

DOI: 10.7672/sgjs2026070093

富水深埋 TBM 隧道突涌水机理分析及反坡排水设计*

邱凌

(川藏铁路有限公司, 四川 成都 610045)

[摘要] 突涌水问题是富水深埋隧洞常面临的主要挑战之一。基于引汉济渭秦岭隧洞岭南 TBM 段工程, 结合突涌水实测数据及其时间和空间分布特征, 划分了 3 类典型突涌水, 并分析了各自产生机理; 分析了反坡 TBM 隧道突涌水防治特点, 提出了系统性排水总体方案, 并基于工程实际完成了突涌水排水具体设计, 详细介绍了反坡排水系统的设计、施工、设备选型及管理措施。结果表明, 排水设计降低了突涌水对特长深埋 TBM 隧洞反坡施工的制约, 保障了 TBM 设备安全。

[关键词] 水利工程; 隧洞; 突涌水; 反坡排水; 设计

[中图分类号] U456.3+2

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)07-0093-06

Water Inrush Mechanism Analysis and Reverse Slope Drainage Design in Water-rich Deep-buried TBM Tunnel

QIU Ling

(Sichuan-Xizang Railway Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610045, China)

Abstract: The problem of water inrush is one of the main challenges faced by water-rich deep tunnels. Based on the Lingnan TBM section project of the Qinling Tunnel in the Hanjiang-to-Weihe River Diversion Project, combined with the measured data of water inrush and its temporal and spatial distribution characteristics, three types of typical water inrush are divided, and their respective generation mechanisms are analyzed. The characteristics of water inrush prevention and control in reverse slope TBM tunnels were analyzed, and the overall scheme of systematic drainage was proposed. Based on the actual project, the specific design of water inrush drainage was completed. The design, construction, equipment selection, and management measures of the reverse slope drainage system were introduced in detail. The results indicate that the drainage design reduces the restriction of water inrush on the reverse slope construction of extra-long, deep-buried TBM tunnels and ensures the safety of TBM equipment.

Keywords: water conservancy project; tunnels; inrush water; reverse slope drainage; design

0 引言

随着西部大开发战略的持续推进以及南水北调等战略工程的大力兴建, 长距离、大埋深及复杂地质水文条件已成为新建隧道工程的典型特征, 而突涌水问题往往是隧道建设过程中面临的主要挑战之一^[1-8], 严重威胁施工装备正常使用及施工人员的安全, 且反坡施工隧道尤为突出。如何防治反坡隧道突涌水成为该类工程施工中的控制性问题。栗光前等^[9]结合长梁山隧道, 提出了隔站送

水增效法、长大隧道反坡多级排水法等反坡排水方案; 周国龙^[10]以玉蒙铁路秀山隧道为例, 提出了一套反坡排水系统, 并证明其适合特长隧道的快速施工; 冯艺^[11]以锦屏二级水电站 3 号施工支洞为例, 着重介绍了大型抽排水系统的设计, 并针对现场进行优化; 高文涛等^[12]以鹰嘴岩隧道为例, 采用净水压力的反坡排水新技术, 有效解决了涌水对隧道施工的影响; 贾锋^[13]将华丽高速公路营盘山隧道工程反坡排水分为斜井施工及斜井转正洞施工两个阶段, 根据突涌水特点具体介绍了隧道反坡排水设计关键技术参数。汲生虎^[8]依托实际工程, 在揭示地下水时空演化规律的基础上, 提出了隧道反坡分时排水系统, 建立了隧道反坡施工防排水成本计算模

* 中铁隧道局集团有限公司科研课题: 高原特长 TBM 铁路隧道智能化无轨运输系统与定额研究(隧研合 2023-26)

[作者简介] 邱凌, 高级工程师, E-mail: qiul789@qq.com

[收稿日期] 2025-08-13

型。然而既有研究对深埋长大隧道施工中复杂现场条件(如TBM机械空间限制、反坡排水动态变化)的适应性不足,导致其排水方案难以满足TBM隧道工程需求。本文依托引汉济渭秦岭隧道TBM段工程,结合工程中不同突涌水特点探讨了不同类型突涌水产生机理及特点,并分析了突涌水风险;对深埋、长大隧道洞内反坡排水技术进行深入探讨,详细介绍深埋长大隧道TBM工程反坡排水系统的设计、施工、设备选型及配套管理措施,以期对类似工程提供借鉴。

