进机机型。

6.1.6 本条强调掘进机选定敞开式、单护盾或双护盾的基本型式后，还应针对隧洞围岩的掘进机施工适应性围岩分类，提出有针对性的设计要求，以增强其对具体工程的适应性。

6.2 设备选型和配置

6.2.1 本条系统说明了掘进机主机选型应遵循的原则。

3 不衬砌隧洞围岩条件好,适用于采用敞开式掘进机施工。单护盾掘进机无支撑系统,隧洞不衬砌时推进油缸无法提供推进反力,故其不可用不衬砌隧洞的施工;双护盾掘进机设有支撑系统,理论上可用于不衬砌隧洞的掘进,但此种掘进方式既不合理也不必要。

4 本款旨在强调护盾式掘进机应用于有压水工隧洞的局限性。因护盾式掘进机施工的隧洞一般采用预制钢筋混凝土管片衬砌,管片为拼装式结构,片与片之间采用止水条止水,因此,当内水压力较大时,管片间缝隙可能张开,并使止水失效。鉴于护盾式掘进机用于有压水工隧洞的工程案例相对较少,难以给定其适用性界限。兰洲水源地工程输水隧洞最大内水压力为 0.75MPa,大部分洞段内水压力均超过 0.6MPa,输水隧洞采用双护盾掘进机施工,预制钢筋混凝土管片衬砌。在具体选型时,可将这一值控制在 0.6MPa 左右,并在 IV ~ V 类围岩洞段辅以固结灌浆,超过这一限制应进行专题研究后确定。

5 敞开式掘进机与护盾式掘进机结构上的差异,使其相同推进油缸推力下,敞开式掘进机作用于刀盘的总推力较护盾式掘进机大,其破岩效果也相对较好。隧洞 I ~ III 类围岩的超硬岩坚硬且较完整,其掘进所需推力大,故当隧洞 I ~ III 类围岩的超硬岩比例较高时,宜选用敞开式掘进机。

6 本款主要从施工安全方面考虑做出的规定。敞开式掘进机在岩石刚被揭露时,作业人员和设备暴露在岩爆的威胁之下,而强岩爆的岩块弹射速度可达 5m/s ~ 10m/s、爆坑深度达 1.0m ~ 3.0m,一旦发生强岩爆发生在敞开式掘进机施工洞段,可能直接造成人员的伤亡和设备的毁损。

护盾掘进机可抵抗强岩爆从而保证施工安全的推论尚待进一步确认,原因之一是护盾式掘进机应用于深埋隧洞的案例相对较少;原因之二是围岩被封闭于护盾和管片之外,即使发生了强岩爆也有可能未被发现。如法国 Frejus Safety Gallery 工程最大埋深 1800m,最小埋深 700m,采用开挖直径 9.46m 单护盾施工,建设过程中未感知到强岩爆的发生。

护盾式掘进机施工的隧洞采用管片支护,作业人员和设备均处于护盾和管片的保护之下,从施工环境分析,在岩爆段施工时护盾式掘进机较敞开式掘进机安全,且迄今为止,护盾式掘进机确实未因岩爆发生过安全事故。故当强岩爆洞段长度占拟掘进段总长度比例较高时,宜优先选用护盾式掘进机。

7 本款强调断层破碎带比例较高时不宜采用敞开式掘进机。因敞开式掘进机依靠撑靴提供推进反力,在断层破碎带处撑靴无法工作,需对撑靴部位加固后方可掘进,不利于掘进机快速通过断层破碎带,且易导致卡机。故当断层破碎带洞段长度占拟掘进段总长度比例较高时,宜采用护盾式掘进机施工。

8 本款强调护盾式掘进机不适用于大变形围岩隧洞的施工。考虑以隧洞Ⅳ~Ⅴ类围岩的大变形围岩等级为 D_3 和 D_4 的洞段长度之和与该台掘进机拟掘进总长度之比来判别其适应性,当该值较大时,宜采用敞开式掘进机施工。

9 本款强调敞开式、单护盾、双护盾掘进机对突涌水(涌泥)的适应性无明显优劣之分,故不将其作为掘进机选型的依据,但在设备配置时应考虑对突涌水(涌泥)的应对措施。

10 本款强调隧洞沿线地质条件较为复杂时,以各单一不利地质条件进行掘进机主机选型时,得到的结论有可能相反,此时应辅以适当的定量分析。因本规范编制前,尚无隧洞围岩的掘进机施工适应性围岩分类的相关规定,相应统计数据欠缺,准确确定各不利地质条件的比例阈值困难。为了方便使用,本规范根据经验选定各不利地质条件的比例阈值。

一般认为,在掘进机施工的隧洞工程中,其顺利与否是由5%的最不良地质洞段来决定的,超硬岩、岩爆、断层破碎带和大变形围岩的最高等级分别为 A_4 、 B_4 、 C_4 和 D_4 ,在此四个不利地质条件中,超硬岩对机型选择的影响相对较小,其阈值可适当提高。因护盾式TBM通过针对性设计可获得相同的对刀盘的推力,建议将超硬岩 A_4 等级的比例阈值设为15%,其他各不利地质条件仍沿用5%阈值。

以阈值为基准将不利地质条件围岩占比范围分为三档,并针对敞开式掘进机的特性评分,好、中、差三等分别赋值 90 分、60 分和 30 分,依其在主机选型中的重要性分别赋予权重,并求各项掘进机适应性围岩分类的分项得分之和。

超硬岩、岩爆、断层破碎带和大变形围岩的次高等级分别为 A₃、B₃、C₃ 和 D₃,也对掘进机的选型产生影响,但其程度略低,为了便于定量分析,将其长度分别折算为相应最高等级的长度,折算系数统一取为 0.4。

按表 6.2.1 计算掘进机选型分值,若总得分大于 60 分宜采用敞开式掘进机;总得分 50 ~ 60 时,既适用于敞开式掘进机,又适用于护盾式掘进机;总得分小于 50 分,则适用于护盾式掘进机。选用护盾式掘进机时,若隧洞 IV ~ V 类围岩的大变形围岩等级为 D₄ 洞段长度比例在 3% 以下,宜采用双护盾掘进机,否则宜采用单护盾掘进机。以隧洞围岩的掘进机施工适应性围岩分类等级进行掘进机主机选型分值计算见表 6.2.1。

表 6.2.1 敞开式掘进机施工适应性围岩分类评分表

掘进机施工适应性围岩分类等级	比例 (%)	敞开式掘进机适应性分值 (分)	权重	分项得分
I ~ III 类围岩的超硬岩 A ₄ 等级	0~5	30	0.10	
	10~15	60		
	> 15	90		
I ~ III 类围岩的岩爆 B ₄ 等级	0~3	90	0.35	
	3~5	60		
	> 5	30		
V 类围岩的断层破碎带 C ₄ 等级	0~3	90	0.20	
	3~5	60		
	> 5	30		
IV、V 类围岩的大变形围岩 D ₄ 等级	0~3	90	0.35	
	3~5	60		
	> 5	30		
合计	-	-	1.00	

6.2.2 本条强调掘进机主机配置应遵循的原则。

2 隧洞断面允许时,无论选用敞开式掘进机还是护盾式掘进机,均宜配置超前钻机,

以对围岩进行超前支护和加固。装有取芯钻头的超前钻机也可承担部分钻探功能。

3 当隧洞围岩较差时，应及时封闭出露的岩面并进行局部加固，否则围岩条件将进一步恶化，造成洞壁岩局部失稳，危及人员和设备安全。 L_1 支护区位于敞开式掘进机紧后方，可及时对护盾后出露的岩体进行支护，因此宜在此配置锚杆钻机和喷混凝土系统。

4 因护盾式掘进机的护盾相对较长，在大围岩变形洞段受到来自围岩收敛的变形应力较大，可能导致护盾卡机，配置大推力推进油缸的目的在于增大护盾卡机时的自主脱困能力。当护盾式掘进机的护盾受到围岩收敛变形应力挤压，推进阻力增大时，可以极限推力推进机头，快速通过大变形围岩洞段，以防护盾卡机。

5 在隧洞工程施工时，因受技术或成本限制，掌子面前方地质条件不可能完全清晰，通过超前物探手段预测预报掌子面前方地质条件，为超前支护提供指导十分重要。鉴于地下工程地质条件的复杂性，所有物探系统均不能确保精准预测前方地质条件，因此，宜配备两套以上物探设备相互印证。地下水对隧洞围岩特性影响较大，因此，宜配置一套超前探水物探设备，如激发极化法超前探水设备。当掘进机施工段岩爆风险较大时，还应对岩爆进行监测和预报，宜配置微震监测系统。

6.2.3 本款强调后配套选型及配置的原则。

3 隧洞施工采用单线运输时，当掌子面掘进到一定距离后，必须保持有在同一时间内有多列车在隧洞进出运行，因此需每隔一段距离（一般 3km ~ 5km）设一处错车平台，平台上布设双轨及道岔，两端布置坡道，不同方向行驶的列车可在此错车。为了使掘进机掘进过程中物料运输不出现延迟，需有一处错车平台始终紧跟在后配套附近，一般在后配套尾部配置移动式加利福尼亚错车平台，随后配套行走于隧洞轨道上，其顶面布设双轨道和道岔，实现列车在掘进机的近距离错车，保证物料的及时供应。

4 敞开式掘进机的 L_1 区不宜也不应大规模喷射混凝土，否则会造成设备的工作环境和

设备的污染，因此应在 L₂ 区配置系统喷混凝土设备，设备的喷射能力应能满足最大喷混凝土强度的需要，一台喷射机械手不满足喷射强度要求时，可配置两台以上喷射机械手。

6.3 技术要求

6.3.1 本条提出了一系列对掘进机的基本要求。

8 护盾式掘进机因护盾较长，应着重关注其防卡机能力，其自刀盘至尾盾的直径应逐渐减小，以便使自刀盘向后与岩壁的间隙逐渐变大，以在一定程度上适应围岩的变形，减小护盾卡机的概率。如法国 Frejus Safety Gallery 工程单护盾刀盘开挖直径为 9.46m，前盾、中盾和尾盾最大直径分别为 9.37m、9.35m 和 9.33m。

为实施超前注浆，单护盾式掘进机在中盾布置一环孔径不小于 100mm 的超前注浆导孔，双护盾掘进机在支撑护盾和尾盾各布置一环孔径不小于 100mm 的超前注浆导孔，其间距应能在相应地层可灌性下形成一定厚度的封闭帷幕。

13 本款主要强调施工通风设计中应考虑通风管的胀破安全系数。因国内工程界尚无规程规范对此做出相关规定，鉴于掘进机施工隧洞常需采用长距离高压通风，一旦发生爆管，将对洞内人员的生命安全造成严重威胁，因此通风管的运行必须考虑适量的安全系数。

瑞士工程师协会的 SIA 196 规范对隧洞施工通风管的胀破安全系数做出了规定，即不低于 10，这一系数与国内实际工程应用情况相去甚远，若采用这一系数，很多长隧洞工程的通风系统设计将无法进行。考虑国内实际经济与技术水平，建议将通风管胀破安全系数取值范围规定为 3~5，一般压力通风时取小值，高压通风时取大值。

6.3.2 本条强调隧洞围岩的掘进机施工适应性围岩分类等级较差时对设备性能的特殊要求。

1 若根据本规范表 4.6.4 确定的隧洞 V 类围岩的断层破碎带等级为 C₃ 和 C₄ 洞段长度之和与该台掘进机拟掘进的隧洞总长度之比较大，此时若选用敞开式掘进机则应采取措施增

加撑靴面积或设置辅助推进系统，以减少撑靴无法工作的停机时间。

2 护盾式掘进机的护盾均采用台阶式设计，机头较前部位为较后部位预留变形空间，但当隧洞Ⅳ～Ⅴ类围岩的大变形围岩等级达 D_4 ，台阶式设计的预留变形量已不能满足大围岩变形洞段的变形要求，此时护盾式掘进机需有较大的长距离扩挖能力。通过刀座垫块、浮动刀盘等设计可使护盾式 TBM 具备直径向 200mm 的扩挖能力。

6.4 出厂验收

6.4.1 本条对验收内容进行了界定，主要包括掘进机设备整机质量、安全设施、设计布局、功能及性能等方面内容。主要侧重与功能检查，检查掘进机各系统安全防护措施、检查掘进机各系统安全警示标识、检查监造过程中提出问题整改落实情况、检查随机备件、检查掘进机组装专用工具、检查随机资料完整性等，有条件的实施性能测试。

6.4.2 本条主要强调出厂验收前，应首先编制验收大纲，并明确验收通过的标准。

7 施工组织设计

7.1 一般规定

7.1.1 本条提出了掘进机法隧洞施工组织设计编制的依据，应遵循的基本原则和要求。

长距离隧洞地质条件复杂，建设周期较长，对工程管理、安全、质量、进度、投资、环保等方面要求很高。因此应当根据工程特点，从工程策划阶段开始，积极创新、应用施工新技术、新工艺及新设备，并落实环境保护、节约资源（节地、节水、节能、节材）的具体措施。

7.1.2 本条强调了编制掘进机法隧洞施工组织设计调研和资料收集分析的重要性。长距离隧洞作为地下工程，断层破碎带、软弱岩体、围岩变形、涌水突泥、岩爆、溶洞等不良地质；超硬岩；瓦斯等有害物质均会严重影响掘进机的正常施工。作为掘进机法隧洞施工组织设计编制前的重要环节，应确保调研、收集及分析资料的详细、全面、准确，为处理方案的提出做好充分的准备。

7.1.3 国内外各类隧洞的实践表明，掘进机法与钻爆法相比，适应不良地质地层的能力较差。不良地质、超硬岩及有害物质等严重影响采用掘进机法施工的隧洞安全、质量、进度、投资等，如国内的云南掌鸠河引水、四川锦屏Ⅱ级水电站、甘肃引洮、青海引大济湟、陕西引红济石等引水隧洞项目。另外，掘进机恶劣的工作环境和工作状态（震动）也可能造成主轴承、刀盘、液压系统等故障频发。作为定制设备，基于隧洞工程安全、规模、工期、投资等方面的要求，可从工程条件、施工方案、设备能力及使用条件等方面综合选择合适掘进机施工的地质洞段。

7.1.4 本条强调对工程安全、质量、进度、投资、环保等方面造成重大影响的不良地质、超硬岩、有害物质开展专项研究的要求。

7.1.5 二十世纪 80~90 年代以来，随着硬岩掘进机在水利工程隧洞上的应用，基于经

济、环境保护等方面的要求，工程建设过程中有关参建方不断提出掘进机开挖渣料能否用做混凝土细骨料的问题。其中甘肃引洮供水工程、四川锦屏Ⅱ级水电站、云南那邦水电站等项目，在前期或施工阶段对掘进机开挖渣料的可利用性方面做了技术方面的初步试验研究。相比钻爆法开挖的洞碴料，掘进机开挖的洞碴料加工的骨料级配欠佳、粒型较差，一般多用于混凝土细骨料。通过对配合比和外加剂的调整，基本可以满足混凝土的设计技术指标要求。鉴于应用实例不多，而且 TBM 开挖的洞碴料的利用受地质、环境保护等方面影响较大，TBM 开挖的洞碴料的可利用性应通过技术、经济、环境保护等方面综合论证。

7.2 施工总体规划

7.2.1 施工总体规划主要有施工分段（掘进机法、钻爆法及其他方法施工段）、施工方案（包括但不限于：各段隧洞和辅助洞室的开挖、支护、衬砌施工方法，隧洞出渣和物料运输方式、设备及配套设施，掘进机及其配套设施转场方案，掘进机组装和拆卸位置及吊装方案，施工通风方案，施工防排水方案，施工通道的施工方案等）、工业广场布置、施工通道型式和位置选择等内容。涉及工程安全、技术、经济、环保、征地等方面，本条强调施工总体规划通过从隧洞布置情况、工程地形地质条件、施工环境条件等综合分析、论证确定。同时，从施工简单、节约资源、节省工期等方面考虑，对于准备期和主体工程施工期的施工装备和设施，尤其是施工通道的装备和设施前后施工期应避免重复拆装，尽量统一利用。

7.2.2 本条基于地形地质、工程布置、不同施工方案及其适应性、掘进机等施工装备能力、施工工期、工程征占地、环境保护等方面要求，提出了施工分段有关位置、长度及施工通道位置选择的基本原则。

掘进机掘进长度主要受主要部件寿命、地质条件（包括但不限于岩石抗压强度、围岩类别、构造及不良地质）、洞径、施工通道布置、工期等因素影响。掘进机的使用期限主要由主轴承、液压系统等部件的寿命决定。根据对设备厂家（海瑞克、罗宾斯、赛利、北方重工、

中铁装备、中铁重工等)等的多方调研和咨询,一般主轴承寿命在 15000 小时~20000 小时,折合掘进机施工长度为 20km~25km。依据地质条件和隧洞长度,国内已建工程 TBM 的主轴承寿命一般选择 15000 小时。

目前已建、在建项目 TBM 掘进长度如山西省万家寨引黄入晋工程总干线 6#隧洞 21.41km;南干线 26.2km(TBM1)、19.96km(TBM2)、21.38km(TBM3)、19.36km(TBM4);吉林引松供水工程 TBM 三标段 17.0km;山西省中部引黄工程 23.72 km(TBM1)、25.704 km(TBM2);引汉济渭工程秦岭隧洞岭北 TBM15.2km;滇中引水工程大理 I 段施工 3 标 TBM 掘进段 21km;新疆 ABH 引水隧洞 III 标 17.615km、IV 标 17.223km;新疆某引水工程 XE 隧洞 III 标 23.55km、KS 隧洞 V 标 24.28km(TBM4)、17.491km(TBM5)、SS 隧洞 II 标 20.541km 等。其中部分工程无中部施工平洞条件下单台连续掘进达 15km~20km。

单从岩石掘进机掘进长度而言,通过已建工程统计分析,中小型断面隧洞岩石掘进机掘进长度大部分在 20km 以下,但部分工程掘进机掘进长度程达到或超过 20km。基于设备能力的进步和长距离隧洞的日益增多,全断面岩石掘进机单工作面掘进长度在 25km 以下是有保障的。但掘进机施工受不良地质、管理水平、施工能力等方面的影响很大,掘进长度还是需要留有余地。同时,针对超硬岩、大断面隧洞,掘进长度还应通过论证确定。

7.2.3 基于国内外隧道工程实例,全断面岩石掘进机适宜于岩性较为单一的岩石洞段,对于较大的断裂构造带、断层密集地带、大变形围岩、岩爆等不良地质洞段的施工往往出现卡机甚至无法掘进的现象。而且考虑工程地形地质、工程布置、掘进机采购工期等因素,水工长隧洞需要布置施工通道、地下工业广场及辅助洞室及不良地质洞段,需要采用钻爆法施工。故本条提出水工长隧洞宜采用全断面岩石掘进机为主、钻爆法为辅的综合施工方案,不适宜掘进机掘进的不良地质洞段采用钻爆法或超前预加固、管棚等处理措施提前施工。

不良地质类型包括：断层破碎带；大变形围岩；涌水突泥；高地应力岩爆；高磨蚀性硬岩、坚硬岩或超硬岩；岩溶（岩溶管道、溶腔等）；高地温；有害气体；放射性物质等。

7.2.4 本条强调隧洞施工时，根据全断面岩石掘进机掘进段地下水，选择掘进机的掘进方向；根据地质适应性选择的施工方法及对应的施工分段，确定单台掘进机总体起止位置，组装、步进、掘进、转场、检修、拆卸等工作状态及对应的位置。

地下水不丰富的隧洞，全断面岩石掘进机可顺坡掘进，亦可逆坡掘进。反之，正常施工受地下水影响时，掘进机应采用逆坡施工，且在施工过程中须进行超前探测，采取相应措施，保证人员设备安全。

7.2.5 掘进机组装、拆卸场地按空间位置分为地面与地下，地面与地下相比具有灵活方便、工期短、费用低等优势，建议在场地、气候等条件允许的前提下优先选择地面。

隧洞地形地质、工期等条件不合适时，掘进机的组装、拆卸场地不可避免选择在地下。施工通道中通过平洞运输、安装方案技术可靠，应用成熟，但缺少竖井和斜井运输掘进机重大件的经验和实例，尤其是深竖井。其他行业有狭窄空间内垂直吊装运输的类似案例，对比水利工程深竖井掘进机重大件运输，一是地面吊装；二是高度低；三是重量轻。

7.2.6 目前国内外个别隧洞工程出现刀盘刀座开裂、轴承磨损等严重影响掘进机正常施工的状况。同时，部分岩石掘进机施工长度达 20km 以上，复杂的地质环境带来了人员、设备方面的安全风险。基于工程施工安全、掘进机运行可靠性、投资经济等因素考虑，本条提出论证掘进机在隧洞中部检修的必要性。如果存在大修或关键部件更换，还需要设置检修洞室。

同时，掘进机转场一般包括步进（或滑行）设施、出渣系统、通风系统、供电系统、供水系统、生产生活区及配套中间通道等内容。掘进机转场一方面可以缩短工期（敞开式掘进机）；二是降低风水电、出渣运输系统、物料运输系统等临建设施的规模和投入，节约投资；

三是施工管理简单。但需要设置施工中间通道。

因此，转场方案可从掘进机可靠性、施工安全性、转场经济性等方面论证确定。

7.2.7 本条强调工业广场及辅助洞室在位置选择和规划布置方面考虑的主要因素及要求。

工业广场布置主要包括掘进机和配套系统组装、检修、物料转运和存放等所需的场地、施工装备及车场等规划。辅助洞室包括连接、组装、步进、始发、检修、拆卸洞室及排水泵站、变电站洞室、混凝土拌和站等项目。

1 针对地下水不丰富的隧洞，本条提出“单洞双机”方案（一条进入通道服务两台掘进机，一台顺坡掘进、一台逆坡掘进）需进行工业广场和辅助洞室独立布置和综合布置方案技术经济方面的论证。

