

ICS 号

CCS 号

团 体 标 准

T/CHTS XXXXX-202X

公路隧道全断面岩石掘进机法设计指南

Design Guide for Full Face Rock Tunnel Boring Machine Method
for Highway

(征求意见稿)

2022-xx-xx 发布

2022-xx-xx 实施

中国公路学会 发布

作为国家标准委、中国科学技术协会团体标准双试点单位，中国公路学会积极贯彻国务院《深化标准化工作改革方案》（国发〔2015〕13号）的要求，立足交通运输行业公路交通领域，于2015年6月份正式启动团体标准工作。同时，中国公路学会标准工作得到了交通运输部的大力支持，并正式写入交通运输部《交通运输标准化“十三五”发展规划》。

中国公路学会严格按照学会标准管理办法及团体标准良好行为指南要求对标准化工作进行管理，遵循开放、公平、透明、协商一致的原则，突出团体标准贴近实际、注重实用的特点，充分发挥密切跟踪行业科技创新进程、及时了解市场技术发展需求的优势，为交通运输行业公路交通领域提供优质的标准，促进行业技术进步，并打造中国公路学会标准品牌。

获取更多学会标准资讯请关注“中国公路学会标准”微信公众号（微信号：CHTS-standard）。

本标准版权为中国公路学会所有。除用于国家法律法规规定用途，或事先得到中国公路学会文字上的许可，不得以任何形式擅自复制、改编、汇编、翻译、发行或传播本标准。

中国公路学会地址：北京市朝阳区安华路17号

电话：010-64288712

网址：<http://www.chts.cn/>

电子信箱：CHTS-S@qq.com

团体标准

公路隧道全断面岩石掘进机法设计指南

Design Guide for Full Face Rock Tunnel Boring Machine Method
for Highway

T/CHTS XXXXX-202X

主编单位：中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司

发布单位：中国公路学会

实施日期：202×年××月××日

××××××(出版单位)

前 言

本指南是在系统总结国内全断面岩石掘进机法公路隧道设计研究成果和工程经验的基础上编制而成。

本指南按照《中国公路学会标准编写规则》(T/CHTS10001)编写。共分为 12 章，主要内容包括：总则、术语和符号、工程勘察、总体设计、掘进机设备选型、荷载、材料、结构计算、衬砌结构设计、特殊地质地段设计、防水与排水、监控量测与超前预报。

本指南由中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司提出，受中国公路学会委托，负责具体解释工作。请有关单位将实施中发现的问题和建议，反馈至中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司（地址：四川省成都市温江区政和街 8 号（温江办公区），联系电话：+86-28-60158240，电子邮箱：157410074@qq.com），供修订时参考。

主 编 单 位： 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司

参 编 单 位： 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司

西南交通大学

中交天和机械设备制造有限公司

主要起草人：

主要审查人员： xxx xxx

目 次

1 总则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	3
3 工程勘察	5
3.1 一般规定	5
3.2 勘察内容	5
3.3 勘察方法	6
3.4 掘进机工作条件分级	7
4 总体设计	9
4.1 一般规定	9
4.2 隧道线形设计	10
4.3 隧道横断面设计	10
4.4 施工计划	11
5 掘进机设备选型	13
5.1 一般规定	13
5.2 掘进机选型	13
5.3 掘进机主要技术参数	14
5.4 后配套设施配置	16
6 荷载	18
6.1 一般规定	18
6.2 永久荷载	19
6.3 可变荷载	21
6.4 偶然荷载	22
7 材料	23
7.1 一般规定	23
7.2 混凝土	23
7.3 钢材	25
7.4 防排水材料	26
8 结构计算	28
8.1 一般规定	28

8.2 复合式衬砌结构计算.....	28
8.3 仰拱预制块结构计算.....	34
8.4 管片衬砌结构计算.....	34
9 衬砌结构设计	40
9.1 一般规定.....	40
9.2 喷锚衬砌.....	40
9.3 复合式衬砌.....	42
9.4 管片衬砌.....	45
9.5 衬砌抗震设计.....	49
9.6 服务洞室.....	50
9.7 构造要求.....	51
10 特殊地质地段设计.....	55
10.1 一般规定.....	55
10.2 岩溶.....	56
10.3 高应力区.....	57
10.4 膨胀性围岩.....	59
10.5 高地温.....	60
10.6 破碎带.....	62
10.7 富水带.....	64
11 防水和排水	66
11.1 一般规定.....	66
11.2 复合式衬砌防水和排水.....	66
11.3 管片衬砌防水与排水.....	67
12 监控量测与超前预报.....	70
12.1 一般规定.....	70
12.2 监控量测.....	71
12.3 超前地质预报.....	72

1 总则

1.0.1 为规范和指导公路隧道全断面岩石掘进机法设计，制定本指南。

1.0.2 本指南适用于不大于两车道新建全断面岩石掘进机施工的公路隧道工程。

1.0.3 新建特长公路隧道应结合地形、地质、水文和运输场地等条件，经技术、经济综合比选，宜优先采用全断面岩石掘进机法。

1.0.4 隧道主体结构应根据设计使用年限及环境作用等级进行耐久性设计，设计使用年限为 100 年。

1.0.5 全断面岩石掘进机施工的公路隧道工程设计除应符合本指南的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

中国公路学会标准征求意见稿

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 全断面隧道掘进机 full face tunnel boring machine

通过开挖并推进式前进实现隧道全断面成型，且带有周边壳体的专用机械设备。

2.1.2 敞开式岩石隧道掘进机 open type hard rock tunnel boring machine

利用支撑机构撑紧洞壁以承受向掘进的反力及扭矩的全断面岩石隧道掘进机。

2.1.3 护盾式岩石隧道掘进机 shielded hard rock tunnel boring machine

在整机外围设置与机器直径相一致的圆筒形防护结构以利于掘进和进行管片安装的全断面岩石掘进机。

2.1.4 单护盾岩石隧道掘进机 single shield rock tunnel boring machine

具有护盾保护，仅依靠管片承受掘进反力的岩石隧道掘进机。

2.1.5 双护盾岩石隧道掘进机 double shield rock tunnel boring machine

具有护盾保护，依靠管片和/或撑靴撑紧洞壁以承受掘进反力和扭矩，掘进可与管片拼装同步的岩石隧道掘进机。

2.1.6 主机 main machine

全断面隧道掘进机的开挖、推进和支护装置的总称。

2.1.7 后配套系统 back-up system

为主机提供工作支持条件、位于连接桥及其后方的设备和结构的总称，包括连接桥、后配套拖车及辅助设备。

2.1.8 刀盘 cutter head

设置在全断面隧道掘进机的前端，通过旋转或其他运动方式对地层进行全断面开挖的钢结构和刀具的总成。

2.1.9 刀具 cutter tools

对地层进行切削或破碎的刀具。

2.1.10 撑靴系统 gripper system

敞开式和双护盾岩石隧道掘进机中可撑紧洞壁承受掘进反力的系统，主要由钢结构架、液压缸、撑靴等组成。

2.1.11 围岩分级 surrounding rock classification

根据岩体完整程度和岩石强度等指标，按稳定性对围岩进行的分级。

2.1.12 荷载 load

作用于结构物而使结构产生应力的力。

2.1.13 衬砌 lining

支护隧道围岩的结构体。

2.1.14 喷锚衬砌 shotcrete and rockbohs lining

喷射混凝土、锚杆、钢筋网和钢架等单独或组合使用的隧道围岩支护结构。

2.1.15 复合式衬砌 composite lining

由喷锚衬砌、防水层和模筑混凝土衬砌构成的复合衬砌结构。

2.1.16 管片 segment

隧道预制衬砌环的基本单元。

2.1.17 标准环 standard ring

两侧环面平行的管片衬砌环。

2.1.18 楔形环 tapered ring

两侧环面不平行的管片衬砌环，亦称转弯环。

2.1.19 楔形量 taper

楔形环最大环宽与最小环宽之差。

2.1.20 通用环 universal ling

一种通用的楔形环，可以通过该楔形环的不同组合形成直线隧道和不同半径的曲线隧道。

2.2 符号

BQ —— 岩体基本质量指标；

$[BQ]$ —— 岩体修正质量指标；

R_c —— 岩石单轴饱和抗压强度；

K_v —— 岩体完整性系数；

J_v —— 岩体体积节理数；

CAI —— 岩石磨蚀指数；

D —— 岩石掘进机刀盘直径；

- D_1 —— 管片环外径；
 R —— 线路最小曲线半径；
 n —— 岩石掘进机刀盘转速；
 T —— 岩石掘进机刀盘扭矩；
 W —— 岩石掘进机刀盘驱动功率；
 F —— 岩石掘进机掘进推力；
 v —— 岩石掘进机掘进速度；
 L —— 岩石掘进机掘进行程；
 K —— 衬砌截面强度安全系数；
 K_0 —— 支护尺寸系数；
 K_1 —— 岩石掘进机推力储备系数；
 γ —— 围岩重度；
 γ_w —— 水的重度；
 q —— 垂直围岩均布压力；
 e_c —— 水平围岩均布压力；
 λ —— 侧压力系数；
 R_a —— 混凝土抗压极限强度；
 R_t —— 混凝土抗拉极限强度；
 E —— 弹性模量；
 R_w —— 混凝土弯曲极限抗压强度；
 η_1 —— 掘进机隧道荷载折减系数；
 S —— 围岩级别；
 $[S]$ —— 围岩级别修正值；
 S_1 —— 挤压性围岩变形等级；
 G_n —— 岩体强度应力比；
 ξ —— 管片弯矩传递系数；
 θ_0 —— 管片接头转角；
 $K_{\theta+}$ —— 管片接头的正弯矩回转弹簧刚度；
 $K_{\theta-}$ —— 管片接头的负弯矩回转弹簧刚度。

3 工程勘察

3.1 一般规定

3.1.1 工程地质勘察应满足全断面岩石掘进机法适宜性评价要求，对可能遇到的重大工程地质问题，应开展专题研究。

3.1.2 全断面岩石掘进机法公路隧道宜按设计阶段和施工阶段分别开展工程地质勘察工作。

3.1.3 工程地质勘察应综合利用遥感解译、地质调绘、物探、钻探、取样试验、现场测试及观测等方法。

3.1.4 掘进机工作条件分级应结合围岩级别、岩石坚硬程度、岩体完整程度及岩石磨蚀性等综合确定。

3.2 勘察内容

3.2.1 设计阶段勘察应查明隧道工程地质与水文地质条件，包括以下内容：

1 区域地质构造特征、区域性断层及活动特征、地震动参数等，开展区域构造稳定性评价工作。

2 隧道沿线地形地貌特征，河流、水库等地表水体的分布、水位、流量、规模等。

3 隧道沿线地层岩性分布，重点查明软岩、膨胀岩、可溶岩、蚀变岩、高磨蚀性硬岩等特殊岩类的分布及性状。

4 隧道沿线地质构造特征，重点查明地质构造类型、性质、规模，断层、节理等软弱结构面特征及其与隧道的组合关系，断层与地表水体的连通情况等。

5 影响隧道洞口和洞身稳定的各类不良地质和特殊岩土成因、类型、性质及范围，分析其发生原因、发展趋势，判明对隧道影响的程度。

6 隧道进出口段地质条件，重点查明覆盖层成因、性质及厚度，岩体风化、卸荷特征，评价隧道进出口场地稳定性。

7 隧道地下水类型、地下水位、含水层的分布范围及相应的渗透系数、水量、水压、水温 and 补给关系等，划分水文地质单元，估算隧道涌水量，预测工程有无突涌水风险，明确水质对钢筋混凝土的侵蚀性，评价其对掘进机掘进的影响。

8 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，预测隧道发生突泥、突水的风险，评价隧道排水对周边地下水环境的影响。

9 隧道沿线地应力大小、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，高地应力引起的围岩大变形、岩爆分布范围及程度，评价其对掘进机掘进的影响。

10 深埋隧道应查明洞身段地温情况，确定热害类型，进行地温分级，评价其对掘进机掘进的影响。

11 提出隧道围岩的基本物理力学参数建议值，评价隧道围岩稳定性。

12 进行隧道围岩分级和掘进机工作条件分级。

13 有害气体、矿体及具有放射性危害的地层，确定分布范围、成分和含量，评价其对人体健康和掘进机施工的影响。

条文说明

设计阶段勘察可根据工程可行性研究、初步设计和施工图设计的勘察要求，逐步深入查明地质条件。

3.2.2 施工阶段勘察包括以下内容：

1 核查施工开挖揭露的地层岩性、地质构造、地下水等，分析判定实际围岩级别。

2 探测和预报隧道开挖前方可能出现的围岩条件、遇到的不良地质问题，指导掘进机的施工。

3 在掘进机施工过程中，及时分析掘进机在各种地质条件下的掘进效率。

3.3 勘察方法

3.3.1 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，重要的地质现象应进行现场地质调查、复核。

3.3.2 地质调绘范围应包括隧道及相关地段，进出口、浅埋和岩溶发育等洞段应进行专项工程地质调绘。

3.3.3 物探工作应符合下列规定：

1 宜沿隧道轴线布设，必要时可布置辅助物探剖面。

2 物探方案应根据地质条件、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。

3 深埋隧道应布置大地电磁测深剖面。

3.3.4 钻探工作应符合下列规定：

1 隧道进出口、浅埋段、过沟段、主要地质界线、断层、重要的不良地质段、特殊岩土地段及地质条件复杂洞段等应布置钻孔。

2 深埋隧道宜根据地质调绘和物探成果，选择对掘进机施工有重大影响的不良地质发育段布置深钻孔。

3 钻孔深度应至隧道底板以下 3~5 m，遇溶洞、暗河及其它不良地质时，应加深至不良地质体以下 5 m。

3.3.5 隧道穿越的主要岩层及特殊性岩层应取样进行室内试验，试验项目主要包括矿物成分、物理性质、抗压强度、弹性模量、硬度、膨胀性、石英含量、磨蚀性等，必要时进行现场岩体抗剪强度和变形试验。

3.3.6 宜选择合适的钻孔进行钻孔压水试验或抽水试验。

3.3.7 隧道岩溶发育段宜进行连通试验。

3.3.8 宜选择合适的钻孔进行地应力、地温、放射性元素及有害气体测试等。

3.3.9 施工阶段勘察宜采用地质素描、物探、微震监测、超前钻孔、孔内摄像、导坑等综合超前地质预报方法。

3.4 掘进机工作条件分级

3.4.1 岩石坚硬程度应按岩石单轴饱和抗压强度 (R_c) 进行评价， R_c 与岩石坚硬程度对应关系可按表 3.4.1 确定。

表 3.4.1 R_c 与岩石坚硬程度对应关系

R_c (MPa)	> 60	60 ~ 30	30 ~ 15	15 ~ 5	≤ 5
坚硬程度	坚硬岩	较硬岩	较软岩	软岩	极软岩

3.4.2 岩体完整程度应按岩体完整性系数 (K_v) 或岩体体积节理数 (J_v) 进行评价， K_v 、 J_v 与岩体完整程度对应关系可按表 3.4.2 确定。

表 3.4.2 K_v 、 J_v 与岩体完整程度对应关系

岩体完整程度	坚硬岩	较硬岩	较软岩	软岩	极软岩
K_v	> 0.75	0.75 ~ 0.55	0.55 ~ 0.35	0.35 ~ 0.15	≤ 0.15
J_v (条/m ³)	< 3	3 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 35	> 35

3.4.3 岩石磨蚀性可通过测试岩石磨蚀指数 (CAI) 进行评价。岩石磨蚀性等级与岩石磨蚀性指数对应关系可按表 3.4.3 确定。

表 3.4.3 岩石磨蚀性等级与岩石磨蚀性指数对应关系

磨蚀性等级	岩石磨蚀指数 (CAI) (1/10 mm)
极低	0.1 ~ 0.4
非常低	0.5 ~ 0.9
低	1.0 ~ 1.9
中等	2.0 ~ 2.9
高	3.0 ~ 3.9

续表 3.4.3 岩石磨蚀性等级与岩石磨蚀性指数对应关系

磨蚀性等级	岩石磨蚀指数 (CAI) (1/10 mm)
非常高	4.0 ~ 4.9
极高	≥ 5.0

条文说明

岩石耐磨性通常采用岩石磨蚀指数 CAI 进行表征, 岩石耐磨性试验设备为塞卡耐磨性试验仪, 是用一个特制钢针, 在未处理的岩石表面拖动 1 cm 的距离, 针尖由此而磨钝, 其磨钝面的直径就是岩石耐磨性指数 CAI。

3.4.4 掘进机工作条件由好到差可分为 A (工作条件好)、B (工作条件一般)、C (工作条件差) 三级, 分级可按表 3.4.4 确定。

表 3.4.4 掘进机工作条件分级表

围岩级别	分级评判主要因素			掘进机工作条件等级
	岩石单轴抗压强度 R_c (MPa)	岩体完整性系数 K_v	岩石磨蚀指数 CAI (1/10 mm)	
I	80 ~ 150	0.65 ~ 0.75	< 5	Ⅰ _B
		> 0.75	≥ 5	Ⅰ _C
	≥ 150	> 0.65	-	
II	80 ~ 150	0.65 ~ 0.55	< 3	Ⅱ _A
			3 ~ 5	Ⅱ _B
			≥ 5	Ⅱ _C
	≥ 150		-	
III	60 ~ 120	0.55 ~ 0.35	< 3	Ⅲ _A
			3 ~ 5	Ⅲ _B
			≥ 5	Ⅲ _C
	≥ 80		≤ 0.35	-
IV	30 ~ 60	0.35 ~ 0.20	< 5	Ⅳ _B
	15 ~ 60	0.20 ~ 0.15	-	Ⅳ _C
V 和 VI	< 15	< 0.15	-	不宜使用

条文说明

围岩级别参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 中表 3.6.4 规定执行。

4 总体设计

4.1 一般规定

4.1.1 总体设计应满足隧道正常使用功能、掘进机施工工艺、运营管理与维护、防灾救援等要求。

4.1.2 隧道无法绕避特殊地质及建构筑物密集区等区段时，应开展专项研究。

条文说明

特殊地质包括以下情况：

1 岩溶发育带。施工中极可能碰到大的岩溶洞穴、充填溶洞或充水溶洞，掘进机掘进或通过很困难，严重时可能发生掉机、陷机和埋机等事故。

2 高地应力地段。对于软弱围岩，因其岩石强度低而围压高易产生大的塑性变形，造成隧道围岩挤出，洞径缩小；对于强度较高的围岩，可能发生岩爆，给作业人员、岩石掘进机设备安全带来较大威胁，同时会破坏已有支护，给岩石掘进机法施工安全、进度和成本造成很大影响。