1 工程概况

引汉济渭工程是由汉江向渭河关中地区调水的陕西省内南水北调骨干工程,主要由黄金峡水库枢纽、黄金峡水源泵站、黄金峡至三河口输水工程、三河口水库和秦岭隧道等5个部分组成。其中,秦岭隧道越岭段全长81.779km,设计流量 $70\text{m}^3/\text{s}$,多年平均输水量15亿 m^3 ,采用2台TBM施工。

秦岭隧道沿线上覆岩体高程1050.000~2420.000m,标段地表水及地下水发育。TBM施工段岭南工程主洞起讫桩号为K28+085—K46+360,全长18275m,隧洞平均坡降1/2500,标段起始点底板高程531.536m,结束点高程524.148m,TBM自始发后反坡施工。工程平面布置如图1所示。

隧洞地表水较发育,主要为萝卜峪沟、木河、东木河,为常年流水沟,水量较大,受大气降水补给;地下水分布主要受构造、节理、裂隙发育和分布情况控制,表现为基岩裂隙水及构造裂隙水,水量较丰富,隧洞洞身段位于地下水位以下。地勘结果表明TBM施工段最大涌水量设计值为 $26412\text{m}^3/\text{d}$ 。

2 隧洞涌水机理及处置措施

2.1 涌水分类

根据引汉济渭秦岭隧洞岭南TBM段工程的实测数据,突涌水可划分为以下3类。

1)直涌型:地下水通过岩溶管道或宽大裂隙直接涌入隧道,具有瞬时性、压力衰减快的特点。实测涌水量变化特征曲线如图2所示。

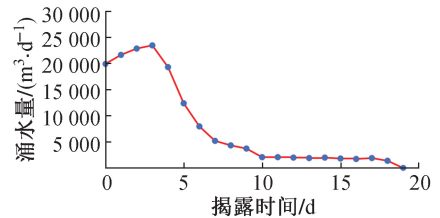


图2 直涌型涌水量曲线

Fig. 2 Water inrush flow curve of direct gushing type

2)冲溃型:充填物(如泥砂、碎石)在高压水作用下突然溃决,导致携带大量碎屑的涌水,具有滞后性、突发性和高破坏性。实测涌水量变化特征曲线如图3所示。

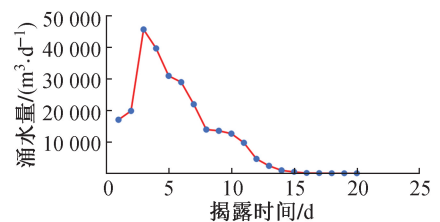


图3 冲溃型涌水大量曲线

Fig. 3 Water inrush flow curve of breach-type

3)劈裂型:高水头地下水通过微裂隙扩展形成劈裂通道,水流清澈但压力极高,常见于深埋、高地应力环境。实测涌水量变化特征曲线如图4所示。

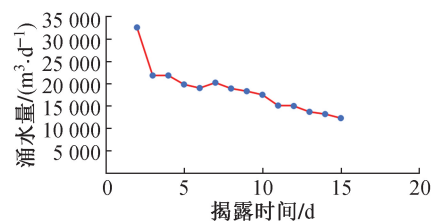


图4 劈裂型涌水量曲线

Fig. 4 Water inrush flow curve of split-type

2.2 地质与水文因素分析

突涌水的形成与以下地质和水文条件密切相关。

1)构造带与裂隙发育:区域性断层、节理密集

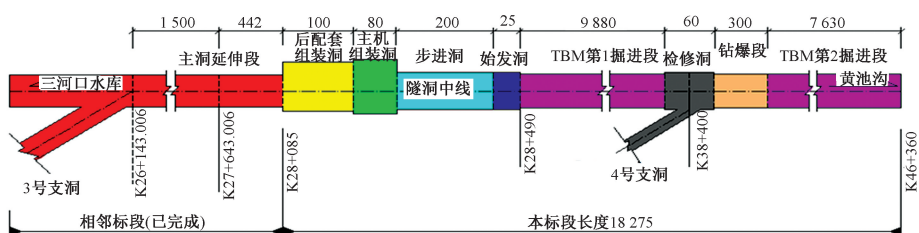


图1 秦岭隧洞TBM施工段岭南工程平面布置(单位:m)