2 本条基于施工运输、设备布置等方面因素，提出了大多数项目工业广场及辅助洞室布置的位置，个别项目因场地限制、地形地质条件等因素将工业广场及辅助洞室放在距洞口或交叉口较远的洞段。

7.2.8 全断面岩石掘进机施工通道有平洞（又称缓斜井）、竖井及斜井三种型式，按掘进机使用和分布位置的不同，可设置在掘进机施工段进入部位、中间部位及尾部。其具体型式应结合隧洞地形地质条件、施工方案、施工分段等论证确定。

1 岩石掘进机及配套系统具有连续、高速的特点。本条提出施工通道的型式及通道施工期和运行期布置的装备与岩石掘进机施工装备、设备能力等相匹配的要求，是因为不同的通道型式及配套装备有其特定的使用范围和条件。如掘进机出渣运输一般为连续带式输送机，目前垂直状态下带式输送机输送高度不超过 200m；掘进机物料运输一般为轨道系统，无论竖井或斜井，均存在地面和地下车场布置困难、转运衔接不畅的问题。特别是竖井作为岩石掘进机重大件运输进入通道时，吊运技术要求高，安全风险大。

2 基于施工安全、设备能力、工程经济等考虑，在隧洞中为掘进机施工服务的施工通

道宜优先选择平洞。平洞具有施工方便，运行简单的特点。

3 国内目前已建的类似工程中大部分项目在掘进机施工段中部布置了平洞，作为掘进机转场的配套项目，承担渣料、物料、人员的运输及通风、供电、供排水等功能。本条因掘进机转场设置施工通道而将隧洞分为两段，提出掘进段长度均衡的要求，目的在于提高施工安全性，设备可靠性，减少临建工程，缩短运距，节约投资。

4 如果地形条件合适，施工通道不深或不长，基于掘进机运输安全、拆卸方便、缩短工期、节约投资等方面，掘进机掘进段尾部设置施工通道可具备施工部分隧洞、掘进机拆卸准备及其运输等功能。

7.2.9 在大埋深隧洞中，施工平洞较长时，施工工期也较长。尤其是作为掘进机组装进入的施工平洞，严重制约主体工程的开工。故应进行掘进机法和钻爆法施工方案的论证，并充分考虑二手全断面岩石掘进机再利用的可行性。

7.2.10 本条强调研究同一台全断面岩石掘进机掘进隧洞和平洞的施工方案，并提出全断面岩石掘进机掘进长度、断面及地质方面的要求：一般平洞长度不大于掘进机掘进长度的15%~20%，平洞与隧洞掘进长度之和小于掘进机的施工能力；掘进机开挖断面满足平洞施工装备的布置；平洞和隧洞交叉段围岩Ⅲ类以上。

7.3 施工通道、工业广场及辅助洞室

7.3.1 施工通道和辅助洞室因工程运行期检修、通风等要求，可分为永久和临时建筑物，相应按 SL 252 确定建筑物工程寿命、级别、设计标准。

7.3.2 施工通道设计原则

本条从工程地形地质、工程布置、施工运行、环境保护及工程占地等方面提出原则性的设计要求。

7.3.3 施工通道的布置应根据地形地质条件、工程布置和工程量、施工方案及机械设备

要求等具体情况确定。

关于竖井、斜井：除本规范规定的以外，水利行业有规定的按水利行业有关规范执行；水利行业没有规定的按冶金行业的相关规程规范执行，尤其是埋深大于百米的竖井、斜井的设计。

本条未涉及的设计内容按 SL 303、SL 642、SL 378 中有关规定执行。

7.3.4 施工通道的断面型式和尺寸除应考虑地形地质条件、工程布置、施工工期、施工方案及机械设备等因素之外，具体应结合通道型式和布置、重大件运输、断面施工装备的布置（包括运输装备、通风管、水电风管路、人行通道、排水设施等）、安全设施和安全间距等方面确定。

7.3.5 隧洞断面装备之间的安全间距

1 水利行业有关规范中没有规定隧洞内施工断面装备之间的安全间距。本条按 GB 50915 第 7.1.1 条的规定执行，为强制性条文。采用有轨运输时，运输设备之间、运输设备与洞内其他施工设备和管线之间、运输设备与支护之间的安全间距均为 300mm；采用无轨运输时，运输设备与洞内其他施工设备和管线之间、运输设备与支护之间的安全间距均为 600mm。存在围岩变形的洞段，安全距离宜适当加大。

类似于平洞，施工期间隧洞施工断面装备之间的安全间距应满足 GB 50915 中的相关规定。

2 本条施工竖井、斜井的凿井期间按 GB 50653 第 11.1.8 和 11.1.10 等条款执行；竖井、斜井运行期间按 GB 50915 第 4.2.2 条和 5.1.2 条等条款执行。均为强制性条文。

7.3.6 工业广场

1 本条强调了车场布置方面考虑的因素。地面车场主要根据交通运输、施工企业及场地等条件和要求布置。地下车场应结合交通运输、辅助洞室（连接、组装、步进、始发、检

修、拆卸等洞室)、围岩等条件和要求布置。

2 连接、组装、检修、拆卸等辅助洞室宜布置在隧洞、通道交叉口附近，断面较大，同时又是隧洞施工人员、物资转运场所，布置在Ⅲ类围岩以上洞段有利于洞室结构、施工运行安全，缩短工期，节约投资。必须布置在围岩较差的洞段时，应进行充分论证。

3 辅助洞室（连接、组装、步进、始发、检修、拆卸等洞室）的长度选择的主要考虑因素有车场、掘进机工作状态、掘进机主机和整机长度、连续带式输送机系统驱动和皮带机仓布置等方面因素。

一般连续带式输送机系统驱动、皮带机仓及硫化平台长度约为 110m 左右。连接洞室长度约取 40m~50m，组装洞室长度取约 80m。

为了满足掘进机及配套系统正常掘进的要求，掘进机整机应能布置在步进和始发洞室内。

始发洞室长度受掘进机主机长度和掘进模式控制。敞开式掘进机主机段长度一般在 18m 左右，始发洞室长度一般为 20m，护盾式 TBM 主机长度较短，单护盾 10m~11m，双护盾 12m~13m。单护盾掘进机一般采用反力架提供初始推进时的反力。双护盾掘进机：采用双护盾模式始发时可根据撑靴位置确定始发洞长度；采用单护盾模式始发时同单护盾掘进机。

掘进机主要重大件位于主机段。根据掘进机主机长度，考虑检修、拆卸时设备存放、运输等要求，提出检修、拆卸洞室的最小长度 25m。

4 本条提出确定组装洞室、检修洞室断面型式和尺寸应考虑的因素。

5 本条主要从钻爆法目前施工水平、节约投资的角度，提出步进、始发洞室扩大断面的富余宽度。

7.3.7 本条明确施工通道（平洞、竖井、斜井）和辅助洞室设计的适用规范。平洞、竖井、斜井、辅助洞室的支护设计按 SL 377 中的相关规定执行。结构、防排水等其他设计：

平洞参照 JTG 3370 中的相关规定执行；竖井、斜井参照 GB 50915 中的相关规定执行；辅助洞室往往结合隧洞布置，按 SL 279 中的相关规定执行。

7.3.8 水利工程中积累了丰富的平洞施工经验。平洞、辅助洞室的施工技术可按照 SL 303 和 SL 378 中的相关要求执行。深度大于百米的竖井和斜井施工技术宜按照 GB 50653 中的相关要求执行。深度小于百米的竖井和斜井不受工期、装备等方面制约时，其施工技术宜按照 SL 303 和 SL 378 中的相关要求执行。

7.4 掘进机组装、检修、转场及拆卸

7.4.1 本条主要说明掘进机组装方式和吊装设备选择方面的要求。

1 掘进机组装场地一般分为洞内和洞外。洞外组装基本不受场地空间制约，组件的运输、就位相对方便，组装周期短，故条件允许时宜采用洞外组装。采用洞外组装时，若洞外组装场地长度小于 1 倍整机长度，可采用分部组装方式。分部组装场地应至少满足大件堆放、主机组装的要求，其长度不宜小于 50m。洞内组装需要预先施工大断面组装洞室，宜采用分部组装方式。

掘进机组装程序应结合设备进场运输方案和计划合理安排，最大限度节约组装工期。

掘进机吊装方法应根据单件外形尺寸、重心位置及重量等确定。

2 掘进机组装的起吊设备型式选择主要涉及吊装方式、洞室围岩条件、断面型式和尺寸、断面结构、承包人拥有的吊装设备等因素，一般宜结合洞室断面型式和尺寸、掘进机组装（或设备检修、部件更换）和物料转运所需起吊设备综合确定。当洞室围岩为 I ~ III 类，一般采用桥式起重机组装；洞室围岩为 IV ~ V 类，一般采用门式起重机或钢结构吊车梁桥式起重机组装。实际工程中选择何种吊装方式比较复杂，如 III 类以上围岩也可采取门式起重机方式，或者掘进机组装（或设备检修、部件更换）和物料转运所用起吊设备不同。但无论采用何种组装方式，起重机最大起重量均应满足起吊最重件的要求。

3 因洞内组装空间较大，掘进机组件繁多，土建和组装周期较长，要求合理规划掘进机组件的进场、转运、组装等环节进度。

4 鉴于现场制作或加工掘进机刀盘的有限条件和能力，当交通运输等条件不制约时，尤其是掘进缺少检修条件的长距离硬岩隧洞，建议刀盘工厂化整体制作、运输、安装。

5 本条为常规性要求，掘进机为系统集成产品，组件复杂，种类繁多，多源供货，进场前需要一次预装。如认为确实没有必要或特殊情况要求，也可直接进场组装。

7.4.2 本条强调掘进机掘进过程中的检修方面的要求。

1 掘进机施工配应置保养检修班，每天维护、检修时间不少于每日 4h，以保证较高的设备完好率，提高施工效率。

2 掘进机主轴承设计寿命可达到 15000h~20000h，具备连续掘进 20km 以上的能力，但因掘进过程中主机周边环境恶劣，受力条件复杂，会对掘进机造成各种各样的损伤。虽有日常检修，掘进机在掘进过程中仍可能出现各种故障。因此，一般在掘进 10km 后对掘进机进行系统检修，更换部分日常不易检修、维护的受损组件，如主密封、刀盘等。

3 本条说明检修洞室内的起吊设备能力应按掘进机需检修、更换的最大件和转运物料的最大重量确定。

7.4.3 掘进机转场是一项复杂的系统工程，涉及交通运输系统、出渣系统、供电系统、供水系统、通风系统、生产生活区等转场，以及施工通道选型和布置、掘进机和配套系统步进和拆装、工程占地、环境保护要求等因素，转场方案需经过技术经济论证确定。因掘进机转场准备项目工作繁多，转场工期较长，应尽可能做好充分准备，缩短转场工期。

7.4.4 掘进机拆卸

掘进机拆卸保持部件的完整性主要针对二次利用而提出的要求。

掘进机地面拆卸相对简单。掘进机地下拆卸依据拆卸设备不同，分为桥式起重机、门

式起重机等方式；依据掘进机拆卸后运输方向的不同，分为前进式和后退式；依据拆卸设备配套的土建洞室划分，分为洞室拆卸方案或无洞室拆卸方案。在深埋长隧洞施工过程中，如果终点没有设置施工通道运输的条件，采用掘进机机尾开挖旁洞绕至机前施工拆卸洞室，掘进机拆卸和运输存在安全、工期、费用等方面的问题。掘进机拆卸方案应根据工作面交通情况、围岩条件、工期要求等因素，通过技术经济论证确定。尽量采取简易、可靠的拆卸方式。

7.5 掘进、支护与衬砌

7.5.1 掘进、步进

1 本条强调掘进机的功能和掘进能力应与工程地质、施工方案、施工进度、工作环境等方面相匹配。

2 本条强调掘进机在组装完成后、进入始发洞前应进行整机调试，以便及时消缺。

试掘进的主要目的在于进行设备、人员的磨合；检验掘进机的开挖、支护、衬砌等施工能力；检查掘进机和出渣系统、液压系统、电气系统和辅助设备等的工作情况；完成各单项设备的功能测试。通过对各设备、系统做进一步的再次调整，管理及作业人员更加熟悉掘进机各项设备的性能，可合理选择掘进参数及控制措施，有效协调洞内外的组织管理，尽快形成快速掘进的能力。

试掘进段长度宜依据施工单位的管理水平和施工人员素质确定，一般为 2.0km，其中前 1.0km 由掘进机供货商示范操作并负责对操作人员的培训，后 1.0km 由土建承包人负责操作，掘进机供货商负责技术指导。

3 目前掘进机步进或滑行方法包括轨行式、滑轨式、滑板式、掘进式、蛙跳式、反力架式等。其中轨行式、滑轨式适合各种机型，如辽宁大伙房供水工程、重庆轨道交通 6 号线铜锣山隧道。滑板式、掘进式、蛙跳式适合于敞开式掘进机，如辽西北供水工程、引汉济渭供水工程、引松供水工程。反力架式适合盾构式掘进机，如引大济湟供水工程、二期输水

工程双三隧洞。

掘进机步进或滑行方式可通过技术经济论证确定。

7.5.2 支护、衬砌

1 掘进机是集掘进、支护、衬砌及回填注浆于一体的设备。本条要求掘进机配置的一次支护系统、混凝土衬砌、豆粒石回填、注浆等设备的施工能力应满足掘进机在不同地质条件下最高速度的要求。

2 本条强调敞开式掘进机的钢筋排安装系统、锚杆钻孔、混凝土喷护、钢拱架安装等支护措施应在护盾后紧跟作业，尤其是在不良地质洞段，及时封闭围岩很关键。工程实际施工过程中因设备布置限制，喷护混凝土往往滞后，不及时封闭开挖面，造成掉块掉渣、变形等问题。此问题的实际解决办法是在敞开式掘进机护盾后配置喷护混凝土应急设备。

3 本条说明采用敞开式掘进机施工的隧洞，一般掘进、支护与衬砌作业的施工程序。工程实际施工过程中，因地质影响、进度要求，需要调整掘进与衬砌的施工顺序。根据铁路行业及其他行业施工经验，隧洞开挖断面直径大于 8m 时：掘进机采用矿车出渣，边顶拱或底板衬砌可与隧洞开挖同步进行；掘进机采用皮带机出渣，边顶拱衬砌有一定的困难，但底板衬砌同步掘进机开挖是有可能的。如果隧洞断面开挖直径小于 8m，受结构型式和隧洞断面开挖尺寸的影响，应研究底板衬砌与掘进机开挖平行作业的可行性。

4 本条强调掘进机施工的圆形断面长隧洞，衬砌从结构断面上分为全断面或底板与边墙、顶拱二次两种施工方式。有条件时，宜选择全断面衬砌；边墙、顶拱一体衬砌。

5 本条强调选择隧洞衬砌方案时应考虑的主要因素，隧洞衬砌方案包括结构段浇筑长度、衬砌与掘进作业方式（同步或者顺序）、衬砌分段、由里向外或由外向里衬砌、全断面衬砌或者底板与边顶拱分开衬砌、底板与边顶拱衬砌程序、混凝土施工运输方式、模板类型、入仓方式等内容，优化施工程序和工期。

7.6 施工出渣及物料运输

7.6.1 出渣运输可分为带式输送机、轨道系统及其与无轨胶轮车组合的运输方式。物料运输可分为轨道运输、无轨运输、垂直运输及其组合方式。一般物料包括：钢轨、轨枕、水管、喷或现浇混凝土、预制管片、豆砾石、水泥、砂浆及各种机具机械设备、材料器材等。轨道系统适应长距离运输，无轨系统适应短距离运输。受制于施工通道型式和布置的影响，物料运输方式可能有多种选择，需要综合考虑隧洞长度、设备造价、掘进机掘进能力等因素。

大伙房工程建设以前，国内水利工程全断面岩石掘进机出渣一般采用轨道机车系统。为充分发挥全断面岩石掘进机连续、快速、强度高的特点，要求出渣运输与掘进作业同步，轨道机车系统存在转接间断的问题，影响掘进机的充分利用。目前，只要隧洞掘进机开挖断面合适，出渣基本上采用带式输送机运输。

带式输送机具有运输线路适用性强、连续快速、可靠性强、安全性高、费用低、无污染等优点，与掘进机上的固定带式输送机完全匹配。

7.6.2 本条强调出渣和物料运输系统能力应与掘进机掘进、支护等速度相匹配。

7.6.3 本条针对出渣和物料运输方式改变而提出设置转运设施、设备、存放场地的要求。如隧洞渣料运输采用带式输送机，地面采用带式输送机转渣卸料后，装载机装自卸汽车运输或直接装自卸汽车运输；物料运输一般由无轨车辆转轨道运输系统，均需要在地面或地下设置加工设施、转运设施、存放场地等。

7.6.4 带式输送机可分为固定带式输送机和连续带式输送机两种型式。

1 本条说明带式输送机的适用条件：

1) 隧洞开挖断面应满足带式输送机出渣系统、物料运输系统、风管等装备布置。如果隧洞开挖直径太小，存在渣料和物料运输系统断面布置上的困难。采用带式输送机出渣的鄂北供水工程宝林隧洞，为目前查到的最小断面隧洞，开挖直径 4m。

2) 隧洞转弯半径须满足带式输送机运输系统正常运行的要求。通过调研,一般供货商认为带式输送机转弯半径大于 500m 后基本不影响正常运行。有条件时,尽可能选择较大的带式输送机转弯半径。转弯半径过小,易发生皮带严重磨损、脱辊、掉渣等问题。深圳地铁 6 号线梅林关站至民乐停车场项目带式输送机转弯半径为 260m。

3) 本条引用《煤炭安全规程》第三百七十四条。带式输送机允许的最大倾角与运输物料对输送带的摩擦系数 f 有关,对于加斗槽等特种带式输送机不受摩擦系数影响。

4) 根据广泛调查,现有工程带式输送机出渣垂直最大提升高度为 203m。

表 7.6.4 - 1 垂直带式输送机应用统计表

工程名称	带速 / (m/s)	运量 / (t/h)	高度 / m	备注
美国芝加哥隧洞	2.3	1000	80	
巴布亚新几内亚地下金矿	2	350	203	
宝钢钢铁生产线	-	460	110	

2 本条提出与掘进机配套的连续或固定带式输送机在隧洞内的布置要求。

3 因带式输送机设计涉及系统布置、设备选型、施工效率、运行成本等,本条提出进行必要的论证工作。

4 带速是一个模数化的参数,依据 GB 50431《带式输送机工程设计规范》,带速系列见表 7.6.4 - 2。带速的选择应考虑带宽、运输角度、运输能力等因素。一般带式输送机皮带宽度在 800mm ~ 1200mm 之间。

表 7.6.4 - 2 带式输送机带速与输送带宽度的匹配范围

带宽 / mm	带速 / (m/s)													
	0.8	1.0	1.25	1.6	2.0	2.5	3.15	3.5	4.0	4.5	5.0	5.6	6.3	7.1
500	√	√	√	√	√	√								
650	√	√	√	√	√	√								
800	√	√	√	√	√	√	√	√						
1000	√	√	√	√	√	√	√	√	√					
1200		√	√	√	√	√	√	√	√	√	√			
1400			√	√	√	√	√	√	√	√	√			
1600				√	√	√	√	√	√	√	√	√		
1800					√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

2000						√	√	√	√	√	√	√	√	√
2200						√	√	√	√	√	√	√	√	√
2400						√	√	√	√	√	√	√	√	√
2600							√	√	√	√	√	√	√	√
2800							√	√	√	√	√	√	√	√

7.6.5 轨道运输系统

1 采用有轨运输方案时运输坡度与机车牵引力、装载能力有关。按 SL 303-2017 第 4.6.8 条规定，平洞纵坡：有轨运输不宜超过 2%。新疆某输水工程双三隧洞的 6#、7# 施工平洞采用轨道运输方案，平洞纵坡 5%，目前运行基本正常。从安全方面考虑，按 GB 50157《地铁设计规范》第 4.1.6 条，轨道运输坡度取不大于 4%。

表 7.6.4-3 双三隧洞施工支洞纵坡统计表

工程名称	长度 / m	直径 / m	开挖直径 / m	纵坡 / %	备注
6#	1423	φ4.5	φ5.5	5	轨道运输
7#	1376	φ4.5	φ5.5	5	轨道运输

机车一般分为内燃机车和电瓶机车，内燃机车对空气污染严重，通风成本高，电瓶机车续航能力差，但环境污染小，因此机车选择需要进行技术经济、环境要求等论证后确定。

为确保施工安全，应在洞口、主支交叉口、作业地段、曲线段、道岔、掘进机事故多发点限制行驶速度；列车之间设置安全距离。

2 提升机或绞车提升

1) 本款说明提升机或绞车提升系统适用斜井。基于提高运输能力的目的，布置两套提升系统，一套提升箕斗专门出渣，一套提升矿车和人员，运输材料、人员，辅助出渣。

2) 本款说明建井施工期、隧洞施工期的出渣运输方式及施工装备方面的要求。

3) 受空间限制及考虑施工安全、施工效率，斜井内应选用大型提升设备单级提升，不宜设置转渣平台及转渣仓。

7.6.6 无轨运输

无轨运输一般适合大中型断面隧洞，但长隧洞不适合无轨运输。一般交通条件制约无轨

运输，地面无轨运输按 SL 303 中的相关规定执行；地下工程无轨运输 SL 303 中在特殊情况下，对限制坡长 150m 的隧洞纵坡提出了两个要求：一是不要超过 9%；二是局部最大纵坡不允许大于 14%。

1 本条强调选择无轨运输方式和机械化设备考虑的因素。如长距离、小断面隧洞，由于运输距离、断面装备（通风等）、作业空间等因素，一般适合轨道运输。机械化设备要求一要配套，二要流水作业，提高施工效率。