3 中等及以上膨胀性的围岩。膨胀岩具有膨胀、收缩、崩解、软化等一系列不良工程特性，如果处理不当，常会造成岩石掘进机法隧道变形、围岩坍塌、甚至刀盘被卡等工程事故。

4 中高地带及以上地段。高地热会恶化洞内人员作业环境，同时也可能导致设备过热而无法正常工作。

5 III级及以上破碎带。破碎带因其围岩破碎，且多富水，导致围岩失稳、塌方，危及洞内施工人员和设备的安全。

6 涌、突水严重的地段。当围岩为软弱岩层、破碎带，将会大大恶化围岩的工程地质条件。一般不宜用掘进机掘进。若采用，将会发生开挖工作面坍塌、塌拱和隧道基底及侧壁承载力低等问题，掘进机掘进困难；当围岩为硬质岩，一般不致危及围岩及机具的安全稳定，但严重涌、漏水区段较长或反复出现，也将大大增加掘进机推进的难度。

7 高瓦斯地段。高瓦斯地层常含有易燃、有害气体，严重地威胁着洞内施工人员的健康和生命安全瓦斯浓度过高时，还可能引起火灾或爆炸，造成惨痛损失。

掘进机通过上述特殊地质地段时，应针对性地开展专项研究。

4.1.3 隧道设计除应考虑工程地质和水文地质等条件外，尚应考虑设备运输、施工场地布置、材料供应、供电等条件。

条文说明

采用管片衬砌的隧道设计时应充分考虑管片生产和存放场地的要求。

隧道洞口位置的选择除满足相应行业相关规范及标准要求外，尚应考虑掘进机拼装要求，拼装场地宜

为平坡，场地宽度根据掘进机所需龙门吊车的宽度并考虑富裕量来确定，拼装场地周围应有足够的空间堆放零部件。

4.1.4 隧道掘进机宜在洞外拼装及拆卸，场地受限时可在洞内拼装及拆卸。

4.2 隧道线形设计

4.2.1 隧道平曲线和竖曲线设计应满足掘进机设备通行要求。

4.2.2 隧道线路平面不宜采用需要进行加宽的平曲线半径。

4.2.3 隧道最大纵坡应与掘进机设备的爬坡能力相匹配，最小纵坡不应小于 3‰。

4.2.4 地下水发育的隧道掘进机掘进方向宜为上坡。

4.3 隧道横断面设计

4.3.1 横断面设计应根据使用功能进行明确分区，满足建筑限界、事故疏散、维护检修等要求，并应充分利用空间、合理布置设备和设施等。

4.3.2 隧道宜采用圆形断面，内轮廓直径应满足建筑限界、使用功能、施工工艺等要求；开挖直径应考虑施工误差、测量误差、结构受力变形及后期沉降等的影响。

4.3.3 隧道横断面设计应充分利用断面富余空间布置附属设施。宜利用上部空间作为排烟通道，下部空间作为逃生通道。

条文说明

隧道圆形断面上部和下部富裕空间较大，宜利用上部空间布置隧道的排烟通道，下部空间布置电缆通道、疏散通道等附属设施，如图 4.3.3 所示。

4.3.4 在满足建筑限界及其他使用功能要求下，采用管片衬砌的隧道内轮廓沿径向应预留不小于 150 mm 的富裕空间，采用复合式衬砌的隧道内轮廓沿径向应预留不小于 50 mm 的富裕空间。

条文说明

隧道建筑限界不包括测量误差、施工误差、结构变形和后期沉降。为严格控制隧道限界，本指南规定了在隧道建筑限界外侧预留一定的富裕空间。

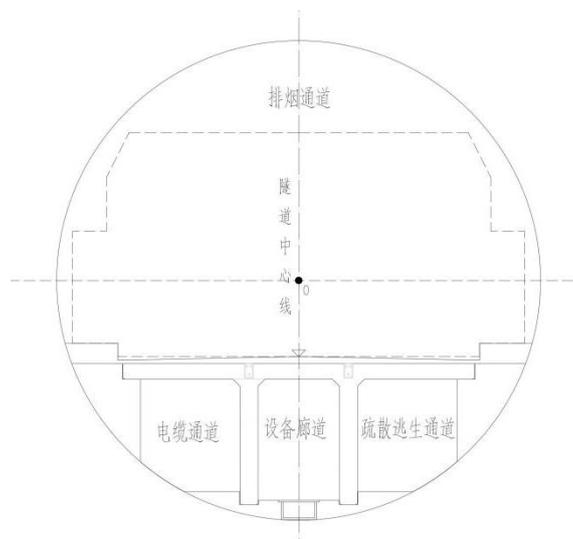


图 4.3.3 公路两车道隧道横断面布置示意图

4.4 施工计划

4.4.1 施工计划应包括工期、工区划分、施工便道、设备拼装及拆卸场地、管片预制及堆放场地、弃渣场、施工进度计划以及环境保护等内容。

4.4.2 隧道施工工期应考虑项目施工作业环境，以及设备设计、制造、运输、安装调试、拆卸等因素综合分析确定。

条文说明

项目施工作业环境包括施工场地和工程地质条件，制定隧道施工工期时应注意施工场地对施工进度的影响以及地质条件对隧道施工工期的影响。

4.4.3 施工工区划分及场地布置应根据下列条件综合分析确定：

- 1 应根据隧道长度、进洞工作面、工期要求等确定施工工区划分或施工场地的布置方案，必要时可设置施工辅助导坑。
- 2 应充分考虑便道、施工用水用电以及周边环境等方面对施工的影响。
- 3 应考虑隧道地质条件、隧道纵坡、弃渣场和土石方平衡等综合因素。

4.4.4 隧道施工方案、施工组织设计应主要包括下列内容：

- 1 施工现场设施平面布置图。
- 2 掘进机的拼装、步进及拆卸方案。
- 3 掘进机施工的临时给水、排水、供电、消防、通风、通信等设计。
- 4 采用预制衬砌的隧道管片生产、运输和储存方案。
- 5 后配套辅助施工设备的选型、规格和数量。

6 掘进机掘进与出渣方案。

7 超前地质预报、监控量测及不良地质地段施工预案。

条文说明

施工组织设计应切合施工实际，其关键点在于做好施工调查和设计文件校核，在施工中如发现条件有变异，应及时进行调整。

4.4.5 在施工场地布置的临时设施应符合环保、水土保持要求。

中国公路学会标准征求意见稿

5 掘进机设备选型

5.1 一般规定

5.1.1 掘进机选型应遵循地质适应、安全高效、功能齐全、性能稳定、经济环保、易于维护保养等原则。

5.1.2 掘进机选型时应对敞开式、双护盾、单护盾及多模式掘进机等进行综合比选。

5.2 掘进机选型

5.2.3 掘进机选型应考虑下列因素：

- 1 隧道长度、线形、横断面、支护结构等设计参数。
- 2 地质条件。
 - 1) 围岩岩性及岩石强度。
 - 2) 岩体完整程度。
 - 3) 岩体主要结构面产状与隧道轴线组合关系。
 - 4) 地应力状态。
 - 5) 水文地质条件。
 - 6) 岩石耐磨性。
 - 7) 特殊地质条件（断层破碎带、高地温、岩爆、软岩大变形、有毒有害气体等）。
- 3 隧道施工环境。
 - 1) 交通运输、施工场地及周边环境。
 - 2) 气象条件。
 - 3) 供水供电。
 - 4) 水保、环保要求。
- 4 工期及节点要求。
- 5 辅助工程措施。

5.2.4 掘进机适用下列地质范围：

- 1 II、III 级围岩为主的硬岩隧道宜采用敞开式掘进机。
- 2 III、IV 级围岩为主的硬岩隧道宜采用双护盾式掘进机。
- 3 以软岩为主的隧道宜采用单护盾式掘进机。
- 4 对不适用以上形式掘进机的隧道，宜采用多模式掘进机：

1) 敞开式/护盾式掘进机：主要适用于岩石整体较完整~完整，但存在较长段落的软岩大变形、高地应力、断层破碎带等不良地质地层，可通过模式转换，由锚喷支护转换为管片支护。

2) 单护盾/土压掘进机：主要适用于有一定自稳性的软岩地层，但存在较长段落的软土或者富水地层时，可通过转换为螺旋机出土的土压模式，安全、快速的通过软土及富水地层。

条文说明

1 敞开式掘进机主要适用于岩石整体较完整~完整，有较好自稳性的硬岩地层（ $R_c = 50 \sim 180 \text{ MPa}$ ）。当采取有效支护手段并经论证，也可适用于软岩隧道，但掘进速度应予以限制。

2 双护盾式掘进机主要适用于较完整，有一定自稳性的软岩~硬岩地层（ $R_c = 30 \sim 90 \text{ MPa}$ ）。

3 单护盾式掘进机主要适用于有一定自稳性的软岩地层（ $R_c = 5 \sim 60 \text{ MPa}$ ）。

5.3 掘进机主要技术参数

5.3.1 掘进机的主要技术参数包括刀盘直径、刀间距、刀盘转速、刀盘扭矩、刀盘驱动功率、掘进推力、掘进速度、掘进行程、接地比压等。

5.3.2 刀盘直径应按掘进机的类型、成洞洞径、衬砌厚度、允许偏差等因素确定。

5.3.3 刀具布置主要根据围岩类型确定。

条文说明

对于硬岩隧道，岩石越硬，刀间距宜越小。

5.3.4 刀盘转速应根据围岩级别、刀盘直径、刀具选型等因素确定。

条文说明

刀盘转速主要受限于最外周滚刀线速度，目前刀盘最大转速一般以刀盘最外周滚刀线速度 $\geq 3.5 \text{ m/s}$ 为准。

5.3.5 刀盘扭矩应根据围岩条件、掘进机类型、掘进机结构、刀盘直径等因素确定，并配置脱困扭矩。

条文说明

刀盘扭矩计算方法有理论计算方法和经验计算方法两种。根据驱动电机性能，脱困扭矩一般为额定扭矩的1.5倍。

理论扭矩计算公式：

$$T = \sum (f \times F_i \times R_i) + \sum T_m \quad (5.3.5-1)$$

式中:

T ——刀盘扭矩, 单位为千牛米 ($\text{kN} \cdot \text{m}$);

f ——滚刀滚动系数, 一般取值 0.1~0.15;

F_i ——滚刀额定承载能力, 单位为千牛 (kN);

R_i ——每把滚刀在刀盘上的回转半径, 单位为米 (m);

T_m ——摩擦扭矩, 单位为千牛米 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)。

经验计算方法:

$$T = S_t \times D^2 \quad (5.3.5-2)$$

式中:

D ——刀盘直径, 单位为米 (m);

S_t ——扭矩系数。扭矩系数 S 根据掘进机直径、围岩条件而异, 一般取 $S_t \approx 60$ 。

5.3.6 刀盘驱动功率应根据刀盘扭矩、转速、传动效率及驱动形式确定。

条文说明

掘进机需求功率计算方法:

$$W = T \times \frac{n}{9550} \quad (5.3.6)$$

式中:

W ——驱动功率, 单位为千瓦 (kW);

T ——理论扭矩, 单位为千牛米 ($\text{kN} \cdot \text{m}$);

n ——刀盘转速, 单位为转每分 (r/min)。

5.3.7 掘进推力应根据盾体与围岩之间的摩擦力、后配套拉力、围岩条件、坡度等因素确定, 且预留一定的储备系数。

条文说明

掘进机推力理论计算方法:

$$F = K_1 \times (F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5) \quad (5.3.7)$$

式中:

F ——掘进机推力, 单位为千牛 (kN);

K_1 ——储备系数, 一般取 $K_1 = 1.1 \sim 1.5$;

F_1 ——岩石和护盾间摩擦阻力, 单位为千牛 (kN);

F_2 ——拖动后配套系统产生的阻力, 单位为千牛 (kN);

F_3 ——刀盘推进反力, 单位为千牛 (kN);

F_4 ——鞍架与主梁导轨之间摩擦阻力, 单位为千牛 (kN);

F_5 ——尾刷与钢管片间的摩擦力, 单位为千牛 (kN)。

注：敞开式掘进机无需加 F_5 ，双护盾及单护盾掘进机无需加 F_4 。

5.3.8 掘进速度应根据掘进机不同的工作条件确定。

5.3.9 敞开式掘进机的掘进行程需满足拱架安装间距的需求，护盾式掘进机的掘进行程需满足管片环宽的需求。

5.3.10 敞开式掘进机接地比压需根据地质条件确定。

条文说明

对于硬岩隧道，撑靴接地比压不宜大于 4 MPa，如碰到软岩地层，需根据地层条件降低接地比压。

5.4 后配套设施配置

5.4.1 出渣系统应满足设备最大掘进速度要求，并具备一定的安全系数。

5.4.2 应根据掘进机类型和围岩条件配置相应的支护装置。

条文说明

敞开式掘进机支护装置主要为：钢拱架安装器、钢筋排装置、锚杆钻机、L1区应急混喷、L2区混喷；

护盾式掘进机支护装置主要为：管片拼装机、豆砾石注入系统、注浆系统；

多模式掘进机支护装置根据需求可进行配置。

5.4.3 应根据掘进机类型和线路配置合适的导向系统。

5.4.4 物料运输系统需根据隧道形式配置，可采用有轨运输及无轨运输系统，应选用与掘进机能力相匹配、技术上可靠、经济上合理的方案，并根据开挖洞径、掘进循环进尺、隧道长度和坡度等因素确定运输设备的具体规格和数量。

5.4.5 通风系统选择应满足下列规定：

- 1 一次通风宜采用压入式通风，风管采用软管，管径根据隧道断面、长度、出渣方式确定。
- 2 根据计算风量和风压，结合通风方式及布置选择通风设备，宜采用轴流式通风机。
- 3 长距离通风时，为满足风压的要求，宜采用相同型号的风机等距离间隔串联方式。
- 4 施工区域的风速不宜低于 0.5 m/s。
- 5 二次通风宜采用压、抽（含防尘）并用式。
- 6 在后配套拖车上，须配备除尘机。

条文说明

5 向施工区域压风，将刀盘开挖出风抽出后进行除尘后再外排。

5.4.6 掘进机应配置地质超前钻机等超前地质预报设备。

5.4.7 需配备监测系统，满足隧道内有毒有害气体的监测及报警。

条文说明

有毒有害气体监测装置需根据地质条件，针对可能存在的有害气体进行配备。

中国公路学会标准征求意见稿

6 荷载

6.1 一般规定

6.1.1 隧道结构上的荷载应按表 6.1.1 的规定分类。

表 6.1.1 隧道结构上的荷载分类

编号	荷载分类		荷载名称
1	永久荷载		围岩压力
2			土压力
3			结构自重
4			结构附加恒载
5			混凝土收缩和徐变的影响力
6			水压力
7	可变荷载	基本可变荷载	公路车辆荷载、人群荷载
8			立交公路车辆荷载及其所产生的冲击力、土压力
9			立交铁路列车活载及其所产生的冲击力、土压力
10		立交渡槽流水压力	
11	其他可变荷载	其他可变荷载	温度变化的影响力
12			冻胀力
13			施工荷载
14	偶然荷载		落石冲击力
15			地震力

注：编号 1-10 为主要荷载；编号 11、12、14 为附加荷载；编号 13、15 为特殊荷载。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 6.1.1 条制定。

6.1.2 围岩压力应根据隧道所处的地形、地质条件、埋置深度、支护条件、施工方法、相邻隧道间距等因素确定，在施工和实地量测中发现与实际不符时，应及时修正。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 6.1.2 条制定。

6.1.3 在隧道复合式衬砌结构上可能同时出现的荷载，应按满足承载能力和正常使用要求分别进行组合，并按最不利组合进行设计。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 6.1.3 条制定。荷载组

合方式可参考《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 6.1.3 条的条文说明。

6.1.4 本指南所列之外的特殊荷载，在荷载计算与组合时应进行特殊处理。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 6.1.5 条制定。

6.1.5 管片衬砌结构设计应根据施工阶段和使用阶段可能同时出现的荷载，按承载能力极限状态和正常使用极限状态分别进行组合，并按最不利组合进行设计。其荷载组合具体表达式及荷载分项系数按照现行行业标准《公路工程结构可靠性设计统一标准》JTG2120 执行。

6.2 永久荷载

6.2.1 深埋隧道垂直均布压力及水平均布压力，在不产生显著偏压及膨胀力的围岩条件下，可按下列公式计算：

1 垂直均布压力可按下式计算确定：

$$q = \eta_1 \gamma h_q \quad (6.2.1-1)$$

$$h_q = 0.45 \times 2^{S-1} \omega \quad (6.2.1-2)$$

式中：

q ——垂直围岩压力（kN/m²）；

η_1 ——掘进机法隧道荷载折减系数，建议取值 0.7~1.0，III 级及以上围岩取 0.7~0.8，IV 级围岩取 0.8~0.9，V 级围岩取 0.9~1.0；

γ ——围岩重度（kN/m³）；

h_q ——围岩压力计算高度（m）；

S ——围岩级别，按 1、2、3、4、5、6 整数取值；

ω ——宽度影响系数，按下式计算：

$$\omega = 1 + i(D - 5) \quad (6.2.1-3)$$

D ——岩石掘进机刀盘直径（m）；

i —— D 每增减 1 m 时的围岩压力增减率，以 $D=5$ m 的围岩垂直均布压力为准，按表 6.2.1-1 取值。

表 6.2.1-1 围岩压力增加率 i 取值表

岩石掘进机刀盘直径 D (m)	$D < 5$	$5 \leq D < 13$
围岩压力增减率 i	0.2	0.1

有围岩 BQ 或 $[BQ]$ 值时， h_q 计算公式中的 S 可用 $[S]$ 代替。 $[S]$ 可按下式计算：

$$[S] = S + \frac{[BQ]_{\text{上}} + [BQ]_{\text{下}} - [BQ]}{2} \quad (6.2.1-4)$$

$$[S] = S + \frac{BQ_{\text{上}} + BQ_{\text{下}} - BQ}{2} \quad (6.2.1-5)$$

式中：

$[S]$ ——围岩级别修正值(精确至小数点后一位)，当 BQ 或 $[BQ]$ 值大于 800 时，取 800；

$BQ_{\text{上}}$ 、 $[BQ]_{\text{上}}$ ——分别为该围岩级别的岩体基本质量指标 BQ 和岩体修正质量指标 $[BQ]$ 的上限值，按下表 6.2.1-2 取值；

$BQ_{\text{下}}$ 、 $[BQ]_{\text{下}}$ ——分别为该围岩级别的岩体基本质量指标 BQ 和岩体修正质量指标 $[BQ]$ 的下限值，按下表 6.2.1-2 取值。

表 6.2.1-2 岩体基本质量指标 BQ 和岩体修正质量指标 $[BQ]$ 的上、下限值

围压级别	I	II	III	IV	V
$BQ_{\text{上}}$ 、 $[BQ]_{\text{上}}$	800	550	450	350	250
$BQ_{\text{下}}$ 、 $[BQ]_{\text{下}}$	550	450	350	250	0