Fig. 1 Layout of the Lingnan section of the TBM construction of the Qinling Tunnel (unit: m)

带为地下水提供了储集和运移的通道。例如,秦岭隧洞穿越的构造带中,基岩裂隙水与构造裂隙水的富集是突涌水的主控因素。

2)地下水压力与渗透性:高水头压力(如隧洞埋深达 2 420m 时,水压可达 24MPa 以上)是突涌水的驱动力。渗透性强的岩层(如溶蚀裂隙发育的灰岩)加剧了突涌风险。

3)隔水层完整性:隧洞开挖导致围岩卸荷,破坏隔水层(如泥岩夹层)的连续性,当水压超过隔水层抗渗强度时,突涌水发生。

2.3 TBM 施工扰动对突涌水的触发机制

TBM 施工对围岩的扰动是突涌水的直接诱因。

1)应力重分布:隧道开挖形成临空面,导致围岩应力场重新分布。在劈裂型突涌水中,高水压与地应力耦合作用下,微裂隙扩展形成贯通性劈裂面。

2)机械振动与破碎效应:TBM 刀盘切削岩体时产生的振动加剧了裂隙扩展,尤其是冲溃型突涌水中的充填物松动溃决。

3)排水不及时:反坡施工中,若排水系统能力不足,积水反流至掌子面,进一步软化围岩并降低其稳定性。

2.4 突涌水处置措施

突涌水处置策略可根据水文调控强度与工程目标差异,划分为全排水、部分排水及全封堵三类技术体系^[3]。全排水方案通过系统性抽排降低隧道内水压,但其大规模地下水排泄易引发区域性地下水位下降,导致地表沉降、植被退化等次生环境灾害,且长期排水可能加剧围岩渗透破坏,威胁隧道结构耐久性。全封堵技术依托高压注浆帷幕或防渗衬砌实现水力隔离,虽可最大限度降低生态扰动,但其工程可行性依赖于精准的超前地质预报、高强度注浆材料及结构防渗等级的协同保障,技术门槛及成本显著高于常规工法。

部分排水作为二者间的平衡策略,通过控制排水量(通常为总涌水量的 30%~70%)维持地下水系统动态平衡,在降低环境风险的同时,可大幅压缩处置成本。该体系的核心技术为注浆堵水,具体包括:①超前注浆堵水,针对高风险富水带(如断层破碎带、岩溶管道),在掌子面前方 10~30m 范围内实施扇形钻孔注浆,形成主动连续止水帷幕;②径向注浆堵水,针对局部渗漏区,在隧道轮廓线外 2~4m 范围内进行放射状注浆,填充围岩裂隙(孔隙率降低至 $\leq 3\%$),主要用于修复既有渗漏通道。

3 反坡 TBM 隧道排水设计分析

3.1 排水系统、环境、工况特点分析

本工程主洞采用 TBM 逆向坡降掘进实施独头掘进作业,施工段距离长,水文地质条件呈现裂隙水发育特征,洞内涌水频繁且单点出水量大。在受限空间条件下,TBM 主机系统、连续带式输送机等大型装备的集成化布局对排水系统的管路敷设形成空间干涉效应,显著加剧了反坡排水工况下的水力学梯度控制难度。

特别指出的是,TBM 在硬岩地层掘进过程中,刀具-岩体界面产生的岩屑呈现多尺度分布特征($d_{50} < 5\text{mm}$),其中片状剪切碎屑与粉末状研磨颗粒形成固液两相流体系。此混合介质对排水泵组的过流部件产生复合型磨蚀作用,同时存在临界粒径导致的泵腔堵塞风险。

该工况对排水设备选型提出了双重技术要求:一方面需满足高扬程、大流量的流体输送能力,另一方面需具备多级过滤装置(过滤精度 $\leq 2\text{mm}$)和耐磨合金内衬结构($\text{HRC} \geq 60$),以应对高含固量流体的输送需求。

