

工程地质技术在地下隧道施工中的应用研究

胡冲, 任卓楠, 邱鹏, 宋辉

中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051

DOI:10.61369/ETQM.2026050031

摘 要 : 地下隧道工程具有较强专业性和复杂性, 科学规划设计和规范施工是保证施工效率和质量的前提。文章从地下隧道工程的施工特点入手, 介绍了工程地质技术在地下隧道施工中的应用, 并结合工程实例展开工程地质分析, 根据突水形成原因采取针对性的防治技术措施。通过本文, 为类似工程的建设施工提供参考, 充分发挥出工程地质技术的功能和优点, 提升地下隧道施工质量。

关 键 词 : 地下隧道; 工程地质技术; 水文特征; 防治技术

Application of Engineering Geology Technology in Underground Tunnel Construction

Hu Chong, Ren Zhuonan, Qiu Peng, Song Hui

China Nonferrous Metals Industry Kunming Survey and Design Institute Co., Ltd. Kunming, Yunnan 650051

Abstract : Underground tunnel projects are highly specialized and complex, where scientific planning, design, and standardized construction are essential for ensuring efficiency and quality. This article examines the construction characteristics of underground tunnels, introduces the application of engineering geology in tunnel construction, and presents engineering geological analyses through case studies. It also proposes targeted prevention and control measures based on the causes of water inrush. The study aims to provide references for similar projects, fully leverage the advantages of engineering geology, and enhance the quality of underground tunnel construction.

Keywords : underground tunnel; engineering geology technology; hydrological characteristics; prevention and control technology

引言

近年来, 我国隧道工程建设项目增多。据统计, 我国目前已建成铁路隧道和公路隧道超过5万公里, 其中水下沉管隧道、盾构隧道、超长隧道等施工技术位居世界前列^[1]。面对复杂的地质条件, 其施工技术难度也在增加, 将工程地质技术应用其中, 可以评价工程地质条件、解决工程地质问题, 为工程规划、设计、施工、使用及维护提供必要技术资料。以下结合实践, 探讨了工程地质技术在地下隧道施工中的具体应用。

一、地下隧道工程的施工特点

(一) 施工环境恶劣

地下隧道施工位于地下空间, 普遍存在黑暗、潮湿、通风不良、照明不足等问题。现场施工中, 掘进、爆破、机械作业会产生大量粉尘和废气, 由于扩散效果不佳, 使得空气质量进一步恶化。另外, 地下环境湿度高, 易造成建筑材料受潮失效、机械设备发生锈蚀, 施工人员长期在该环境下也会危害身心健康。

(二) 风险隐患较多

地下隧道施工属于高风险作业, 受地质条件的不确定性影响

极大, 难以准确预测掌子面前方的隐伏断层、岩溶裂隙、软弱夹层等地质构造^[2]。若围岩应力失衡, 可能引起塌方事故, 高应力区域施工可能产生岩爆; 在岩溶发育地带, 可能出现涌水灾害; 部分矿区或含煤层隧道, 还可能存在瓦斯突出风险。因安全隐患多, 安全事故具有突发性, 不仅影响正常施工进度, 还可能造成人员伤亡和财产损失。

(三) 专业协同性强

地下隧道施工是高度系统化的工程作业, 需要多工种、多专业紧密协同配合, 涉及工程地质、结构设计、隧道掘进、机电安装、通风排水、安全监测等多个专业系统, 围岩开挖、支护、混

凝土浇筑、防排水等形成交叉作业。在这个过程中，工程地质勘察能提供数据支撑，制定科学合理的施工方案；通风排水系统可保障现场作业条件，安全监测能反馈并调整施工参数，任一环节配合不当均可能导致施工停滞，影响施工质量。

二、工程地质技术在地下隧道施工中的应用

地下隧道施工中，工程地质技术的应用贯穿全过程，通过把控工程地质条件、预判施工风险，为隧道施工方案制定、工艺优化和安全管控提供科学依据。

（一）设计勘察方案

设计勘察方案是工程地质技术应用的基础，根据隧道规划路线的地形、地貌特征，确定勘察范围与重点区段，采用多种勘察技术如物探、钻探取样、原位测试、遥感测绘等，制定相应的勘察方案，重点明确勘察点位、深度和测试指标^[3]。该方案的设计，既要满足施工需求，又要保证勘察精度，通过查明掌子面前方的未知地质条件，采集区域地质数据，为后续施工提供支持。

（二）分析地质结构

对隧道地质结构展开分析，能衔接勘察和施工两个环节。通过整合岩样试验数据、物探剖面资料、地质测绘成果，划分隧道沿线围岩的分级，明确不同区段岩石的物理力学特性；识别有无隐伏断层、岩溶裂隙、软弱夹层等不良地质构造，并确定这些构造的分布位置、规模和发育特征，生成地质构造分布图和剖面图。如此，可预判施工中可能出现的塌方、岩爆等风险，进而选择合适的掘进方式和支护结构，提高施工作业的安全性。