2 为方便施工，提高施工效率，本条提出了隧洞内车辆错车、回车方式及间距。

7.6.7 竖井运输系统

1 本条说明竖井人员、物料及出渣的容器运输方式。

2 本条强调建井、改绞及隧洞施工各阶段提升系统设备设施应前后衔接，充分利用，避免二次改造。同时，这种要求或安排也符合水利工程施工装备临时性的特点。

3 参照冶金、煤炭行业系列化、标准化的提升设备，本条提出采用建井期间提升系统的提升机、定型井架等设备，节省工期，节约投资。

4 本条说明提升系统其他主要要求应符合 GB 50653、GB 50384 中的相关规定。

7.7 施工通风、防尘及防有害气体

7.7.1 本着“以人为本”精神，隧道施工通风是改善施工环境、保障作业人员身体健康的主要措施，应不断向洞内供给新鲜空气，补充足够氧气，稀释有害气体和降低洞内粉尘浓度，并调节洞内温度和湿度。为了保护隧洞内作业人员的身心健康，保证安全生产，本条依据有关规范，提出了隧洞内氧气浓度、粉尘浓度、有害气体浓度等采用的环境卫生标准。其中，考虑到人体汗液蒸发效率不仅与空气温度有关，也受相对湿度的影响，高温高湿会对隧道内作业人员带来不利的影晌，使其工作效率降低，也对洞内湿度进行了规定。

1 洞内空气中氧气含量按体积计不得小于 20%。

2 洞内粉尘浓度和有害气体浓度必须符合表 7.7.1 - 1 中的规定。

表 7.7.1 - 1 空气中有毒物质的最高容许含量表

项目名称	最高容许浓度		附注
	按体积 / %	按质量 / (mg/m ³)	
二氧化碳 (CO ₂)	0.5	-	一氧化碳的容许含量与作业时间： 容许含量为 50mg/m ³ 时，作业时间不宜超过 1h； 容许含量为 100mg/m ³ 时，作业时间不宜超过 0.5h； 容许含量为 200mg/m ³ 时，作业时间不宜超过 20min； 反复作业的间隔时间应在 2h 以上。
甲烷 (CH ₄)	1	-	
一氧化碳 (CO)	0.0024	30	
氮氧化物换算成二氧化氮 (NO ₂)	0.00025	5	
二氧化硫 (SO ₂)	0.0005	15	
硫化氢 (H ₂ S)	0.00066	10	
醛类 (丙烯醛)	-	0.3	
含有 10% 以上游离 SiO ₂ 的粉尘	-	2	含有 80% 以上游离 SiO ₂ 的生产粉尘不宜超过 1mg / m ³
含有 10% 以下游离 SiO ₂ 水 泥粉尘	-	6	
含有 10% 以上游离 SiO ₂ 的 其他粉尘	-	10	

3 洞内作业地点噪声超过 90dB (A) 时，应采取消音或其他防护措施。仍达不到标准时，应按表 7.7.1 - 2 规定减少接触噪声的时间。

表 7.7.1-2 噪声与容许接触时间表

每个工作日接触噪声时间 h	6	4	2	1
容许噪声 dB (A)	< 0.25	< 1.0	> 1.0	> 1.5

7.7.2 通风方式可根据工程布置、通风长度、断面尺寸、施工方案、工作面有害气体和粉尘浓度的含量及其危害程度等因素综合考虑确定。隧洞一般采用采用机械通风方式。机械通风又分风管式、巷道式、风道式等方式。风管式通风又有压入式、抽出式和混合式等。

掘进机法施工通风通常采用风管压入式，当局部通风效果较差时应设置辅助通风系统。

7.7.3 施工通风风量、风速

1 根据《铁路隧道全断面岩石掘进机法技术指南》以及秦岭铁路隧道工程、大伙房水库输水工程、辽西北引水工程等实例，掘进机工作面附近的隧洞回风风速不应低于 0.5m/s。

2 根据国内外部分长距离隧洞工程施工通风资料，采用优质软风管，长距离隧洞施工

通风每 100m 平均漏风率不宜大于 0.6%。

表 7.7.3 - 1 国内外部分隧洞工程 TBM 施工通风统计表

序号	项目名称	施工方法	通风长度 (km)	风管直径 (m)	漏风率 (%)	备注	
1	厄瓜多尔 CCS 水电站输水隧洞	TBM	14	2.4	0.2	双护盾	
2		TBM	11.2	2.2	0.2	双护盾	
3	越南上坤嵩水电项目	TBM	15.5	1.5	0.3		
4	辽宁大伙房水库输水工程一期工程	TBM1 标	TBM	10.5	2.2	0.2	
5		TBM2 标		10.63	2.2	0.2	
6		TBM3 标		8.45	2.2	0.5	
7	陕西引红济石工程	TBM	11	0.9	0.25	双护盾	
8	吉林引松供水工程 TBM 三标段	TBM	11	2.2	0.2		
9	山西中部引黄工程	T2	TBM	16	1.5	0.15	双护盾
10		T4	TBM	15.06	1.2	0.15	双护盾
11	湖北鄂北地区水资源配置工程 16 标宝林隧洞	TBM	10.65	1.2	0.5		
12	广州北江引水项目四标段 (DZ700)	TBM	11	1.4	0.5		
13	陕西引汉济渭工程秦岭隧洞 TBM 掘进段	岭北	TBM	16.5	2.2	0.5	5 号洞工区
14				11.8	2.2	0.5	6 号洞工区
15				岭南	11	2.2	0.5
16	新疆 ABH 输水隧洞	III 标	TBM	18.58	2.2	0.5	
17		IV 标	TBM	18.384	2.2	0.5	接力
18	新疆某引水工程 XE 隧洞 III 标	TBM361	TBM	17.89	2.2	0.5	接力
19		TBM362	TBM	14.558	2.2	0.5	
20	新疆某引水工程 KS 隧洞 V 标	TBM4	TBM	13.577	2.2	0.4	
21		TBM5	TBM	10.5	2.2	0.4	
22	滇中引水工程大理 I 段施工 3 标	TBM	21	2.6	0.5		
23	新疆吐库二线铁路工程中天山隧道	TBM	14	2.2	0.4		
24	兰渝铁路西秦岭隧洞	TBM	12	2.2	0.2		

3 提出隧洞施工作业区平均气温超过 28℃后，施工作业区的风速应专题研究的要求。

隧道内温度取决于洞内空气温度、湿度和风速三者的综合状态。人体内的热量通过辐射、对流和汗液蒸发而散发，当洞内温度超过 25℃时，辐射和对流减少程度较大，当洞内平均温度不应超过 28℃时，对施工主要作业区的人员影响较大。

洞内温度与风速的关系表详见表 7.7.3 - 2。

表 7.7.3 - 2 温度与风速关系表

温度 °C	15 以下	15~20	20~22	22~24	24~28
-------	-------	-------	-------	-------	-------

风速 / (m/s)	<0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	>2.0
------------	------	---------	---------	---------	------

4 隧道内需风量的计算，除考虑保证作业人员身体健康需要的新鲜空气外，尚应满足施工方面的其他要求。

1) 按洞内同时工作的最多人数和内燃机械需要的新鲜空气风量之和计算风量。每人每分钟需风量供给不小于 $3\text{m}^3/\text{min}$ ，内燃机械作业需风量不宜小于 $4.08\text{m}^3/(\text{min}\cdot\text{kW})$ 。

2) 近年来，高海拔地区的隧道工程逐渐增多，由于海拔高程增加后，空气稀薄，缺氧严重，会出现施工机械效率降低造成燃烧不充分而使有害物质产生量增加等情况，故计算出的通风量应加以修正。

当隧洞洞口或井口位于海拔 1000m 以上时，通风量应按以下规定进行修正：①施工人员通风量乘以高程修正系数 1.3 ~ 1.5（高程低者取小值，高程高者取大值）；②洞内使用柴油机机械时，所需风量可乘以高程修正系数 1.2 ~ 3.9（高程低者取小值，高程高者取大值）；③爆破散烟所需风量可除以表 7.7.3 - 3 中相应的高程修正系数。

表 7.7.3 - 3 高程修正系数表

海拔 (m)	0	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
高程修正系数	1.00	0.90	0.85	0.81	0.76	0.72	0.69	0.65	0.62	0.58

注：高程修正系数可根据海拔内插取值。

3) 根据 SL 303，按最大、最小容许风速及隧洞工作面温度所需的风速校核计算的风量。

施工通道工作面最大风速不应超过 4m/s ；运输东和通风洞最大风速不应超过 6m/s ；升降人员与器材的井筒不应超过 8m/s 。隧洞工作面附近的最小风速不应小于 0.25m/s 。

按以上方法计算、校核后，以其中风量最大者作为选择通风设备的依据。

7.7.4 通风系统设计

1 通风系统方式、布置、风机型式、风管直径和材料选择等应根据工程布置、需风量、隧洞断面尺寸、施工机械等要求论证确定。风机依据工作风量和工作风压进行选择。通风机

的工作风量应为施工所需风量与风管的漏风量之和 ;工作风压为风流经过风管或风道时所需的总风压。风管的通风效果与风管末端到工作面的距离、风管安装质量有关。

2 通风距离受通风量、风管直径和材质、漏风率、维护管理等因素影响较大。通风距离较长时,如果采用一站压入式通风,通风设备功率较高;风管前 1/3 段承受风压高,风管投资增加,接力式通风可有效解决上述问题。但应综合技术经济等因素确定。

目前国内外一站式通风距离大于 15km 的工程实例较少。天山隧洞Ⅲ标 1#支洞的洞口高程为 1503m, TBM1 通过 1#支洞施工,风管直径 2.2m,已实现 16.4km 独头通风。

长距离隧洞施工通风,无论采用用一站式或接力式,均应选用满足施工断面要求的允许最大直径、每 100m 平均漏风率较小的优质软风管。

3 长距离隧洞通风宜选择效率高、体积小、结构紧凑的变频高压轴流式风机,该风机属多级变速,节能,尺寸小、重量轻、转速高,可直接与电动机连接,便于串联通风。

4 长距离隧洞独头通风,一般选用 2 台及以上风机集中串联运行,初期安装 1 台,通风超过一定长度后 2 台串联,以节约能源。串联风机宜选用型号与功率相同的风机。风机串联时的合成特性曲线按风量相等、风压相加原则求得。

5 风管直径主要根据送风量及送风长度确定,同时还应考虑隧洞断面大小、运输净空、风机直径配套或接近等因素。此外,在相同的情况下,风管的阻力与风管直径的五次方成反比,风管直径越大,风管的风阻就越小,对管道送风越有利。在施工断面允许的情况下,应尽可能选择较大直径通风管,以减小通风机功率。

6 对于风管目前使用的通风管道有刚性和柔性两种,刚性风管具有摩擦阻力小、抗冲击、耐磨、不易变形、能承受负压等优点,不足之处是管节短、重量大、加工、搬运、存储、安装较麻烦,由于其管节短、接头及焊接多漏风大,不适合长距离通风;柔性风管兼有刚、柔的特点,其强度、耐磨、低阻、布置平顺、安全。通常长距离隧洞通风管道采用软质风管。

根据国内外通风风管的设计、制造和工艺水平，通风软管的风管直径已达到 3.20m。

7 风管的通风效果与安装质量等因素有关，通风系统的风管风阻和漏风量直接影响实际通风效果。除风管按设计要求布置顺直，单节风管越长，接头越少，相应漏风率就越低，对长距离通风管道尤其明显。否则漏风量和沿程损失增加，严重影响通风效果。

7.7.5 防尘、防辐射及防有害气体

隧道在掘进过程中会有大量的岩尘产生，其中特别有害的是游离 SiO₂，会严重污染施工区域的空气。0.1~5μm 的粉尘能直接进入人体肺部，对人体健康危害极大，同时粉尘也会加快机械磨损。对于悬浮于空气中的粒径小于 5μm 的粉尘需加强通风，不断置换洞内空气，才能把粉尘浓度降到允许值以下。

表 7.7.5 空气中粉尘的最高容许含量表

项目名称	最高容许浓度 / (mg/m ³)	备注
含有 10% 以上游离 SiO ₂ 的粉尘	2	含有 80% 以上游离 SiO ₂ 的生产粉尘不宜超过 1mg/m ³
含有 10% 以下游离 SiO ₂ 水泥粉尘	6	
含有 10% 以上游离 SiO ₂ 的其他粉尘	10	

防辐射处理措施应按照 SL 642 中的 9.3.2 款执行。

防尘、防有害气体处理措施应按照 SL 378 中的相关规定执行。

7.8 施工供水、供电

7.8.1 施工供水

1 本条强调隧洞工程各类用户水质、水压、水量等方面的要求。

2 掘进机用水主要为冷却用水、刀盘喷淋、皮带机喷水降尘等。用水指标可根据工程经验、环保要求确定，当缺少资料时也可根据掘进机石方开挖用水指标进行估算。

表 7.8.1 掘进机施工石方开挖用水指标表

项目名称	单轴抗压强度 / MPa							
	敞开式 TBM 耗水量 / (m ³ /100m ³)				双护盾 TBM			
开挖直径 / m	≤50	50~100	100~150	150~200	≤50	50~100	100~150	150~200

4	79	94	105	126	79	94	105	126
5	64	76	86	105	64	84	96	116
6	64	75	86	104	64	81	93	111
7	59	79	90	111	59	79	90	107
8	57	77	88	109	57	77	88	105
9	55	75	86	107	55	75	86	101
10	53	73	84	105	53	73	84	94

3 本条强调掘进机施工用水、生产用水应进行处理并达到工业用水标准，二次充分利用。

4 为了保证掘进机正常、顺利施工，工程要求施工供水系统应当安全、可靠。本条主要针对施工水源距离远、供水系统复杂提出的要求。施工供水方案主要包括供水方式和级数、取水水源、输水管线、建筑物布置、调节池规模和型式、水泵选型和台数、管径管材、防腐、自动控制等设计内容。

7.8.2 施工供电及照明

1 掘进机由于其工作性质和设备本身的重要性，根据电力系统规定，确定为一级用电负荷。同时由于掘进机电负荷较大，且为地下或隧洞内作业，对用电质量和安全性都比较高，应优先考虑采用电网供电。对洞内有通风、排水、照明、施工通信中心、急救室以及其他因停电可能造成人身伤亡的设备事故、引起国家财产严重损失的一类负荷，应考虑电网双电源设计。双电源有困难时，洞口必需配备为一类负荷供电电压等级一致及足够容量的应急备用电源。有耗氧及废气排放的发电设备不得进入洞内。

2 掘进机作为移动用电负荷，不仅用负荷大，且负荷随着岩性变化而变化，导致电压周波不断地变化，会对电网的稳定运行产生一定的影响。根据掘进机对供电质量要求和电网稳定运行要求，应根据电网实际分布情况，因地制宜采用不同的电压等级，针对不同的电源点，选择多方案供电体系，对供电的稳定性、安全性、合理性、经济性做综合评价，对稳定电网电压和满足掘进机不断变化的负荷波动所投入的稳控设备作可行性评价，以期达到最佳

供电效果。

3 掘进机设备主要为电机,运行特性对其他设备的用电影响较大,且其用电相对独立、负荷大,变化较为频繁,用电质量要求较高,为其供电的洞外变配电设备需要单独设置。

4 掘进机电负荷较大,且洞内施工距离较长,供电线路损耗较大,相同条件下根据不同的掘进距离采用 10kV 或 20kV 较为经济,其他 20kV 以上高电压等级的线路电气设备安全防护距离加大,对有限的洞内空间布置带来极大不便。铜导体电缆在耐受强度、抗氧化性、短路电流耐受性及载流量等诸多方面比铝导体电缆有着较突出的优势,在正常运行过程中的可靠性和安全性比铝导体电缆高,作为洞内施工的重要电源,电缆应选用铜电缆。

5 隧洞供电一般为临时性供电,电气设备周围不得存放易燃易爆物品、污染和腐蚀介质,洞内设备要有预防洞顶高处坠物、物体打击、车辆伤害等的防护措施,洞内明敷电缆要有防外力破坏的措施。变压器必须设接地保护装置,安装护栏、设置安全警示牌。所有配电盘、配电箱要有绝缘垫,安装漏电保护装置,具备防火、防水,箱内不得存放杂物。

6 临时备用电源通常作为保安电源使用,在网电故障情况下,确保洞内人员及重要设施的安全不受影响。同时洞内为人员和设备生产活动的重要场所,临时电源一般为动力发电设备,对洞内的环境影响较大,在密闭洞室内严禁使用。

7 洞内设备接地系统必须要保障人员和设备的安全,高压交流供电系统应遵循 DL/T 620 的相应条文,低压交流配电系统应遵循 GB 14050 的相应条文。

8 隧道照明可采用荧光灯、荧光高压汞灯、卤钨灯、长弧氙灯或高压钠灯等光源照明。采用普通光源照明时,其照度应满足说明表 7.8.2 的要求。

表 7.8.2 隧道施工照明要求

序号	施工作业地段	照度标准 / lx	序号	施工作业地段	照度标准 / lx
1	锚杆部位	20	6	预制厂生产区	10
2	喷射混凝土部位	10	7	存放区	10
3	掘进机上列车编组部位	20	8	混凝土生产区	10
4	掘进机尾部	15	9	列车编组区	6

5	成洞地段	4	10	普通作业场所	8
---	------	---	----	--------	---

在主要交通道路、洞内抽水泵站、支洞交叉口等重要处所，应由安全照明，漏水地段照明应采用防水灯头和灯罩。

7.9 施工防排水

7.9.1 本条主要提出防排水应遵循的原则。地下突涌水对许多工程施工造成巨大的危害。综合考虑工程施工期安全、环境、进度等因素，首先要预防地下水渗漏灾害的发生，对下穿江、河、城市及环境有特殊要求的隧洞，宜采取全封闭不排水或少排水的处理措施；对岩溶、高压水和适当排水不会影响环境的隧道，宜采取以堵为主，限量排放的处理措施；排水对环境确无影响时，宜采取以排为主的措施，并考虑排水措施的可维护性。

7.9.2 施工防水

1 本条强调针对水量大、水压高的突涌水地层，为避免或降低灾害的发生，应积极采取超前预注浆等方式处理。目前，超前预注浆方式是一种有效、常用的方法。

2 随着科学技术的发展，隧洞工程防水的新材料、新工艺、新技术也不断出现，只要是符合国家现行标准，满足设计要求，经实践检验质量和性能可靠的，应当都可以使用。本条强调根据工程地质和水文地质情况，通过试验选用合理的防水方案。

3 本条基于环保方面的考虑，提出以水泥基材料为主灌浆。但在实际施工过程中，由于地层可灌性差或者高水头地下水需要快速凝结堵漏，也经常采用化学灌浆材料，灌浆效果较好。因此注浆材料的选用应根据现场条件、要求，通过试验确定。注意严禁使用有毒和污染环境材料，而且在长期使用中也不允许有毒物质滤出。

7.9.3 因水文地质的不同，不同洞段的地下水突涌水水量和延续时间差别较大。从地下水分布特点和施工安全考虑，结合防排水原则，本条提出隧洞工作面排水规模和隧洞总排水规模的计量方法。

7.9.4 施工排水系统

1 基于施工排水系统安全、可靠、技术、经济等方面的考虑，本条针对施工排水系统的排水方式和级数、泵站和管路布置、水仓规模和型式、水泵选型和台数、排水管径和根数、管材、自动控制等工程布置、设备配置方面的设计提出了论证要求。

2 本条提出了逆坡、顺坡掘进时的排水方式。水工长隧洞顺坡排水时，由于纵坡较缓，涌水量大时水深较大，可能会影响正常施工，可采取自然和机械相结合的方式。根据坡度、水量和设备情况设集水坑及布置管路和泵站，将洞内积水一次或分段接力排出洞外。

3 按 SL 378-2007 第 12.2.7 条款，本条主要提出地下排水泵站排水能力、设备数量、水泵和管路布置等方面的要求。

不同的规范对水仓的设置要求相差过大。

2016 版《煤矿安全规程》第八十二条：永久排水系统完成前，在井底必须设置临时排水系统。当预计涌水量不大于 $50\text{m}^3/\text{h}$ 时，临时水仓容积应当大于 4h 正常涌水量；当预计涌水量大于 $50\text{m}^3/\text{h}$ 时，临时水仓容积应当大于 8h 正常涌水量。第三百一十三条：新建、改扩建矿井或者生产矿井的新水平，正常涌水量在 $1000\text{m}^3/\text{h}$ 以下时，主要水仓的有效容量应当能容纳 8h 的正常涌水量；正常涌水量大于 $1000\text{m}^3/\text{h}$ 的矿井，主要水仓有效容量按照 $V=2(Q+3000)$ 计算。

按 GB 16423《金属非金属矿山安全规程》中第 6.6.4.3 条和 GB 50915 中第 10.4.2 条：涌水量较大的矿井，每个水仓的容积应能容纳 2h~4h 的井下正常涌水量；一般矿井主要水仓总容积应能容纳 6h~8h 的正常涌水量。

TB 10109《铁路隧道辅助坑道技术规范》中第 10.4.9 条：井下排水泵站的水仓应有两条独立、互不渗漏的坑道组成。水仓容积应能容纳 1.5h~2h 的设计涌水量。第 10.4.10 条：斜井、竖井分段排水时，腰泵站宜按泵站 10min~15min 排水能力计算。

显然，煤矿、有色行业无论作为建井期还是生产期，水仓容积最小的也要考虑 2h 的正常涌水量。考虑到水利工程施工期排水为临时性措施，突涌水发生历时无法预估，水仓不起调节作用，泵站排水能力按堵水以后的设计预计涌水量计算，并考虑备用能力，水仓容积不宜太大。同时，实际工程中也很少按煤矿、有色行业的要求执行的。参照铁路行业有关规范，竖井、斜井井下泵站水仓按 1.5 小时设计涌水量计；平洞井下泵站水仓容积按 10min ~ 15min 设计涌水量计。