3.2 风险分析

TBM 穿越富水洞段时,渗流-损伤耦合效应引发掌子面后方积水深度持续上升,影响隧洞下部仰拱施工、清渣、材料吊装,并显著降低有轨运输系统效率。持续渗水环境加速了 TBM 主轴密封圈老化及变频器绝缘失效,致使设备故障间隔时间大幅缩短。

在穿越断层带等极端工况下,渗透压力驱动的围岩渐进破坏可诱发瞬时塌方,导致刀盘扭矩骤增及撑靴接触压力,最终引发 TBM 姿态失稳。岭南标段典型的长距离反坡与大落差组合工况,使排水系统面临非稳态流态挑战。

3.3 设计原则

1)TBM 隧道突涌水防治遵循“堵、排、探结合,因地制宜,综合治理”的原则。

2)以堵水可靠、排水畅通、经济合理、减小对生态影响为目的,TBM 隧道堵水以超前注浆为主,径向注浆为辅,堵、排水比值控制在 7:3。

3)涌水量预估值取最大设计涌水量与揭露段注浆封堵后最大涌水量之和,排水系统能力按“宁强毋弱”原则配置,排水系统最大排水能力不小于涌水量预估值。

4)泵站与集水坑间距、容积应按实际排水量并结合对 TBM 施工的影响程度综合确定,其设置的位置不得影响洞内运输和安全。

5) 施工工作面排水设临时集水坑接力抽排至洞外,已施工地段经仰拱跳段并安装轨排,待 TBM 掘进过后用轨道加高的方式形成泵站。

6) 针对本项目洞内距离长、坡度大、水量高的特点,在 3 号支洞主支洞交叉处设置 6m 高拦水坝,在上游延伸段形成大型水仓,从而增大洞内中转水仓的储水能力,在支洞排水设施出现故障时有较好的缓冲功能。

3.4 总体方案

结合工程地质情况及施工过程中揭示的隧洞渗涌水情况明确突涌水类型,合理进行隧洞可能出现的最大涌水量评估,确定排水设施的排水能力,然后根据实际情况分析合理布置排水泵站与集水坑(间距与容量),计算排水管路的组合配置方式,最后再针对性开展水泵选型及其他配套设施完善。

4 反坡排水系统设计

4.1 泵站位置及容量设置

基于工程区水文地质勘探数据,采用分级动态排水系统设计原则,主洞设置五级永久泵站与 TBM 随机移动泵站(包括掌子面泵站和移动泵站)组成的复合排水体系。永久泵站依据涌水量空间异质性分布特征进行优化布设:1 号泵站位于步进洞起始段,2~5 号泵站间距控制在 1 850~2 150m,精准定位于涌水量峰值区。构建三级导排路径(掌子面→移动泵站→永久泵站→3 号支洞水仓),3 号支洞上游水仓作为核心枢纽,配备智能水位监测系统(精度±5cm),当水位超过警戒阈值($H=5.0\text{m}$)时,自动启动 3 台并联离心泵进行洞外导排。

1 号泵站水仓由步进洞纵断面 V 形底板形成,容量约 400m^3 ,2~5 号泵站水仓容量为 400,350,300,300 m^3 。在泵站与泵站之间根据实际 TBM 掘进出水情况动态设置临时截水坑,防止隧洞出水回流至掌子面增加施工难度与抽排水压力。

4.2 最大涌水量预估及排水能力确定

已揭露段注浆封堵后隧洞最大涌水量约为 $14\ 800\text{m}^3/\text{d}$,1~5 号泵站最大涌水量设计值分别为 26 412,24 284,15 532,17 654 m^3/d ,根据设计原则并考虑泵站所处位置,其中 1 号和随机泵站排水系统最小排水能力不应小于其他各级泵站预估最大涌水量的最大值,各级泵站最大涌水量预估及最小排水能力取值如表 1 所示。

4.3 排水管路选定

TBM 掘进施工期间,排水管路宜按照大管配小管、永临结合、方便现场施工的原则进行设置,小管道可作为日常排水使用,大管道作为隧洞出现较大

表 1 各级泵站最大涌水量预估及最小排水能力取值

Table 1 Estimation of maximum water inrush flow and minimum drainage capacity for each level of pumping station