2 围岩水平平均布压力可按表 6.2.1-3 的规定确定。

表 6.2.1-3 围岩水平平均布压力

围压级别	I、II	III	IV	V	VI
水平平均布压力 e_c	0	$< 0.15q$	$(0.15 \sim 0.3)q$	$(0.3 \sim 0.5)q$	$(0.5 \sim 1.0)q$

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 6.2.2 条制定，增加了“掘进机法隧道荷载折减系数 η_1 ”，目前工程样本少，暂取 0.7~1.0，今后收集到更多的工程样本数据后，逐步修正该系数。

6.2.2 掘进机穿越岩爆地段，岩爆荷载可按下列公式计算：

$$q_{\text{冲击}} = \sqrt{\frac{2E_k EI}{K_0 a^4}} \quad (6.2.2)$$

式中：

$q_{\text{冲击}}$ ——岩爆冲击荷载 (Pa)；

E_k ——爆块动能 (J)；

E ——支护结构弹性模量 (MPa)；

I ——截面惯性矩 (m^4)；

K_0 ——支护尺寸系数 (m^2)；

a ——爆块边长 (m)。

6.2.3 作用于泄水型管片衬砌的水压力可按下列公式计算：

$$P = \begin{cases} (1 - \beta_2)\gamma_w H_1 & \beta_2 \neq 0 \\ \gamma_w H & \beta_2 = 0 \end{cases} \quad (6.2.3-1)$$

式中：

P ——管片背后平均水压力（Pa）；

β_2 ——管片排水率；

γ_w ——水的重度（kN/m³）；

H_1 ——围岩渗透影响范围（m）；

H ——实际水头高度（m）。

条文说明

本条借鉴了派墨公路多雄拉隧道作用于泄水型管片衬砌的水压力的计算方法。

管片排水率即单位时间内管片排水量与隧道涌水量的比值。

围岩渗透影响范围量值与围岩渗透系数、初始水头高度、管片排水率相关。围岩渗透影响范围计算公式为分段函数，按照下列公式计算：

$$H_1 = \begin{cases} [1.6 + 0.44 \ln k + 0.035 \beta_2 + 0.029 (\ln k)^2 - 0.01 \beta_2 \ln k] H & H \leq H_{\text{临界值}} \\ 478.9 + 175 \ln k + 266.6 \beta_2 + 16.17 (\ln k)^2 + 45.41 \beta_2 \ln k - 4.73 \beta_2^2 & H > H_{\text{临界值}} \end{cases} \quad (6.2.3-2)$$

式中： H 为实际水头高度（m）； k 为围岩渗透系数（cm/s）； $H_{\text{临界值}}$ 为临界初始水头高度（m），可通过下列公式进行计算：

$$H_{\text{临界值}} = 548.5 + 106 \ln k + 82.62 \beta_2 + 4.657 (\ln k)^2 + 9.819 \beta_2 \ln k - 10.33 \beta_2^2 \quad (6.2.3-3)$$

6.3 可变荷载

6.3.1 浅埋隧道上方车辆荷载产生的土压力可按下列公式计算：

1 垂直均布压力可按下列公式计算确定：

$$q_c = \frac{N_c G_c}{(B_l + 2H_b \tan \delta)(L_c + L_j)} \quad (6.3.1-1)$$

式中：

q_c ——隧道上方车辆荷载产生的作用在隧道拱部的垂直均布压力（kPa）；

N_c ——隧道上方路面宽度范围内分布的车辆数；

G_c ——车辆重力标准值（kN），按照《公路桥涵设计通用规范》JTG D60的规定，取550 kN；

B_l ——隧道上方路面宽度（m）；

H_b ——隧道埋深（m）；

δ ——荷载扩散角（°），取30°；

L_c ——车辆长度（m），按照《公路桥涵设计通用规范》JTG D60的规定，取15.0 m；

L_j ——车辆前后距离 (m)，取 0.6 m。

2 水平均布压力可按下式计算确定：

$$e_c = q_c \lambda \quad (6.3.1-2)$$

式中：

q_c ——隧道上方车辆荷载产生的作用在隧道上的水平侧向压力 (kPa)；

λ ——侧压力系数。

6.3.2 其余可变荷载应按现行行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1 的有关规定计算。

条文说明

行业标准《公路隧道设计细则》JTG/T D70-2010 第 12.3.5 条给出了车辆荷载的计算方法，该方法的原理是集中荷载扩散。由于 1 辆车有数个车轮，每个车轮扩散到隧道结构某计算点的荷载都不相同，因此导致了隧道结构上每个计算点所承担的车辆荷载都不相同，计算过程复杂。本条所给出的隧道上方车辆荷载产生的土压力计算方法，其原理是隧道上方分布的车辆总重，除以隧道上方车辆荷载扩散的总面积。

6.4 偶然荷载

6.4.1 有落石危害需验算冲击力时，应通过现场调查或有关计算验证。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 6.4.1 条制定。

6.4.2 地震荷载应按本指南第 9 章及《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1 附录 K 确定。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 6.4.2 条制定。

7 材料

7.1 一般规定

7.1.1 隧道工程常用的各类建筑材料，可选用下列强度等级：

- 1 混凝土：C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50。
- 2 喷射混凝土：C20、C25、C30、C40。
- 3 钢材：HPB300、HRB400、HRB500，Q235、Q345、Q390。

7.1.2 工程材料应根据结构类型、受力条件、使用要求和所处环境等选用，并应满足可靠性、耐久性和经济性要求。

条文说明

根据隧道选择的结构类型及所处的环境条件，应对隧道衬砌的材料类型进行慎重选择，而选择不同的衬砌材料对隧道的可靠性、耐久性和经济性影响很大。

7.1.3 工程材料应根据不同的料源情况，在保证结构需要的前提下，做到因地制宜、就地取材。

7.1.4 喷锚支护混凝土材料可采用网喷混凝土或喷射钢纤维混凝土。二次衬砌可采用素混凝土、钢筋混凝土、钢纤维混凝土等材料。

条文说明

二次衬砌宜选用经济耐用且便于施工的模筑混凝土材料。

7.1.5 初期支护的钢架宜用格栅钢架或型钢钢架。

7.1.6 管片衬砌材料宜采用钢筋混凝土，也可根据情况采用钢管片或纤维混凝土材料。

条文说明

管片衬砌宜选用较高强度、刚度和抗腐蚀性的高强度钢筋混凝土管片，承载动载和较大集中荷载或可能发生不均匀变形的隧道宜采用钢管片。

7.2 混凝土

7.2.1 隧道工程各部位的混凝土材料强度等级不应低于表 7.2.1-1 和表 7.2.1-2 的规定：

表 7.2.1-1 复合式衬砌混凝土材料强度等级

工程部位	材料种类		
	混凝土	钢筋混凝土	喷射混凝土
拱圈	C20	C25	C20
边墙	C20	C25	C20
仰拱	C20	C25	C20

表 7.2.1-2 管片衬砌混凝土材料强度等级

部位	工程材料	强度等级
全环管片衬砌	钢筋混凝土结构	C35、C40、C50

条文说明

管片衬砌采用高强混凝土可减少管片的厚度和重量，有利于构件运输和拼装施工；有利于承受岩石掘进机千斤顶作用力；工厂预制时可使管片混凝土尽快达到脱模强度，提高钢模板的周转率。

根据派墨公路多雄拉隧道、引洮供水一期工程总干渠 9#隧道、引红济石青峰峡隧道等双护盾 TBM 隧道建设经验，当公路隧道围岩级别为 II、III 级且采用双护盾岩石掘进机施工时，管片衬砌受力较小，选用高标号混凝土，经济性较差；而在高地应力地段、破碎带、洞口段等围岩较差及特殊地质地段，管片受力较大，需要采用高标号混凝土以满足管片结构承载力。对于 II、III、4 级常规围岩段，管片混凝土标号宜采用 C35；对于 V 级围岩或围岩级别为 II~4 级但是存在轻微岩爆、轻微大变形时，管片混凝土标号宜采用 C40；对于存在断层破碎带、中等及以上大变形、中等级以上岩爆时，管片混凝土标号宜采用 C50。

7.2.2 混凝土的材料性能设计参数应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定。

7.2.3 二次衬砌和管片混凝土的原材料配合比、最低强度等级、最大水胶比、抗渗指标等应符合现行行业标准《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTG/T3310 的规定，同时应满足抗裂、抗渗、抗冻和抗侵蚀的需要。

条文说明

当掘进机法隧道修建于特殊地区和特定场合时，如严寒地区、含盐地层和有侵蚀性水时，其混凝土材料的性能设计参数应适应这些特殊条件的要求。

7.2.4 喷锚支护混凝土材料宜符合下列要求：

- 1 喷射混凝土应优先采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，也可采用矿渣硅酸盐水泥。
- 2 宜采用早高强喷射混凝土。
- 3 粗集料应采用坚硬耐久的碎石或卵石，不得使用碱活性材料；喷射混凝土中的石子粒径不宜大于 16 mm，喷射钢纤维混凝土中的石子粒径不宜大于 10 mm；集料级配宜采用连

续级配，细集料应采用坚硬耐久的中砂或粗砂，细度模数宜大于 2.5，砂的含水率宜控制在 5%~7%。

7.2.5 混凝土和喷射混凝土中可根据需要掺加添加剂，其性能应满足下列要求：

- 1 对混凝土的强度及其与围岩的黏结力基本无影响，对混凝土和钢材无腐蚀性。
- 2 对混凝土的凝结时间影响不大（除速凝剂和缓凝剂外）。
- 3 不易吸湿，易于保存，不污染环境。

7.3 钢材

7.3.1 钢筋混凝土结构受力钢筋宜采用 HRB400、HRB500 钢筋，箍筋、拉筋宜采用 HPB300、HRB400 钢筋。

条文说明

钢筋混凝土的钢筋宜优先采用延性、韧性和焊接性较好的钢筋。

7.3.2 钢筋混凝土结构的钢筋技术条件应符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢 第一部分：热轧光圆钢筋》GB 1499.1、《钢筋混凝土用钢 第二部分：热轧带肋钢筋》GB 1499.2 的规定。

7.3.3 钢筋混凝土结构构件的纵向受力钢筋性能应符合下列规定：

- 1 钢筋的抗拉强度实测值与屈服强度实测值的比值不应小于 1.25。
- 2 钢筋的屈服强度实测值与屈服强度标准值的比值不应大于 1.30。
- 3 钢筋最大拉力下的总伸长率实测值不应小于 9%。

条文说明

本条参照《公路隧道抗震设计规范》JTG/T 2232-01-2019 第 7.3.1 条的规定制定。

7.3.4 喷锚支护钢材料应符合下列规定：

- 1 砂浆锚杆杆体材料宜采用 HRB400、HRB500 热轧带肋钢筋。
- 2 中空锚杆材料宜采用 Q345 结构用无缝钢管，杆体断后伸长率不应小于 16%，并应符合现行国家标准《结构用无缝钢管》GB/T 8162 的规定。
- 3 锚杆垫板材料宜采用 Q235 热轧钢板。
- 4 钢筋网材料可采用 HPB300 热轧光圆钢筋。
- 5 钢纤维宜采用普通碳素钢制成，抗拉强度不得小于 380 MPa，且不得有油渍和明显的锈蚀。

7.3.5 钢管片中结构所用钢材宜采用 Q235、Q355 或 Q390，其质量等级均不应低于 B 级，其材质与材料应分别符合现行国家标准《碳素结构钢》GB700 和《建筑结构用钢板》GB/T 19879 的规定。

7.3.6 钢管片的钢材性能应符合下列规定：

- 1 钢材的屈服强度实测值与抗拉强度实测值的比值不应大于 0.85。
- 2 钢材应有明显的屈服台阶，且伸长率不应小于 20%。
- 3 钢材应有良好的焊接性和合格的冲击韧性。

7.3.7 管片连接螺栓的机械性能宜选用 4.6、5.6、6.8、8.8 级，应有较好的耐腐蚀性和抗冲击韧性，表面应进行防腐蚀处理。螺母的性能等级不应低于与其相配的螺栓等级。

7.4 防排水材料

7.4.1 采用复合式衬砌的隧道内防水材料应符合现行国家标准《地下工程防水技术规范》GB 50108 的规定。防水材料可选用注浆止水材料、防水卷材、中埋式止水带、背贴式止水带、排水盲管、防水混凝土等。

7.4.2 防水卷材宜采用乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)、乙烯-醋酸乙烯与沥青共聚物(ECB)、聚乙烯(PE)或其他性能相似的材料，也可选用预铺反粘类防水卷材或立体防排水板等新型防水材料。卷材及其胶黏剂应具有良好的耐水性、耐久性、耐穿刺性、耐腐蚀性和耐菌性。

条文说明

防水卷材具体的技术指标按照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 5.3.1 条的规定采用。

7.4.3 隧道内无纺布宜采用聚丙烯针刺非织造土工布。环、纵向排水盲管应具有一定的强度和良好的透水性，能顺壁面凹凸铺设。

条文说明

隧道内无纺布具体的技术指标按照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 5.3.2 条的规定采用。

7.4.4 橡胶止水带的外观质量、尺寸偏差和物理性能应符合现行国家标准《高分子防水材料第二部分：止水带》GB18173.2 的规定。

条文说明

橡胶止水带具体的技术指标按照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第

5.3.3 条的规定采用。

7.4.5 管片密封垫宜采用三元乙丙橡胶类、遇水膨胀橡胶类、遇水膨胀橡胶与三元乙丙橡胶的复合材料等，密封垫应符合下列规定：

- 1 密封垫在长期水压力作用下，当环、纵缝达到预定的张开量时仍能满足止水要求。
- 2 密封垫的压缩永久变形不应大于 25%。
- 3 接缝闭合压力应小于千斤顶最大顶力。
- 4 高地温隧道的密封垫应满足耐热（老化）要求。
- 5 当封顶块采用纵向插入方式时，密封垫表面应涂抹润滑剂。

条文说明

密封垫需选择具有合理构造形式、良好回弹性及遇水膨胀性、耐久性、耐久性的橡胶类材料。

7.4.6 管片嵌缝材料宜采用微膨胀防水砂浆；当采用聚氨酯密封胶等嵌缝类材料时，应具有良好的不透水性、粘结性、耐久性、弹性和抗下坠性。

条文说明

嵌缝防水材料应具有收缩性小、与潮湿混凝土结合力强、便于施工等特征。

7.4.7 螺栓孔、注浆孔密封圈应采用合成橡胶或遇水膨胀橡胶制品，密封圈应满足以下要求：

- 1 伸缩性好，水密性能良好。
- 2 能承受螺栓紧固力。
- 3 耐久性好，不易老化。

8 结构计算

8.1 一般规定

8.1.1 复合式衬砌结构应按破损阶段法验算构件截面的强度安全系数。钢筋混凝土构件应验算裂缝宽度。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 9.1.1 条制定。

8.1.2 管片衬砌设计应采用基于分项系数的极限状态法，对承载能力极限状态和正常使用极限状态分别进行计算。

条文说明

国内隧道管片衬砌结构设计一般采用极限状态法。经过多年的建设、运营实际情况的验证，采用极限状态法能满足工程安全的要求。本指南规定管片衬砌按以概率理论为基础，以分项系数表达的极限状态法设计。

施工期间根据极限状态法结构计算的内容如下：

- 1) 推进油缸推力作用在管片的承载力计算。
- 2) 管片吊装与堆放计算。

使用期间根据极限状态法结构计算、验算的内容如下：

- 1) 管片主截面承载能力计算。
- 2) 纵向和环向接缝承载能力计算，包括接缝连接螺栓强度验算、混凝土局部受压强度验算。
- 4) 管片在正常使用状态下的钢筋混凝土裂缝宽度验算。
- 5) 管片在正常使用状态下的隧道收敛变形验算及接缝张开量计算。

8.2 复合式衬砌结构计算

8.2.1 复合式衬砌宜采用荷载结构法计算，也可采用地层结构法计算。荷载结构法、地层结构法计算应分别符合现行行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1 附录 L 与附录 M 相关规定。

条文说明

采用地层结构法要先确定围岩的初始地应力，由于围岩的初始地应力难以确定，因此复合式衬砌宜采用荷载结构法计算。当有较为准确的初始地应力数据时，也可采用地层结构法计算。

8.2.2 按破损阶段验算构件截面强度时，应根据不同的荷载组合，分别采用不同的安全系

数，并不应小于表 8.2.2-1 和表 8.2.2-2 所示的数值。验算施工阶段截面强度时，安全系数可采用表 8.2.2-1 和表 8.2.2-2 “永久荷载+基本可变荷载+其他可变荷载” 栏内的数值乘以折减系数 0.9。

表 8.2.2-1 混凝土结构不同荷载组合的强度安全系数

破坏原因	永久荷载+ 基本可变荷载	永久荷载+基本可变荷 载+其他可变荷载	永久荷载+偶然荷载
混凝土达到抗压极限强度	2.4	2.0	1.8
混凝土达到抗拉极限强度	3.6	3.0	2.7

表 8.2.2-2 钢筋混凝土结构不同荷载组合的强度安全系数

破坏原因	永久荷载+ 基本可变荷载	永久荷载+基本可变荷 载+其他可变荷载	永久荷载+偶然荷载
钢筋达到屈服强度或混凝土 达到抗压或抗剪极限强度	2.0	1.7	1.5
混凝土达到抗拉极限强度	2.4	2.0	1.8

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 9.2.4 条制定。

8.2.3 验算初期支护时，应将带钢架的喷射混凝土作为钢筋混凝土进行计算，将无钢架的喷射混凝土作为素混凝土进行计算。

条文说明

本条参照行业标准《组合结构设计规范》JGJ 138-2016 第六章“型钢混凝土框架柱和转换柱”制定。

8.2.4 素混凝土受压构件的矩形截面强度安全系数计算方法如下：

1 计算轴力作用点至截面重心的距离（偏心距） e_0

$$e_0 = \frac{M}{N} \quad (8.2.4-1)$$

式中：

M —— 弯矩；

N —— 轴力。

2 当 $e_0 \leq 0.20h$ 时，系抗压强度控制承载能力

$$K = \frac{\varphi\alpha R_a bh}{N} \quad (8.2.4-2)$$

式中：

K —— 截面强度安全系数；

h ——截面高度；

b ——截面宽度；

R_a ——混凝土抗压极限强度；

φ ——构件纵向弯曲系数，对于墙背紧密回填的隧道衬砌，可取为 1；

α ——轴力的偏心影响系数，计算公式如下：

$$\alpha = 1 + 0.648(e_0/h) - 12.569(e_0/h)^2 + 15.444(e_0/h)^3 \quad (8.2.4-3)$$

3 当 $e_0 > 0.20h$ 时，系抗拉强度控制承载能力

$$K = \varphi \frac{1.75R_t b h}{\left(\frac{6e_0}{h} - 1\right)N} \quad (8.2.4-4)$$