4 本条主要说明隧洞工作面的排水设备布置方面的要求。排水能力按隧洞工作面最大涌水量计，备用容量一般考虑最大涌水量的 30% ~ 50%。

5 本条针对隧洞施工中突发状况提出的要求。如在富水地区可能发生严重的突涌水事故，这就要求不仅布置正常排水系统，配备足够的抽排水设备，还要针对突发状况制定突涌水预案，做好充分准备。

7.9.5 本条强调施工废水在环境保护方面的要求。在洞口应设与施工排水量相匹配的小型污水处理厂，或设沉淀池、过滤池、净化池等设施处理施工废水、污水。

7.10 施工交通、施工工厂及总布置

7.10.1 施工交通

1 本条强调了场内外交通运输能力及道路、桥涵、隧洞的设计遵循。

需要说明的是隧洞纵坡的选取。SL 303 中隧洞纵坡一般在 0.3% ~ 5% 范围内选择。特殊情况下，对限制坡长 150m 的隧洞纵坡提出了两个要求：一是不要超过 9%；二是局部最大纵坡不允许大于 14%。通过调查，辽宁西北部供水工程 7 条平洞综合纵坡为 9.84% ~ 14.5%，长度在 839m ~ 2455m 之间；引汉济渭工程 6 条平洞的综合纵坡在 8.23% ~ 10.78%，长度在 1148m ~ 5786m 之间；新疆北部供水工程有 22 条平洞综合纵坡在 11% ~ 12%，长度在 635m ~ 6444m 之间，均已突破了规范要求。其中，辽西北工程

新增 TBM 拆卸洞 5'号平洞综合纵坡达到 14.5%，洞长 1251m，在运行过程中发生过工程车刹车失灵方面的安全问题；12 号支洞长 1870m，综合纵坡 12.66%；新疆某引水工程 KS 隧洞多条施工平洞纵坡为 200m 陡坡（12.9%）+20m 缓坡（3%），综合纵坡 12%。工程采取了车辆安装缓速器、洞内增设防撞设施等安全措施。

国内部分已实施或正在实施的工程施工平洞由于埋深大、洞线较长等原因，隧洞纵坡设计突破了规范中的限制。

建议如果施工平洞纵坡布置超出规范要求，需作专题论证。

表 7. 10. 1 国内部分引水工程施工平洞布置资料

序号	工程名称	平洞编号	长度 / m	最大纵坡（坡长）+ 缓坡（坡长）	综合纵坡 / %	备注
1	辽西北供水工程	2#	951	12.82%(500m)+0% (25m)	12.21	
2		5'#	1251	15.428%(389.145m)+0% (25m)	14.5	
3		6#	2455	11.71%(125m)+0% (25m)	10.76	
4		11#	839	13.31%(125m)+0% (25m)	11.09	
5		12#	1870	13.89%(345m)+0% (25m)	12.66	
6	引汉济渭工程	岭北 0#	1148	11.65%(200m)+2% (30m)	10.13	
7		岭北 0-1#	1518	12%(200m)+2% (30m)	10.44	
8		岭北 4#	5786	11.96%(200m)+2% (30m)	10.78	
9		岭北 5#	4595	11.15%+2%	9.96	
11		岭北 6#	2470	9.1%+3%	8.23	
12		岭南 4#	5820	11.96%+2%	10.78	
15	新疆 ABH 输水隧洞	1#	2584	10.4%	10.4	TBM 掘进
16		2#	4386	12.8%+1%	11.48	
17	新疆某引水工程 XE 隧洞 III 标	2#	2398	12.9%+1%	12.0	勘探试验洞
18		4#	1028	12.9%+1%	12.0	
19	新疆某引水工程 KS 隧洞	P2	1689	12.9% (200m) +3% (20m)	12	
20		T1	1656	12.9% (200m) +3% (20m)	12	
21		P4	2567	12.9% (200m) +3% (20m)	12	
22		T2	2987	12.9% (200m) +3% (20m)	12	
23		T2+	3852	12.9% (200m) +3% (20m)	12	
24		T3	5152	12.76%+3.9%	11.5	勘探试验洞
25		T5	1980	12.9% (200m) +3% (20m)	12	

2 掘进机运输要求高、困难多，尤其是重大件运输往往对运输安全、安装进度有一定

的影响。其运输方案涉及运输路线、运载工具、装卸设备以及交通沿线个建筑物的承载能力、影响正常交通等方方面面，需要研究论证。运输方案确定时，还需征求有关部门的意见，订立有关协议。必要时还需出具专题报告，报请主管部门审批。

施工交通其他设计要求应符合 SL 303 相关规定。

7.10.2 施工工厂

1 本条强调了混凝土生产系统的生产能力应通过衬砌现浇混凝土、喷护混凝土或预制混凝土管片高峰时段的施工强度比较确定。一般掘进机高峰掘进速度可达 50m/d 以上，敞开式掘进机喷护混凝土的施工强度控制混凝土生产系统的规模。

2 本条强调了预制混凝土管片厂同其他施工工厂的布置和管片存放周期。管片存放场占地面积较大，应满足管片储量要求。

施工工厂的生产规模、工艺、布置及设备配置等设计要求应符合 SL 303 相关规定。

7.10.3 施工总布置

作为线性工程，长隧洞施工总布置应依据隧洞施工分段及施工方案，以施工通道口为中心，统筹安排各施工工区各种临时设施的总体布置，其总布置规划原则、项目及布置要求等与 SL 303 中相关要求并无二致。施工总布置及场地选择、施工分区规划、防洪与排水、土石方平衡及渣场规划、施工用地等应满足 SL 303 相关要求。

1 考虑低温季节对混凝土生产的影响，混凝土生产系统布置在洞外，存在混凝土质量不宜保证、运行管理困难、费用较高等问题。混凝土骨料堆存、拌和、运输等环节必须采取保温棚、供暖设备等保温措施；混凝土生产系统布置在洞内，虽然洞室开挖工程量大，但混凝土拌和质量保证率高，且不需要二次倒运。

2 如果工程采用多台掘进机施工，基于掘进机备品备件更换数量、频率的较大差异，存在设置备品备件集中仓库的可能性，但也带来仓库位置、备品备件种类、日常管理等方面

的问题。本条从有利于施工管理的角度，为满足掘进机组装、掘进、拆卸过程中部件转运、堆存、正常运行等方面的需要，本条提出洞口或井口附近场地选择布置掘进机备品备件库、刀具检修车间、堆存转运场地的要求。实际上施工临时设施也要求布置在洞口或井口附近场地。

7.11 施工总进度

7.11.1 本条强调“宜采用同类工程近期平均先进水平合理安排工期”；对于“地质条件复杂、环境敏感”的隧洞工程，工期安排宜适当留有余地。“平均水平”随着工程规模、建设时间、施工技术能力、工程环境条件的不同而不同。掘进机进度受地质、设备、技术、管理等众多因素影响，尤其是掘进机不适合不良地质等复杂地层的掘进，有些工程其掘进进尺指标理论计算与实际相差较大。工程类比又因地质条件、工程经验的不足，实际往往达不到理想的结果。因此确定“同类工程近期平均水平”需充分调查、广泛收资、合理分析、谨慎选用。同时，充分考虑移民、工程征占地、设备可靠性对工程进度、工期的影响。近期可考虑 5 年～10 年。

7.11.2 根据 SL 303 的划分方法，工程建设全过程划分为筹建期、准备期、主体工程施工期、完建期四个阶段。本条针对隧洞工程各施工期分界面提出了明确意见，以避免造成执行过程中的标准不统一。

7.11.3 本条提出隧洞施工总进度关键形象目标的要求。

7.11.4 当隧洞分为多段并具备平行施工条件时，关键线路的确定较为困难。本条强调关键隧洞施工段采用的方法，以及关键隧洞段各施工期关键线路上的作业项目、逻辑关系及历时。

7.11.5 筹建及准备工程施工进度

1 本条强调了筹建及准备期工应当开展的主要项目及工作进度计划。目前工程移民和

征地往往制约施工进度的顺利推进，需要引起重视。同时，由于一台掘进机制造时间较长，约 12 个月左右。在潜在承包人不能提前进场时，工程掘进机及配套系统往往由发包人提前代为集中采购。掘进机进场又受厂家制造、运输、服务能力及准备工程中的施工通道、工业广场及辅助洞室完工时间的影响。

2 本条强调了筹建及准备期临时工程施工工期的方法和要求。

根据准备工程规模、施工特性和工程总体控制性施工进度计划，筹建及准备工程施工进度计划应明确掘进机和配套系统采购及进场、对外交通、施工供电、施工供水、施工通讯及场内交通、施工通道等项目进度。结合工程投资计划、设备采购进度、征地进展等安排，综合平衡施工临建等工程的施工强度和工期。

7.11.6 本条提出在正常条件下隧洞掘进机掘进和衬砌进尺指标的确定方法。

一般掘进机掘进速度包括净掘进速度 P_r 、平均掘进速度 AR 。影响掘进机施工进度的主要因素有掘进机的技术特性（贯入度、刀盘转速、推力、扭矩等）或设备利用率、岩性、地质构造、施工组织与管理等。

(1) 围岩岩性对掘进速度的影响

围岩岩性对掘进机掘进速度影响很大，中软至中硬岩掘进速度较高。结合以往工程经验，砂岩、页岩、石灰岩、白云岩等月进尺最高达 600m ~ 750m，而坚硬的花岗岩等月进尺仅 140m ~ 220m，主要是刀具损耗随岩石抗压强度的增加而显著加大。

岩石硬度对掘进机的施工速度有明显的影响，根据国外七十年代掘进机破岩性能发展水平，掘进机宜用于莫氏硬度小于 4.5 的岩石，如页岩、砂岩、灰岩、大理岩、板岩等。随着掘进机破岩性能、主要是刀具性能的提高，掘进机适应的岩石硬度也将有所提高。

当岩石中的石英含量超过 25% 时，岩石的韧性增大，不宜切割。TBM 在石英砂岩中的掘进速度仅为其他岩石的 50% 左右，刀圈寿命仅为 16% ~ 40%。这表明，TBM 在石英砂

岩洞段的可掘进性差；在石英砂中，不仅 TBM 的掘进速度慢，且刀盘磨损严重，需要频繁地更换滚刀，不能发挥其快速掘进的优势。

（2）地质构造对掘进速度的影响

掘进机遇到不良地质地层时，掘进速度将受严重影响。

在特别复杂的条件下，掘进机可能无法掘进，需要考虑用人力、钻爆等其他方法辅助，并辅以必要的安全支护措施。在引滦古人庄隧洞开挖后期，遇有构造复杂、曾坍塌的部位有 14 处，特别是遇到两处被黄泥和大石块所充填的大溶洞，只得采用人力挖除、钻爆和钢枕垫支撑等措施，才能使掘进机得以通过。西班牙伯特隆隧洞正常掘进月最高进尺达 619，但在断层段月进尺仅 90m。

I·W·法米尔根据 3 个隧洞的资料分析，每 10m 隧洞的节理数在 10 条~20 条以下时，进机的掘进速度较高。

不同地层对掘进机的使用和掘进速度的影响如下：

1) 无节理和裂隙的完整岩石，无需支护；如岩石硬度小于 4.5 莫氏硬度，采用掘进机将达到最佳掘进速度。

2) 有节理和裂隙的块体岩石，但节理之间的块体连接在一起或基本连接在一起，无需支护；如岩石硬度小于 4.5 莫氏硬度，采用掘进机也可取得最佳掘进速度。

3) 有节理和裂隙或有软弱夹层的层状岩石，需连续支护的岩层，采用掘进机可能是适宜的，也可能是不适宜的。

4) 有节理和裂隙分割的中等块度（岩体断面尺寸大于 0.6m）的岩层，需要支护。在这样岩层中不推荐采用掘进机。

5) 节理、裂隙发育，被分割成面尺寸小于 0.6m 的块状岩层中不宜采用掘进机。

（3）机型对掘进速度的影响

完全破碎或非固结的岩石或粘土、壤土、风化岩石，需重型支护的岩层中，需采用盾构或护盾式掘进机。护盾式掘进机掘进时可以同步衬砌管片，支护不占用直线工期，地质构造对掘进速度影响较小；敞开式掘进机掘进时支护占用直线工期，地质构造对掘进速度有一定的影响。

国内外 TBM 掘进机施工进尺统计见表 7.11.6。

表 7. 11. 6 国内外 TBM 掘进机施工进尺统计表

序号	项目名称		掘进长度 / km	开挖直径 / m	月平均进尺 / (m/月)	月最高进尺 / (m/月)	备注	
1	莱索托北引水隧洞	阿什隧洞	11.00	5.39	647	987	双护盾	
2		凯勒顿隧洞	8.15	5.39	680		敞开式	
3	英法海峡隧道		148.50	5.6~8.6	375	1487	盾构机	
4	引大入秦输水隧洞	30A 号	11.65	5.53	860	1300	双护盾	
5		38 号	4.95	5.53	1100	1400		
6	引黄入晋工程	总干线 6#隧洞	21.41	6.125	663	1089	双护盾	
7		南干线 TBM1	26.2	4.92	1143	1821		
8		联接段	13.52	4.82	1322	1637		
9	引洮供水一期工程		13.8	5.75	1236	1868	单护盾	
10	引红济石 IV 标段		9.362	3.65	114	478	双护盾	
11	大伙房水库输水工程	一期 TBM1 标	10.4	8.0	618	1058	敞开式	
12		一期 TBM2 标	13.1	8.0	561	751		
13		二期 TBM3 标	14.3	8.0	580	1111		
14	辽西北供水工程（二段四标 TBM6）		10.0	8.53	640	822	敞开式	
15	引松供水工程	二标段	15.6	7.93	672	1210	敞开式	
16		三标段	17	7.93	613	1423		
17	兰州市水源地工程第 3 标段 TBM2		12.3	5.46	567	1251	双护盾	
18	山西中部引黄工程	TBM1	23.72	5.06	367	1411	双护盾	
19		TBM2	25.704	5.06	476	1026		
20		TBM3	15.46	4.15	237	916		
21	鄂北地区水资源配置工程宝林隧洞		10.163	4.03	511	864	敞开式	
22	引汉济渭工程秦岭隧洞	岭北 TBM	15.2	8.02	376	868	敞开式	
23		岭南 TBM	12.33	8.02	172	484		
24	新疆 ABH 输水隧洞	III 标	17.615	6.53	410	802	敞开式	
25		IV 标	17.223	6.53	108	524		
26	新疆 KS 隧洞 v 标	TBM4	24.28	7.0	564	908	敞开式	
27		TBM5	17.491	7.0	592	1135		
28	新疆 SS 隧洞 II 标		TBM1	20.541	5.5	720	敞开式	
29	新疆 XE 隧洞 III 标		TBM 361	15.15	7.8	341	778	敞开式

序号	项目名称	掘进长度 / km	开挖直径 / m	月平均进尺 / (m/月)	月最高进尺 / (m/月)	备注
30	TBM 362	23.55	7.8	247	502	
31	西康铁路秦岭隧道	18.46	8.8	314	531	敞开式

TBM 掘进进度指标可根据 2004 年中国铁道出版社《岩石隧道掘进机 (TBM) 施工及工程实例》及 2011 年中国水利水电出版社《敞开式 TBM 的应用》中的相关计算方法计算。

1 掘进机进尺指标

影响掘进机小时进尺、日进尺、月进尺的主要指标为贯入度、刀盘转速及每小时、每天、每月的有效掘进时间。而贯入度、刀盘转速又随岩石强度、围岩完整性及开挖直径的不同而不同。一般软岩、硬岩、坚硬岩贯入度较大，可以达到较高的进尺指标。

2 设备利用率

掘进机铭牌掘进速度因受各种因素影响，与实际施工差距很大。掘进机时间利用率或设备利用系数受围岩条件、施工管理水平、设备性能和养护要求、有效工作时间等多种因素影响，提高掘进机的时间利用率是加快掘进速度的途径。

设备利用率是掘进机有效工作时间与掘进总工期的比值，该系数国外在 0.3~0.5 之间，有的项目可达 0.6~0.75。

法国埃蒙松水电站引水隧洞采用掘进机施工的调查结果表明，61%为掘进时间，18%用于检修和更换，11%用于临时支护和测量，10%为交换班时间。

根据吉林引松供水工程、大伙房水库输水工程、引汉济渭工程等调研资料，硬岩掘进机施工采用连续皮带机出渣情况下，时间利用率通常为 0.3~0.4，最高可达 0.6~0.7。引额供水二期工程掘进机及其配套系统的时间利用率在 0.31~0.68 之间。

3 本款强调调试掘进期间因掘进机系统性能调试、检测、验证等要求，不能达到正常工作状态，应降低进尺指标，具体降低幅度可采用工程类比确定。

7.11.7 现场贯入指标 FPI 和扭矩贯入指标 TPI 充分反映和体现了岩-机的相互作用，间接反映了围岩的总体特性。

1 现场贯入指标 FPI

如式(7.11.7-1)所示， FPI 是掘进机单刀推力与贯入度的比值，包含了掘进机的基本参数推进力、刀盘转速和掘进速度，充分体现了推力和贯入度的相关性，蕴含丰富的特征信息，在国内外学术界、工程界得到了大量应用。

$$FPI > \frac{F}{p} = \frac{F}{Pr / RPM} \quad (7.11.7 - 1)$$

式中 F ——单刀推力，即刀盘总推力除以滚刀数，kN；

p ——以刀盘每转计的贯入速率，即贯入度，mm/rev。

Pr ——掘进速度，mm/min；

RPM ——刀盘转速，rev/min。

2 扭矩贯入指标 TPI 。

如式(7.11.7-2)所示， TPI 是掘进机单刀扭矩与贯入度的比值，包含了掘进机的基本参数刀盘扭矩、刀盘转速和掘进速度，充分体现了扭矩和贯入度的相关性。

$$TPI > \frac{T}{p} = \frac{T}{Pr / RPM} \quad (7.11.7 - 2)$$

式中 T ——单刀扭矩，即刀盘总扭矩除以滚刀数，kN/m。

在掘进过程中，掘进机采集并记录了大量的推力、扭矩、掘进速度和转速，若仅通过定义进行计算，冗杂多变的数据会对 FPI 和 TPI 的取值产生一定影响。故计算时，需要在一定掘进长度内对单刀推力和贯入度、单刀扭矩和贯入度进行线性回归，以回归系数 R^2 为标准进行筛选，以符合要求的回归线的斜率作为当前长度范围内的 FPI 和 TPI 。

基于吉林引松、引汉济渭以及内蒙古引绰济辽等工程的大量数据，通常情况下一个掘进

段内的单刀推力与贯入度、单刀扭矩与贯入度线性关系良好，可选取回归系数 $R^2 > 0.6$ 的相应数据作为有效数据。经过大量的统计分析，可认为 FPI 与 TPI 具有强烈的相关性，与围岩类别关系密切。当 FPI 和 TPI 逐渐减小时，围岩质量逐渐变好。当 FPI 和 TPI 逐渐增大时，围岩质量逐渐变差，如表 7.11.7 所示。考虑不同工程间的地质特性和设备参数存在差异，还需要根据本工程地质和岩石力学的其它力学性能指标和同类工程的类比，提出根据 FPI 和 TPI 评价岩体质量和可掘性的定量标准。

表 7.11.7 不同工程定量指标统计表（均值）

工程	岩性	类别	Pr mm/min	AR mm/min	UI	FPI kN/(mm/rev)	TPI kN·m/(mm/rev)
引松工程	花岗岩	II	53.83	33.77	0.617	16.55	5.7
		III	59	31.66	0.53	12.76	4.09
		IV	59.42	17.26	0.287	7.6	2.4
		V	55.97	8.61	0.15	2.02	0.82
	石灰岩	II	64.88	36.99	0.553	11.71	3.82
		III	61.91	34.07	0.542	15.99	4.68
		IV	54.61	18.20	0.337	9.97	2.92
		V	45.34	11.32	0.244	11.56	3.28
	闪长岩	II	52.20	30.44	0.569	22.36	6.45
		III	64.11	35.63	0.545	14.31	4.54
		IV	68.27	19.19	0.286	11.51	3.93
	YE 工程	花岗岩	II	34.53	14.8	0.44	18.11
IV			28.83	10.17	0.35	22.45	4.03
石英片岩		III	44.16	17.17	0.39	16.66	4.99
引汉济渭	花岗岩	I	32.72	2.16	0.067	22.66	3.03
		II	32.08	3.34	0.105	42.43	4.48
		III	31.85	2.57	0.083	20.77	2.67
		IV	46.52	1.28	0.031	7.63	0.94

7.11.8 国内外大量的工程实例表明，掘进机穿过断层破碎带、大变形围岩、岩溶、突水突泥、岩爆、卡机、高磨蚀性硬岩、高地温、有害气体、放射性物质等特殊地质地层时，掘进速度将受到严重影响，严重时造成掘进机长期停工。本条针对特殊地质地层在施工进度

上的安排提出了明确要求。

7.11.9 本条强调的掘进机采购、掘进、步进、拆卸等工序所需工期的确定方法。一般掘进机的制造、运输,约需9个~12个月;组装1个~2个月;滑板式步进平均速度100m/月左右;转场3个~5个月;拆卸2个~3个月。实际工期应结合运输安装条件、机型、施工方案、工程量及组织管理等因素具体确定。

8 掘进机施工

8.1 一般规定

8.1.5 水工隧洞 TBM 设备一般根据工程任务和地质风险等条件定制，设备制造单位或其技术服务单位技术人员对设备情况更为熟悉，对设备运输、组装、使用、维护及拆除的安全风险掌握更全面。所以专项施工方案应由设备制造单位或其技术服务单位与施工单位共同编制，或由施工单位根据设备制造单位或其技术服务单位提供详细的设备安装、使用、维修手册编制专项方案，设备制造单位或其技术服务单位参与审核。具体专项施工技术包括以下内容：

