

山岭隧道大规模突涌超前处治施工方案研究

张 鹏¹, 倪汉杰¹, 谷晴天¹, 易领兵², 程梓铭³

(1. 中铁隧道局集团(上海)特种高新技术有限公司, 上海 201306; 2. 郑州城建职业学院, 河南 郑州 450001; 3. 河南工程学院, 河南 郑州 451191)

摘要: 山岭隧道穿越复杂地质构造时, 突泥涌水灾害严重威胁施工安全与进度。文章以某隧道突涌处治工程为例, 系统分析了突涌成因, 并提出“左洞加固、右洞引排、堵排结合”的综合处治方案, 重点优化超前帷幕注浆工艺: 采用分段前进式注浆结合超细水泥材料, 提升砂层浆液扩散能力; 优化注浆段长至 25 m, 提高施工效率; 辅以泄水孔与止浆墙控制地下水动态平衡。现场施工过程中, 注浆范围覆盖拱部开挖线外 6 m, 材料选用水泥砂浆、单液浆、水泥-水玻璃双液浆及超细水泥, 结合 PVC 管孔底注浆工艺, 确保浆液充填率超 80%。检查孔压水试验显示透水率均小于 2 Lu, 验证了加固可靠性。同时, 拱部设置 $\varnothing 108$ mm 超前管棚支护, 辅以动态监测机制, 实时预警异常工况。结果表明: 优化方案有效解决了富水破碎围岩加固难题, 开挖后浆脉分布均匀, 围岩稳定性显著提升。本文成果可为类似地质条件下隧道突涌灾害的超前处治提供技术参考。

关键词: 山岭隧道; 突涌处治; 超前帷幕注浆; 管棚支护; 泄水降压

中图分类号: U453.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)11-0067-08

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.11.140

Study on the construction program of large-scale surge overrun treatment for mountain tunnels

ZHANG Peng¹, NI Hanjie¹, GU Qingtian¹, YI Lingbing², CHENG Ziming³

(1. China Railway Tunnel Group (Shanghai) Specialized High-Tech Co., Ltd., Shanghai 201306, China;
2. Zhengzhou Urban Construction Vocational College, Zhengzhou 450001, Henan, China;
3. Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, Henan, China)

Abstract: When mountain tunnels traverse complex geological structures, mud intrushes and water gushing disasters seriously threaten construction safety and progress. Taking a tunnel surge treatment project as an example, this paper systematically analyzes the causes of surge disasters and proposes an integrated treatment scheme of “left tunnel reinforcement, right tunnel drainage, combination of plugging and drainage”. Key optimizations were made to advanced curtain grouting technology: 1) Adopting segmented forward grouting combined with ultra-fine cement materials to enhance slurry diffusion capability in sand layers; 2) Optimizing grouting section length to 25 m to improve construction efficiency; 3) Implementing drainage holes and grout walls to control groundwater dynamic equilibrium. During field construction, the grouting range covered 6m beyond the arch excavation line. Multiple materials including cement mortar, single-fluid slurry, cement-sodium silicate dual-fluid slurry, and ultra-fine cement were selectively used with PVC pipe bottom grouting technology, achieving over 80% grout filling rate. Water pressure tests in inspection holes revealed permeability rates below 2Lu, verifying reinforcement reliability. Additionally, $\varnothing 108$ mm advanced pipe roof support was installed in the arch

收稿日期: 2025-03-13

基金项目: 企业自研课题(TY-2025-05); 河南省科技厅自然科学基金资助项目(162102210188); 河南省建筑业协会科研开发项目(YJX-2023-K01、YJX-2023-K02)

作者简介: 张 鹏(1999—), 男, 硕士研究生, 从事隧道与地下工程的施工与技术管理。

通信作者: 倪汉杰(1991—), 男, 工程师, 从事隧道及地下工程注浆加固方面的施工及管理工作。

section complemented by real-time dynamic monitoring for early warning of abnormal conditions. Results demonstrate that the optimized solution effectively addressed water-rich fractured surrounding rock reinforcement challenges, showing uniform grout vein distribution and significantly enhanced rock stability post-excavation. The research outcomes provide technical references for advanced treatment of tunnel surge disasters under similar geological conditions.