式中：

R_t ——混凝土抗拉极限强度。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 9.2.11、9.2.12 条制定，并参照《铁路工程设计技术手册 隧道》第二十章“结构构件设计与计算”，给出了公式的适用条件。

8.2.5 对称配筋钢筋混凝土受压构件的矩形截面强度安全系数计算方法如下：

$$K = \frac{A_0 R_g (h_0 - a') + 0.5 R_a b h_0^2}{N e} \quad (8.2.5-1)$$

式中：

K ——截面强度安全系数；

A_0 ——纵向受拉及纵向受压钢筋的截面积，受拉和受压钢筋截面积相同，即

$$A_0 = A_g = A_g' ;$$

$A_g = A_g'$ ——纵向受拉及纵向受压钢筋的截面积；

R_g ——钢筋抗拉或抗压屈服强度；

h_0 ——截面的有效高度；

a' ——自钢筋 A_g 、 A_g' 的重心分别至截面最近边缘的距离；

R_a ——混凝土抗压极限强度；

b ——每延米喷砼混凝土的截面宽度；

N ——轴力；

e ——轴力作用点至 A_g 重心的距离。

将上面算得的 K 值代入 $x = \frac{KN}{bR_w} > 0.55h_0$ 进行验算，若验算条件满足，则上式算得的 K 即为截面强度安全系数，若验算条件不满足，应按以下公式求解：

$$K = \frac{bR_w \left[\sqrt{(e-h_0)^2 + \frac{2A_g R_g}{bR_w} (h_0 - a') - (e-h_0)} \right]}{N} \quad (8.2.5-2)$$

式中：

R_w ——混凝土的弯曲抗压极限强度。

将上面算得的 K 值代入 $2a' < x = \frac{KN}{bR_w} < 0.55h_0$ 进行验算，若验算条件满足，则上式算得的 K 即为截面强度安全系数，若验算条件不满足，应按以下公式求解：

考虑受压钢筋：

$$K = \frac{A_g R_g (h_0 - a')}{Ne'} \quad (8.2.5-3)$$

式中：

e' ——轴力作用点至 A_g' 重心的距离。

不考虑受压钢筋：

$$K = \frac{[bR_w(h_0 - e) - R_g A_g] + \sqrt{[bR_w(h_0 - e)]^2 + 2bR_w R_g A_g e}}{N} \quad (8.2.5-4)$$

以上两式计算结果的较大者即为截面强度安全系数。

条文说明

行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 附录 N “钢筋混凝土受弯和受压构件配筋量计算方法”第 N.0.8、N.0.9 条表述的是非对称配筋受压构件的配筋量计算原理，根据上述两条中给出的公式，无法计算受压构件的截面强度安全系数。本条参照《铁路工程设计技术手册 隧道》第二十章“结构构件设计与计算”中的矩形截面对称钢筋偏心受压构件的配筋量计算方法，推导出了对称配筋钢筋混凝土受压构件的矩形截面强度安全系数计算方法。

8.2.6 钢筋混凝土受弯和偏心受压构件在永久荷载组合作用下的最大裂缝宽度可按下列公式计算：

$$\omega_{\max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_s}{E_s} \left(1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (8.2.6-1)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_s} \quad (8.2.6-2)$$

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} \quad (8.2.6-3)$$

$$\rho_{te} = \frac{A_s}{A_{te}} \quad (8.2.6-4)$$

式中：

α_{cr} ——构件受力特征系数，按表 8.2.6-1 采用；

ψ ——裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数：当 $\psi < 0.2$ 时，取 $\psi = 0.2$ ；当 $\psi > 1.0$ 时，取 $\psi = 1.0$ ；对直接承受荷载重复荷载的构件，取 $\psi = 1.0$ ；

- σ_s ——在永久荷载组合作用下计算的钢筋混凝土构件纵向受拉钢筋力；
- E_s ——钢筋弹性模量，按表 8.2.6-2 采用；
- c_s ——最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离（mm）：当 $c_s < 20$ 时，取 $c_s = 20$ ；当 $c_s > 65$ 时，取 $c_s = 65$ ；
- ρ_{te} ——按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率，当 $\rho_{te} > 0.01$ 时，取 $\rho_{te} = 0.01$ ；
- f_{tk} ——混凝土轴心抗拉强度标准值；
- A_{te} ——有效受拉混凝土截面面积：对轴心受拉构件，取构件截面面积；对受弯、偏心受压和偏心受拉构件，取 $A_{te} = 0.5bh + (b_f - b)h_f$ ，此处， b_f 、 h_f 为受拉翼缘的宽度、高度；
- A_s ——受拉区纵向钢筋截面面积；
- d_{eq} ——受拉区纵向钢筋的等效直径（mm）；
- d_i ——受拉区第 i 种纵向钢筋的公称直径；
- n_i ——受拉区第 i 种纵向钢筋的根数；
- v_i ——受拉区第 i 种纵向钢筋的相对粘结特性系数，按表 8.2.6-3 采用。

注：1.对承受吊车荷载但不需做疲劳验算的受弯构件，可将计算求得的最大裂缝宽度乘以系数 0.85；
2.对梁的混凝土保护层厚度大于 50 mm 且配置表层钢筋网片时，按公式

$$\omega_{max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_s}{E} \left(1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right)$$

计算的最大裂缝宽度可适当折减，折减系数可取 0.7；

3.对 $e_0 / h_0 \leq 0.55$ 的偏心受压构件，可不验算裂缝宽度。

表 8.2.6-1 构件受力特征系数

类型	α_{cr}	
	钢筋混凝土构件	预应力混凝土构件
受弯、偏心受压	1.9	1.5
偏心受拉	2.4	—
轴心受拉	2.7	2.2

表 8.2.6-2 钢筋的弹性模量($\times 10^5$ N/mm²)

品牌或种类	弹性模量 E_s
HPB300 钢筋	2.10
HRB335、HRB400、HRB500 钢筋、HRBF335、HRBF400、HRBF500 钢筋、RRB400 钢筋	2.00

注：必要时可采用实测的弹性模量。

表 8.2.6-3 钢筋的相对粘结特性系数

钢筋类别	光圆钢筋	带肋钢筋
ν_i	0.7	1.0

注：对环氧树脂涂层带肋钢筋，其相对粘结特性系数应按表中系数的 80% 取用。

条文说明

本条参照《混凝土结构设计规范（2015 年版）》GB50010-2010 第 7.1.2 条制定。行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 N.0.11 条中的最大裂缝宽度计算公式源自《混凝土结构设计规范》GBJ 10-89，与现行《混凝土结构设计规范》GB50010 不一致，本指南最大裂缝宽度计算公式与现行《混凝土结构设计规范》GB50010 保持一致。

8.2.7 钢筋混凝土构件受拉区纵向钢筋应力按下列公式计算：

1 受弯构件

$$\sigma_s = \frac{M_q}{0.87h_0A_s} \quad (8.2.7-1)$$

2 偏心受压构件

$$\sigma_s = \frac{N_q(e-z)}{A_s z} \quad (8.2.7-2)$$

$$z = \left[0.87 - 0.12(1 - \gamma_f') \left(\frac{h_0}{e} \right)^2 \right] h_0 \quad (8.2.7-3)$$

$$e = \eta_s e_0 + y_s \quad (8.2.7-4)$$

$$\gamma_f' = \frac{(b_f' - b)h_f'}{bh_0} \quad (8.2.7-5)$$

$$\eta_s = 1 + \frac{1}{4000e_0/h_0} \left(\frac{l_0}{h} \right)^2 \quad (8.2.7-6)$$

式中：

N_q 、 M_q ——按永久荷载组合计算的轴力值、弯矩值；

h_0 ——截面有效高度；

A_s ——受拉区纵向普通钢筋截面面积：对偏心受压构件，取受拉区纵向普通钢筋截面面积；

e ——轴向压力作用点至纵向受拉普通钢筋合力点的距离；

η_s ——使用阶段的轴心压力偏心距增大系数，当 l_0/h 不大于 14 时，取 1.0；

e_0 ——永久荷载组合下的初始偏心距，取为 M_q/N_q ；

l_0 ——计算跨度或计算长度；

h ——截面高度；

y_s ——截面重心至纵向受拉普通钢筋合力点的距离；

z ——纵向受拉普通钢筋合力点至截面受压区合力点的距离，且不大于 $0.87h_0$ ；

γ_f' ——受压翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值；

b_f' 、 h_f' ——分别为受压区翼缘的宽度、高度；在公式 $\gamma_f' = \frac{(b_f' - b)h_f'}{bh_0}$ 中，当 h_f' 大于 $0.2h_0$ 时，取 $0.2h_0$ ；

b ——矩形截面宽度，T形、I形截面的腹板宽度。

条文说明

本条参照《混凝土结构设计规范（2015年版）》GB50010-2010第7.1.4条制定。行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018第N.0.12条中的构件纵向受拉钢筋应力计算公式源自《混凝土结构设计规范》GBJ 10-89，与现行《混凝土结构设计规范》GB50010不一致。本指南构件纵向受拉钢筋应力计算公式与现行《混凝土结构设计规范》GB50010保持一致。

8.3 仰拱预制块结构计算

8.3.1 仰拱预制块结构计算应采用整体建模。

8.3.2 仰拱预制块结构计算应分别考虑施工工况与运营工况。

8.3.3 仰拱预制块施工工况结构计算所采用的施工荷载应包括吊装荷载、轨道荷载，两种荷载不应同时施加。

8.3.4 仰拱预制块运营工况结构计算所采用的可变荷载主要是公路车辆荷载。

8.4 管片衬砌结构计算

8.4.1 管片衬砌结构计算应符合下列规定：

- 1 结构计算包括施工阶段和使用阶段两部分。
- 2 结构计算按横断面和纵断面方向分开进行。
- 3 管片衬砌的计算简图应根据地层情况、衬砌构造特点及施工工艺等确定，计算中应考虑衬砌与地层共同作用及接头的影响。管片衬砌环采用具有一定接头刚度的柔性结构模型时，应限制荷载作用下的结构变量和接头张开量。

4 隧道管片衬砌横向内力计算分别选取浅埋、深埋、存在超载或偏压较大、穿越地层条件突变处等位置进行。

条文说明

- 1 管片衬砌计算应考虑施工期间的各个阶段和竣工后使用状态应考虑的荷载组合状况。
- 2 由于隧道荷载、隧道的线路和地基的变形等原因，隧道会同时发生横断面内的变形和纵向的变形。考虑到结构计算的简便性和影响的程度，横向、纵向各自独立进行结构计算为好。结构计算以横向为主，

纵向的结构计算则按需要进行。

3 确定荷载所需要的埋深厚度、围岩等各种条件会沿着隧道纵向发生变化，但如针对所有区段进行衬砌设计，其施工性和经济性都不理想。因此，从经济角度出发，在条件发生急剧变化的地段，将隧道按纵向进行分区。在每一区间内，采用同样的设计条件按最不利的情况进行衬砌的设计。

8.4.2 管片衬砌横向内力计算宜采用均匀圆环法、弹性铰圆环法、梁—弹簧法等模型。

条文说明

目前管片衬砌横向内力计算采用的模型均对管片衬砌结构进行了适当的简化，为确保管片结构的安全，一般宜取两种或两种以上模型的计算结果进行包络设计。

8.4.3 当采用匀质圆环模型进行管片衬砌计算时，应符合下列规定：

- 1 该计算模型应适用于错缝拼装的管片衬砌隧道。
- 2 管片衬砌应等效为截面刚度均相同的匀质圆环。
- 3 管片接头应由对衬砌环整体刚度进行折减来模拟。
- 4 衬砌环内力计算宜计及环间剪力传递的影响。
- 5 衬砌环整体刚度折减系数和接头弯矩传递系数可分别取 0.5~0.8 和 0.2~0.5。
- 6 错缝拼装衬砌环在纵向接头处的接头弯矩按下式进行修正：

$$M_1 = (1 - \xi)M \quad (8.4.3-1)$$

式中：

- ξ —— 弯矩传递系数；
- M —— 匀质圆环模型的计算弯矩；
- M_1 —— 修正后的管片接头弯矩。

- 7 与纵向接头位置对应的相邻管片截面弯矩按下式进行修正：

$$M_2 = (1 + \xi)M \quad (8.4.3-2)$$

式中：

- M_2 —— 修正后的管片截面弯矩。

条文说明

根据管片拼装方式，接头数量及构造的不同，衬砌环整体刚度折减系数 η 和接头弯矩传递系数 ξ 也不同， η 和 ξ 的建议值见表 8.4.3。

表 8.4.3 η 与 ξ 的建议值

隧道外径 (m)	拼装方式	η	ξ
6~9	—	0.6~0.8	0.3~0.5
9~13	通缝	0.5~0.7	0.2~0.4
	错缝	0.6~0.8	

8.4.4 采用弹性铰圆环模型进行管片衬砌计算应符合下列规定：

- 1 该计算模型应适用于通缝拼装的管片衬砌隧道。
- 2 管片接头应等效为可承担弯矩的弹性铰，弹性铰刚度宜由数值模拟配合经验确定，有条件时可采用试验确定。
- 3 弹性铰承受的弯矩应按照下列公式计算：

$$\text{当 } M_0 > 0, \quad M_0 = K_{\theta+} \theta_0 \quad (8.4.4-1)$$

$$\text{当 } M_0 < 0, \quad M_0 = K_{\theta-} \theta_0 \quad (8.4.4-2)$$

式中：

M_0 ——衬砌结构接头处所承受的弯矩（kN·m），以内侧受拉为正，外侧受拉为负；

θ_0 ——接头转角（rad）；

$K_{\theta+}$ 、 $K_{\theta-}$ ——接头的正弯矩回转弹簧刚度（kN·m/rad），负弯矩回转弹簧刚度（kN·m/rad）。

条文说明

弹性铰模型的计算简图除在管片衬砌纵缝位置处设置弹性铰以外，其余均与匀质圆环模型计算简图相同。

8.4.5 当采用梁—弹簧模型进行管片衬砌计算时，应符合下列规定：

- 1 该计算模型应适用于错缝拼装的管片衬砌隧道。
- 2 衬砌环环向接头应采用回转弹簧模拟。
- 3 衬砌环纵向接头应采用剪切弹簧模拟。
- 4 剪切弹簧和回转弹簧的刚度应由试验或经验确定。

条文说明

管片接头刚度可根据接头构造进行理论推导，或采用管片接头试验进行直接测定。一般来说，环向接头回转刚度的取值通常为 10000~100000 kN·m/rad。回转弹簧的正弯矩回转刚度与负弯矩回转刚度宜取不同值。

计算中如对剪切弹簧刚度取偏小的值，则截面的计算弯矩会偏小。为了安全起见，通常计算中采用对剪切弹簧刚度设定为无穷大的方法。

8.4.6 管片衬砌与地层间的相互作用计算应符合下列规定：

- 1 管片衬砌与地层间的相互作用宜采用假定抗力法或地基弹簧法进行模拟。
- 2 采用假定抗力法时，管片衬砌与地层间的相互作用应假定为位于隧道两侧的三角形分布的地层抗力。
- 3 采用地基弹簧法时，管片衬砌与地层间的相互作用应采用径向不抗压地基弹簧与切向抗剪地基弹簧模拟，地基弹簧刚度应根据地质勘察资料取值。

条文说明

管片均匀圆环法计算模型衬砌与地层间的相互作用采用假定抗力法；弹性较圆环法、梁—弹簧法计算模型衬砌与地层间的相互作用采用地基弹性法，弹簧刚度依据隧道所穿越地层的基床系数确定。

8.4.7 当遇到下列情况时，管片衬砌还应进行纵向强度计算和变形验算：

- 1 沿纵向荷载有较大变化。
- 2 基底地层有较大变化。
- 3 小半径曲线隧道承担掘进机千斤顶推力作用。

4 纵向强度计算和变形验算按照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 或《钢结构设计标准》GB50017 相关条款执行。

条文说明

当隧道覆盖层厚度或地层沿隧道纵向有较大变化、直接承受较大局部荷载时，管片衬砌可能产生较大的纵向内力并发生较大的纵向变形。小半径曲线施工时，管片上会出现千斤顶推力不均匀情况，可能会产生变形和破坏。当遇到以上情况时，为保证管片衬砌的结构安全和正常使用，应对此情况下的管片衬砌进行纵向强度和变形验算。

8.4.8 管片衬砌结构纵断面内力计算可采用梁—弹簧模型、等效刚度模型、三维壳体模型。

条文说明

梁—弹簧模型将隧道沿纵向等效为接头环与管片衬砌环的组合物，以梁单元模拟管片衬砌环，以弹簧的轴力、剪切和转动效应模拟环向接头和螺栓，再以弹簧模拟土体与隧道之间的相互作用。

等效刚度模型将隧道沿横向视为一均质圆环，沿纵向以刚度等效的方法把由接头和管片衬砌环组成的隧道等效为具有相同刚度和结构特性的均匀连续梁，连续梁的等效刚度与管片衬砌环和纵向接头的刚度相关。

三维壳体模型将管片结构视为纵横各向同性的壳体，壳体纵向刚度的折减同等效刚度模型，横断面内的刚度折减同均质圆环模型。

8.4.9 纵断面方向管片结构与地层间的相互作用可依据弹性地基梁理论采用地基弹簧模拟，地基弹簧刚度依据地层参数取值。

8.4.10 管片衬砌结构应按荷载效应准永久组合进行变形计算。衬砌环收敛变形和接缝张开量限值应符合表 8.4.10 的规定。

条文说明

为了满足隧道净空要求，本条给出了管片衬砌收敛变形的限值。管片的接缝张开量限值应与接头的弹性密封垫设计相适应，确保接头防水能力。

表 8.4.10 衬砌环收敛变形和接缝张开量限值

类别	限值
衬砌收敛变形	$\leq 3\% D_1$ ，且小于 50 mm
接缝张开量	≤ 2 mm，且小于弹性密封垫的允许张开量

注：1. D_1 为衬砌环外径；

2. 表中收敛变形和接缝张开量限值不含管片拼装误差造成的变形量。

8.4.11 一般环境管片衬砌钢筋混凝土结构正截面受力最大计算裂缝宽度允许值应符合表 8.4.11 的规定。

表 8.4.11 一般环境管片衬砌钢筋混凝土结构正截面受力最大计算裂缝宽度允许值

环境作用等级	允许值 (mm)
I _A 、I _B	0.2 mm
I _C	0.15 mm

注：1. 一般环境下管片衬砌混凝土结构的环境作用等级划分按照《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTG/T3310-2019 第 4.3.2 条执行。

2. 处于冻融环境、氯化物环境、盐结晶环境、化学侵蚀环境下的混凝土结构，其最大计算裂缝宽度允许值按现行行业标准《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTG/T3310-2019 第 7.3.1 条的规定取值。