泵站名称	最大涌水量设计值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	预估最大涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	排水系统最小排水能力/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
1 号泵站	—	—	41 212
2 号泵站	26 412	41 212	41 212
3 号泵站	24 284	39 080	39 080
4 号泵站	15 532	30 332	30 332
5 号泵站	17 654	32 454	32 454
TBM 随机泵站	—	—	41 212

突涌水情况下应急排水启用。抽排水经济流速按照 1.7~2.5 m/s 取值。各种材质、管径水管在经济流速范围内的流量如表 2 所示。

表 2 各种材质、管径水管在经济流速范围内的流量

Table 1 Flow rates of pipes with various materials and diameters under economic velocity conditions

序号	管材	管径/ mm	经济流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	经济流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
1	钢管	200	1.7~2.5	192~282
2	钢管	300		432~636
3	PE 管	250		300~441
4	PE 管	400		622~962

4.4 水泵选定

各级泵站排水能力按由内而外递增选配。由于水中含有岩石颗粒、喷射混凝土的回弹杂物及油污等,泥浆泵及潜水泵在运行中受水中杂质的影响较大,因此水泵主要采用单级双吸式离心泵(single-stage, double-suction centrifugal pump,简称 SN)和潜水排污泵(QW)。水泵所需扬程主要由以下三部分组成。

1) 排水净高度 H 。

2) 管路沿程阻力损失 h_1

$$h_1 = \lambda \cdot (L/D) \cdot (V^2/2g) \quad (1)$$

式中: V 为流速 (m/s),一般取 $V = 4Q_{Z_{\max}} / (3\ 600 \times \pi D^2)$; λ 为常数,一般取 0.03; L 为单趟管路长度 (m); D 为管径 (m); $Q_{Z_{\max}}$ 为排水流量 (m^3/s); g 为重力加速度 (m/s^2)。

3) 局部阻力损失

$$h_2 = Z \cdot \xi \cdot (V^2/2g) \quad (2)$$

式中: Z 为局部管件个数; ξ 为阻力系数,按 90° 弯头 $\xi=0.25$,底阀 $\xi=6$,闸阀 $\xi=0.1$,止回阀 $\xi=2$ 。

所选水泵的扬程应大于以上三部分之和($H+h_1+h_2$)。通过计算可知,针对不同管径的水管,在经济流速内对应的水泵扬程如表 3 所示。

表 3 水泵扬程计算

Table 3 Pump head calculation

序号	管材	管径/ mm	经济流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	对应的 水泵扬程/m
1	钢管	200	192~282	56~123
2	钢管	300	432~636	40~84
3	PE 管	250	300~441	87~187
4	PE 管	400	622~916	29~62

根据表 2 和表 3,并结合设计原则与水泵选型手册,配置水泵型号及相应的参数如表 4 所示。

结合主洞选用水泵参数,综合考虑水泵性能参数和不同尺寸管道经济流量,进行各级泵站水管及水泵配置,计算 TBM 掘进施工期间主洞各级泵站的经济最大排水能力均不小于对应泵站排水系统最小排水能力要求,如表 5 所示。

4.5 供电配置

TBM 施工条件下,为降低安全风险,应考虑设置备用电源。根据现场设备配置情况,采用需要系

数法进行负荷计算。各级泵站供电配置如下:1 号和 2 号泵站分别配置 1 台 1 500kVA,20/0.4kV 变压器,3 号泵站可配置 1 台 1 000kVA,20/0.4kV 变压器,4 号和 5 号泵站分别配置 1 台 800kVA,20/0.4kV 变压器,均从洞壁敷设的 20kV, YJV22-3×120mm² 高压电缆 T 接降压后供排水设备使用。