（三）测量水文数据

测量水文数据才能防控水文灾害，采用工程地质技术获取地下水位、分布范围，其一能测算不同区段的地下水涌水量，并对地下水的径流、排泄条件、补给方式予以分析；其二能测试地下水的品质指标，评估其对金属设备和混凝土结构的腐蚀性，采取不要的防护措施；其三能划分隧道涌水突泥风险区域，为防排水系统的设计提供精准支持，有效防控水文灾害^[4]。

（四）特殊地质处理

地下隧道施工中，常见的特殊地质有断层破碎带、软弱围岩段、岩溶发育区等，此类地质直接影响施工安全，必须进行针对性处理。采用工程地质技术，综合分析地质结构和水文数据，有助于制定科学可行的处理方案。例如，断层破碎带采用超前注浆加固方案，提高围岩的整体稳定性；软弱围岩段优化掘进循环进尺，配合锚喷支护及时封闭掌子面；岩溶发育区则超前钻探明确溶洞分布情况，进而采用填充、注浆等方案^[5]。注浆堵漏施工工艺见下图1。

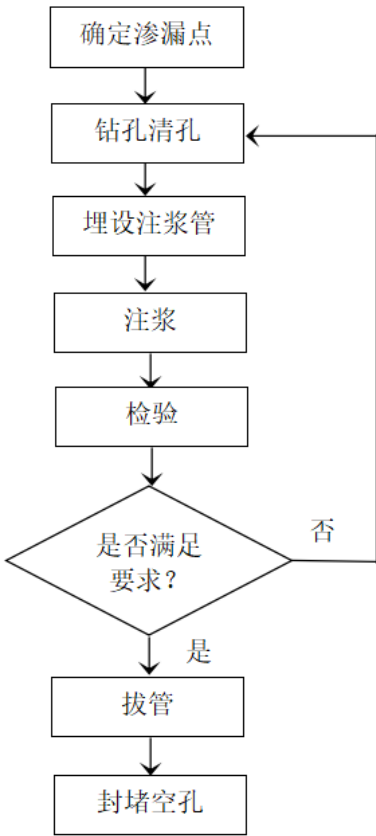


图1 注浆堵漏施工工艺流程图

三、典型案例分析

（一）地下隧道工程概况

某地下隧道工程位于低山丘陵区，沿线主要是侏罗统火山凝灰岩地层，且地质构造发育。施工过程中，隧道左线 K70+643 处掌子面发生突水事故，地下水具有明显的承压性，水平喷射距离为 5.2 m，初始突水量约 600 m³/d。随着地下水释放，突水流量减小，约 2 d 后水平喷射距离为 0。此次突水事故导致施工暂停 2 d，未造成人员伤亡，但部分施工设备浸水受损。为明确突水事故的发生原因，避免后续施工中再次发生，遂采用地质工程技术分析工程地质特征。

（二）工程地质分析

1. 围岩特征

突水段围岩主要是凝灰岩，具有明显的分层分布特征。其中，底部是红凝灰岩，厚度超过 2.2 m，岩石坚硬，含少量砾状岩屑；中部是黑凝灰岩，岩性单一，厚度约 40 cm；上部是绿凝灰岩，厚度约 1.2 m，含少量石英和长石晶屑。这三类岩石的物理力学参数见下表1，可见围岩的整体力学性能良好，微溶于水、透水性差，没有明显的软弱围岩段。

表1 突水段围岩的物理力学参数

岩石类型	密度 (g/cm ³)	弹性模量 (×10 ⁴ MPa)	泊松比	抗压强度 (MPa)	孔隙率 (%)	吸水率 (%)
红凝灰岩	2.66	1.94	0.12	104.8	21.2	0.23
黑凝灰岩	2.50	1.83	0.13	99.7	17.9	0.25
绿凝灰岩	2.62	1.98	0.12	107.2	19.4	0.24

2. 断层特征

突水段围岩的区域构造以脆性构造为主，勘察发现围岩受 F2 断层的直接控制，突水点与 F2 断层破碎带的最小距离仅为 65 m，是突水灾害发生的构造背景，见下图 2。对 F2 断层破碎带进一步分析，是由多条小断裂组成，断层面波状起伏且近于直立，与隧道中轴线的夹角约 45°。该断层破碎带属于张扭性断裂，断裂带内岩石破碎、节理密集，成为地下水赋存与运移的重要通道。