8.4.12 隧道管片衬砌结构应进行管片接头计算并应符合下列规定：

- 1 管片接头计算内容应包括管片接头强度验算及接缝张开量计算。
- 2 管片接头强度验算应包括连接螺栓抗拉强度、抗剪强度、接缝混凝土局部受压及螺栓手孔处管片的抗剪和抗冲切承载力验算。
- 3 管片接头处设有凹凸榫槽时可不进行螺栓的抗剪强度验算。

条文说明

1 管片接头处接缝张开量以环向螺栓达到允许拉应力时衬砌外侧的张开量作为验算标准，接缝张开量应满足弹性密封垫的防水适用能力。

8.4.13 管片衬砌环向螺栓强度验算应符合下列规定：

- 1 钢筋混凝土管片的环向螺栓应按照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 中矩形截面偏心受压构件的承载能力极限状态模型计算螺栓拉应力。
- 2 钢管片的环向螺栓应采用以管片边缘为回转中心的模型计算螺栓拉应力。

8.4.14 管片衬砌纵向螺栓强度验算应符合下列规定：

- 1 管片应进行纵向螺栓抗剪强度的验算。
- 2 位于 7 度及以上地震设防区的隧道应进行地震作用下的纵向螺栓抗拉强度验算。

8.4.15 承受千斤顶作用的管片环面应按照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010

进行局部受压承载能力计算。

条文说明

承受掘进机千斤顶作用的管片环面的局部受压承载力验算规定以现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定为基础，针对千斤顶作用特点及管片构造进行了细化。

8.4.16 进行钢筋混凝土管片螺栓手孔设计时，应对螺栓连接处混凝土环肋、端肋结构按照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 进行抗剪和抗冲切承载力的验算。

8.4.17 钢管片应按照现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 对接头板抗压强度、抗剪强度、局部稳定性进行验算。

中国公路学会标准征求意见稿

9 衬砌结构设计

9.1 一般规定

9.1.1 全断面岩石掘进机法施工的公路隧道应设置衬砌，根据隧道围岩级别、施工条件和使用要求选择宜采用喷锚衬砌、复合式衬砌、管片衬砌。

9.1.2 高速公路、一级公路、二级公路的主洞应采用复合式衬砌或管片衬砌；辅助通道、三级及三级以下公路隧道主洞洞口段、IV~VI级围岩洞身段应采用复合式衬砌或管片衬砌，I~III级围岩洞身段可采用喷锚衬砌。

9.1.3 隧道衬砌设计应综合考虑围岩地质条件、开挖直径、支护结构、施工条件等，充分利用围岩的自承能力。衬砌应有足够的强度、稳定性和耐久性，保证隧道使用安全。

9.1.4 衬砌结构类型、支护参数，应根据使用要求、围岩级别、工程地质和水文地质条件、隧道埋置深度、结构受力特点，并结合周边工程环境、支护手段、施工方法，通过工程类比和结构计算综合分析确定。在施工阶段，尚应根据现场监控量测结果调整支护参数，实行动态设计，必要时可通过试验分析确定。

9.1.5 隧道衬砌设计应符合下列规定：

- 1 围岩较差地段衬砌应向围岩较好地段延伸 5~10 m。
- 2 偏压衬砌段应向一般衬砌段延伸，延伸长度应根据偏压情况确定，不宜小于 10 m。
- 3 净宽大于 3.0 m 的横通道与主洞或辅助通道的交叉段，主洞、辅助通道、横通道均应加强。加强段衬砌应向各交叉洞延伸，主洞、辅助通道延伸长度不应小于 5.0 m，横通道延伸长度不应小于 3.0 m。延伸长度范围内不宜设变形缝。

9.1.6 护盾式掘进机施工的公路隧道宜采用预制管片衬砌。

条文说明

护盾式掘进机施工的隧道，通常直接采用预制管片衬砌，无需设置二次衬砌。当地质条件表明需要补强，或地下水压力较大需提高隧道抗渗效果时，可增设二次衬砌。二次衬砌通常采用模筑混凝土。

9.2 喷锚衬砌

9.2.1 喷射混凝土的强度等级不应低于 C20，厚度不应小于 50 mm。

9.2.2 喷射混凝土钢筋网设计应符合下列规定：

- 1 钢筋网钢筋直径不应小于 6 mm，不宜大于 12 mm。

- 2 钢筋网网格应按矩形布置，钢筋间距宜为 150~300 mm。
- 3 钢筋网钢筋的搭接长度不应小于 $30d$ (d 为钢筋直径)。
- 4 钢筋网喷射混凝土保护层厚度不应小于 20 mm；当采用双层钢筋网时，两层钢筋网之间的间隔距离不宜小于 80 mm。
- 5 单层钢筋网喷射混凝土厚度不应小于 80 mm，双层钢筋网喷射混凝土厚度不应小于 150 mm。
- 6 钢筋网可配合锚杆或临时短锚杆使用，钢筋网宜与锚杆或其他固定装置连接牢固。

9.2.3 在围岩变形大、自稳性差的软弱围岩、膨胀性围岩、硬岩岩爆地段，可采用纤维喷射混凝土支护，纤维喷射混凝土设计应符合下列规定：

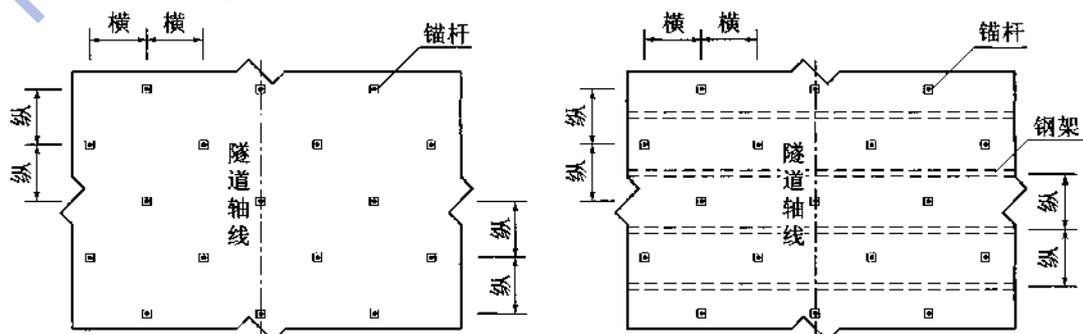
- 1 纤维喷射混凝土强度等级不应低于 C25。
- 2 钢纤维喷射混凝土中钢纤维掺量宜为干混合料质量的 1.5%~4%。
- 3 合成纤维喷射混凝土中纤维掺量应根据试验确定。
- 4 防水要求较高时，可采用强度等级高于 C30 的高性能喷射混凝土。

9.2.4 锚杆支护设计应根据隧道围岩条件、开挖直径、作用、施工条件等选择锚杆种类和参数，并符合下列规定：

- 1 用作永久支护的锚杆应为全长黏结型锚杆，端头锚固型锚杆作为永久支护时必须在孔内注满砂浆或树脂，砂浆或树脂的强度等级不应小于 M20。
- 2 自稳时间短的围岩，宜采用全黏结树脂锚杆或早强水泥砂浆锚杆。
- 3 软岩、变形较大的围岩地段，可采用预应力锚杆。预应力锚杆的预加力不应小于 100 kN。预应力锚杆的锚固端必须锚固在稳定岩层内。
- 4 岩体破碎、成孔困难的围岩，宜采用自进式锚杆。
- 5 锚杆直径宜采用 20~28 mm。
- 6 锚杆露头应设垫板，垫板尺寸不应小于 150 mm（长）×150 mm（宽）×8 mm（厚）。

9.2.5 系统锚杆设计应符合下列规定：

- 1 锚杆宜沿隧道拱部或拱墙部位径向或与岩面大角度相交。
- 2 锚杆宜按梅花形排列，如下图所示。



3 系统锚杆长度和间距应根据围岩条件、开挖直径，通过计算或工程类比确定。

4 锚杆间距不宜大于锚杆长度的 1/2 且不宜大于 1.5 m，锚杆间距较小时，可采用长短锚杆交错布置。

9.2.6 在围岩条件较差地段、洞口段、浅埋段或地面沉降有严格限制地段，可在喷射混凝土层内设置钢架。钢架设计应符合下列规定：

1 钢架支护应有足够的刚度和强度，能够承受隧道施工期间可能出现的荷载。

2 钢架间距应根据围岩条件、每个掘进行程长度确定。

3 连续使用钢架的数量不应少于 3 环。

4 相邻钢架之间应设横向连接，采用钢筋作横向连接时，钢筋直径不宜小于 20 mm，间距不应大于 1 m，并在钢架内缘、外缘交错布置；采用型钢连接时，间距不应大于 1 m。

5 钢架应分节段制作，节段之间应采用钢板连接。

6 钢架与围岩之间的混凝土保护层厚度不应小于 40 mm；临空一侧的混凝土保护层厚度不应小于 20 mm。当采用喷锚单层衬砌时，临空一侧的混凝土保护层厚度不应小于 40 mm。

7 钢架形状和尺寸应根据开挖断面确定，受力变形后不得侵入设计净空或二次衬砌。

8 钢架宜全环设置，考虑围岩变形因素，钢架可设计为可伸缩的结构。

9.2.7 岩体破碎地段宜采用围岩加固、钢筋排等手段减少拱部掉块塌落。

9.3 复合式衬砌

9.3.1 复合式衬砌设计应符合下列规定：

1 初期支护应按永久支护结构设计，宜采用喷射混凝土、锚杆、钢筋网和钢架等支护单独或组合使用，并应符合本指南第 9.2 节的规定。

2 二次衬砌应采用模筑混凝土或模筑钢筋混凝土衬砌结构。

3 预留变形量大小应根据围岩级别、开挖直径、埋置深度、施工方法和支护情况等，通过计算分析确定或采用工程类比法确定，可参照表 9.3.1 的规定选用。预留变形量还应根据现场监控量测结果进行调整。

表 9.3.1 复合衬砌预留变形量 (mm)

围岩级别	开挖直径 (m)		围岩级别	开挖直径 (m)	
	6~9	9~13		6~9	9~13
I	—	—	IV	30~50	50~80
II	—	—	V	50~80	80~120
III	10~30	30~50	VI	现场量测确定	

注：围岩软弱、破碎取大值；围岩完整取小值。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 8.4.1 条制定，做了两处修改：1、由于皮带机出渣影响二次衬砌施工，一般要等隧道全部贯通后，才能施做二次衬砌。因此，为安全起见，宜考虑初期支护承担全部围岩压力。2、根据掘进机法的特点以及大凉山隧道全断面岩石掘进机法平导、夹金山隧道全断面岩石掘进机法平导等项目的工程经验，对预留变形量进行了调整。

9.3.2 复合式衬砌，可采用工程类比法进行设计，必要时，可通过理论分析进行验算。隧道支护参数可按下表选用。在施工过程中应根据超前地质预报及现场围岩监控量测信息对原设计支护参数进行必要的调整。

表 9.3.2-1 开挖直径 6~9 m 复合式衬砌设计参数

围岩级别	喷射混凝土厚度 (cm)	锚杆 (m)			钢筋网间距 (cm)	钢架		二次衬砌厚度 (cm)
		位置	长度	间距		间距	钢架型号	
I	—	局部	2~3	—	—	—	—	30~35
II	5~8	局部	2~3	—	@25×25	—	—	30~35
III	8~10	拱部	2~3	0.9~1.8	@25×25	—	—	30~35
IV	16~19	全断面	2.5~3.5	0.45~0.9	@20×20	0.9~1.8	HW100~ HW125、	30~35
V	16~21	全断面	2.5~3.5	0.45~0.9	@20×20	0.45~0.9	HW100~HW150	30~35 钢筋混凝土
VI	通过试验或计算确定							

表 9.3.2-2 开挖直径 9~13 m 复合式衬砌设计参数

围岩级别	喷射混凝土厚度 (cm)	锚杆 (m)			钢筋网间距 (cm)	钢架		二次衬砌厚度 (cm)
		位置	长度	间距		间距	钢架型号	
I	—	局部	2~3	—	—	—	—	30~35
II	5~10	局部	2~3	—	@25×25	—	—	30~35
III	10~15	拱部	2~3	0.9~1.8	@25×25	—	—	30~35
IV	16~19	全断面	3~4	0.45~0.9	@20×20	0.45~0.9	HW100~ HW125、	30~35 素混凝土或钢筋混凝土
V	19~25	全断面	3~4	0.45~0.9	@20×20	0.45~0.9	HW125~ HW150、	30~35 钢筋混凝土
VI	通过试验或计算确定							

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 8.4.2 条制定，根据掘进机法的特点以及大凉山隧道全断面岩石掘进机法平导、夹金山隧道全断面岩石掘进机法平导等项目的工程经验，给出了不同开挖直径的复合式衬砌设计参数。

9.3.3 对于软弱流变围岩、膨胀性围岩、高地应力条件下的特殊围岩，隧道支护参数可通过现场试验确定，应考虑围岩变形压力继续增长的作用。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 8.4.4 条制定。

9.3.4 二次衬砌截面宜设计为等截面。

9.3.5 二次衬砌出现下列情况时，宜采用钢筋混凝土结构：

- 1 存在明显偏压的地段。
- 2 与净宽大于 3 m 的横通道、通风道、地下变电所等交叉的地段。
- 3 地震动峰值加速度大于 0.20g 的地区洞口段。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 8.3.2 条制定。

9.3.6 二次衬砌采用钢筋混凝土结构时，应符合下列规定：

- 1 混凝土强度等级不应低于 C30。
- 2 结构厚度不宜小于 300 mm。
- 3 受力主筋的间距不宜小于 100 mm。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 8.3.2 条制定。

9.3.7 二次衬砌应设置变形缝，并应符合下列规定：

- 1 明洞衬砌与洞内衬砌交界处、不设明洞的洞口段衬砌，在距洞口 5~12 m 的隧道内应设沉降缝。
- 2 地质条件明显变化处、不同衬砌类型交界处，宜设置沉降缝。
- 3 在连续软弱围岩中，每 30~100 m 宜设一道沉降缝。
- 4 严寒与酷热温差变化大地区，特别是最冷月平均气温低于 -15 ℃ 的寒冷地区，距洞口 100~200 m 范围的衬砌段应根据情况设置伸缩缝。

5 沉降缝、伸缩缝缝宽不应小于 20 mm，缝内可填塞沥青木板或沥青麻丝。伸缩缝、沉降缝宜垂直于隧道轴线竖向设置。拱、墙、仰拱的沉降缝、伸缩缝应设在同一断面位置。

6 沉降缝、伸缩缝可兼作施工缝。在需设沉降缝或伸缩缝地段，应结合施工缝进行设置。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 8.3.4 条制定。

9.3.8 仰拱可采用预制仰拱块，仰拱块应采用钢筋混凝土结构，并符合以下规定：

- 1 仰拱块尺寸可根据掘进机循环进尺、施工运输方式、排水沟设置等因素综合确定。
- 2 对于需设置钢架支护地段，仰拱块底部弧形部位应设置环向开槽，以满足钢架安装要求。
- 3 仰拱块应采用洞外工厂化预制，洞内拼装，其底部应采用细石混凝土或砂浆回填密实。
- 4 仰拱块应预留回填孔、吊杆、钢架安装槽、止水带安装槽、水沟接头防水处理槽等，当采用有轨运输方式时可预留承轨槽、道钉孔。
- 5 仰拱块应检算其脱模、翻转、吊装、运输、洞内安装及二次衬砌整体受力等工况。

条文说明

本条根据高黎贡山隧道、多雄拉隧道等项目的工程经验制定。

9.3.9 拱墙模筑衬砌与仰拱块两侧接缝处可采用凹凸面楔形衔接。

条文说明

本条根据高黎贡山隧道、多雄拉隧道等项目的工程经验制定。

9.3.10 拱顶应进行充填注浆以保证初期支护与二次衬砌密贴。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道施工技术规范》JTG/T 3660-2020 第 9.6.18 条，以及工程经验制定。

9.4 管片衬砌

9.4.1 管片衬砌宜采用钢筋混凝土管片，有特殊要求时可采用其他管片形式。管片宜采用四边形管片。

条文说明

管片形式主要有四边形和六边形结构两种。交通隧道断面较大，管片衬砌受力相对较大，一般采用四边形结构管片，管片间利用螺栓连接准确定位，安装、灌浆等程序较多。六边形结构管片一般适用于中小

断面的水工隧道，管片间靠自锁结合达到自稳，简化了安装工序，提高了施工速度，但六边形管片的纵向接缝，仅靠管片自重而完全紧密结合较困难，拼装效果不佳，对结构稳定性不利。

隧道管片衬砌设计参数可按照下表选用。

表 9.4.1-1 外径 6~9m 隧道管片衬砌设计参数表

幅宽	1.5~1.8m
管片类型	四边形钢筋混凝土
管片厚度	0.04~0.05 倍衬砌环外径
分块	6~7 分块方案 通用环
拼装方式	错缝拼装
管片连接	弯螺栓连接
混凝土等级	混凝土强度等级：C35、C40、C50
楔形环楔形量	双面楔形管片，楔形量 40~90 mm
管片接缝构造	管片接缝设止一道水条安装槽和燕尾槽

表 9.4.1-2 外径 9~13m 隧道管片衬砌设计参数表

幅宽	1.8~2.0m
管片类型	四边形钢筋混凝土
管片厚度	0.035~0.04 倍衬砌环外径
分块	7~10 分块方案 通用环
拼装方式	错缝拼装
管片连接	斜螺栓连接
混凝土等级	混凝土强度等级：C50
楔形环楔形量	双面楔形管片，楔形量 40~70 mm
管片接缝构造	管片接缝设止两道水条安装槽和燕尾槽

9.4.2 管片衬砌厚度应根据工程水文地质条件、隧道直径、建筑材料、荷载等因素综合分析确定。

条文说明

管片厚度一般根据计算并结合工程经验确定，隧道管片厚度宜为管片环外径的 0.035~0.05 倍。

9.4.3 管片衬砌环宽度应根据曲线拟合、运输、拼装、防水等因素综合确定。

条文说明

从便于运输、提高曲线段施工精度等方面考虑，管片宽度要小；从减小接头数量、减少漏水机率、降低工程造价、提高施工速度等方面考虑，管片宽度要大。综合以上主要因素，目前我国公路隧道管片衬砌环宽度推荐选取 1.5~2.0 m。

9.4.4 衬砌环宜由数块标准块、两块邻接块和一块封顶块组成，其分块方式应根据管片制作、运输、推进千斤顶布置、拼装方式、结构受力与变形、防水要求等因素综合确定。管片环外径为 6~9 m 时，分块数量宜为 6~7 块；管片环外径为 9~13 m 时，分块数量宜为 7~10 块。

条文说明

管片分块应具体考虑以下因素：

- 1 管片内力——不同分块的管片结构内力有一定差异，应对不同分块进行内力分析比选。
- 2 管片防水——分块数越少、接缝数量越少，越有利于减少渗水。
- 3 千斤顶布置——为使管片受力均匀，减少破损，千斤顶应尽量避免压缝布置。
- 4 管片制作、运输及拼装难度。