TBM 随机泵站使用 TBM 配置的 2500kVA,20/0.4kV 变压器,降压后直接供排水设备使用。

4.6 排水作业管理措施

在隧洞反坡排水系统实际运行过程中专门成立了抽水管理班组,并制定了抽排水系统运行与维保的管理措施,同时做好抽排水情况记录,发现问题及时处理,并进行总结分析。

5 结语

引汉济渭岭南 TBM 标段自反坡排水方案实施以来,隧洞涌水得到了第一时间抽排,同时排水设施配置合理,也具备较好的应急能力,较大程度降

表 4 主洞水泵参数

Table 4 Pump parameters of main cave

序号	水泵型号	功率/kW	扬程/m	流量/ m^3	配套管路	备注
1	SN200-N7/305	110	70~110	388~0	200mm 钢管	—
2	SN250-M6/410	110	48~67	580~0	250mmPE 管	—
3	SN300-N6/445	185	60~73	675~0	300mm 钢管	—
4	SN400-N9/446	280	30~68	2 100~0	400mmPE 管	—
5	QW400-30-55	55	30	400~0	200mm 钢管	掌子面
6	QW200-16-18.5	18.5	16	200~0	150mm 橡胶管	掌子面
7	QW55-30-1170	55	30	1 170~0	300mm 钢管	掌子面

表 5 TBM 主洞各级泵站抽排水能力

Table 5 Pumping capacity of each level of TBM main tunnel pumping stations

项目名称 泵站名称	水管配置	水泵配置	每趟管路经济 最大排水能力/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	各级泵站经济 最大排水能力/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	备注
1 号泵站	3 趟 200mm 钢管	3 台 SN200-N7/305	3×282	2 249	—
	1 趟 250mmPE 管	1 台 SN250-M6/410	1×441		
	1 趟 400mmPE 管	1 台 SN400-N9/446	1×962		
2 号泵站	3 趟 200mm 钢管	3 台 SN200-N7/305	3×282	2 249	—
	1 趟 250mmPE 管	1 台 SN250-M6/410	1×441		
	1 趟 400mmPE 管	1 台 SN400-N9/446	1×962		
3 号泵站	2 趟 200mm 钢管	2 台 SN200-N7/305	2×282	1 967	—
	1 趟 250mmPE 管	1 台 SN250-M6/410	1×441		
	1 趟 400mmPE 管	1 台 SN400-N9/446	1×962		
4 号泵站	2 趟 200mm 钢管	2 台 SN200-N7/305	2×282	1 526	—
	1 趟 400mmPE 管	1 台 SN400-N9/446	1×962		
5 号泵站	3 趟 200mm 钢管	3 台 SN200-N7/305	3×282	1 808	—
	1 趟 400mmPE 管	1 台 SN400-N9/446	1×962		
TBM 随机泵站	2 趟 200mm 钢管	2 台 SN200-N7/305	2×282	1 526	至 5 号泵站水仓
	1 趟 400mmPE 管	1 台 QW1170-30-55	1×962		
	2 趟 200mm 钢管	2 台 QW400-30-55	2×282	564	至 TBM 随机泵站水仓

注:总排水能力按照每台水泵每天工作 20h 计算

低了对施工的制约,降低了TBM设备安全风险,也对生态环境的可持续发展起到了积极作用,所得结论如下。

1)根据突涌水发生的时间和空间特征,依托工程突涌水分为直涌型、冲溃型和劈裂型三类。

2)富水深埋隧道突涌水量的准确预测极为困难,排水系统设计需基于最大设计涌水量与揭露段注浆封堵后涌水量的叠加效应,遵循“宁强毋弱”原则配置冗余排水能力。

3)排水管路的布置宜按照大管配小管、永临结合、方便现场施工的原则进行设置。TBM隧道中应利用已掘进成型断面来设置泵站与水仓,泵站间距根据保证及时抽排与方便施工的原则确定,TBM后配套应自带随机泵站,并配备大容量水箱。硬岩TBM隧道水中石粉含量高,选潜污泵或泥浆泵,降低故障率,多级泵需正压进水保护设备。为保证排水的持续性,应配备排水双电源或者备用电源。

4)富水深埋隧洞地下水分布、涌水类型判定及涌水量估计是制定突涌水防治措施和降低突涌水危害的关键,合理的排水系统设计是重要保障。由于现有技术水平有限,还不能完全准确进行预测,需要继续创新研发先进预测手段,结合有效的水文地质勘测,方可进一步降低对最大涌水量的预测误差。

参考文献:

- [1] 吴志军,戴骞,储昭飞,等.基于DNN和属性数学的岩溶隧道突涌水风险预测[J].中国公路学报,2024,37(7):82-99.
WU Z J, DAI Q, CHU Z F, et al. Risk prediction of water inrush in karst tunnels based on DNN and attribute mathematics[J]. China journal of highway and transport, 2024, 37(7): 82-99.
- [2] 傅鹤林,安鹏涛,伍毅敏.断层与隧道位置关系对突涌水的影响研究[J].铁道工程学报,2023,40(9):78-83,91.
FU H L, AN P T, WU Y M. Study on the influence of the relationship between fault and tunnel location on water inrush[J]. Journal of railway engineering society, 2023, 40(9): 78-83, 91.
- [3] 张建峰,郑晓悦,于国亮,等.富水炭质千枚岩隧道突涌水灾变机制及防控措施研究[J].现代隧道技术,2022,59(5):221-227,236.
ZHANG J F, ZHENG X Y, YU G L, et al. Study on water inrush mechanism and control measures for water bearing carbonaceous phyllite tunnels[J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59(5): 221-227, 236.
- [4] 傅鹤林,安鹏涛,李凯,等.围岩非均质性对隧道突涌水的影响分析[J].岩土力学,2021,42(6):1519-1528.
FU H L, AN P T, LI K, et al. Analysis of influence of surrounding rock heterogeneity on water inrush in tunnel[J]. Rock and soil

mechanics, 2021, 42(6): 1519-1528.

- [5] 夏邵君,党亮.强涌水隧道长距离反坡施工及涌水处理关键技术研究[J].施工技术(中英文),2021,50(18):40-45.
XIA S J, DANG L. Research on key technology of long distance reverse slope construction and water gushing treatment of strong water gushing tunnel[J]. Construction technology, 2021, 50(18): 40-45.
- [6] 刘博,王宁,汪伟华,等.长大隧道富水围岩防渗施工关键技术研究[J].施工技术(中英文),2025,54(10):71-76.
LIU B, WANG N, WANG W H, et al. Research on key technology of seepage prevention construction of rich-water surrounding rock of long tunnel[J]. Construction technology, 2025, 54(10): 71-76.
- [7] 李豫馨,夏强,许模,等.隧道开挖过程涌水量的动态模拟[J].现代隧道技术,2015,52(5):125-130,144.
LI Y X, XIA Q, XU M, et al. Dynamic simulation of water inflows during tunnel excavation[J]. Modern tunnelling technology, 2015, 52(5): 125-130, 144.
- [8] 汲生虎.长大深埋富水隧道施工期排水量控制及反坡排水系统研究[D].成都:西南交通大学,2023.
JI S H. Study on displacement control and reverse slope drainage system during construction of long, deep and rich water tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.
- [9] 粟光前,宫海军.长梁山隧道进口区段(DK20+105—DK24+720)反坡施工排水综述[J].工程力学,2000,17(S2):828-830.
SU G Q, GONG H J. Summary of drainage in reverse slope construction at the entrance section of Changliangshan Tunnel (DK20+105—DK24+720)[J]. Engineering mechanics, 2000, 17(S2): 828-830.
- [10] 周国龙. I级高风险特长隧道反坡排水方法探析[J].交通标准化,2011(16):141-144.
ZHOU G L. I-class high-risk long tunnel anti-slope drainage method analysis[J]. Communications standardization, 2011(16): 141-144.
- [11] 冯艺.大型抽排水系统在富水反坡隧道施工中的应用[J].国防交通工程与技术,2011,9(5):57-60,49.
FENG Y. The application of the heavy-duty draining system to the construction of the rich-watered, adverse grade tunnel[J]. Traffic engineering and technology for national defence, 2011, 9(5): 57-60, 49.
- [12] 高文涛,吴志刚.反坡排水技术在隧道涌水处理中的应用[J].土工基础,2012,26(2):16-18.
GAO W T, WU Z G. Counter slope drainage applications in mitigating of groundwater and mud gushing in the tunnel construction[J]. Soil engineering and foundation, 2012, 26(2): 16-18.
- [13] 贾锋.山岭特长隧道斜井反坡排水施工技术[J].公路,2018,63(7):347-351.
JIA F. Construction technology of reverse slope drainage in inclined shaft of mountain extra-long tunnel[J]. Highway, 2018, 63(7): 347-351.