- 1 TBM 设备进场运输方案。
- 2 TBM 设备组装与调试专项技术措施。
- 3 试掘进、掘进施工组织方案。
- 4 TBM 设备保养与维修专项技术措施。
- 5 TBM 设备关键部件维修或更换专项技术措施。
- 6 TBM 施工设备拆卸及运输专项技术措施。

8.2 施工准备与组织

8.2.2 TBM 部件较重且体积庞大，与 TBM 相配套的临时设施必须满足不同时期 TBM 施工的要求，为满足运输装卸、组装、出渣倒运、材料供应、混凝土拌合运输、电力供应及环保需要等，应留有足够的场地。TBM 施工临时设施包括 TBM 组装场地、道路、转渣场、混凝土预制厂及存放场、混凝土拌合站、材料场、修理间、施工供水、供电、车辆及轨道运输设施、污水处理等。施工场地布置着重考虑了以下方面：

- 1 设计能力满足 TBM 最高效率的要求。
- 2 TBM 施工进度指标（最高日进尺和最高月进尺）的要求。

3 临时设施搭建应兼顾与掘进同步的要求。

4 应充分考虑土地资源和当地环境保护的要求。

8.3 TBM 设备制造和运输

8.3.1 设计联络会的目的是进一步对 TBM 的设计参数及配置给予完善，复核 TBM 的设计功能与工程建设设计要求是否匹配，在 TBM 设备设计制造阶段融合施工单位使用经验及当前 TBM 设备及施工新技术，主要内容如下：

1 根据合同文件、设计文件及相关规范确认 TBM 设备型式、主要参数及配置。

2 确定刀盘结构、尺寸与刀具配置设计，确定主驱动、主推力系统参数及配置。

3 确定钢拱架安装器、超前钻机、锚杆钻机、喷射混凝土设备等辅助设备施工参数，并应与工程设计支护参数匹配。限于设备布置或当前技术水平，部分不能达到设计要求的应研究解决办法。

4 确定 TBM 设备上搭载的测量系统、超前预报系统、有害气体监测系统等设备要求及参数。

5 确定后配套布置及结构设计、轨道交通运输接口布置、机上物料运输辅助设备配置及布置等。

6 确定供电、供水、排水、通风、出渣等辅助设施配置及延伸接口等。

8.3.2 设备监造是保证设备质量的重要环节，TBM 在工厂建造组装阶段应由监造单位派有经验或执业资格人员现场监督，对进厂零部件的生产厂家、型号、规格予以核查，对重要部位的焊接、防腐等工序检查验收，对组装过程予以监督，所有建造过程均作记录。监造的主要工作内容：

1 对主要零部件的原材料进行质量监督。

2 对外购件质量及外部协作单位的工作进行监督。

- 3 在生产过程中进行现场质量监督。
- 4 对重要零部件参检并了解部件组装情况。发现问题及时通知制造商，并向设备购置单位汇报。
- 5 参加有关合同设备质量的会议。
- 6 配合业主代表进厂检查工作。
- 7 向设备购置单位提交设备月生产进度。

8.4 设备组装、调试与步进

8.4.1 洞内组装宜采用桥式起重机或门式起重机为主要吊装设备，洞外组装宜采用吊车为主要吊装设备。

8.4.2 TBM 一般采取分段组装，然后边步进边连接的方式。

敞开式 TBM 组装的基本顺序为：刀盘拼装焊接→步进装置就位→主驱动安装→主梁段安装→后支撑及撑靴安装→连接桥及推进油缸安装→刀盘安装→后配套安装。

双护盾 TBM 组装的基本顺序为：刀盘拼装焊接→步进装置就位→前盾安装→伸缩盾安装→支撑盾安装→主皮带机前部安装→管片拼装机安装→盾尾安装→主皮带机后部安装→刀盘安装→后配套安装。

8.4.3 为保证 TBM 整个组装过程的顺利、安全与准确，确保其原有的设计精度。

8.4.9 目前不同的 TBM 步进设计原理不同、步进机构及基础地质条件不同，设备单位应提供设备步进原理图、说明书和必要的计算说明，支撑步进的地面基础结构应由设计单位完成，TBM 的首次步进包括调试和技术验证，应由设备生产单位操作完成并负责。

8.5 掘进与控制

8.5.1 试掘进和正式掘进前应做好以下准备：

- 1 培训与交底包括各种设备操作的理论培训，操作演示，安全、技术、质量等。

- 2 完成始发前段的地质超前预报及必要超前支护及地下水处理。
- 3 掘进支护的材料应不少于 1000m，预制管片不少于 1000 环。
- 4 轨道、排水、照明和供电、通风等施工辅助延伸的材料准备。

8.5.2 掘进模式

1 敞开式、护盾式掘进机应分别按其掘进机设计原理及控制模式要求操作，设备制造商应在其设备使用说明书中详细说明。

2 单护盾 TBM 的推力是由液压推进油缸作用于护盾内安装的管片反力提供。掘进时，液压推进油缸的后部顶在已经衬砌好的钢筋混凝土管片上，推进油缸伸出，推动刀盘前进。推进行程结束后，TBM 停止前进，推进油缸回缩归位，新的混凝土管片在盾尾进行组装，开始进入下一循环。

3 双护盾掘进机施工根据其原理有两种掘进模式：一般情况下采用双护盾掘进模式；在有挤压倾向的不良地质下，撑靴可能得不到有效支撑，可通过管片提供反力，以单护盾模式掘进。

围岩状态较好时采用双护盾模式，通过位于后护盾的侧向撑靴紧撑在洞壁上，为刀盘和前护盾提供反力，掘进与安装管片能同时进行，此时 TBM 作业循环为：掘进与安装管片→撑靴收回换步→再支撑→再掘进与安装管片。

软弱围岩时则采用单护盾模式，不再使用侧向撑靴，依靠推进油缸支撑在管片上提供掘进反力，TBM 掘进与管片安装不能同步。作业循环为：掘进→辅助油缸回收→安装管片→再掘进。

8.5.4 掘进参数是影响掘进速度的重要因素，主要由刀盘的推进速度、扭矩、刀盘转速和推进力四个指标来表示。这些参数必须随围岩条件的变化而不断变化，而且相互之间必须匹配。掘进参数选择得当，掘进速度就高。

8.5.5 试掘进

1 试掘进长度应考虑了以下几个因素来确定：

- 1) 结合地质条件的设备性能的检验、检测需要。
 - 2) 机械的磨合期和操作人员的熟练过程。
- 2 熟练掌握操作系统和规范操作方法。
- 1) 掌握在不同地质地层中 TBM 推进的各项参数的调节控制方法。
 - 2) 测定和统计不同地层条件下推力、扭矩的大小；TBM 姿态的控制特点。
 - 3) 注浆参数的选择和浆液配比的优化；同步注浆中出现的问题和解决方法。
 - 4) 各种刀具的适应性。
 - 5) 掌握施工监测与 TBM 推进的协调方法等。

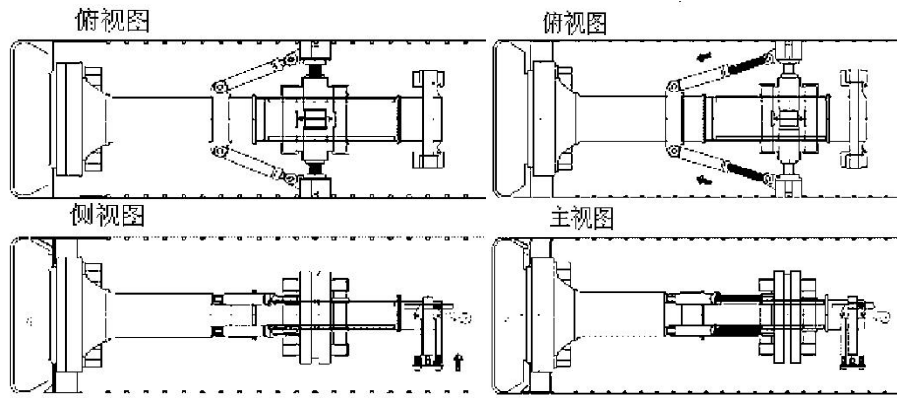
3 试掘进段应及时详细分析在不同地层中各种推进参数条件下地层的位移规律和结构受力情况，以及施工对地面环境的影响，及时反馈并调整施工参数，为顺利施工做好参照。

8.5.6 TBM 设备说明书中应详细说明设备的换步原理，换步步骤及注意事项。施工中严格按说明书规定程序及要求来进行换步操作，敞开式、单护盾、双护盾一般换步流程如下：

1 敞开式 TBM 换步流程：

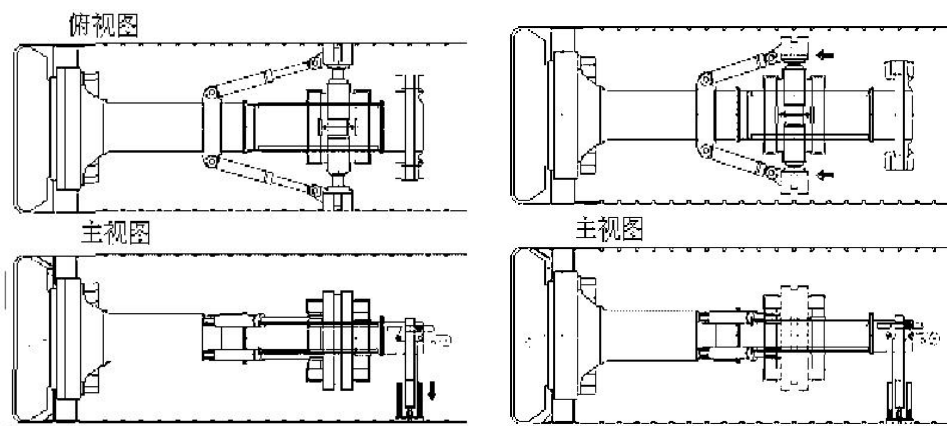
当敞开式 TBM 主推进油缸达到最大掘进行程时，TBM 需要停机换步。此时刀盘停止转动，放下后支撑和刀盘底护盾支撑，将撑靴慢慢收回并前移一个行程，撑靴前移到位后再次撑紧岩壁并收回后支撑和底护盾支撑，最后通过操作后配套伸缩油缸牵引后配套行走一个循环步长。

整个作业循环为：撑紧撑靴，收起后支撑→刀盘旋转，开始掘进推进→掘进行程完成后，进行换步，放下后支撑→收回水平撑靴，前移撑靴，再撑紧水平撑靴。



(a) 撑紧撑靴收起后支撑

(b) 刀盘旋转、开始掘进推进



(c) 掘进行程完成放下后支撑换步

(d) 收回水平撑靴前移撑靴再撑紧撑靴

图 8.5.6 - 1 敞开式 TBM 掘进模式

2 单护盾 TBM 换步流程：刀盘推力由辅助推进油缸支撑在管片上提供，TBM 推进时掘进与管片安装不能同时进行。单护盾 TBM 施工作业循环为：掘进→辅助油缸回收→安装管片→再掘进，流程如图 8.5.6 - 2 所示。

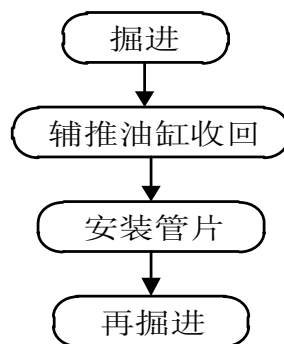


图 8.5.6 - 2 单护盾 TBM 作业流程

3 双护盾 TBM 换步流程：

1) 双护盾模式：在围岩稳定性较好的地层中掘进时，位于后护盾的撑靴紧撑在洞壁上，为刀盘掘进提供反力，在主推进油缸的作用下使 TBM 向前推进。此时 TBM 作业循环为：掘进与安装管片→撑靴收回换步→再支撑→再掘进与安装管片。

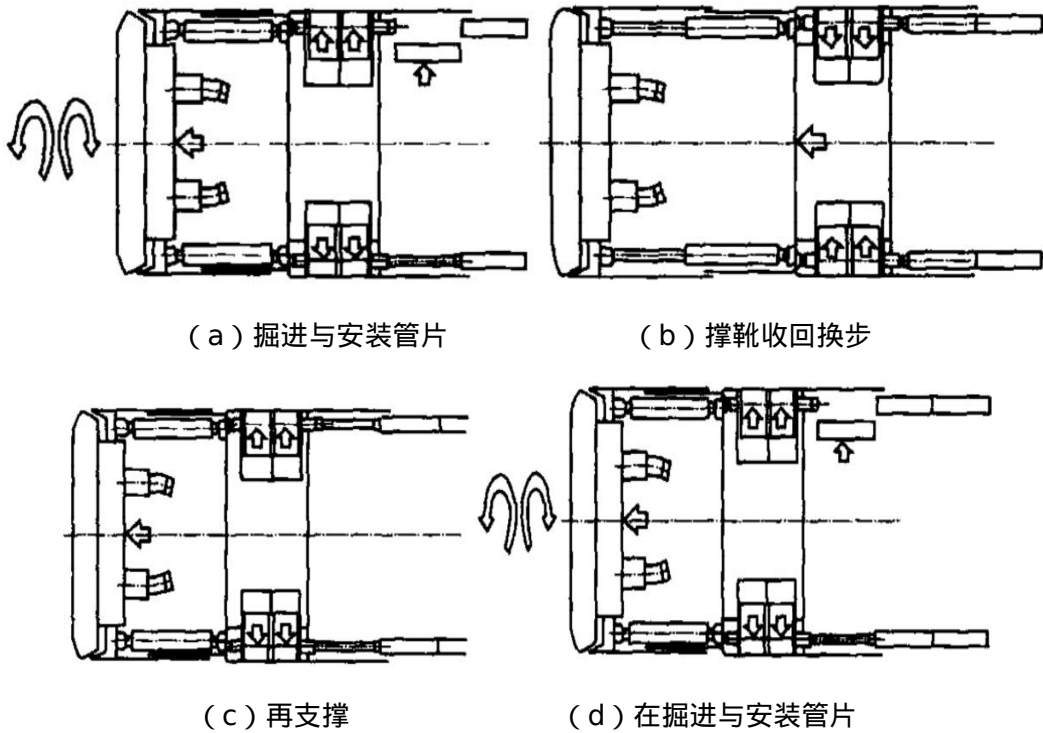
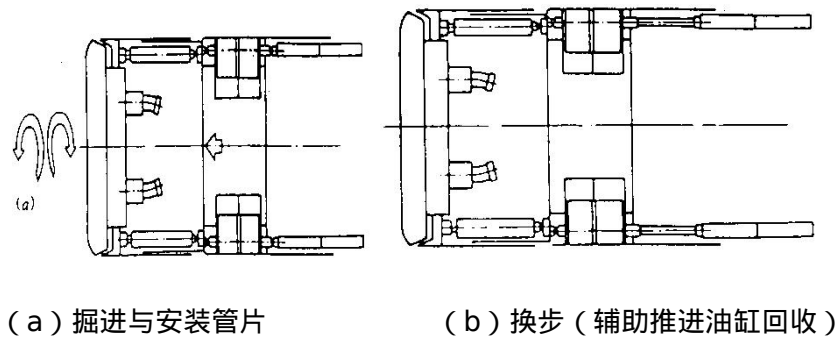


图 8.5.6-3 双护盾 TBM 掘进模式（双护盾模式）

2) 单护盾模式：不再使用侧向撑靴，依靠推进油缸支撑在管片上提供掘进反力，TBM 掘进与管片安装不能同步。作业循环为：掘进→辅助油缸回收→安装管片→再掘进。



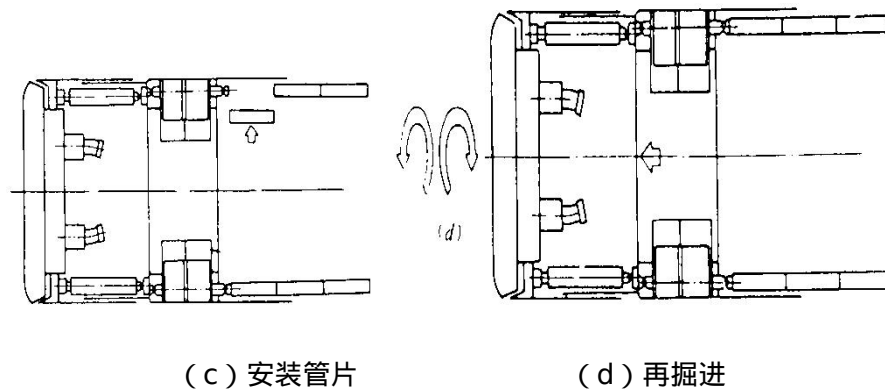


图 8.5.6 - 4 双护盾 TBM 掘进模式（单护盾模式）

8.5.8 方向控制与纠偏

- 1 每次调向动作不能使边刀移动量超过 3mm，否则造成边刀冲击洞壁而损坏。
- 2 TBM 的导向角控制在 10mm/m 以内，否则会造成仰拱铺设困难，后配套难于通过的后果。
- 3 正确导向状态下，洞壁表面规则（即看不到因为偏向造成的痕迹或标记），导向正确时，洞壁上不产生屋脊状表面。台阶是过度调向的标志，如果出现，应校正调向作业的方式。

8.5.10 TBM 施工日志宜包括以下基本信息：

施工日期；记录施工过程的时间。

掘进班组：本报表施工过程的操作人员及班组信息，如 TBM 操作人员，保养班人员，土木工程专业人员等。

掘进桩号：记录本班组施工掘进桩号范围，包括起始桩号和终止桩号以及本班组掘进进尺信息。

掘进循环基本信息：记录本班组循环掘进基本数据，如掘进循环数量、各循环掘进起止时间、持续时长、推力、扭矩、转速、推进速度、掘进速度、贯入度、油缸压力及综合参数如 FPI 、 TPI 等；应以施工横道图的方式进行记录。

停机信息：记录本班组停机过程信息，如停机影响因素、停机时间、停机时长、恢复掘进时间等。

停机影响因素：记录各种原因导致的停机，主要分为三类：第一类为 TBM 设备正常检修过程的停机，如刀具检查或更换、设备定期保养等；第二类为设备故障停机，如机械故障、液压系统故障、润滑系统故障、电器系统故障、主机皮带机故障、连续皮带皮带机故障、支洞转渣皮带机故障、洞外转渣皮带机故障、连续皮带延伸、高压电缆延伸、TBM 风筒延伸；第三类为不良地质段处理的停机，如软弱围岩处的立拱架、挂网喷混凝土、突水突泥处理、岩爆清渣等，在不良地质段的停机信息应进行详细的文字描述并配以图片信息。

地质情况：记录施工过程中掘进段岩壁及掌子面地质信息，如地质素描、断层、节理、软弱夹层、破碎带、突水突泥、岩爆等信息。

TBM 姿态记录：记录 TBM 刀头、激光靶的水平偏转、垂直偏转，隧道轴向水平趋势、垂直趋势，滚动角等信息。

物料使用信息：记录施工过程中物料的使用情况，如钢拱架使用数量、网片数量、锚杆数量、喷射混凝土放量、中心滚刀更换数量、单刀更换数量、轨道安装数量等信息。

施工情况描述：对循环掘进过程进行描述，主要包括渣土形状、掘进参数变化情况、掘进参数波动情况及其他施工过程中的正常特征及异常特征。

8.6 超前预报

8.6.1 本条所列举的 TBM 隧道超前地质预报主要预报内容，是对 TBM 施工中可能遭遇的不良地质体情况的总结，并且能用相应的超前地质预报方法探测。然而实际工程面临的地质情况十分复杂，当遇到未在本规程中列出的其他复杂地质情况时，需要结合工程实际情况，通过试验研究解决工程问题。

8.6.2 掘进机施工的隧洞地质调查

2 目前基于图像识别、三维激光扫描的隧道掌子面岩体裂隙、岩层产状的识别技术正在开展应用研究，主要利用此类技术实现掌子面与洞身图像、点云的实时或定时采集，并建立数据实时传输功能，即可实现岩体裂隙、岩层产状及围岩级别的远程识别和判识，从而实现各类地质条件的远程信息化处理，可以极大的节约人力、物力，并缩短现场工作时间，提高工作效率。

8.6.5 预报方法及技术要求

2 TBM隧道超前地质预报设计建议采用地震波法长距离探测破碎带、断层等不良地质构造的位置；采用激发极化预报方法重点探测不良地质构造的地下水的赋存情况；结合TBM岩碴分析、TBM掘进参数进行综合预报结果解释；必要的时候，可根据超前地质预报结果开展超前地质钻探；条件允许时，可利用洞内超前钻孔进行孔内物探预报。

3 TBM隧道内可用探测空间比较狭小，因此应选择合适的观测系统。经过工程实践，地震波法观测系统宜布置在掌子面后方约10m~70m范围内的隧道轮廓上，根据现场情况不同，观测系统的具体排布形式可以有多种选择，包括在隧道一侧边墙上沿纵向排列的单条测线、沿隧道纵向多条测线呈立体分布组合、空间内多测点散布等方式。在条件允许时，应充分利用隧道全空间环境，使震源点和检波器点在隧道纵向、水平和竖直三个方向上均具有一定间距，这样有利于获得更充分的波场信息。一般来说，地震波法观测系统按照震源和检波器位置的相对关系，可分为两种布置形式：一是震源在前、检波器在后，即震源布置在靠近掌子面的边墙上、检波器布置在震源后方边墙；另外一种是在震源在后、检波器在前，即震源布置在远离掌子面的边墙上、检波器布置在震源前方边墙，示意图可参见本规程附录A。其中，震源在后、检波器在前这一类观测系统采集到的地震记录中，来自掌子面前方的反射波同相轴与直达波同相轴反向，具有负视速度的特点，可更方便的压制直达波和来自其他方向的干扰波。