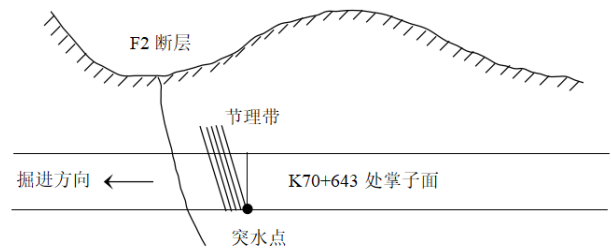


图2 突水点与断层带的关系示意图

3. 水文特征

突水段围岩的地下水系统，由地表水、风化层孔隙水、基岩裂隙水组成。①地表水是主要补给源，因项目所在地年均降雨量超过 1500 mm，且地表植被生长茂盛，有助于降水快速下渗。②风化层孔隙水为中间补给层，埋深 20–43 m，含水层厚约 18 m，渗透系数在 4.8–47.5 m/d 之间。③基岩裂隙水是突水的直接来源，主要赋存于 F4 断层带内，呈条带状分布，因凝灰岩透水性差，裂隙水难以向周围扩散进而形成承压水。

(三) 突水原因

根据隧道施工方案和地质勘察结果，本次突水事故的发生原因有三个：①在现代构造应力场的作用下，使凝灰岩构造裂隙发生张扭性变形，形成储水导水通道。而构造裂隙与地表相通，为地下水补给创造了条件。②区域降水量充足，大气降水持续补给风化层孔隙水、孔隙水下渗至基岩裂隙，在不断集聚过程中形成静水压力。③掌子面施工时，钻孔直接钻通了赋存承压水的节理带，打破了地下水的平衡状态，最终发生突水事故。

参考文献

[1] 中国新闻网. 中国已建成铁路公路隧道逾 5 万公里 创造数量和规模两项世界之最 [EB/OL]. 2025-10-16, <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1846115866095134281&wfr=spider&or=pc>.

[2] 付俊, 周罕, 王凯, 等. 玉维高速科色特长隧道地应力特征及工程地质意义 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(23): 10106–10111.

[3] 高芳芳, 邓睿, 王栋, 等. 托洛旋扭构造带隧道工程地质特征分析 [J]. 铁道工程学报, 2024, 41(6): 28–33.

[4] 王迎法, 牟儒, 赵鑫, 等. 云南沪腾公路高黎贡山深埋隧道工程地质特征与主要工程地质问题 [J]. 工程地质学报, 2025, 33(5): 2028–2039.

[5] 常兴旺, 宋章, 赵平, 等. 友谊隧道盐岩工程地质特征及防治对策 [J]. 铁道工程学报, 2021, 38(6): 26–31.

[6] 王喜才. 复杂地质条件下连拱隧道进洞施工关键技术 [J]. 交通世界, 2026, (22): 225–227.

[7] 朱双云. 滑坡工程地质水文地质勘察中物探技术的应用研究 [J]. 中国房地产业, 2026, (01): 222–224.

[8] 洪慧. 原位测试技术在工程地质勘察中的应用研究 [J]. 新城镇科技, 2025, 34(12): 152–154.

[9] 关利进, 满昌, 董红伟. 边坡工程地质勘察与稳定性分析技术应用 [C]// 中国国土经济学会. 2026 智慧城市建设与创新发展研讨会论文集. 天津: 华北地质勘查集团有限公司; 2025: 60–63.

[10] 莫云凯. 原位测试技术在水利工程地质勘察中的应用研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 4(20): 141–144.

(四) 防治技术措施

经综合分析，该隧道工程的围岩力学性能良好，突水裂隙较小且构造的控水性强，结合地质分析结果采取钻孔排水 + 注浆堵漏 + 超前预报的防治技术措施。

1. 钻孔排水

隧道掌子面施工中，当探测到前方存在节理群导水构造时，在掌子面下部沿掘进方向布置超前排水孔，根据构造裂隙的产状确定钻孔深度与角度，打穿储水裂隙带实现排水目标^[6]。同时，严格控制钻孔施工速度，避免钻孔施工时突发涌水，排水过程中监测涌水量与水压变化，消除承压水突涌风险。

2. 注浆堵漏

一方面，在掌子面掘进方向布置伞状排列的注浆孔，使用水泥 – 水玻璃双液浆作为注浆材料，根据围岩透水情况调整注浆压力，确保浆液充分填充裂隙、形成完整止水帷幕，切断地下水的运移通道^[7]。另一方面，隧道衬砌时铺设防水板、设置衬砌防水层，形成衬砌背后排水系统，防止地下水集聚破坏衬砌结构^[8]。

3. 超前预报

应用地质超前预报系统，对掌子面前方地质展开探测，根据岩体弹性波速的变化识别前方的地质构造。其中，位于 F2 断层构造附近，且构造裂隙产状与主断裂平行，则判定为高突水风险区。针对高风险区提前调整施工方案，实施超前钻孔排水、注浆堵漏等施工，达到主动预防的目标^[9]。

四、结语

综上所述，工程地质技术是地下隧道施工的核心技术支撑。结合隧道突水案例可知，通过工程地质分析制定钻孔排水、注浆堵漏等综合防治措施，后续施工未再出现突水问题，顺利通过 F2 断层带，提高了地下隧道施工的安全性与质量，可为类似隧道工程的建设提供借鉴^[10]。