Key words: mountain tunnel; surge treatment; overcurtain grouting; tube shelter support; water drainage and pressure relief

山岭隧道穿越复杂地质构造时,常遭遇突泥涌水灾害,尤其在可溶岩与非可溶岩接触带,地下水富集与岩溶发育加剧了施工风险。注浆技术作为治理突涌的核心手段,其材料选择、工艺设计及质量控制直接决定工程成败。

林之恒等^[1]针对高原隧道断层破碎带突泥灾害,采用现场调查、地面物探、洞内地震波反射法及瞬变电磁法开展综合预报,结合超前钻孔验证,提出富水断层破碎带三维物探分析技术,明确了超前注浆与钢架支护结合的加固措施。许劲松等^[2]针对第三系粉细砂半成岩突涌问题,通过地表深井降水与洞内排水方案比选,研发超前密管棚联合水平高压旋喷桩的立体支护体系,建立包含“四台阶五步交错开挖工法”的施工关键技术,形成“地表-洞内”协同降水技术路径。戴志仁等^[3]基于岩溶区地下水径流特征分析,揭示突水涌沙与泥沙物源运移的耦合机制,提出“径向注浆堵水+环向盲管引排”的限量排放实施方案。张建峰等^[4]通过能量演化三阶段(储存-释放-触发)理论解析,阐明炭质千枚岩突涌水灾变中弯曲、剪切、渗透复合破坏机理,构建包含预注浆参数优化、密排中管棚超前支护的风险段落分级防控体系。凌涛等^[5]依托平阳隧道突泥案例,采用 FLAC^{3D}数值模拟量化注浆加固圈厚度与围岩塑性区演化规律,验证“径向注浆+锁脚锚管”组合方案对突涌抑制的有效性。贾建波等^[6]针对 TBM 卡机事故,创新性实施突涌体两端注浆加筋挡墙技术,结合地表深孔加固与洞顶塌坑回填工艺,形成“支护加强-溃口封堵-应力重分布”的阶梯式处治策略。杨华等^[7]通过迂回导坑探明岩溶接触带涌泥边界,采用“水平旋喷桩+ $\varnothing 108$ mm 超前管棚”构成复合承载拱,配合三台阶拆换工艺与临时仰拱横撑,实现大变形段落的动态支护转换。龙洪等^[8]基于六宜高速公路岩溶突泥事故,提出“溶腔探查-钢花管注浆-型钢支撑”递进式处治工法,通过拱顶沉降与收敛位移双控指标验证处治后围岩长期稳定性。尚海敏等^[9]以黄

木尖隧道为例,通过物探解译与富水性模型验证,分析富水空间分布特征,建立多重介质等效连续模型进行涌水动态模拟,为预测隧道施工突涌水风险进行了定性与定量分析。冯应等^[10]以西谷隧道为依托,考虑不同破碎带构造及地下水特征,建立三维离散元-裂隙流耦合模型,明确灾害模式并分析岩体裂隙扩展与渗流演化规律。傅鹤林等^[11]构建涌水简化模型并推导涌水量与外水压力公式,探讨了断层与隧道位置对涌水的影响,并通过工程案例验证模型合理性,同时开展参数敏感性研究以揭示断层作用规律。李维瑞等^[12]针对 CRD 法在大断面隧道中临时支撑工程量大问题,提出双层大倾角管棚注浆+上台阶 CD 法新型施工方法,并通过数值模拟与现场监测对两种方案进行对比分析。许增光等^[13]系统综述隧道注浆技术研究现状,梳理模型试验、材料研发、智能控制等领域的优缺点与发展趋势。

本文以某隧道突涌处治工程为例,针对四次大规模突涌,系统分析突涌成因,通过地质分析、注浆方案设计与现场试验,提出一套包含超前帷幕注浆、堵排结合及径向注浆的综合施工方案技术体系,以期可为其他研究提供参考。

1 工程概述

1.1 工程概况

某隧道为越岭隧道,正交穿越马鞍山。隧道按左、右线分离式设计,隧道间距为 40 m;隧道进口左洞施工至 Z1K25+097(右洞 K24+937)位置,在 2023 年 7 月—12 月期间,进口累计发生 4 次大型突泥涌水事件,突涌量超 45 万方。隧道突涌位置洞内平面关系如图 1 所示。