4 电法预报要求。

1) 隧道激发极化法的探测距离会受到隧道洞径、地质条件等因素的影响，当隧道洞径

较小或地质条件复杂时，探测距离会有所降低，具体应视实际探测效果而定。

3) 柔性电极依靠柔性导电介质与围岩接触实现供电与测量，具有不需打孔、能与围岩良好耦合、快捷方便的优势，在 TBM 隧道电法探测时宜优先选用柔性接触电极。

4) 在掌子面上布置测量电极，用于观测掌子面前方一定范围内介质的导电性或激电效应差异影响下的电场或激电场分布规律。综合考虑上述因素和探测效果对数据量的要求，建议测量电极数量不少于 12 个；对于 TBM 施工隧道，由于隧道掌子面被 TBM 刀盘占据，搭载式探测和非搭载式探测的测量电极数量和布置形式均需考虑 TBM 刀盘的型式、结构、尺寸、刀具布置等因素。刀盘直径的增加或条件许可时，宜适当增加测量电极数量。对于搭载式探测方式，通过在刀盘上开孔安装测量电极；对于非搭载式探测方式，利用刀盘滚刀刀孔伸出电极接触掌子面进行探测。应考虑刀具布置等因素，使得电极尽可能均匀的布置。

8.6.6 预报信息管理与处置

2 超前预报管理平台共享范围有主要的超前预报相关工作人员，设计、施工、监理等方面，共享功能包括做到实时信息获取与实时指令的传达且根据实际工程情况进行调整运行。

3 超前地质预报工作完成后应编制预报成果简报，报告应做到格式规范、内容详实、数据可靠、结论明确，附图附表等资料齐全。

8.7 施工运输

8.7.3 有轨运输

3 运输轨道轨距一般采用 762mm 和 970mm 两种轨距，钢轨规格一般为 43kg/m。

4 轨线布置方式

1) 单线轨制列车直接进入 TBM 后配套，优点是钢轨需要量少，利于后配套设备布置。如图 8.7.3 - 1 所示。

2) 四线三轨制进出分左右两条运输线，左右两线的运输互不干涉、运输连续，编

组列车容量和编组列数受运行因素影响较小，配置的灵活性大、运输量大，如图 8.7.3 - 2 所示。

3) 复合轨线制主运输轨线仍为单线制轨线，在后配套后部设两副浮放双开道岔组成会车点。特长隧道中部可增设双线会车点，可以是固定的或可移动式的。复合式轨线制兼有单线制轨线和四轨三线制轨线的优点，如图 8.7.3 - 3 所示。

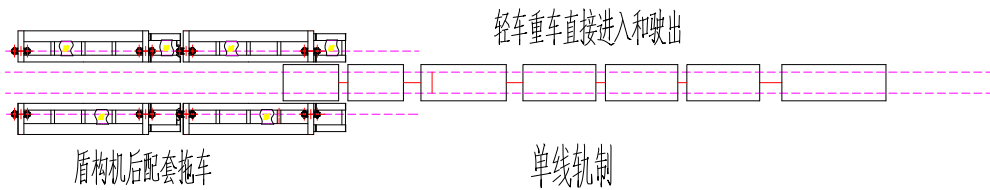


图 8.7.3 - 1 单线轨制

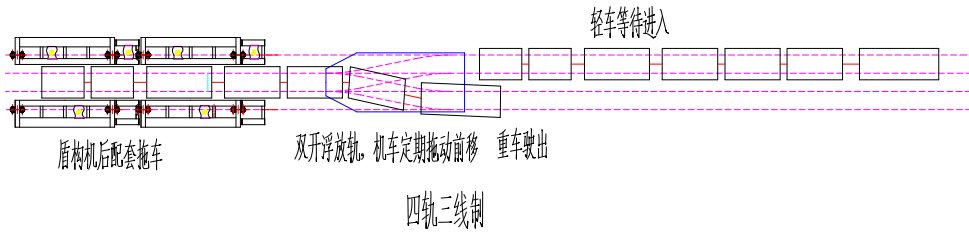


图 8.7.3 - 2 四轨三线制

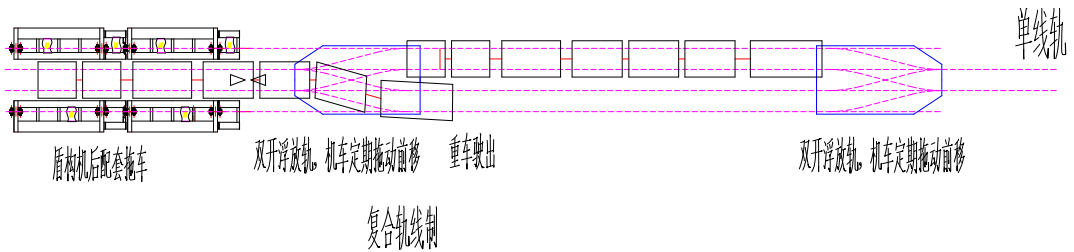


图 8.7.3 - 3 复合轨线制

8.8 支护与衬砌

8.8.3 模筑混凝土衬砌

5 采用皮带机出渣的隧道，模板台车编组宜按钢筋/防水板台架+前伸缩门架+衬砌台车+后伸缩门架+后处理台架设置，门架结构设计应考虑材料运输、皮带出渣运输、施工通风、施工风水电管线铺设和衬砌作业工作空间等要求，并配置皮带运输减震装置及偏压减载系统。

9 不利地质洞段掘进施工

9.1 一般规定

9.1.1 超前钻探和超前支护加固是掘进机必备的辅助施工手段，掘进机配置超前钻机用于地质超前钻探和不良地质处理。超前钻机钻进距离宜达到掌子面前方 30m，可在隧道周向实现钻孔作业，应具有独立的液压操作装置。采用掘进机施工时应重点考虑是否存在不良地质洞段。当掘进机施工风险较低时，可采用合适的掘进机类型辅以必要的超前加固和支护措施进行掘进，但对于 B₄ 级岩爆、C₄ 级断层破碎带、D₅ 级大变形围岩、E₄ 级突涌水（涌泥）等不良地质洞段，则不适合采用掘进机施工。在这些情况下，采用钻爆法更能发挥其机动灵活的优越性。

9.1.2 超前地质预报应遵循地质与物探相结合、长短距离相结合的原则。

1 地质与物探相结合：地质分析法是物探法的基础，在了解地质情况的基础上，才能使物探法的解释结果更接近真实情况，有利于减少物探法的多解性。

2 长距离与短距离相结合：根据施工进度和预报方法特点分为长距离预报和短距离预报。一般情况下，长距离与短距离预报方法相结合，按照由远及近开展预报工作。其中长距离超前地质预报是在较远距离判断是否存在断层、溶洞等不良地质体。当长距离超前地质预报发现存在不良地质体时，进行短距离超前地质预报，获取不良地质体的位置、赋存形态和地下水情况。

掘进机通过深埋高地应力复杂地质条件洞段时，补充勘察宜通过适宜的现场地应力测试结合反演分析，确定复杂地质条件洞段的应力分布规律。

9.2 断层破碎带

9.2.1 断层破碎带岩体节理发育，地下水丰富，岩土层坚硬程度不一，易引起围岩垮塌、刀具磨损、刀盘损坏和突涌水事故，甚至危及施工人员和设备的安全。总地来说，掘进机进

入断层破碎带遇到的主要问题是掌子面和洞壁围岩坍塌，导致掘进机卡刀盘、卡护盾、撑靴失稳、支护困难，甚至被掩埋。因此，需要提前对断层破碎带的空间位置、展布范围、掘进机施工风险等级进行预测分析。

9.2.2 由于地质勘探的局限性，掘进机掘进时往往会遇到一些之前没有查明的破碎带。为了进一步探明掘进机前方断层破碎带的确切情况，应积极开展补充勘察和超前地质预报工作，以便详细掌握断层破碎带的真实情况，包括断层破碎带边缘、长度、破碎程度以及含水情况等，根据断层破碎带的不同情况采取合理的施工措施。常用的补充勘察和超前地质预报方法有：利用掘进机上配备的超前钻机；利用超前预报系统；利用平导地质情况推断；利用露出的岩石、出渣的情况以及掘进时的异常情况进行判断等。同时，还应通过适宜的现场地应力测试方法，结合反演分析，确定断层破碎带区域的地应力分布规律；还应通过贯入试验、点荷载实验等现场实验方法或单轴压缩试验、巴西劈裂实验等室内实验方法，结合断层破碎带区域围岩的完整性情况，获得断层破碎带区域围岩体的物理力学性质参数。

9.2.5 掘进机在断层破碎带掘进时，应根据断层破碎带宽度、垮塌失稳风险及可能危害程度进行分级，并根据相应掘进风险等级选择合适的超前加固措施、掘进控制参数和支护加固措施。

应选择合适的超前加固措施。对于 C₁ 级断层破碎带，掘进机掘进不会受到影响，可不进行超前加固处理，但掘进过程中应加强对机器受力、围岩和支护结构变形的监测。对于 C₂ 级断层破碎带，一般采用掘进机先掘进通过、再支护加固围岩的方法，必要时进行超前加固处理，同时刀盘可以进行小变径扩挖避免可能的卡机风险。对于 C₃ 级断层破碎带，掘进机无法施工，应停止掘进，用掘进机所搭载的钻孔注浆设备进行超前加固处理，然后打超前钻孔检查，证明掌子面前方围岩已经稳定时再向前掘进通过。对于 C₄ 级断层破碎带，采用一般的超前加固处理之后仍无法使掘进机顺利通过，应采用钻爆法开挖成洞，掘进机随后

跟进通过。

应选择合适的掘进控制参数。在不同的地质条件下，掘进机所需要的刀盘推力、扭矩、转速、掘进速度和撑靴支撑力等掘进控制参数是不同的。在掘进机通过断层破碎带时，应适当减小掘进机的掘进速度、刀盘转速等掘进参数，采用“低转速、小行程、连续掘进”的方法，尽可能不停机或减少停机时间，这样可以有效地减小对围岩的扰动，从而减小或避免围岩垮塌失稳。同时，要根据掘进中部分掘进参数的相对变化，了解前方围岩的变化情况，如通过刀盘推力压力的大小可以推知围岩强度情况，通过刀盘扭矩的大小可以推知围岩完整性情况，从而及时调整掘进机的掘进参数或采用其他措施，使掘进机快速、安全通过。

应选择合适的支护加固措施。掘进机在断层破碎带施工时，其支护主要由挂钢筋网喷混支护、钢支撑支护，并视围岩情况根据设计要求采用超前小导管或超前锚杆等超前支护。对于较小规模的断层破碎带，可挂钢筋网，打系统锚杆，视情况立钢拱架，局部支护加密。对于较大规模的断层破碎带，可挂钢筋网，喷射混凝土或纤维混凝土，打注浆锚杆，立钢拱架，搭管棚。对于规模特别大的断层破碎带，可采用分步联合支护技术进行围岩稳定性控制。在断层破碎带中掘进时，应注意对撑靴处和机头处的围岩进行加固处理，防止撑靴失稳和机头下沉。

9.3 大变形围岩

9.3.1 当隧道等地下工程在穿越高地应力、较大残余构造应力、浅埋偏压区域的软弱破碎围岩体时，常常会产生围岩大变形，隧洞快速收敛经常会导致混凝土管片变形、破损，严重时还会导致掘进机卡机事故的发生。因此，需要提前对大变形围岩的空间位置、展布范围和围岩大变形卡机风险等级进行预测分析。

9.3.2 为了进一步探明掘进机前方大变形围岩的确切情况，应积极开展补充勘察和超前地质预报工作，具体可以参考 9.2.2 节。

9.3.5 掘进机在大变形围岩中掘进时，应根据掘进风险等级选择合适的超前加固措施、掘进控制参数和支护加固措施，支护加固措施可采用如下所述的分步联合支护技术。

1 无挤压变形（D₁级）：不需要扩挖，采用正常的掘进机掘进参数和常规的支护技术通过，必要时采取超前支护措施。

2 轻微挤压变形（D₂级）：全断面隧道掘进机刀盘进行适当扩挖，支护结构采用预应力锚杆、钢拱架、钢筋排结合挂网喷射混凝土支护。

3 中等挤压变形（D₃级）：掘进过程中向掌子面前方打入超前锚杆，掘进机刀盘小变径扩挖，预留变形量，掘进机保持匀速、不间断掘进快速通过，掘进后及时在L₁区施作钢筋排、钢拱架、预应力锚杆并喷射混凝土支护，在L₂区根据情况需要施加预应力锚索支护。

4 严重挤压变形（D₄级）：采用“大变径扩挖+掘进参数调整+分步联合支护”控制技术：人工扩挖旁洞、开挖超前导洞、更换刀盘进行大变径扩挖，采取启动脱困电机、降低刀盘转速等措施提高刀盘扭矩和主驱动推力，对掌子面前方进行超前预注浆加固，掘进后及时施作钢筋排、可缩式钢拱架、预应力锚杆/索并分步注浆。

9.4 岩溶（岩溶管道、溶腔）

9.4.2 溶洞是山区隧洞工程建设中常见的地质灾害之一，给施工安全造成威胁，有时甚至造成重大灾害事故。因此，在岩溶发育地区施工过程中必须加强超前地质预报工作，并及时分析处理超前预报和监控量测数据，为施工支护参数提供依据，在此基础上采取因地制宜的岩溶处理措施，以便安全、顺利地通过溶洞段。

9.4.4 岩溶水以不同形式的岩溶管道、溶洞或暗河为运移通道，因此。在治理岩溶水的同时，应以溶洞处理为主体，并根据溶洞规模采取不同的处理方法。当涌水量较大、掘进机无法掘进时，应进行超前预注浆，加固地层、封堵涌水并根据实际情况引排地下水。排水建筑物可采用排水沟、涵洞或泄水洞等；堵水可采用超前预灌浆措施，通过溶洞后，采用固结

灌浆堵水。

9.5 突涌水（泥）

9.5.4 掘进机施工中，对隧洞突涌水（泥）处理应本着“预报先行、预防为主、防微杜渐、确保安全”的原则，根据预测的突涌水情况，采取不同的处理措施：如水量不大、超前探测孔在放水过程中水压逐渐减小，预计对围岩影响较小时，可采取排水措施后，掘进机继续掘进；如水量较大、超前探测孔在放水过程中水压、水量不减，预计可能出现围岩坍塌时，应进行超前预注浆处理，加固地层、封堵涌水，并根据实际情况引排地下水、超前支护加固围岩，之后才能继续掘进。超前预注浆处理时应当配合采用低强度或与金属弱胶结注浆材料，以及动态反馈注浆技术，避免注浆压力压死护盾、浆液污染刀盘。

9.6 岩爆

9.6.1 岩爆可能发生位置、等级、岩爆损失等级和岩爆风险等级分析过程称为岩爆风险评价。岩爆风险评价一般按勘察设计和施工掘进阶段分别进行。随着隧洞的掘进开挖，揭露的工程地质条件、岩体破坏规律和监测信息的丰富，施工阶段岩爆风险评价在勘察设计阶段初期评估的基础上，借助补充地质勘察和岩爆微震监测预警法对掘进前方一定区域可能发生的岩爆的空间位置、范围、等级以及掘进机施工风险等级进行预测分析，以便于后续掘进机施工的顺利进行。目前国内外积累了许多岩爆微震监测案例表明，岩爆的孕育过程是一系列的岩体破裂、破裂累积到块体弹射的过程，而微震监测技术能够实时监测岩体破裂时间、位置、能量、类型等信息，进而对岩爆灾害进行动态预警。在掌子面前方 150m 范围内可以捕捉到岩体内部断裂到整个岩体失稳的渐进破坏过程。依据微震监测信息，开展岩爆预警工作，预判掌子面前方潜在岩爆的位置、范围及等级及掘进机施工风险等级，可以为岩爆防控提供可靠依据，从而避免或降低岩爆风险，保障施工人员和设备安全。

9.6.2

1 脆性是岩石（特别是深部岩石）的一种非常重要的性质，在硬脆性围岩中，围岩的脆性是决定岩爆风险的关键内因。测试和评价岩石的脆性是岩爆地层（区域）补充勘察的重要内容。岩石脆性评价方法主要有矿物组份法、岩石力学参数法、抗压抗拉强度法、应力—应变曲线法、硬度和断裂韧度法、内摩擦角法等，实际可根据需要和现场资料选用不同岩石脆性指标进行评价。

2 结构面、地应力对岩爆具有重要的影响，一方面，深埋地下工程实践中的很多大规模破坏和剧烈破坏都与结构面有关。结构面对脆性围岩开挖响应的影响方式和机理非常复杂，既可以起到减缓围岩脆性破坏程度尤其是剧烈型脆性破坏（如岩爆）的缓和性作用，也可以反过来加剧围岩的脆性破坏（如构造型岩爆）。在同等岩性条件下，结构面的发育程度的差异直接导致围岩质量不同，完整程度高、质量好的围岩有利于积累高应力和弹性应变能，往往成为岩爆的基本条件之一；结构面发育差、岩体质量较差时，一般缺乏导致岩爆的基础条件。

地应力分布对岩爆的影响规律：通常情况下，埋深越深，出现高地应力问题越普遍，如锦屏二级水电站深埋隧洞，埋深在 1500m 以上时出现高应力破坏，然而，应力型破坏并非和埋深之间存在单调增长关系，隧洞最强的岩爆破坏并非出现在最大埋深段，造成这一现象的主要原因是地应力分布的不均匀性。局部地应力异常是导致岩爆破坏的重要因素，特别是 B₃ 等级的岩爆破坏，一般是局部异常地应力影响的必然结果。

通过钻芯取样等方法采集岩芯，在室内或现场进行工程岩石（岩体）的岩石力学试验，获得岩石的密度、孔隙度、含水性、单轴抗压强度、抗拉强度、剪切强度、声波速度等。在不便于钻孔或缺少钻孔岩芯的情况下，可采用点荷载试验来初步评估岩石抗压强度。现场测试应符合现行行业标准 DL/T 5368 的相关规定。岩体力学参数可根据地质素描、钻孔取芯、现场应力破坏和监测信息反演分析确定。

4 地应力是控制岩爆的重要因素，相对于地应力经验公式估计，地应力测试是获得地应力场更为可靠的手段，地应力测试信息能够用于地应力场反演和地应力状态的确定。水利水电工程采用的地应力测试方法主要有水压致裂法、声发射法和应力解除法。葛修润院士研究了三维地应力 BWSRM 测量新方法，并开发了测井机器人，在重大工程中得到应用。

表 9.6.2 我国部分水利水电工程地应力测试成果表

工程名称	测试段岩性	水压致裂法的最小测试深度 / m	主要测试成果 / MPa			主要测试方法
			最大水平主应力	最小水平主应力	最大垂直应力	
万家寨引黄入晋工程	侏罗纪砂岩	331	19.22	11.32	8.77	水压致裂法 应力解除法
太原市给水工程输水隧洞	奥陶系灰岩	303.1	19.7	8.60	8.10	水压致裂法 声发射法
天生桥二级发电引水隧洞	灰岩	450	31.1	—	—	水压致裂法
锦屏二级水力发电引水隧洞	大理岩	740	46.60	—	—	应力解除法
太平驿水电站引水隧洞	花岗岩	200	30.70	10.20	—	应力解除法
南水北调西线	三叠系砂板岩等	235	11	—	—	水压致裂法
大伙房输水隧洞	混合岩	400	23	13	15	水压致裂法
新疆输水隧洞	花岗岩	477.20	26.93	18.11	12.43	水压致裂法
天山抽水蓄能电站地下厂房	火山碎屑岩	291.20	15.88	9.80	5.82	水压致裂法 应力解除法

9.6.3

B_1 等级岩爆时，围岩表层有爆裂，剥落现象，零星间断发生，对施工影响较小，一般难以造成灾难性损失。当岩爆等级为 B_3 、 B_4 时，严重威胁施工人员和设备安全，有必要开展岩爆微震监测工作，从岩体变形的初始阶段开始，跟踪监测岩体内部岩块断裂到整个岩体失稳的渐进性破坏过程，能够实时监测岩体破裂时间、位置、能量、类型等信息。

微震监测技术可实现三维空间全方位、大范围 24h 连续不间断实时监测，具有自动化、信息化、智能化的特点，支持自动监测和监测信息的远程传输，准确率高，在岩爆预警方面具有十分独特的优势。目前国内外大量水电工程中已开展岩爆微震监测，取得了显著的成效，

如锦屏二级水电站深埋隧洞、引汉济渭秦岭输水隧洞等。2010年8月22日~2011年11月22日，在雅砻江流域锦屏二级引水隧洞工程先后开展了东端、辅引支洞、西端共计31个开挖工作面的微震监测工作，共获得现场岩爆信息237次，除14次未能提前预测外其余223次均有岩爆风险预测，占94.09%。2017年9月至2018年7月，引汉济渭工程秦岭隧洞岭南掘进机施工洞段微震监测，岩爆发生次数146次，准确预报140次，准确率达95.89%。2018年1月至2019年11月，新疆ABH天山隧洞三标掘进机施工洞段微震监测，岩爆发生115次，准确预报88次，其中， B_1 等级岩爆预测准确率为73.26%， B_2 等级岩爆预测准确率达86.21%。

确定岩爆微震监测整体技术方案。对于岩爆监测首先要确定监测区域，微震监测设备、微震传感器类型、数量以及布置方案。微震源定位时微震传感器越多，定位精度也就越高，一般而言监测过程需要布置6个~10个传感器，且间隔距离不宜过近，防止形成的微震传感器空间阵列较差，影响定位精度。微震监测宜选用三向加速度传感器。开敞式掘进机在掘进机护盾盾尾与撑靴之间可布置微震传感器，一般只安装在顶拱 140° 范围内，每个监测断面宜布置3个~4个微震传感器，相邻断面间距宜为20m~50m，在高岩爆风险区域，宜增布微震传感器。为了保证微震监测的顺利，微震监测系统还需配置不间断电源、防电涌浪装置、光缆、电缆、无线网络通讯等模块。