随着分块数量的增加，衬砌环刚度降低，柔度增加。柔性的衬砌结构可充分利用围岩的自承能力，但接缝增多，拼装速度慢，不利于防水。

从管片运输及拼装施工方便考虑，管片体积和重量不宜太大，管片的最大弧长、弦长一般较少超过 4 m，且需满足运输设备的运输能力、管片在隧道内运输空间要求、掘进机举重臂起重能力的要求。从防水的角度考虑，应尽可能减小分块数。

从国内外经验及实际运用情况来看，通常情况下，6~9 m 的直径隧道，管片一般采用 6~7 分块方案，9~13 m 的直径隧道，管片一般采用 7~10 分块方案。

9.4.5 管片拼装方式宜采用错缝拼装，有特殊要求时可采用通缝拼装。

条文说明

错缝拼装方式与通缝拼装方式相比，具有管片接头刚度分布均匀，衬砌环整体结构刚度大，结构变形小，防水性能好等优点。对于防水要求高、软弱破碎围岩地区、大直径断面的隧道，应优先采用错缝拼装方式。隧道与横通道、废水泵房结构连接部位处的管片可采用通缝形式拼装。

9.4.6 管片环类型可采用通用环或普通环组合方式。当采用普通环组合方式时，管片环宜分为标准环+左楔形环+右楔形环。当采用通用环组合方式时，管片环宜为通用楔形环一种类型。

9.4.7 管片楔形环楔形量设计应符合下列规定：

- 1 楔形量应根据管片环类型及拼装方式、隧道直径、管片宽度、最小转弯半径、曲线拟合误差等综合确定。
- 2 楔形环可采用单面楔形或双面楔形形式。
- 3 当根据线路最小曲线半径计算楔形量时，管片环平均楔形量应按下列公式计算：

$$\Delta = B \times D_1 / R \quad (9.4.7)$$

式中：

Δ ——计算平均楔形量（m）；

B ——衬砌环在隧道中心轴线水平投影位置平均环宽（m）；

D_1 ——管片环外径（m）；

R ——最小曲线半径（m）。

条文说明

在国内隧道工程中，单面楔形和双面楔形管片环均有较多成功的工程实例。总的说来，双面楔形的工程实例相对要多一些，可根据某地区的管片模具或工程习惯确定楔形环的形式。

楔形环楔形量可根据管片环平均楔形量和管片环组合排版设计确定，也可参照表 9.4.7 的规定。

表 9.4.7 常用楔形量范围值

管片环外径 D_1 (m)	$6\text{ m} \leq D_1 < 9\text{ m}$	$9\text{ m} \leq D_1 \leq 13\text{ m}$
楔形量 (mm)	40 ~ 90	40 ~ 70

9.4.8 封顶块接头角和插入角应根据截面内力传递、拼装方式等因素综合确定。

条文说明

根据设计施工经验，封顶块拼装主要采用轴向和径向混合插入方式，径向插入时管片施工间隙可取 20~30 mm，封顶块插入角斜率不宜大于 1/6。在满足施工要求的前提下宜采用小的接头角和插入角。

9.4.9 管片环与环之间、块与块之间的连接方式应符合下列规定：

- 1 连接方式应根据管片形式、接头受力要求、拼装要求、接缝止水要求等因素综合确定，宜采用螺栓连接。
- 2 螺栓的机械性能等级应满足构造和结构受力要求。
- 3 在满足施工安装的前提下应采用较小的螺栓手孔尺寸。

条文说明

适合管片使用的连接方式有：直螺栓连接、弯螺栓连接和斜螺栓连接。

直螺栓连接构造简单、施工方便，一般用于箱形管片中，用于平板型管片时，对衬砌削弱太大。斜螺栓连接构造简单，施工方便，便于快速施工。弯螺栓连接对衬砌削弱小，施工简单，接头刚度较小。

9.4.10 管片应根据连接方式、起吊方式、拼装方式、注浆要求以及结构受力等因素确定螺栓手孔、定位孔、吊装孔、注浆孔的位置与尺寸。当衬砌环采用吊装孔安装时，宜将管片吊装孔和注浆孔统筹考虑。

条文说明

管片孔洞数量增加会相应增加渗漏水的可能性，同时也增加了工程投资，因此管片大多将注浆孔同时兼做吊装孔，既可以满足吊装的需要，又可以满足豆砾石回填及注浆要求。

9.4.11 管片衬砌外侧和岩石之间的空隙宜采用豆砾石、碎石吹填注浆或水泥砂浆等材料充填。注浆结石体强度应能满足管片衬砌和围岩之间传力的要求，28d 芯样轴心抗压强度一般不应低于 10 MPa。

条文说明

在护盾式岩石掘进机施工时，为了防止掘进机卡机，掘进机从刀盘至盾尾呈倒锥形，给岩石留下一定的变形空间，从而在衬砌混凝土管片外侧与岩石之间形成一个环形空隙，该空隙应用豆砾石、碎石吹填注浆或砂浆填充。充填后的结石体主要起传力、防水作用。

豆砾石、碎石应为经过筛选、清洗干净及坚固的天然骨料或人工骨料，粒径一般为 5~10 mm，超径不大于 5%，针片状颗粒含量不大于 25%。

9.5 衬砌抗震设计

9.5.1 隧道抗震设防类别、设防目标、抗震性能要求、抗震设计方法和地震作用等应符合现行行业标准《公路隧道抗震设计规范》JTG 2232 的相关要求。

条文说明

采用复合式衬砌的岩石掘进机法公路隧道主要按现行《公路隧道抗震设计规范》JTG 2232 钻爆隧道抗震设计执行，采用管片衬砌的岩石掘进机法公路隧道主要按现行《公路隧道抗震设计规范》JTG 2232 盾构隧道抗震设计执行。抗震措施主要包括提高结构自身抗震性能的抗震措施和减少地层传递至隧道结构地震能量的减震措施。采用管片衬砌的岩石掘进机法公路隧道通常比城市盾构隧道埋深大、围岩地质条件更好，参照盾构隧道执行是有利的。

9.5.2 隧道抗震验算时宜采用静力法进行横向抗震计算，主洞与辅助坑道连接处或地层条件明显变化段宜按空间问题进行分级分析，隧道抗震验算方法应按表 9.5.2 采用。

表 9.5.2 隧道抗震验算方法

抗震计算	计算方法	结构性能状态
横向抗震计算	静力法	弹性
	横向反应位移法	弹性
	动力分析法（时程）（二维或三维）	弹性或弹塑性
纵向抗震计算	纵向反应位移法	弹性
	动力分析法（时程）	弹性或弹塑性
三维空间模型抗震计算	动力分析法（时程）	弹性或弹塑性

条文说明

隧道抗震计算方法应根据地层条件、几何形体和输入地震动等因素确定，目前隧道常用的抗震计算方法主要包括静力法、反应位移法及时程分析法等，计算方法的选择应根据隧道重要程度、抗震设防类别、抗震性能要求、结构特征、工程地质条件及地震动参数等综合确定；静力法参数易于确定，在较好的岩质隧道中宜采用静力法进行横向抗震计算；当隧道处于非均匀场地，计算精度要求较高时，且具有场地设计地震时程时，采用反应位移法抗震计算；重要工程及复杂结构，需要考虑地震动的峰值、频谱特性和持续时间，得到地层和结构在地震全时段的内力和位移响应时，采用时程分析法抗震计算。

9.5.3 隧道洞口段、浅埋偏压段、软硬地层变化段、断层破碎带段和结构形式变化段抗震设防范围应往较好围岩或正常结构段延伸，抗震设防段两端延伸长度应根据地震反应计算确定，最小值不宜小于 5 m。

条文说明

震害资料表明，隧道埋深、地质条件不均匀性和结构形式变化段等对其破坏程度影响较大，参照现行《公路隧道抗震设计规范》JTG 2232 要求抗震设防范围延伸段长度不小于 5 m。

9.5.4 采用管片衬砌的隧道在下列位置宜设变形缝或采取增强环缝变形能力的措施：

- 1 隧道与横通道、紧急停车带等构筑物相接处。
- 2 隧道与明挖或暗挖隧道相接处。
- 3 隧道周边地层或荷载发生较大变化处。

条文说明

震害资料显示，在隧道与横通道、紧急停车带等连接处结构形式变化大、空间效应显著的部位以及地质条件发生突变的部位，隧道结构极易出现震害，这条规定是对《公路隧道抗震设计规范》JTG 2232 的补充。增强环缝变形能力的措施包括环缝采用直螺栓连接形式，采用可更换的遇水膨胀橡胶密封圈作为螺栓孔密封垫圈。

9.6 服务洞室

9.6.1 敞开式掘进机服务洞室设计应符合以下规定：

- 1 预备洞衬砌结构与掘进机刀盘之间宜预留不小于 15 cm 间隙，并满足检修及步进要求。预备洞长度可根据洞外拼装场地和掘进机总长度确定。
- 2 掘进机法施工隧道应设置始发洞。始发洞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 15 cm 以内。
- 3 洞内组装宜在地质较好地段设置组装洞，长度、宽度应考虑吊装设备、车辆运输、作业空间等因素。洞内组装宜采取分部组装方式。

4 检修洞、拆卸洞长度为主机长度与 2 倍刀盘直径之和，且不宜小于 30 m。宽度不宜小于刀盘直径的 1.5 倍。高度宜按不小于吊装设备起吊刀盘 2 m 考虑。

5 接收洞净空断面可参照预备洞。

9.6.2 护盾式掘进机服务洞室设计应符合以下规定：

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推油缸行程，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本指南 9.6.1 的要求进行设计。

9.7 构造要求

9.7.1 钢筋混凝土构件中纵向受力钢筋的混凝土保护层最小厚度应符合表 9.7.1 的规定。

表 9.7.1 钢筋混凝土构件中纵向受力钢筋的混凝土保护层最小厚度 (mm)

构件厚度	保护层最小厚度	
	非侵蚀性环境	侵蚀性环境
<150	根据情况确定	根据情况确定
150~300	30	40~55
301~500	35	40~60
>500	40	50~60

注：环境作用等级越高，保护层取值越大。

9.7.2 钢筋混凝土结构构件中纵向受力主钢筋的截面最小配筋率应符合表 9.7.2 的规定。

表 9.7.2 钢筋混凝土结构构件中纵向受力主钢筋的截面最小配筋率 (%)

受力类型	最小配筋率				
受压构件	全部受力主钢筋	0.6			
	一侧受力主钢筋	0.2			
受弯构件、偏心受拉、轴心受拉 构件一侧的受拉钢筋	钢筋种类	混凝土强度等级			
		C25	C30	C40	C50
	HPB300	0.25	0.30	0.35	0.40
HRB400	0.20	0.20	0.25	0.30	

注：1. 受压构件全部受力主钢筋最小配筋率，当采用 HRB400 钢筋时，应按表中规定减小 0.05%。

2. 偏心受拉构件中的受压钢筋，应按受压构件一侧受力主钢筋考虑。

3. 受压构件的全部受力主钢筋和一侧受力主钢筋的配筋率以及轴心受拉构件和小偏心受拉构件一侧受拉钢筋的配筋率应按构件的全截面面积计算；受弯构件、大偏心受拉构件一侧受拉钢筋的配筋率应按全截面面积扣除受压翼缘面积后的截面面积计算。

4. 当钢筋沿构件截面周边布置时，“一侧受力主钢筋”系指沿受力方向两个对边中的一边布置的受力主钢筋。

9.7.3 钢筋混凝土构件钢筋弯起应符合下列规定：

1 当受力主钢筋需弯起时，弯起钢筋的弯终点应留有锚固长度。该长度在受拉区不应小于 $20d$ (d 为钢筋直径)，在受压区不应小于 $10d$ 。光圆钢筋在端部应设弯钩。

2 弯起钢筋的弯起角，对于梁宜取 45° 或 60° ，对于板不宜小于 30° 。

3 弯起钢筋为 HPB300 时，最小弯曲半径为 $10d$ (d 为钢筋直径)；弯起钢筋为 HRB400 时最小弯曲半径为 $12d$ 。

9.7.4 钢筋混凝土构件钢筋锚固应符合下列规定：

1 钢筋锚固长度应符合表 9.7.4 的规定。

表 9.7.4 钢筋锚固长度

锚固条件		钢筋类别	
		HPB300	HRB400、HRB500
受压钢筋自不受力处算起的锚固长度	$\geq 30d$	不设弯钩	—
	$< 30d$	$10d$ 加直钩	—
	$\geq 20d$	—	不设弯钩
	$< 20d$	—	$10d$ 加直钩
受拉构件的钢筋按黏结力计算的锚固长度	在无横向压力区域	$30d$ 加半圆钩	$20d$ 加直钩
	在有横向压力区域	$15d$ 加半圆钩	$10d$ 加直钩
受弯构件、偏心受压构件的受拉钢筋自不受力处算起的锚固长度	在受压区	$10d$ 加直钩	$10d$ 不设弯钩
	在受拉区（困难情况下）	$20d$ 加半圆钩	$20d$ 加直钩
弯起钢筋伸到受压区的长度	$\geq 20d$	不设与纵筋平行的直段，端部采用直钩。	不设与纵筋平行的直段，且 不设弯钩。
	$< 20d$	设与纵筋平行长度为 $10d$ 的直段，并加直钩。	设与纵筋平行长度为 $15d$ 的直段，且 不设弯钩。

注：1.HRB400、HRB500 钢筋的直径大于 25mm 时，其锚固长度应乘以修正系数 1.1。

2.HRB400、HRB500 级的环氧树脂涂层钢筋，其锚固长度应乘以修正系数 1.25。

3.钢筋在混凝土施工过程中易受扰动（如滑模施工）时，其锚固长度应乘以修正系数 1.1。

4.HRB400、HRB500 钢筋在锚固区的混凝土保护层厚度大于钢筋直径的 3 倍且配有箍筋时，其锚固长度可乘以修正系数 0.8。

2 受力主钢筋末端需设弯钩时，弯钩内径应为 $4d$ (d 为钢筋直径)，弯后直段长度应为 $5d$ 。

9.7.5 受力主钢筋连接应符合下列规定：

1 受力主钢筋接头宜设置在受力较小处，在同一根钢筋上宜少设接头。

2 直径大于 25 mm 的光圆钢筋以及所有螺纹钢筋的接头均采用焊接或机械连接，焊接或机械连接接头的抗拉强度不应低于钢筋本身的强度。

3 焊接接头应相互错开，焊接接头连接区段长度为 35d（d 为钢筋较大直径）且不小于 500 mm，凡接头中点位于该连接区段长度内的焊接接头均属于同一连接区段。

4 位于同一连接区段内受力钢筋的焊接接头、机械连接接头面积百分率，对受拉主钢筋接头，不应大于 50%。受压主钢筋的接头面积百分率可不受此限制。

5 直径较小的光面钢筋可以采用搭接，此时钢筋端部应弯成半圆形弯钩，两钩切点间的距离对受拉钢筋不得小于 30d，对受压钢筋不得小于 20d，在搭接范围内应用铁丝绑扎或焊接。

6 其他情况下的钢筋连接应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的相关规定。

9.7.6 仅受轴心压力并配有受力主钢筋及一般箍筋的构件配筋构造应符合下列规定：

- 1 受力主钢筋截面积不应小于构件截面积的 0.6%，且不应大于 3%。
- 2 受力主钢筋的直径不宜小于 12 mm。
- 3 箍筋的直径不应小于受力主钢筋直径的 1/4，且不应小于 6 mm。

9.7.7 隧道衬砌配筋构造应符合下列规定：

- 1 受力钢筋最小直径不应小于 16 mm。
- 2 受力主钢筋截面积不应小于构件截面积的 0.6%，且不应大于 3%。
- 3 衬砌内外侧应设垂直于受力主筋的分布钢筋，分布钢筋直径不宜小于 12 mm，间距不宜大于 300 mm。

4 衬砌内外两层受力钢筋之间应设连接箍筋，箍筋的直径不应小于 6 mm。箍筋两端应设弯钩，弯钩内径不应小于受力钢筋直径，弯后直段长度不应小于 5d（d 为钢筋直径）。

5 衬砌箍筋应布置在环向受力钢筋和分布钢筋的交叉位置，间距不应大于分布钢筋间距的 2 倍，环向受力钢筋和箍筋应进行绑扎或焊接。

6 宜在内外层环向受力钢筋之间设限位钢筋。限位钢筋直径不宜小于 16 mm，间距不宜小于 2.0 m×2.0 m，应布置在环向受力钢筋与分布钢筋的交叉位置。设有限位钢筋位置可不设箍筋，限位钢筋应与环向受力钢筋和分布钢筋绑扎或焊接。

9.7.8 环境作用等级为 D、E、F 时，浇筑在混凝土中并部分暴露在外的吊环、连接件等铁件应与混凝土构件中的钢筋隔离，或对外露铁件采取可靠的防腐蚀措施。

9.7.9 其他隧道结构构件钢筋及考虑地震设防的钢筋，其构造要求应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的相关规定。

9.7.10 电缆沟、水沟盖板钢筋直径和间距应符合表 9.7.10 的要求。

表 9.7.10 电缆沟、水沟盖板钢筋直径和间距 (mm)

类别	直径 d	间距	
		纵向受力钢筋 (主筋)	受力钢筋常用 6, 8, 10
		板厚 $h > 150$	$\leq 1.5h$, 且 ≤ 300
构造钢筋	分布钢筋 $d \geq 6$	≤ 200	

9.7.11 隧道管片衬砌环细部设计应符合下列规定:

- 1 管片边缘应做 5 mm×5 mm 的倒角。
- 2 每个衬砌环管片均应在内弧面明显位置设置标识。
- 3 根据地层特点和施工需要, 衬砌环可设置凹凸榫。
- 4 管片螺栓手孔、预埋件等薄弱部位应设置构造钢筋。

9.7.12 隧道单块成型钢筋混凝土管片尺寸允许偏差应符合表 9.7.12 的要求。

表 9.7.12 隧道单块成型钢筋混凝土管片尺寸偏差允许值 (mm)