构建岩爆微震监测数据处理系统。微震监测时，采样频率不低于被采集信号最高频率的5倍才能保证信号在频域上不发生混叠，一般而言，岩爆微震监测系统的采样频率不宜低于2500Hz。对岩爆监测数据处理分析时，宜分析不同区域内微震事件的空间集中程度和微震参数随事件的演化规律，从而预判不同区域的岩爆等级。微震参数一般包括微震事件数、微震释放能、微震视体积、能量指数和斯密特数等。岩爆风险判别指标越少越容易推广，简化为“以能量为主、频次和震级为辅”进行快速判别，可大大提高工程指导的易用性，推动微震

监测技术的认识和普及，便于在越来越多的工程中应用。

建立岩爆预测判据，评估岩爆灾害风险。根据引汉济渭工程微震监测经验，基于微震监测技术的岩爆级别判定，将岩爆分为四个级别：

震级强、能量大且集中度高的微震事件达到五个以上，或者震级一般、能量一般、集中度高且数量特别多的，发生 B₃ 等级岩爆的概率较大。

震级强、能量大且集中度高的微震事件 2 个~5 个，或者震级一般、能量一般、集中度高且数量较多的，发生 B₂ 等级岩爆的概率较大。

震级一般到强、能量一般到强，事件数量较多但集中度不高，发生 B₁ 等级岩爆的概率较大。

震级一般或较低、能量一般或较低、集中度不高且数量不多的，发生岩爆概率较小。

岩爆风险预判别标准的主要微震监测参数有频次、矩震级、能量、超标准事件分布范围、超标准事件数量等指标进行超前预评判。通过微震事件密度云图、微震事件震级与频度的关系、微震事件震级、能量集中度等作为岩爆判断条件。

9.6.5

1 B₁ 等级岩爆地段，应立即采取喷水措施，一般拱墙范围内连续喷水不少于 0.5 小时，喷水有助于软化围岩与提前应力释放，降低滞后性岩爆发生概率。同时，在应力集中部位应实施径向应力释放短孔，应力释放短孔孔径 38mm 以上、深度 0.5m 左右，间距 1m 左右的梅花状分布。如果岩爆范围相对较大，可采用预应力锚杆、水胀式锚杆等实现快速支护，必要时，进行喷射砼 3cm~5cm 封闭围岩。

2 B₂ 等级岩爆地段，仍须采取喷水措施和径向应力释放孔，岩爆部位进行高压水喷水时间一般应保持在 1h 以上；径向应力释放孔孔径大于 42mm，深度应大于 1.5m，其间距可根据实际应力集中部位及其周边一定范围适当加密。发生岩爆而未形成塌腔的地段采用

φ16~φ20 钢筋排配合 H150~H180 型号的全圆或局部钢拱架进行封闭支护，钢拱架需采用砂浆锚杆进行锁脚，砂浆锚杆长度不小于 2.5m。

掘进机施工在拱部 120°范围内一般设置 McNally 系统钢筋排安装孔。如岩爆引起的坍塌超过这个范围，松散石块很可能沿着钢筋排两侧向下滑落，导致拱部形成空腔，此时，应对岩爆塌腔进行喷浆封闭，初喷厚度一般不小于 5cm，宜添加纳米纤维，使喷射混凝土能够快速起强同时增加其抗剪性能，待喷射混凝土强度达到 6MPa 以上时，可开展下部的钢拱架及钢筋排安装作业。

在初喷完成后通过挂设 180°整体柔性钢丝网再复喷的支护方式进行施工，但这种情况需要增加系统锚杆的布置，系统锚杆长度也应增加到 3m 以上，有利于提高支护体系的整体受力。在围岩坍塌之外区域尽可能实施系统锚杆，系统锚杆长度一般在 2.5m 以上，钢拱架的安装间距可根据实际情况动态调整，一般 90cm 左右，钢拱架之间应加强纵向连接，采用 22mm 螺纹钢进行焊接牢固。

3 采用掘进机施工，B₃ 等级岩爆可采取以下措施：爆坑及周边围岩喷射高压水 2h 以上，促使应力进一步释放，能量释放后，初喷 8cm~10cm 厚纳米仿纤维混凝土，喷射 C20 混凝土对岩面进行封闭，厚度 10cm~15cm。

4 B₄ 等级岩爆风险极大，目前在应对极强岩爆方面经验较少，稍有不慎将引起灾难性后果。在极强岩爆地段，应遵循“前方地质不探明不开挖、施工方案未充分论证不开挖、后部支护体系不稳固不施工”的原则进行防治。对于弹射型破坏，或破坏深度超过 100cm 的 B₃ 岩爆或 B₄ 岩爆段应加强岩爆预测和监测工作。依赖掘进机自身可以发掘的能力很难解决问题，采取非常措施提前解除掌子面前方岩爆风险：超前应力解除爆破（中部 5m、拱部 10m~20m），以期降低岩爆等级，评估继续掘进施工的可行性；等待、观测岩爆是否降级，降级即按照 B₃ 岩爆防治措施进行治理；若未降级，需停工召开岩爆专项方案研讨会，对掘

进机工法施工可行性进行分析；通过钻爆法开挖的导洞解除或降低围岩高应力集中，甚至全断面钻爆开挖后让掘进机安全步进通过高岩爆风险区域。

5 施工中结合具体工程情况，在不利施工条件下宜采用抗岩爆快速支护工艺和增强材料。包括快速起强喷射混凝土、抗冲击锚杆及型钢支撑等，能有效抑制岩爆的发生，为掘进机安全快速掘进起到积极作用。掘进机在岩爆段施工过程中可采用无机纳米材料和有机仿钢纤维材料的喷射混凝土进行围岩支护。锦屏二级引水隧洞施工实践表明，掺加无机纳米材料和有机仿钢纤维材料后，可部分替代钢筋网和钢纤维，实现强度起效快、增强、防裂的效果，并具有改善和易性、抑制裂缝、提高抗冻融能力、抗疲劳、抗渗、抗磨、抗碎裂、抗冲击、抗弯增强和辅助增强功能，减少回弹量等；而且更加经济、省时方便。

6 以引汉济渭工程秦岭输水隧洞为例，通过对直径 8 米开敞式掘进机施工中遇到的围岩和掘进参数进行统计分析，总结了适用于本工程的不同岩爆等级围岩掘进参数的建议值为：

B₁ 等级岩爆硬岩段掘进参数建议值为推力 17000kN ~ 20000kN，转速 5r/min ~ 6r/min，扭矩 1500kN·m ~ 2200kN·m，速度 1.2m/h ~ 1.8m/h；软岩段掘进参数建议值为推力 6600kN ~ 8600kN，转速 2r/min ~ 3r/min，扭矩 1500kN·m ~ 2200kN·m，速度 1.0m/h ~ 1.4m/h。

B₂ 等级岩爆掘进参数建议值为推力 6600kN ~ 14000kN，转速 2r/min ~ 4.5r/min，扭矩 1300kN·m ~ 1750kN·m，速度 1.2m/h ~ 1.8m/h。

B₃ 等级岩爆掘进参数建议值为推力 8500kN ~ 11000kN，转速 3r/min ~ 3.5r/min，扭矩 1550kN·m ~ 1850kN·m，速度 1.2m/h ~ 1.6m/h。

9.7 超硬岩

9.7.2 在实际掘进施工中，对于不属于 A₃ 和 A₄ 等级围岩洞段，属于适宜掘进机掘进施工的围岩，可以采用正常掘进模式进行掘进。

对于 A₃ 等级围岩洞段，掘进机工作条件一般，对滚刀材料、刀刃宽度和布置间距以及刀具防磨蚀措施都应进行优化和改进，可采用以下措施：

(1) 优化掘进机掘进参数：宜采用高转速、低贯入度、高推力、低扭矩的“两高两低”模式。

(2) 刀具技术攻关：开展刀具专项试验，摸索适合工程的刀具，一定程度上可减少刀具成本支出；通过增加刀盘检查频次及换刀人员，减少刮板、刀座磨损和消耗。

(3) 优化设备结构、引入新型材料：

1) 优化刮板座结构：刮板座可由原来单个组装焊接结构更改为整体铸造结构，使其受力更均匀，刮渣板更换更简易，减少异常损坏。

2) 引进新材料：易磨损部件可改用耐磨材料或堆焊耐磨材料，达到增加耐磨的效果。

对于 A₄ 等级围岩洞段，掘进机工作条件差，除采取针对 A₃ 等级围岩的措施外，可采取高压水射流、高低温交变、微波、激光等辅助破岩手段。

9.8 高地温

9.8.1 高地温等级划分阈值确定

(1) 划分指标的确定

实际工程中，涉及到高地温隧道段的监测项目有洞内空气温度和湿度、涌水水温、岩体（岩壁）温度、WBGT 指数等多项。实际施工中多以洞内空气温度、岩体（岩壁）温度、WBGT 为高地温处理措施控制指标（图 9.8.1 - 1），其中洞内空气温度是影响施工过程中监测或控制的主要指标，现行规范有关高地温的表述也以洞内空气温度为控制指标（表 9.8.1 - 1）。而 WBGT 虽然能真实反映工人在高地温条件下的劳动负荷，但其测量、计算过程较为复杂，实际施工中操作难度较大，不宜作为高地温等级划分指标。《高温作业分级》中也建议实际操作中根据环境温度的不同采取对应的高温处理措施，因而应将洞内空气温度作为

高地温等级划分的指标之一。

综合高地温工程案例调研结果,实际施工过程中针对高地温采取的防治措施主要有为提供舒适作业环境的劳保措施和为确保隧道施工质量的施工技术措施。其中施工技术措施的分级实施多以岩体(岩壁)温度为划分指标,部分隧道施工过程的劳保措施也以岩体(岩壁)温度为划分指标。因而,也可将岩体(岩壁)温度作为高地温等级划分的指标之一。

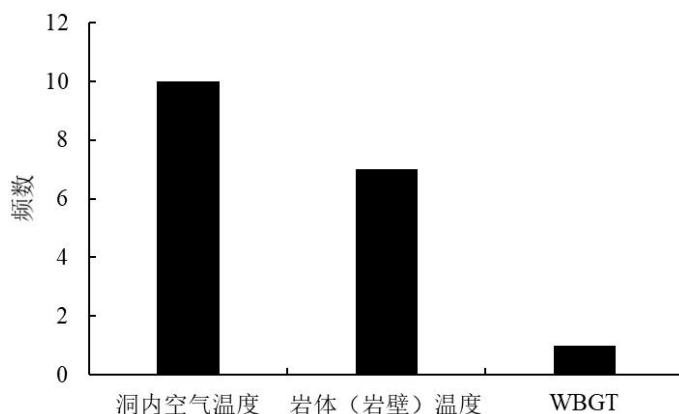


图 9.8.1-1 工程实例中高地温控制指标

(2) 洞内空气温度阈值

现有多种规范都高地温条件下施工作出了明确的规定(表 9.8.1-1),由表可知,现有铁路、公路、水利等行业规范多将 28℃作为高地温的下限阈值,仅有《煤矿安全规程》将 26℃作为下限阈值。结合高地温隧道工程实例调研结果,实际工程中多以处理后洞内空气温度是否低于 28℃以下作为降温效果判据。综合而言,应将 28℃作为高地温下限阈值。

洞内空气温度的其他阈值则应结合实际施工过程中所采取的处理措施取定,结合调研发现,高地温隧道施工过程中所采用的劳保措施主要有:通风、洒水、冷水喷雾、局部风扇、制冰、冷却服、固定或移动式空调。大体可分为以下两类:

①非人工制冷降温:主要采用加强通风方式实现(或结合洒水、冷水喷雾)洞内降温的措施;

②人工制冷降温:在加强通风等不足以消除热害时,安装制冷机、固定或移动式空调实

现降温的措施。

结合工程实例调研发现，采取非人工制冷的洞内空气温度上限值集中分布于 34~37℃ (图 9.8.1 - 2)，其平均值为 35.7℃，为便于施工操作，可取定 35℃为洞内空气温度的另一个阈值。

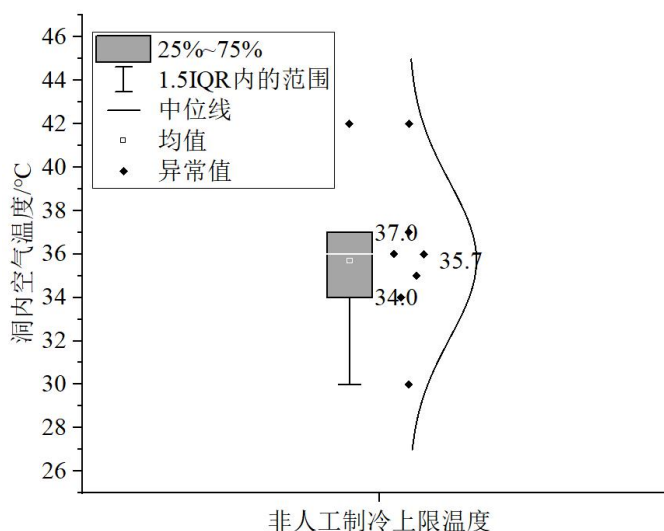


图 9.8.1 -2 非人工制冷洞内气温上限值

结合实际工程经验，洞内空气温度过高之后采取常规劳保措施和施工技术措施对高地温隧道施工的知道十分有限，需针对性地展开专题研究，现有工程中提到针对高地温隧道施工专题研究的报道较少，仅《铁路工程不良地质勘察规程》根据大瑞铁路高黎贡山隧道施工经验明确提出当洞内空气温度超过 60℃时应展开专题研究，基于掘进机掘进施工连续掘进和刀盘、电机散热，取 55℃为洞内空气温度的又一个阈值。

表 9.8.1 - 1 现有规范有关高地温的规定

编号	规范	规定
1	《矿山安全条例》	井下工人作业地点的空气温度不得高于 28℃
2	《水利水电工程施工组织设计规范》SL 303-2017	洞室内温度超过 28℃时，通风风速应进行专门研究
3	《煤矿安全规程》	生产矿井采掘工作面空气温度不得超过 26℃
4	《铁路隧道设计规范》	隧道内温度不得高于 28℃
5	《公路隧道施工技术规范》JTGF 60-2009	隧道内气温不宜高于 28℃
6	《铁路隧道施工规范》TB 10204-2002	隧道内气温不得高于 28℃
7	《铁路工程施工技术手册》	洞内工人作业地点的空气温度，不得超过 28℃
8	《铁路隧道全断面岩石掘进机法技术指南》	隧道内气温不得高于 28℃

(3) 岩体温度阈值确定

高地温隧道施工过程中所采取的施工技术措施主要有：通风、洒水、加强配筋、提高混凝土等级、设置隔热层等措施，大致可分为做好洞内衬砌结构好的护措施（通风、洒水）和衬砌结构质量提升措施（加强配筋、提高混凝土等级、设置隔热层等措施）两类。

结合工程实例统计结果，不同岩体（岩壁）温度条件下施工措施统计如表 9.8.1 - 2，由表可知，40℃、50℃、60℃、70℃、80℃均被采用为施工措施分级施作的控制值。其中 60℃被多个工程用作是否采取人工制冷、是否对衬砌结构采取特殊处理措施的控制值，考虑一定的安全富余，因而将 55℃作为 T_1 、 T_2 高地温风险等级的阈值。而当岩体（岩壁）温度大于 40℃、50℃时，需加大洞内通风，此处取其低值，以 40℃为具有高地温风险的阈值。

表 9.8.1 - 2 不同岩体（岩壁）温度措施统计

引汉济渭工程	桑珠岭隧道	大瑞铁路高黎贡山隧道1号斜井工区	拉日铁路隧道	禄劝船厂水电站工程	未知
>24℃；向掌子面岩体及岩渣喷水	< 50℃；通风降温	< 40℃；通风，控制衬砌表面温差	-	-	-
	50 ~ 70℃；加强通风、洒水、喷雾剂	> 40℃；衬砌混凝土隔热层		50 ~ 60℃，加大通风、喷雾洒水	
	> 70℃；加强通风、洒水、喷雾剂、局部风扇		60 ~ 80℃；加强配筋	> 60℃；人工制冷、衬砌隔热	
	-		> 80℃；提高混凝土等级、设置隔热层	> 60℃；衬砌隔热	

9.9 有害气体

9.9.2 有害气体等级划分阈值确定

(1) 划分指标的确定

隧道工程中，有害气体种类繁多，其中以瓦斯最为常见，研究也较为充分，结合涉及有害气体处理的隧道工程统计发现，多数工程以瓦斯为有害气体监测和控制的主要项目（图

9.9.2 - 1), 而现有隧道常监测的有害气体如: CO、CO₂、SO₂、NO_x、H₂S 均为瓦斯的组成部分, 因而将瓦斯作为有害气体风险等级划分指标之一是合理的。而 H₂S 气体作为瓦斯的组成部分, 有剧毒, 较多工程在监测瓦斯的同时也对 H₂S 浓度另行监测, 部分工程直接将 H₂S 和瓦斯同时作为有害气体处理措施采用的实际依据, 因而可将 H₂S 作为有害气体风险等级划分指标。

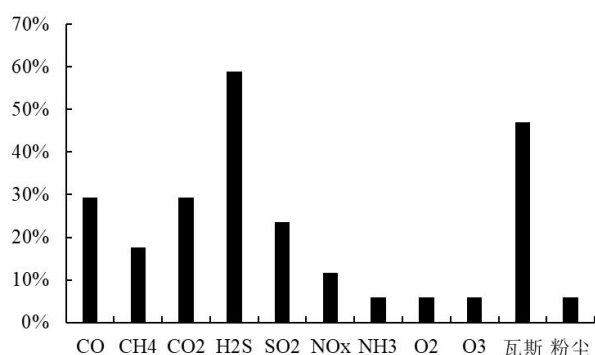


图 9.9.2 - 1 实际工程有害气体监控项目统计

(2) 瓦斯浓度阈值确定

结合工程实例和现有规范调研发现, 针对有害气体风险的处理主要分为超过卫生条件允许限值时处理和具有较高风险时的撤出施工人员处理等两类。按 SL 378—2007“当工作面瓦斯浓度超过 1.0%时, 必须停止作业, 撤出施工人员”的规定, 实际施工过程中采取撤人措施的瓦斯浓度限值为 1% ~ 2.5%, 为安全考虑, 可将 1.0%作为有害气体高风险等级的阈值。

调研现有规范发现, 目前尚无对瓦斯浓度作出卫生条件允许限值 (表 9.9.2), 而 TB 10120-2002《铁路瓦斯隧道技术规范》明确规定“掌子面瓦斯浓度限定小于 0.5%”, 现有工程统计发现, 多数工程将 0.5%作为隧道正常施工是瓦斯浓度限值 (图 9.9.2 - 2), 将停机采取通风措施的瓦斯浓度限值取定为 0.5%。因此, 可将 0.5%作为有害气体一般风险的阈值。考虑到瓦斯易燃易爆, 施工过程中因加强监测, 对相应设备采取防爆设计。

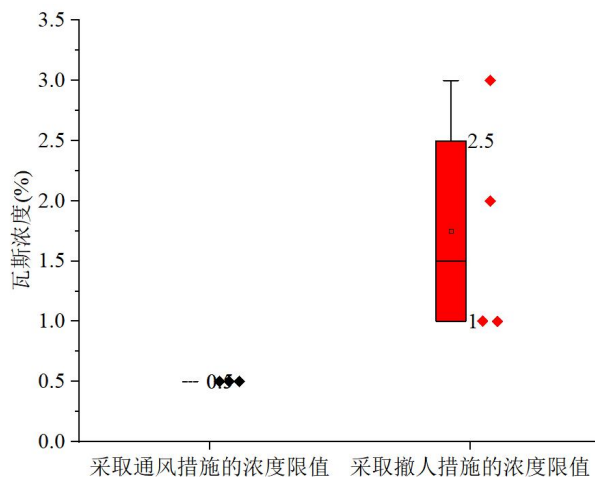


图 9.9.2 - 2 不同处理措施瓦斯浓度限值

(3) H₂S 浓度阈值确定

调研现有规范发现，现有规范多将 6.6ppm 作为 H₂S 卫生条件浓度的限值，实际工程中也将 6.6ppm(图 9.9.2 - 3)作为采取通风等处理措施的 H₂S 浓度限值，因而可将 6.6ppm 作为有害气体一般风险的阈值。

现有规范未见必须撤出施工人员进行处理的 H₂S 浓度限值的规定，而现有工程实例采取停工撤人措施的浓度限值如图 所示，采取撤人措施的 H₂S 浓度普遍集中与 15ppm，因而可考虑将 15ppm 作为有害气体高风险的阈值。

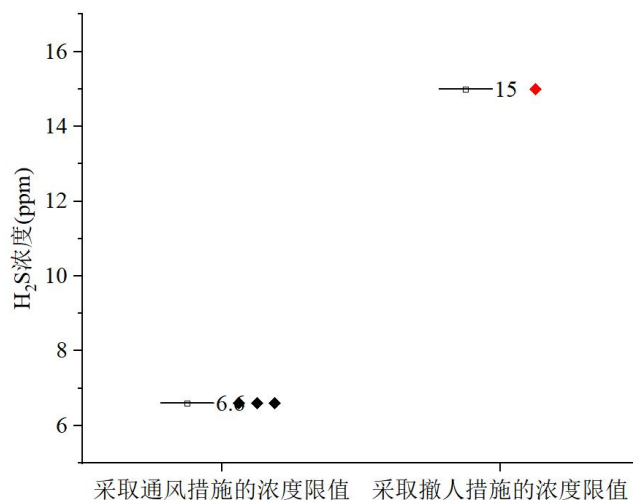


图 9.9.2 - 3 不同处理措施 H₂S 浓度统计

表 9.9.2 相似规范关于有害气体的规定（不完全统计）

编号	规范	规定
1	《公路隧道施工技术规范》JTG F60-2009	一氧化碳不大于 30mg/m ³ ，在特殊情况下施工人员必须进入工作面时不大于 100mg/m ³ ，但工作时间不得超过 30min；二氧化碳不大于 0.5%；氮氧化物不大于 5mg/m ³ ；
2	《铁路瓦斯隧道技术规范》TB 10120-2002	掌子面瓦斯浓度限定小于 0.5%，超前探测孔小于 1%

9.10 放射性物质

9.10.1

1 监督区 (R_1) —— 未被确定为控制区、通常不需要采取专门防护手段和措施但
要不断检查其职业照射条件的任何区域。

2 控制区 (R_2) —— 在辐射工作场所划分的一种区域，在这种区域内要求或可能要求
采取专门的防护手段和措施，以便：

- 1) 在正常工作条件下控制正常照射或防止污染扩展。
 - 2) 防止潜在照射或限制其程度。
- 3 工作场所的表面污染控制水平如表 9.10.1 所列。

表 9.10.1 工作场所的放射性表面污染控制水平

表面类型		α 放射性物质/Bq·cm ⁻²		β 放射性物质/Bq·cm ⁻²
		极毒性	其他	
工作台、设备、墙壁、 地面	控制区	4	4×10	4×10
	监督区	4×10 ⁻¹	4	4
工作服、手套、工作鞋	控制区	4×10 ⁻¹	4×10 ⁻¹	4
	监督区			
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10 ⁻²	4×10 ⁻²	4×10 ⁻¹

应用这些控制水平时应注意：

- 1) 表 9.10.1 中所列数值系指表面上固定污染和松散污染的总数。
- 2) 手、皮肤、内衣、工作袜污染时，应及时清洗，尽可能清洗到本底水平。其他
表面污染水平超过表 9.10.1 中所列数值时，应采取去污措施。
- 3) 设备、墙壁、地面经采取适当的去污措施后，仍超过表 9.10.1 中所列数值时，

可视为固定污染，经主管部门或主管部门授权的机构检查同意，可适当放宽控制水平，但不得超过表 9.10.1 中所列数值的 5 倍。

4) β 粒子最大能量小于 0.3MeV 的 β 放射性物质的表面污染控制水平，可为表 9.10.1 中所列数值的 5 倍。

5) ^{227}Ac 、 ^{210}Pb 、 ^{228}Ra 等 β 放射性物质，按 α 放射性物质的表面污染控制水平执行。

6) 氚和氚化水的表面污染控制水平，可为表 9.10.1 中所列数值的 10 倍。

7) 表面污染水平可按一定面积上的平均值计算：皮肤和工作服取 100cm^2 ，地面取 1000cm^2 。

10 安全监测

10.1 一般规定

10.1.5 监测仪器包含传感器、配套电缆、测量仪表和可用于实现自动化测量的数据采集装置。监测仪器是安全监测的工具，监测仪器的可靠性和准确性直接影响对结构性态和安全的评价，所以监测仪器的适用性和可靠性是选择监测仪器首要考虑的。隧洞工程的特点是环境条件差，使用寿命长，因此，应该选择技术成熟、经长期工程运行考验的监测仪器。

10.2 隧洞周边环境监测

10.2.7 隧洞进出口以及沿线地下水位有变化处等对生态环境有影响的区域，宜设地下水位及水质检测等项目。

10.3 洞内监测

10.3.1 施工期安全监测在隧洞施工中占有重要的地位，在指导隧洞设计、合理确定初期支护参数、选择二次支护及衬砌的合理时间等方面起着重要作用。隧洞施工中，围岩的稳定性直接关系到施工的安全性，仅靠开挖前的勘探资料进行判断是有局限的，由于不同地区岩体结构性状、节理裂隙发育状态、地下水分布情况等地质因素具有随机性，很多地质问题都是在施工过程中逐步认识的，这就需要在施工中对围岩稳定性进行监测，监测围岩的内部变形及收敛情况，同时监测支护结构的稳定，使隧洞围岩和支护结构处于受控状态。

10.3.2 在隧洞运行期，洞周围岩、支护衬砌在水压力（内水和外水）的作用下，应力、应变、渗透压力等形态均会发生一定变化。不同水压力作用下，围岩、支护衬砌形态变化是否会影响隧洞的稳定，是运行期安全监测需要关注的问题。因此，运行期安全监测应重点监测围岩的变形，围岩支护及衬砌结构、水压力等。

10.4 特殊地质洞段防控监测方法

10.4.1 断层带涌水、涌泥、涌砂、岩溶等不良地质洞段应根据不同地质复杂程度制定

专项监测施工方案，进行动态设计，合理调整 TBM 施工参数和监控设计。地质复杂程度根据 SL 629 将地质复杂程度分为复杂、简单两个等级（见表 10.4.1）。

表 10.4.1 隧洞工程地质条件复杂程度划分

	复杂	简单
1	深埋长隧洞、穿越地表水体隧洞、城镇地下隧洞	-
2	地形不完整、物理地质现象发育、环境地质条件差	地形完整，物理地质现象不发育，环境地质条件较
3	地层岩性复杂，工程地质性质不良岩体大面积分布或洞段主要为第三系、第四系地层	地层岩性较单一，无工程地质性质不良岩体分布
4	地质构造复杂，有大断裂或活动性断裂通过，高地应力	地质构造较简单、断裂构造不发育，地应力较低
5	存在有害气体，或地温异常，或中等以上岩爆	无有害气体、地温异常、围岩变形及岩爆问题
6	水文地质条件复杂，岩溶发育，有强透水带或承压水分布。可能存在突水（泥）问题	水文地质条件简单，无富水层（带）分布
7	进出口地质条件差，边坡不稳定	进出口地质条件较好，边坡稳定
注 1：本表不适用黄土隧洞。		
注 2：划分可按“一项符合，就高划类”的原则执行。		

10.4.2 岩爆段防控应进行预报监测，并超前处理释放地应力，降低岩爆等级和危害程度，制定合理的专项监测方案和 TBM 掘进参数。出护盾后应尽快支护或安装管片，并加强监测。

10.5 监测成果与信息反馈

10.5.4 主要测值过程线可包括下列内容：

- 1 一次支护与二衬压力 - 时间过程线。
- 2 位移-时间过程线。
- 3 位移速率-时间过程线。
- 4 位移量与开挖面距离关系曲线。
- 5 位移—时间回归曲线。

10.5.7 信息反馈有理论方法和经验方法，目前仍以经验方法为主，其主要目的是：

- 1 判断围岩是否稳定，支护措施是否安全，施工方法是否恰当。

2 在保障安全的前提下，支护是否经济，必要时调整支护设计。

3 监测资料的分析处理是信息反馈的基本工作。首先对监测数据进行校核，对监测数据需进行可靠性分析，排除仪器、读数等操作过程中的误差，剔除和识别各种粗大、偶然和系统性误差，避免漏测和误测，切实保证监测数据的可靠性和完整性；其次，要对监测数据进行整理，包括各种物理量结算、图表制作，如物理量的时间速率与空间分布图的绘制等；最后是数据分析，分析通常采用比较法、作图法和数值计算法等，分析各监测物理值大小、变化规律、发展趋势。

4 监测成果应及时反馈给监理、设计、施工单位和工程管理部门。

5 当隧洞水平位移收敛速度为 $0.1\text{mm/d} \sim 0.2\text{mm/d}$ ，拱顶下沉位移速度为 0.1mm/d 时可以认为围岩已基本稳定。对IV、V级围岩，应根据监测成果确定二次衬砌施作的适当时间，施作过早可能使二次衬砌承受过大的荷载。

6 在监测过程中，若发现净空位移过大或收敛速度无稳定趋势时，对结构应采取补强措施。

7 若发现净空位移收敛速度具有稳定趋势时，应据此求出隧洞结构一次支护及二次衬砌上的最终荷载，以便对结构的安全度做出正确的判断。

8 若经过对各种量测数据联合反分析后，发现一次支护或二次衬砌结构安全系数较大，应优化设计，针对下一段与此地质类型相近的支护参数进行动态设计调整。

9 对围岩级别的变更及对支护参数的调整均必需有相应的监测数据并得到设计方认可。

10.6 施工期控制值与预警

10.6.1 隧洞周边允许位移相对控制值按 GB 50086-2015 第 7.3.10 条的规定执行，见表 10.6.1。

表 10.6.1 隧洞周边允许位移相对控制值 (%)

围岩级别	埋 深/m			备注
	< 50	50 ~ 300	300 ~ 600	
III	0.10 ~ 0.30	0.20 ~ 0.50	0.40 ~ 1.20	
IV	0.15 ~ 0.50	0.40 ~ 1.20	0.80 ~ 2.00	
V	0.20 ~ 0.80	0.60 ~ 1.60	1.00 ~ 3.00	

注 1：周边位移相对值系指两侧点间实测位移累计值与两测点间距离之比，或拱顶下沉实测值与隧洞宽度之比。
 注 2：硬质围岩的取表中较小值，软质围岩的取表中较大值。
 注 3：本表所列数值可在施工过程中通过实测资料积累，并根据工程类比，对隧洞、洞室周边允许相对收敛值进行修正。并参考围岩的弹模、变模、岩性等将隧洞埋深外延 100m 作适当调整。
 注 4：本表适用于搞跨比 0.8~1.2 的下列地下工程：III 级围岩跨度不大于 20m；IV 级围岩跨度不大于 15m；V 级围岩跨度不大于 10m。

10.6.4 安全监测是一项长期性与周期性的动态采集和分析判断过程，根据隧洞施工的不同阶段、目的与工况，采取相应的监测项目与检测频次，不同监测项目存在关联性，如隧洞结构变形发生异常时，隧洞应力和渗流压力可能也发生异常，在时间序列上监测信息符合渐变到突变的过程，以获取资料的完整性与规范性。

10.7 巡视检查

围岩或支护结构的安全监测，在施工初期，由于受围岩应力释放的影响，监测量值主要受开挖影响较大，开挖影响范围 3 倍 ~ 5 倍洞径，这一时期的监测量值占整个监测量值的 70% 以上，为重视这一期间的监测，本节规定了应进行的监测频次。同时，这部分内容也是围岩稳定性分析和运行期资料分析的基础。

11. 掘进信息化管理系统

11.1 一般要求

11.1.1 编制本规范的目的是为提升水工隧洞施工的信息化管理水平，便于及时了解水工隧洞岩石掘进机的施工情况，“及时、准确、完整”监控管理掘进机现场施工数据和施工风险加强岩石掘进机水工隧洞。施工中宕机、卡机时常发生，运维困难（尤其是海外、高海拔等地区），严重影响施工进度和企业效益。研发掘进机运行服务智能云平台，探索引领智能隧道掘进机远程诊断与运维新技术和服务新模式，是 21 世纪隧道施工的必然趋势。

11.1.3 强调掘进机信息化应具备的扩展空间、兼容空间及信息升级空间，以便掘进机管理系统适应信息化发展的需要及升级需要。

11.1.9 关键部件是指发生故障会严重影响工期、设备安全和经济效益的设备。刀盘刀具、主轴承、减速机、螺旋机、盾尾密封、主轴承密封、铰接密封、主驱动电机、变频器等是掘进机的关键部件。关键部件的主要失效形式和失效原因研究、关键部件的状态监测手段研究、关键部件的状态评估、故障诊断方法研究、掘进部件失效导致的施工风险评估方法研究。

11.1.10 在掘进机在施工过程中，当前方围岩比较破碎，但是在掘进完成时设备上没有支护材料，会导致施工效率下降，严重时会导致隧道塌方风险事故；在掘进机在施工过程中，当设备在维保时，没有进行水管延伸，水管限位导致设备无法正常掘进，降低施工效率，影响工期。

上述现象，在掘进机施工过程中时有发生，都是由于施工人员技术水平和管理水平不到位导致设备资源分配不合理或者作业调度管理不合理，从而影响施工进度，严重时会导致施工风险、人员伤亡。

11.1.11 掘进机在施工过程中因疲劳、性能衰退和磨损等原因，引发掘进机关键部件失

效或需要更换，导致掘进装备停机重大故障；库存备件与更换备件不匹配引发掘进装备长时间停机。关键部件失效存在很大安全隐患，库存备件过多或不存待更换备件会导致施工成本急剧增加，因此必须对关键状态进行实时监控。

11.2 系统技术要求

11.2.1 掘进机管理系统能具备掘进机相关数据的收集，监管、存储和管理方面的能力，以保证该数据可以为后续工程或类似工程的施工提供经验，同时也为相关研究提供基础数据。

11.2.4 强调掘进机管理系统的系统部件构成应采用市场标准产品，以便于后期的维护、维修和升级，以保证系统的长期有效运行。

11.2.6 强调掘进机管理系统可以在一定范围内的一种允许或包容犯错情况的发生，以便不影响掘进机的施工，避免因系统误报而引起的不必要的施工风险和施工隐患。

11.3 掘进信息采集及预警

11.3.3 掘进机管理系统收集人员信息包括：人员姓名、班次信息、班次时间、请假情况、联系方式、家庭住址及紧急通讯联系人等。

11.4 数据存储

11.4.2 数据存储的标准化规范，利于施工单位对风险、进度等统筹管理，能够自动生成日、周、月报表，同时系统应能够对历史数据进行查询并导出保存。

11.4.5 系统自动备份的数据不能替代原始数据，备份数据应与原始数据分别存储，并要采用同样的管理权限管理，并确保数据的准确性及安全性，便于对后期的分析处理。

11.5 信息安全要求

11.5.2 防火墙是建立在内外网络边界上的过滤机制，内部网络被认为是安全和可信赖的而外部网络被认为是不安全和不可信赖的。防火墙可以监控进出网络的流量，仅让安全、

核准的信息进入，同时抵制对企业构成威胁的数据。信息加密的目的是保护网内的数据、文件、口令和控制信息，保护网上传输的数据。数据加密技术主要分为数据存储加密和数据传输加密，数据传输加密主要是对传输中的数据流进行加密。身份认证是系统核查用户身份证明的过程，其实质是查明用户是否具有他所请求资源的使用权。

11.6 水工隧洞掘进智能化

11.6.1 从解决掘进机施工时出现的故障和风险问题出发，掘进机管理系统提供可以提供远程访问或人工导出数据的方式给业内专家提供关键数据，便于业内的家远程诊断和提供技术服务功能，有利于施工单位快速高效的查找问题及制定解决方案，提升施工进行的效率和安全性。

11.6.3 人机岩逻辑分析能力是以保证掘进机安全高效施工，弥补地质资料不足，及时了解施工区掌子面前方的地质条件，通过岩渣检测、塌方与破碎围岩识别、超前钻机与设备掘进参数分析等技术手段适时对不良地质进行超前地质探测和超前地质预报等方面进行逻辑分析和管控。采用人工智能技术通过对工程数据进行对比分析，着重分析掘进机安全作业模型，建立掘进机地质、设备的风险判识与评估的指标，开展掘进机在约束条件下的最优纠偏轨迹设计，计算掘进机的姿态和力学情况，对掘进机姿态的规划、油缸行程、油缸速度、刀盘速度规划，开发掘进机姿态控制、推力、扭矩参数等优化决策提出算法模型。

1 掘进机通过诸如软岩、断层带和风化岩等软弱围岩时往往会由于强烈挤压变形和破坏而发生卡机、塌方、突涌水等事故，会影响工程进展，增加工程造价，有时甚至发生重大人员伤亡。目前大部分掘进机施工地质情况分析往往依赖前期设计院地勘资料以及人为经验，山岭地区或高海拔等特殊地区，往往难以开展详细前期地勘工作，地质分析受人为判读分歧较大影响。准确的地质预报，是隧道施工中的技术难题。

2 当掘进机在隧道中开挖掘进时，掘进状态复杂，常常伴有的典型问题有：第一地质

情况复杂多变，软硬不均、岩爆、塌方、破碎带、涌水等各种地质灾害频发；第二设备状态随工程使用出现不同程度的衰老和损坏，刀盘、刀具、主轴承等关键部件的损坏更会对工程带来巨大风险；第三错误的掘进控制会引起蛇形纠偏，导致成型隧道不符合要求。上述地质和设备的复杂多样性对掘进机的安全运行操作会产生很大的挑战，需加以研究和避免。

3 掘进机施工过程中有：掘进、出渣、支护、换步、出渣等工序，又在其中穿插喷混、铺轨、风水电延伸等工序。在掘进机在施工过程中，当前方围岩比较破碎，但是在掘进完成时设备上没有支护材料，会导致施工效率下降，严重时会导致隧道塌方风险事故；在掘进机在施工过程中，当设备在维保时，没有进行水管延伸，水管限位导致设备无法正常掘进，降低施工效率，影响工期。上述现象，在掘进机施工过程中时有发生，都是由于施工人员技术水平和管理水平不到位导致设备资源分配不合理或者作业调度管理不合理，从而影响施工进度，严重时会导致施工风险、人员伤亡。

4 掘进机在施工过程中因疲劳、性能衰退和磨损等原因，引发掘进机关键部件失效或需要更换，导致掘进装备停机重大故障；库存备件与更换备件不匹配引发掘进装备长时间停机。关键部件失效存在很大安全隐患，库存备件过多或不存在待更换备件会导致施工成本急剧增加，因此必须对关键状态进行实时监控。

12 TBM 施工安全

12.1 一般规定

本章贯彻落实了现行安全生产法律法规的规定，与相关管理制度进行全面对接，与相关技术标准进行充分协调，对隧洞工程施工中的安全管理和施工作业行为提出了明确要求，是建设各方必须严格执行的强制性标准。

12.1.1 依据现行法律法规的规定，建设、勘察设计、施工、监理及其他参与工程建设的单位都应依法承担安全生产责任，必须建立安全生产保障体系，健全安全生产责任制度，并积极采用先进的技术和方法，加强和改进安全生产管理，保证工程施工安全。

12.1.2 专项施工方案是以技术复杂或危险性较大的单项施工项目或其中的某一个分部、分项工程为对象进行编制，用以指导其施工全过程的具体文件，是对施工组织设计的进一步细化、深化、补充和完善，应重点考虑施工方法、机械设备利用、劳动力和材料安排、生产安全保证措施。

12.1.3 施工进场前，应根据国务院《建设工程安全生产管理条例》相关规定，以及 GB 18218《重大危险源辨识》，辨识重大危险源，并针对重大危险源潜在事件和突发事件，制定相应的事故应急救援预案。

完善的应急预案是不良地质和特殊岩土隧道施工必要组成部分，通过制定应急预案，并对参与施工管理、作业的人员进行培训和组织演练，提高人员自救、互救能力，一旦发生重大安全事故，尽可能减少人员伤亡，将事故损失降到最小。

应急救援预案应包括下列内容：工程概况；预测、辨识和评估紧急情况或事故灾害及其后果对内、外部造成破坏的可能性及严重程度；规定应急救援各方组织的详细职责；明确应急救援行动的指挥和协调；应急救援资源配置要求；建立分级响应机制；制定具体详细的紧急情况或事故灾害发生时保护生命、财产和环境安全的应急措施。

12.2 安全管理制度

12.2.1 各参建单位应遵守本规范和其他有关安全生产的法律法规，建立安全生产责任制，把安全生产的重心下移到岗位班组，即重点环节、重点位置落实到各管理人员和工种岗位，做到不漏项无死角，促进安全生产管理和文明施工建设。同时，结合全断面岩石掘进机法水工隧洞工程施工特点，建立健全安全生产管理制度、安全技术管理制度、安全意外事故应急预案制度及其他有关规章制度。其中：

(1) 安全生产管理制度包括《安全生产教育制度》、《安全生产检查制度》、《伤亡事故管理制度》及《安全奖惩制度》等；

(2) 安全技术管理制度包括《特种作业管理制度》、《特种设备管理制度》、《消防管理制度》及各工种安全操作规程等；

(3) 安全意外事故应急预案制度包括防洪、防火、机械事故、触电事故预防措施等；

(4) 其他有关规章制度如《女工保护制度》等。

12.2.4 设置安全生产管理机构是一项最基本也是最重要的工作。施工单位必须依据《中华人民共和国安全生产法》的规定设置安全生产管理机构，成立安全生产管理委员会，配备足够的TBM施工专职安全生产管理人员，并履行规范中所述的相关职责。

12.2.6 特种作业指容易发生人员伤亡事故，对操作者本人、他人及周围设施的安全可能造成重大危害的作业。直接从事特种作业的人员称为特种作业人员。特种作业人员在现行国家标准《特种作业人员安全技术培训考核管理规定》中有明确规定。

12.5 避险、逃生及救援

12.5.2

5 隧洞施工期间，现场各应急组织相关部门、洞口值班室、开挖工作面及其他必要的地方必须设置通信设备，带电源的通话装置应配备备用电源，通信系统必须保证畅通。必要时应采用远程监控系统，及时掌握现场情况，保证洞内外信息及时传达。

12. 5. 3

6 应急救援培训的内容包括：了解潜在危险的性质和对健康的危害；熟悉应急救援程序；掌握必要的自救及互救知识；了解预先指定的主要及备用逃生路线、集合地点及各种避难急救场所位置；了解各种警报含义、掌握警报设备、通信装置、避难器具等的使用方法。

7 当隧洞施工中发生险情时，应根据下列各项要求，迅速开展应急救援工作：值班人员和安全负责人应立即通过警报装置通知隧道内所有作业人员紧急撤离；现场最高管理者应负责指挥疏散撤离，各级调度人员应坚守岗位，保持通信畅通，及时反馈人员撤离及险情出现情况等信息；应及时上报地方政府或相关救助部门，请求紧急救援，做好相关配合工作；现场应采取安全警戒线或隔离措施，防止其他人员进入危险区域，避免灾害损失的扩大；进行事故原因分析，收集事故物证，调查引发事故的具体原因和相关责任人；制定相应的预防措施和工程处理措施，上报建设、设计、监理和有关单位，按批复的方案对事故进行处理。