项目	允许偏差
宽度	± 1
弧、弦长	± 1
厚度	+3、-1
钢筋保护层厚度	± 5

9.7.13 钢筋混凝土管片结构应采用抗裂、防撞措施。

条文说明

钢筋混凝土衬砌环管片防撞设计主要指管片在生产、运输及拼装过程中的防撞构造措施。

9.7.14 钢管片制作精度不应低于混凝土管片的精度。

9.7.15 当钢管片由几个分块管片组合形成时, 各分块管片尺寸设计时应预留适当的公差以满足管片拼装需要。

10 特殊地质地段设计

10.1 一般规定

10.1.1 当隧道通过破碎岩体、膨胀性围岩、高地应力区、岩溶等特殊地质地段时，应根据具体情况进行专项设计。

条文说明

本条规定了不良地质路段的类型，特殊地质路段由于岩层地质成因复杂，对隧道掘进机法施工危害大，在这些围岩中修建隧道，需要进行专门设计和采取特殊的施工方法。

10.1.2 特殊地质段专项设计应包括以下主要内容：

- 1 超前地质预报设计。
- 2 特殊地质处治方案设计。
- 3 施工风险管理设计。
- 4 衬砌结构设计。
- 5 防排水设计。
- 6 监控量测设计。

条文说明

本条参照行业标准《铁路隧道掘进机法技术规程》Q/CR 9528-2019 第 5.10.1 条制定。

10.1.3 特殊地质段超前地质预报应采用地质调查法、地震波法、超前钻孔等方式进行综合超前地质预报。地质调查法可根据开挖围岩、渣体、刀盘扭矩、主驱动电器电流等参数综合判断刀盘前方地质条件。

条文说明

本条参照行业标准《铁路隧道掘进机法技术规程》Q/CR 9528-2019 第 5.10.2 条制定，新增了根据掘进机设备参数综合判断前方地质条件的要求。

10.1.4 穿越特殊地质地段的隧道，在施工期应对地下水变化进行观测，对围岩变形和支护衬砌结构变形或受力进行监测。当设计与实际情况不符时，应及时修正设计。

条文说明

特殊地质地段施工前掌握的地质资料和制定的对策措施不可能完全符合实际情况，在施工过程中，开展动态设计、动态施工，通过超前地质预报和监控量测等手段，发现和排除险情，防止突然事故的发生。

10.2 岩溶

10.2.1 隧道穿越岩溶地层时，应查明岩溶发育阶段、溶洞分布范围和类型、岩层的完整稳定程度、溶洞填充物、地下水情况，并采用相应的工程措施对其进行综合治理。

条文说明

本条参照行业标准《铁路隧道掘进机法技术规程》Q/CR 9528-2019 第 5.10.5 条制定。

10.2.2 对局部严重的、大型的、不易探明的岩溶地段，应尽量绕避；对一般的中、小型岩溶地段，可选择其最窄的、最易于采取措施的地段通过。

条文说明

本条借鉴了“吉林引松供水工程”岩溶地段的处治经验，隧道大型溶洞尽量绕避，掘进机施工存在栽头、偏机甚至掉落风险，如无法绕避，可采用钻爆法进行处治后通过。

10.2.3 隧道穿越规模较大的空溶洞或暗河通道时，可采取钻爆法进行处理，然后步进通过。

条文说明

本条借鉴了“吉林引松供水工程”岩溶地段的处治经验，隧道接近大型溶洞时或暗河时，应提前进行预加固措施，防止出现灾难性事故。

10.2.4 根据溶洞与隧道的空间位置关系，宜采取以下处理措施：

- 1 溶洞在拱顶位置时，采用钢筋排、钢拱架、拱架背部加焊支撑、注浆回填等联合支护措施。
- 2 溶洞在撑靴位置，采取模筑混凝土、注浆加固填充物等进行预加固。
- 3 溶洞在隧底位置，采用钻爆法回填砂浆固结或换填混凝土，防止掘进机偏机、栽头、刀盘被卡等施工风险。

条文说明

本条借鉴了“吉林引松供水工程”岩溶地段的处治经验，小型溶洞对掘进机施工影响较小，可直接掘进通过。

10.2.5 应根据实际情况对岩溶水采取截、引、排等处理措施，并应保护、疏通、恢复岩溶原有排水通道。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 14.3.5 条制定，根据近年来隧道岩溶处治的经验教训，岩溶水排水通道不畅易导致隧道支护结构的损伤和对隧道运营的安全威胁，

因此应尽可能恢复原有排水通道。

10.3 高应力区

10.3.1 隧道穿越高地应力区时，隧道轴线与最大主应力方向水平投影夹角宜小于 30° 。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 14.8.1 条制定。

10.3.2 高地应力区隧道根据不同的地质条件，可能发生岩爆或大变形，岩爆及大变形分级可按表 10.3.2-1、10.3.2-2 选用。

表 10.3.2-1 岩爆分级表

岩爆分级	名称	判据
I	轻微岩爆	$0.3 \leq \sigma_{\theta \max} / R_b < 0.5$
II	中等岩爆	$0.5 \leq \sigma_{\theta \max} / R_b < 0.7$
III	强烈岩爆	$0.7 \leq \sigma_{\theta \max} / R_b < 0.9$
IV	剧烈岩爆	$0.9 \leq \sigma_{\theta \max} / R_b$

注： $\sigma_{\theta \max}$ 为洞壁最大切向应力； R_b 为岩石单轴抗压强度。

表 10.3.2-2 大变形分级表

大变形分级	名称	判据 (%)
I	轻微大变形	$2 \leq U_a / a < 3$
II	中等大变形	$3 \leq U_a / a < 5$
III	强烈大变形	$5 \leq U_a / a$

注： U_a 为变形量； a 为开挖直径。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1 2018 第 14.8.2 条制定。

10.3.3 岩爆、大变形段落较长或频繁出现的隧道，应开展岩爆、大变形地质的专项勘察，预估可能发生的段落和等级。

条文说明

本条结合锦屏引水工程、甘肃引洮工程等项目的施工实践，提出了长距离岩爆、大变形的地质条件，隧道掘进机法的地质适应性较差，可能导致卡机、停机风险，因此应慎重选择。

10.3.4 岩爆处治应遵循“以防为主、防治结合”的原则，对可能发生岩爆段应进行检测、预报。

- 1 轻微岩爆段初期支护可采用喷射混凝土、钢筋网锚喷混凝土、系统锚杆等联合处治措施。
- 2 中等岩爆段在护盾后方、刀盘附近围岩喷洒水或在护盾后方打设注水孔注水，可增设钢架等支护措施。
- 3 强烈岩爆段在护盾后方、刀盘附近围岩喷洒水或在护盾后方打设注水孔注水、护盾后方打应力释放孔，可采用钢筋网锚喷混凝土或纤维喷射混凝土、系统锚杆、钢筋排、加强钢架等综合治理措施。
- 4 采用管片衬砌的隧道通过强烈岩爆地段时，管片衬砌厚度及配筋可适当加强。
- 5 长距离强烈岩爆、剧烈岩爆段可采取钻爆法进行处理。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 14.8.3 条制定，同时借鉴了引汉济渭引水工程、高黎贡山铁路隧道的处治经验，岩爆地段遵循“以防为主、防治结合”的处治原则。根据锦屏引水工程的施工经验，掘进机法应对强岩爆地段的风险较高，因此应停机待避，或采用钻爆法处理后通过。

10.3.5 岩爆地段应加强人员、机械防护，掘进机设备可加装钢板防护。

条文说明

本条参照行业标准《铁路隧道掘进机法技术规程》Q/CR 9528-2019 第 13.11.4 条制定。

10.3.6 大变形防治应遵循“加固围岩、预留变形、先柔后刚、先放后抗”的综合整治原则，应根据大变形不同情况采取合理措施。

- 1 轻微大变形段，采用长短锚杆结合、钢筋网锚喷混凝土、钢架、加强二次衬砌衬砌等支护措施。
- 2 中等大变形段，可采用扩挖边刀加大开挖断面，可采取长锚杆、钢筋网锚喷混凝土、钢架、二次衬砌采用钢筋混凝土衬砌等支护措施。
- 3 强烈大变形段，可采用扩挖边刀加大开挖断面、护盾后方打应力释放孔，采取预加固地层、长锚杆、钢筋网锚喷混凝土、钢架、增设缓冲层、二次衬砌采用钢筋混凝土衬砌等支护措施。
- 4 采用管片衬砌的隧道通过中等、强烈大变形地段时，可设置二次衬砌。
- 5 穿越大变形段掘进机可加大驱动扭矩。必要时可采取钻爆法进行处理，然后掘进机步进通过。

条文说明

本条参照行业标准《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 第 14.8.4 条制定，同时借

鉴于乐西高速大凉山 1 号隧道、高黎贡山铁路隧道工程穿越断层、泥岩段处治经验，掘进机法穿越大变形地层段防止卡机，特别是护盾式岩石掘进机，其被卡、被困的风险较大，在掘进机选型、特殊设计上必须谨慎考虑。

10.3.7 中等及强烈大变形地段的隧道施工中宜添加护盾与岩石间的润滑剂以防止掘进机卡机。

10.4 膨胀性围岩

10.4.1 支护设计应考虑围岩形变压力持续增长的作用。

条文说明

膨胀性围岩的隧道衬砌可能承受较大的膨胀压力，膨胀压力将来自各个方向，隧道断面形状采用圆形或接近圆形的卵形断面能更好地适应这种受力条件。

10.4.2 支护设计应采用先柔后刚、先让后顶、分层支护的设计方法。

条文说明

本条沿用行业标准《公路隧道设计规范》JTG 3370.1-2018 第 14.2.2 条规定。

10.4.3 初期支护喷射混凝土厚度不应超过 25 cm，二次衬砌宜采用钢筋混凝土衬砌，衬砌厚度不宜大于 50 cm。

条文说明

本条沿用行业标准《公路隧道设计规范》JTG 3370.1-2018 第 14.2.3 条规定。

10.4.4 当膨胀压力引起大变形时，初期支护可采用纤维喷射混凝土，同时加密高强度锚杆或预应力锚杆，以抵御膨胀力。

条文说明

膨胀性围岩具有变形大的特点，预留变形量比普通围岩地段适当放大，以减少围岩膨胀对结构产生的压力。

10.4.5 仰拱应及时施做，支护衬砌应尽早形成闭环。

条文说明

在膨胀性岩体中，喷锚支护具有施作及时、密贴围岩，与围岩共同变形的优点，能有效控制围岩变形；二次衬砌主要承受后期继续增加的膨胀围岩压力。为保证二次衬砌具有足够的承载能力，需采用钢筋混凝土结构。及时施作仰拱能提前发挥衬砌的整体承载能力，增加衬砌的承载能力，控制边墙变形，防止底鼓

现象发生。

10.4.6 应做好隧底防排水设计工作，防止水流浸泡基底。

条文说明

在膨胀性围岩中，水对膨胀性围岩强度和体积变化有较大影响。需做好地表截水、排水工程，减少地表水渗入隧道；及时排出洞内积水。

10.5 高地温

10.5.1 地热带分级及高地温隧道热害等级划分应符合表 10.5.1 的要求。

表 10.5.1 地热带分级及高地温隧道热害等级表

原始地层温度 (°C)	地热带分级	热害等级
$t \leq 28$	常温带 (I)	无
$28 < t \leq 37$	低高温带 (II)	轻微
$37 < t \leq 50$	中高温带 (III)	中等
$50 < t \leq 60$	高高温带 (IV)	较严重
$t > 60$	超高温带 (V)	严重

注：原始地层温度是指隧道开挖区原始地层岩温或水温。

10.5.2 高地温隧道支护设计应考虑温度附加应力的作用。

条文说明

在高地温环境下，受支护结构内外侧温差及支护结构约束作用影响，支护结构将产生温度附加应力作用，故设计中应考虑温度附加应力的作用影响，确保支护结构受力安全。

10.5.3 高地温隧道地温大于 50 °C 的地段，二次衬砌应采用钢筋混凝土，并应全环设置隔热层。

条文说明

通过我国拉日铁路吉沃西嘎隧道、拉林铁路桑珠岭隧道等高地温隧道科研成果及工程实践表明，当地温超过 50 °C，受温度附加应力作用影响，素混凝土衬砌结构安全系数将难以满足规范控制要求，建议采用设置仰拱、钢筋混凝土衬砌及设置隔热层等工程措施确保衬砌结构受力安全。

10.5.4 高地温隧道降温设计措施可按表 10.5.4 选用，并应根据现场监控量测信息进行动态调整。

表 10.5.4 高地温隧道降温设计措施表

工程措施	原始地层温度 (°C)			
	$28 < t \leq 37$	$37 < t \leq 50$	$50 < t \leq 60$	$t > 60$
通风降温	★	★	★	★
洒水降温	○	★	★	★

续表 10.5.4 高地温隧道降温设计措施表

工程措施	原始地层温度 (°C)			
	$28 < t \leq 37$	$37 < t \leq 50$	$50 < t \leq 60$	$t > 60$
冰块降温	○	★	★	★
制冷降温	岩温	○	☆	★
	水温	○	☆	★
设备冷却	☆	★	★	★

注：1.“★”表示应采用；“☆”表示宜采用；“○”表示可采用。

2.喷雾洒水降温一般适用于高岩温为主的热害环境。

3.冰块降温一般用于局部降温。

条文说明

高地温隧道应开展降温措施控制洞内工作环境，降低热害对施工作业及人员健康的影响。现阶段工程降温措施主要包括通风、喷雾洒水、冰块、制冷等，应结合不同地温等级进行合理选用。本条降温措施对策主要沿用行业标准《川藏铁路勘察设计暂行规范》Q/CR 9529-2021 进行制定。

10.5.5 高地温隧道支护设计应符合下列规定：

- 1 喷射混凝土可添加引气剂降低导热系数。
- 2 隔热层应选用吸水率小、隔热性能良好、导热性能衰减慢、可压缩性低、耐酸耐碱、施工便利的隔热材料。
- 3 地温 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上地段应采用具有耐高温性能的混凝土材料。
- 4 地温 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上地段宜采用具有耐高温性能的防排水材料。

条文说明

通过我国拉日铁路吉沃西嘎隧道、拉林铁路桑珠岭隧道、大瑞铁路高黎贡山隧道等高地温隧道科研成果及工程实践表明，当地温超过 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，隧道喷射混凝土力学性能将有所劣化，当地温超过 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，隧道防水材料性能有所劣化，故需采用耐高温性能的支护材料，提升支护对环境的适应性。

10.5.6 高地温隧道高温热水段应结合水温、水压、水量、出水特征、作业环境及环保等因素，采取有针对性的热水防治措施，并应符合下列规定：

1 掌子面前方存在大规模的高温热水或导热断裂，可能存在热水突涌风险，热水（汽）排放会严重恶化洞内作业环境时，应采取“以堵为主，限量排放”的原则，宜采用超前注浆封堵。

2 以基岩裂隙热水为主，排放不会造成地表失水风险，且对洞内环境影响较小时，可采取“控制散水，集中引排”的原则，宜采用径向注浆将散水封堵为股状水集中引排。

3 洞内热水宜采用专门的隔热排水管引排，并经处理符合环保要求后排放。

条文说明

在隧道高温热水地段，热水突涌是其主要施工风险，结合我国隧道施工现状，制定“以堵为主、限量排放”的高温水害处治原则；为控制洞内环境温度，排放热水宜采用集中引排的方式进行处理，且排水管应敷设必要的隔热措施。

10.6 破碎带

10.6.1 穿越破碎带的隧道，应加强超前地质预报，及时调整设计和施工方案。

10.6.2 根据对掘进机施工的影响程度，破碎带等级划分可按表 10.6.2 选用。

表 10.6.2 隧道破碎带等级划分表

破碎带分级	宽度（m）
I	< 2
II	2 ~ 15
III	15 ~ 30
IV	> 30

条文说明

掘进机法隧道当遭遇破碎带，会在一定程度上加大开挖施工难度，由于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，实际过程中多以破碎带宽度不同采取不同的设计、施工措施，因此用其宽度来划分其对隧道的影响程度。当含断层破碎带宽度小于 2 m 时，掘进机能顺利通过；当破碎带宽度为 10 ~ 20 m，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掘进机顺利通过；当断层破碎带宽度为 15 ~ 30 m 时，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；当破碎带宽度大于 30 m 时掘进机施工状态急剧恶化，一般需人工开挖导洞、掘进机步进通过，必要时采用钻爆法开挖、掘进机滑行方式通过。因此，依据将宽度作为掘进机施工遭遇断层破碎带时施工适用性的划分依据。

10.6.3 穿越破碎带的隧道设计应符合下列规定：

1 当破碎带等级为Ⅰ级时，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 当破碎带等级为Ⅱ级时，采用超前小导管注浆等进行围岩加固；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；开挖后可综合采用钢筋网喷混凝土、钢筋排、锚杆、钢架等措施加强支护。

3 当破碎带等级为Ⅲ级时，采用下列围岩加固措施：

1) 若撑靴部位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，超前化学灌浆加固围岩；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注浆加固围岩。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，超前支护应进行前后搭接，可采用钢筋网喷混凝土、L1区锚杆、钢筋排、中空注浆锚杆、钢架等措施。

4) 当破碎带等级为Ⅳ级时，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，待穿越该破碎带后再恢复为掘进机掘进。

条文说明

掘进机在破碎带掘进时，应根据破碎带宽度、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Ⅰ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Ⅱ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Ⅲ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Ⅳ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，其支护主要由钢筋网喷混支护、钢架支护，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。

10.6.4 穿越破碎带的隧道掘进机卡机时应根据不同的垮塌规模采取针对性脱困处理措施。

条文说明

对于弱风化具有一定强度，掌子面节理裂隙发育，具有一定自稳能力的围岩，局部破碎掉块垮塌，卡机宜采用刀盘清理法处理。通过刀孔、盾尾向掌子面及刀盘盾体顶部注浆进行加固，之后对刀盘内及周边（前方）堆积渣体采用人工掏渣方式清理，减少刀盘转动阻力直至脱困。

对于弱—中风化具有一定强度，自稳能力差的围岩，局部范围垮塌，卡机宜采用循环管棚法处理。采用采用盾尾循环管棚+掌子面玻璃纤维管循环加固的方式进行超前加固，加固后清理刀盘周边积渣并恢复掘进。

对于强—全风化强度低，自稳能力差的围岩，垮塌范围大，卡机宜采用导洞法处理。在护盾上方开挖小导洞至掌子面，根据管棚施作空间需求及护盾脱困需求，对导洞进行环向扩挖，形成管棚工作室并同步释放护盾，超前管棚施作完成后对刀盘进行清理，恢复掘进机掘进。

对于地质条件复杂，导洞法无法处理的大规模断层破碎带，卡机宜采用迂回导坑法处理。自掘进机后部增设迂回导坑，绕行至掘进机前方，通过迂回导坑向掘进机侧施作高位支洞，利用高位支洞进行高位注浆及泄水改良地质；导坑开挖至掘进机掌子面前方后，迂回绕行至平导，采用钻爆法对掌子面前方不良地质进行开挖处理后，掘进机步进通过。

10.7 富水带

10.7.1 穿越富水带的隧道，应做到超前预报、先探后掘，探明地下水的活动规律，防止突然涌水，以确保隧道安全。

10.7.2 穿越富水带的隧道设计应符合下列规定：

1 对于稳定性较好的岩体裂隙涌水，当隧道涌水量小于 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，可直接掘进通过，待通过后进行“排水+径向注浆堵水”处理；当隧道涌水量大于 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，采取超前注浆堵水处理。待出水量明显减小，具备掘进条件再行掘进。

2 对于软弱破碎和松散岩体涌水，可能发生突水突泥，掘进机被困风险很大，宜采取超前注浆堵水加固处理后步进通过。

3 对于高水压地段，可采取超前周边注浆堵水措施。

4 径向和超前注浆圈厚度应根据涌水量、围岩地质条件和地下水压力等因素综合确定。

条文说明

径向注浆堵水根据围岩地质条件、涌水形态、涌水规模和防排水要求等因素，可选用全断面径向注浆、局部径向注浆和补充注浆等措施。

超前注浆堵水应根据工程和水文地质条件等因素，可选择全断面帷幕注浆、超前周边注浆及超前局部注浆等措施。

在一般富水和少量地下水条件下，注浆材料可选择普通水泥浆、超细水泥浆。在高压、强富水条件下，注浆材料应选择普通水泥基、普通水泥-水玻璃双液浆、超细水泥浆、超细水泥-水玻璃双液浆、TGRM 浆液和 HSC 浆等两种以上材料综合注浆材料。

10.7.3 在富水带上坡地段掘进时，掘进机及其后配套排水系统可按常规设计，隧道排水可考虑自流排水，或采取适当设置排水系统和适当架高运输轨道技术方案。

10.7.4 在富水带下坡地段掘进时，应加强隧道排水系统。隧道排水系统与掘进机设备排水系统应统筹考虑，以保证掘进机施工安全。

条文说明

掘进机富水带下坡掘进时成本、工期提高，设备可能被淹，风险大。需根据勘察设计资料，一般应事先设置超强排水系统，属于风险控制措施。即使掘进贯通后实际未遇到大涌水，这一风险控制措施也是必要的。隧道排水系统与掘进机设备排水系统需统筹考虑，解决好接口问题，并根据流量和扬程设计计算好泵的选型、集水井设置及管路设计等。还需根据水量和隧道坡度计算掘进机关键部位被淹的抢险缓冲时间。

11 防水和排水

11.1 一般规定

11.1.1 隧道防排水设计应遵循“防、排、截、堵相结合，因地制宜，综合治理”的原则，妥善处理地表水、地下水，洞内外防排水系统应完善通畅。

11.1.2 高速公路、一级公路、二级公路隧道防排水应满足下列要求：

- 1 拱部、边墙、设备箱洞不渗水，路面无湿渍。
- 2 有冻害地段的隧道衬砌背后不积水、排水沟不冻结。
- 3 车行横通道、人行横通道等服务通道拱部不滴水，边墙不滴水。

11.1.3 三级公路、四级公路隧道防排水应满足下列要求：

- 1 拱部不滴水，边墙不滴水，设备箱洞不渗水，路面不积水、不滴水。
- 2 有冻害地段的隧道衬砌背后不积水、排水沟不冻结。

11.1.4 防排水设计应符合环境保护要求。当隧道内渗漏水可能引起地表水减少，影响居民生产、生活用水时，应对围岩采取堵水措施。

条文说明

隧道大量排水可能引起地下水流失，对周边环境造成不良的影响和降低围岩稳定性。对围岩采用堵水措施，是尽可能避免和减少隧道建设对周边水环境的影响，减少地下水流和发生次生灾害。

11.1.5 隧道施工期间洞内排水应符合下列要求：

- 1 洞内顺坡排水水沟断面应能满足隧道中渗漏水、施工废水和掘进机循环设备用水的排出需要，排水沟应经常清理。
- 2 洞内反坡排水，可根据坡度、水量和设备情况设集水坑及布置管路和泵站。一次或分段接力排出洞外。

11.2 复合式衬砌防水和排水

11.2.1 隧道采用复合式衬砌时，应在初期支护和二衬间设置防水层，防水层宜采用防水板和无纺织物的组合。

11.2.2 隧道防水应充分利用混凝土自防水能力，衬砌混凝土抗渗等级不低于 P8。

11.2.3 当隧道内地下水发育或有集中涌水时，应先对围岩进行注浆，以免造成大量的地下水流失，然后对少量地下水进行引排。

11.2.4 隧道模筑混凝土衬砌施工缝、变形缝、伸缩缝防水应采用止水带、止水条及其他可靠的防水材料组成的复合防水构造。

11.2.5 存在侵蚀性地下水时，应针对侵蚀类型采用抗腐蚀性、抗侵蚀性排水材料，可适当提高混凝土防水等级。

11.2.6 隧道洞内排水设计应符合以下规定：

1 隧道洞内宜按地下水和运营清洗污水、消防污水分开排放的原则设置纵向排水系统，应能保证排水畅通，避免洞内积水。当隧道左右洞涌水量差异较大时，左右洞的排水设置宜分别进行设计。

2 围岩裂隙水可采用环向排水盲管引排，其间距不宜大于 10 m，围岩有集中水渗出时可单独加设竖向排水盲管直接引排。环向排水盲管、竖向排水盲管应与纵向排水盲管联通。二次衬砌的环向施工缝、沉降缝、变形缝处宜加设排水盲管。

3 隧道内沿全长在二次衬砌外侧应设置纵向排水盲管，上半断面眼孔直径宜为 6~8 mm，间距 10 cm，并用排水管横向联通至中心排水沟。沿隧道纵向间距不宜大于 10 m，水量较大的地段应加密。

4 隧道内宜在单侧行车道边缘设置排水浅沟，并排放清洗、消防用水至洞外，宜设置中心排水沟排放地下水。排水浅沟和中心排水沟宜采用钢筋混凝土结构。

5 隧道内路面基层可采用 15~20 cm 厚水泥碎石，以利于减少路面冒水和排泄地下水，其配合比可按现行行业标准《公路水泥混凝土路面设计规范》JTGD40 确定；也可采用 12~20 cm 厚素混凝土，并在基层顶部或底部设置横向排水盲沟。

6 为便于对排水管定期疏通，宜在二次衬砌纵向间隔 50~100 m 对称布设检查维修孔。隧道内行车道边缘排水沟宜每 50 m 设一处铁篦子泄水检查孔。中心排水沟可按每 200~250 m 设一处沉沙检查井，并应铺设钢筋混凝土盖板。

11.3 管片衬砌防水与排水

11.3.1 管片衬砌防水应以管片接缝防水为重点，必要时辅以外防水层或增设二次模筑衬砌防水。

11.3.2 管片混凝土应采用防水混凝土，其抗渗等级不应小于 P10。

11.3.3 对有特殊要求（如埋深较大或地层腐蚀程度高）地段的管片，应在管片衬砌外表面涂刷防水涂料，以增强防水、防腐蚀性。防水涂料宜采用环氧或改性环氧涂料等封闭型材料、水泥基渗透结晶型或硅氧烷类材料。

条文说明

为满足隧道防水要求及确保管片混凝土结构的耐久性,对有特殊要求(如埋深较大或地层腐蚀程度高)地段的管片,应在管片迎水面涂抹兼具防水和防腐的涂料,该类涂料一般采用高渗透改性环氧或水泥基渗透结晶型防水材料。

11.3.4 管片背后应采用豆砾石、碎石吹填注浆防水或水泥砂浆充填防水,并对注浆孔、螺栓吊装孔进行封堵。

11.3.5 管片接缝至少应设置一道密封垫。当管片厚度不小于 400 mm 且隧道处于富水区域时,应设置两道密封垫;当管片厚度小于 400 mm 且处于富含水区域时,宜在管片密封垫表面增设膨胀条等加强防水。

11.3.6 密封垫应沿管片侧面成环设置。密封垫沟槽形式、截面尺寸应与密封垫形式和尺寸相匹配。

11.3.7 衬砌管片内弧侧应预留嵌缝槽。嵌缝槽宜采用密封材料嵌缝。

11.3.8 螺栓孔和注浆孔应设置防渗漏的密封垫圈。

11.3.9 螺栓孔防水应符合下列规定:

- 1 螺栓孔口应设置锥形倒角的螺孔密封圈沟槽。
- 2 螺栓孔密封圈的外形应与沟槽相匹配。
- 3 螺孔密封圈应采用合成橡胶或遇水膨胀橡胶制品。

11.3.10 注浆孔的注浆管密封圈和注浆管盖密封圈,应符合下列规定:

- 1 注浆管密封圈应在管片混凝土浇筑前固定在注浆管四周,单道或多道设置。
- 2 注浆管密封圈和注浆管盖密封圈应采用遇水膨胀橡胶制品。

11.3.11 隧道管片衬砌与现浇混凝土衬砌的接触部位应采用缓膨型遇水膨胀止水条、注浆防水等方式止水。

11.3.12 高压富水区隧道对地下水应采取“堵水限排”的原则进行处理,应先对围岩进行注浆封堵,然后通过泄水型管片对少量地下水进行引排。

条文说明

高压富水区隧道对地下水首先应采取堵水措施,减少地下水的流失,然后采用泄水型管片排除衬砌背后的积水,减少或消除管片衬砌背后的水压力,减少管片衬砌渗漏水的概率,满足防水的要求。

11.3.13 泄水型管片宜采用管片注浆孔作为泄水孔，根据不同的初始水头高度及地层渗透系数选择适应的开孔位置和数量。

条文说明

当外水头较大时，通过增加管片厚度、配筋强度、螺栓连接强度等措施来提高管片外水压，既不经济也不合理。在管片结构设计时，需要确定其管片能够承受的最大水头高度，综合考虑结构经济性、施工质量及难易程度等因素，判断采用的管片类型。多雄拉隧道轻管片能够承受的最大水头高度为 26m，中型管片能够承受的最大水头高度为 39m，重型管片能够承受的最大水头高度为 56m，当水头高度超过 56m 时，需要采用泄水型管片。

管片泄水主要是通过管片不同的位置开设泄水孔的方式来实现泄水型管片宜采用管片的注浆孔作为泄水孔，但当水量较大，注浆孔无法满足泄水要求时，也可设置单独的泄水孔。从环向布置来划分，主要分为仰拱排水型、仰拱两侧对称排水型、环向排水型和深孔泄水型四种。地下水从管片泄水孔处通过隧道内部设置的排水系统引入隧道中心排水沟，排除隧道外。

12 监控量测与超前预报

12.1 一般规定

12.1.1 隧道应在施工阶段对隧道结构、周边环境进行监控量测。

条文说明

监控量测在隧道动态设计或信息化设计中监控量测起到承上启下的关键作用，通过施工中进行的监控量测，及时掌握围岩稳定状态和支护效果，通过量测数据及时调整和变更设计，是目前隧道工程设计的重要依据。

12.1.2 隧道工程监控量测应贯穿隧道工程施工全过程。隧道贯通且周围岩土体和周边环境变形趋于稳定时，可结束监控量测工作。

12.1.3 隧道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。

条文说明

相对于钻爆法施工而言，全断面岩石掘进机法施工的隧道对工作条件要求较高，对围岩工程地质、水文地质条件的适应性差，特别是在可能出现地质灾害的特殊地质地段，可能发生掘进速度低、卡机、埋机等问题，必须开展施工地质超前预报。

开展隧道地表地质补充调查工作，是确定施工地质超前预报的重点地段（特殊地质地段）及确保洞内地质超前预报的针对性的需要。

开展洞内地质调查工作，是常规地质法预报的重要补充手段。洞内地质调查工作不占用掘进机工作时间，可操作性强，是隧道工程全过程地质工作重要的一环。它不仅是对隧道设计地质资料的补充和完善，更是提高地球物理探测预报准确率的需要，也可对隧道运营阶段隧道病害整治提供完整的隧道地质资料。根据洞内地质调查结果，结合补充地质调查结果进行的地表地下构造相关分析，可对开挖工作面前方地质状况进行推测、判断和预报。

12.1.4 超前预报方法的选择应以不占或少占掘进机工作时间为原则。

条文说明

特殊地质地段隧道施工地质超前预报工作，以利用掘进机前方配备的地质钻机进行超前水平钻探为主，辅以地球物理等方法探测。目的是避免占用或尽可能少占用掘进机工作时间。

12.1.5 隧道施工过程中，应根据隧道监控量测和超前地质预报的相关信息，实行动态设计和信息化施工。

12.2 监控量测

12.2.1 隧道施工期监控量测设计应根据围岩条件、支护参数、周边环境及监控量测目的进行，布置变形、应力应变、渗流及温度等监测项目。

12.2.2 变形监测项目应包括围岩内部变形、收敛变形、拱顶下沉、隧底隆起等监测项目。

条文说明

敞开式掘进机施工期应重点监测初期支护和围岩稳定情况，以初期支护结构为主，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地段，可采用阵列式位移计等监测钢拱架内缘位移。

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。

12.2.3 应力应变监测项目应包括围岩压力、初期支护应力应变、管片结构应力应变等监测项目。

条文说明

敞开式掘进机施工期应以布置初期支护结构为主，宜采用土压力计、锚杆应力计、钢板应变计等进行监测。

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。

12.2.4 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。

12.2.5 隧道施工期监测断面、测点布置及监测频率应根据地质条件、围岩结构、衬砌形式、受力状态等因素综合确定。

条文说明

隧道监控量测应选择最不利和最具有代表性的地段布置监测断面。

12.2.6 富水带地段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。

12.2.7 岩爆地段围岩应进行收敛变形及应力监测，并采取有效的防范措施。

12.2.8 高地温地段应对洞内空气温度和围岩岩壁温度进行实时监测。

12.2.9 有害气体地段应对洞内有害气体种类和浓度进行实时监测。

12.2.10 选择的监控量测的仪器和设备，应满足量测精度、抗干扰性、长期使用等要求。

12.2.11 观测点应埋设在能反应变形、便于观测、易于保存的部位。

12.2.12 采用复合式衬砌的隧道周边相对位移控制值按表 12.2.12 执行：

表 12.2.12 采用复合式衬砌的隧道周边相对位移控制值 (%)

围岩类别	埋深 (m)		
	< 50	50 ~ 300	300 ~ 600
III	0.10 ~ 40	3 ~ 5	10 ~ 40
IV	10 ~ 20	2 ~ 3	10 ~ 20
V	5 ~ 10	1 ~ 2	5 ~ 10

注：1.相对位移值系指两点间实测位移值与两测点间距离之比或拱顶下沉实测值与隧道高度之比。

2.硬质围岩的取表中较小值，软质围岩的取表中较大值。

3.本表所列数值可在过程中通过实测资料积累，并通过工程类比，对隧道相对位移控制值进行修正。

条文说明

采用复合式衬砌的隧道周边相对位移控制值参照国家标准《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB 50086-2015 第 7.3.10 条的规定制定。

12.2.13 采用管片衬砌的隧道的量测位移值、位移速度控制标准应根据工程地质条件、周边环境条件及当地工程经验，按表 12.2.13 采用。

表 12.2.13 采用管片衬砌的隧道量测位移值、位移速度控制值

监测项目	累计值 (mm)	变化速率 (mm/d)
地表沉降	10~40	3~5
隧道竖向位移	10~20	2~3
隧道水平位移	5~10	1~2
隧道净空收敛	0.2% D_1 ~0.3% D_1	3

注： D_1 为管片衬砌外径。

条文说明

采用管片衬砌的隧道位移值、位移速度控制值参照《盾构隧道工程设计标准》GB/T 51438-2021 第 15.6.8 条的规定制定。

12.2.14 隧道施工过程中，当监测数据达到预警标准或发生异常情况时，必须及时报告。

12.3 超前地质预报

12.3.1 掘进机法施工的隧道应动态预报掘进前方的地质情况，地质复杂的隧道段应辅以超

前水平钻探或其他物探方法进行探测、验证。

12.3.2 地质超前预报的内容应包括：

- 1 对掘进机参数选用有关的地质因素
 - 1) 地层、岩性、岩石硬度、岩石强度的确定；
 - 2) 地质构造、断层、节理裂隙发育带位置、规模及性质的确定；
 - 3) 软、硬地层分界面位置的确定。
- 2 对掘进机施作安全有影响的地质因素：
 - 1) 岩溶发育的位置、规模、充填情况等确定；
 - 2) 瓦斯及有害气体的规模；
 - 3) 特殊地层如岩爆、膨胀岩地层的分布；
 - 4) 涌水、涌泥位置的确定。

条文说明

本条要求在掘进机施工过程中，及时分析掘进机掘进效率和地质参数的相关关系，确定各种围岩条件下掘进机施工的最优方案和合理的掘进参数。预报为施工服务，及时提出对预测地段的地质超前预报简报，是体现预报时效性和指导施工的需要。旅工地质预报总报告不仅是对预报工作的总结，更是提高预报准确率的需要。

12.3.3 超前地质预报的方法包括：

- 1 地质法。
- 2 超前水平钻探法。
- 3 地球物理探测等其他方法。

条文说明

敞开支掘进机法施工的隧道，有开展地质法预报的条件。超前水平钻探法地质超前预报是隧道施工地质超前预报方法中最直接的方法。

对设有超前平行导坑隧道的掘进机法施工，可利用超前平行导坑了解地质情况，预测后进的掘进机作业隧道将遇到的地质条件。

对双洞隧道，若一洞为掘进机作业，另一洞为钻爆法施工，可采用钻爆法先行施工一隧道，根据其遇到的地质情况，进行掘进机作业隧道的地质超前预报。

12.3.4 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特殊地质构造的位置，激发极化预报方法短距离探测特殊地质构造的地下水的赋存情况。
- 2 宜结合岩渣分析及掘进参数进行综合地质预报。

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。

12.3.5 预报采用预报简报和预报总报告的方式实施。预报简报应在实施洞内钻探或探测后次日提交。

1 预报简报应包含下列内容：

- 1) 隧道工程概况。
- 2) 地质预报采用的方法原理。
- 3) 钻探或探测布置图。
- 4) 钻探或探测结果分析。
- 5) 预报结论及下一步施工措施建议：预报长度，是否需改变掘进参数，是否需要改变支护措施，预警可能出现的灾害地质问题及处理措施建议等。

2 地质预报总报告应包含下列内容：

- 1) 隧道工程概况。
- 2) 采用的技术方法原理。
- 3) 隧道地质展示图。
- 4) 隧道实际地质纵剖面图。
- 5) 典型预报实例。
- 6) 预报与施工验证的对比分析，预报准确率的统计分析。
- 7) 结论。

条文说明

预报为施工服务，及时提出对预测地段的地质超前预报简报，是体现预报时效性和指导施工的需要。施工地质预报总报告不仅是对预报工作的总结，更是提高预报准确率的需要。

12.3.6 超前地质预报相关仪器设备应尽可能搭载在掘进机上。

12.3.7 地球物理探测法的激发方式不得影响掘进机安全。

用词说明

1 本规程执行严格程度的用词，采用下列写法：

1) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

2) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

3) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

1) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准或行业标准时，应表述为“应符合《×××××》(×××)的有关规定”。

2) 当引用标准中的其他规定时，应表述为“应符合本规程第×章的有关规定”、“应符合本规程第×.×节的有关规定”、“应按本规程第×.×.×条的有关规定执行。”

中国公路学会标准征求意见稿