2 突涌过程及原因分析

2.1 突涌情况简述

2023 年 4 月—12 月期间,隧道进口施工发生多次突泥涌水,7 月—12 月 Z1K25+097 里程累计

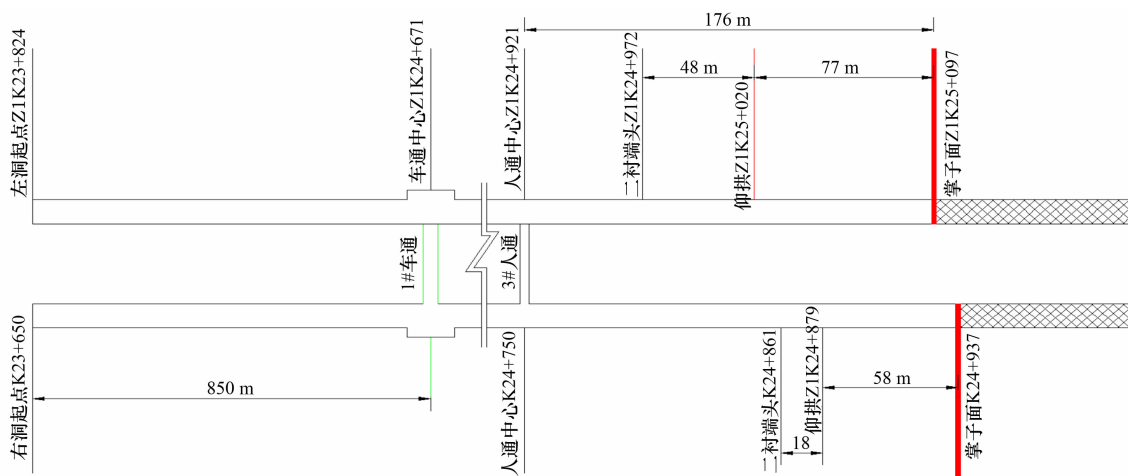


图 1 隧道突涌位置洞内平面关系

发生 4 次大型突涌事件, 总突泥量超 45 万方。

4—5 月 Z1K24 + 067 ~ 097 段因岩体破碎且地下水活跃 (流量 100 ~ 150 m³/h), 引发小型塌方约 1 200 m³; 5 月 25 日该段水量增至 150 ~ 200 m³/h, 地下水冲刷导致拱顶滑塌, 冲出物质以粒径 2 ~ 10 cm 的石英砂岩碎块石为主; 7 月 11 日连续 9 次涌突, 突涌总量约 2 700 m³。涌突物质主要为石英砂岩、全风化灰白色石英砂岩 (呈砂状) 及少量淤泥, 突后持续涌水量达 150 ~ 170 m³/h。7 月 12 日中午基本完成掌子面反压回填。

隧道进口左洞第一次突涌: 2023 年 7 月 12 日晚, 左洞已反压回填掌子面突发溃口突涌, 涌突物质主要为淤泥夹白云岩角砾的黏土团块及强风化白云岩块石, 本次涌出约 5 万方 (固体 1.46 万方), 涌突物可见岩溶充填物, 推测与溶洞连通, 突后水流恢复至 160 ~ 180 m³/h。

隧道进口左洞第二次突涌: 2023 年 7 月 15 日, 左洞突发异常响声, 涌出水量增大, 随后发生大量突泥涌水, 洞口突泥涌水高度近 60 cm, 突涌结束后估计涌出量近 10 万方 (其中固体物质约 2.6 万方), 本次涌出物为水夹泥沙及黄色、灰色白云岩块石, 突涌结束后, 洞口淤泥厚度 20 ~ 40 cm, 本次涌突结束后水流回降至 40 ~ 60 m³/h。

隧道进口左洞第三次突涌: 2023 年 7 月 23 日凌晨, 左洞再次发生突涌。经现场排查清理, 洞内冲刷水位线高度约 3.0 m, 经估算本次突涌物约 18.2 万方, 洞内残留约 3.5 万方。

隧道进口右洞第一次突涌: 2023 年 12 月 3 日

下午, 隧道进口右洞发生突涌, 持续 30 min, 突涌方量约 2 万方。

2023 年 7 月突涌后, 现场对左右洞进行地下水监测, 根据监测记录, 左洞突涌后水量基本维持在 400 ~ 680 m³/h, 右洞维持在 80 m³/h 左右, 直至 2023 年 12 月右洞 K24 + 937 掌子面发生突涌后, 右洞水量基本维持在 430 m³/h 左右, 左洞水量减少至 15 m³/h 左右。图 2 为突涌后洞内现场情况。



图 2 突涌后现场情况

2.2 突涌原因分析

隧道进口突涌成因可归结为以下关键地质与工程因素:

(1) 构造 - 岩性协同作用: 隧道穿越区域受呷过断层及 F1 - 1 次级断层 (图 3) 影响, 岩体呈现强烈节理裂隙发育与差异风化特征, 其中左洞 Z1K24 + 990 及右洞 K24 + 896 段薄层泥岩 - 砂岩互层经地下水长期软化作用形成破碎软弱带, 局部泥页岩砂化呈土状, 石英砂岩碎裂化显著。

(2) 接触面岩溶 - 水力耦合致灾: 在可溶岩 (白云岩) 与非可溶岩接触带 (左洞 Z1K25 + 150/右洞 K24 + 977) 形成高势能地下水富集区 (实测水压 1.5 ~ 1.9 MPa), 岩溶作用沿接触面发育串珠状充填

溶洞(含黑褐色白云岩角砾黏土及有机质腐殖层),溶洞静储水与破碎岩体构成渗流-坍塌连锁通道。隧道开挖扰动引发接触带水力平衡破坏,导致溶洞充填物与软化围岩混合突涌(单次峰值流量达 $680 \text{ m}^3/\text{h}$)。

(3) 注浆固结不均引发渗透失稳:右洞 K24 + 937 段注浆虽有效封堵主体裂隙(浆脉充填率达 83%),但钻孔揭露局部存在砂层(涌砂段厚度为 6 m)及黏土夹层(占比 12%),形成注浆薄弱区。施工验证显示,掌子面左侧拱脚残留未完全固结的砂-黏土复合体,在 1.7 MPa 水压作用下发生渐进式渗透破坏,最终诱发突涌。

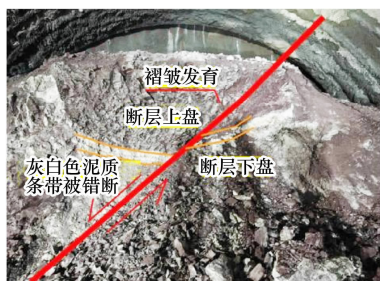


图 3 F1-1 断层在右洞 K24 + 896 中
台阶开挖揭示情况示意

2.3 清淤后进口左右洞基本情况

2024 年 6 月完成进口左洞的清淤工作,清淤后进口左洞现场如图 4 所示,左洞 Z1K25 + 048 ~ Z1K25 + 097 横断面左侧拱架垮塌,自右洞发生涌突后左洞地下水流量大幅减少并长期稳定在 $10 \sim 20 \text{ m}^3/\text{h}$,右洞地下水流量远大于左洞且长期稳定在 $400 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右。

3 超前处治方案

3.1 总体处治方案

基于目前进口左右洞的基本情况,坚持右洞

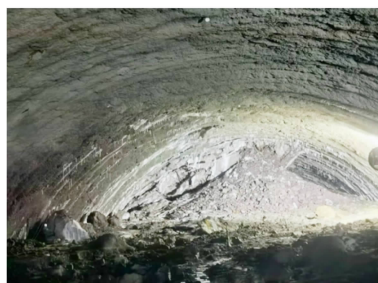


图 4 进口左洞 Z1K25 + 048 位置坍塌情况

排水降压,优先处治左洞涌突为总体处治原则。制定“左洞加固,右洞引排,堵排结合,径向注浆”相结合的注浆加固方案。

3.1.1 左洞加固

隧道左洞处置方案布置见下图 5 所示。隧道超前支护体系优化设计如下:超前帷幕注浆 Z1K25 + 038 ~ + 096 第段设两环超前帷幕注浆固结隧道上半断面周边破碎围岩,第一循环(ZK25 + 038 ~ + 068)与二循环(ZK25 + 066 ~ + 096)均设置 30 m 注浆段及 28 m 和 25 m 开挖段。浆液扩散半径 2 m,注浆孔底间距 2.5 m,作用范围覆盖拱部开挖线外 6 m 区域。支护体系采用 $\varnothing 108 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 管棚结构,首环管棚长 6 m(环向间距 0.3 m,外插角 $\leq 25^\circ$),后续管棚长 15 m(环向间距 0.3 m,外插角 $\leq 12^\circ$),纵向搭接长度 $\geq 3 \text{ m}$ 。施工过程中建立动态监测机制,对顶钻、突钻、涌水等异常工况实施实时预警与工法调整。

3.1.2 右洞引排

左洞帷幕注浆加固完成进行开挖期间,在右洞打设探孔探查右洞水流来源并进行引流,将掌子面的水提前引排出去,保证后期右洞能够正常开挖。

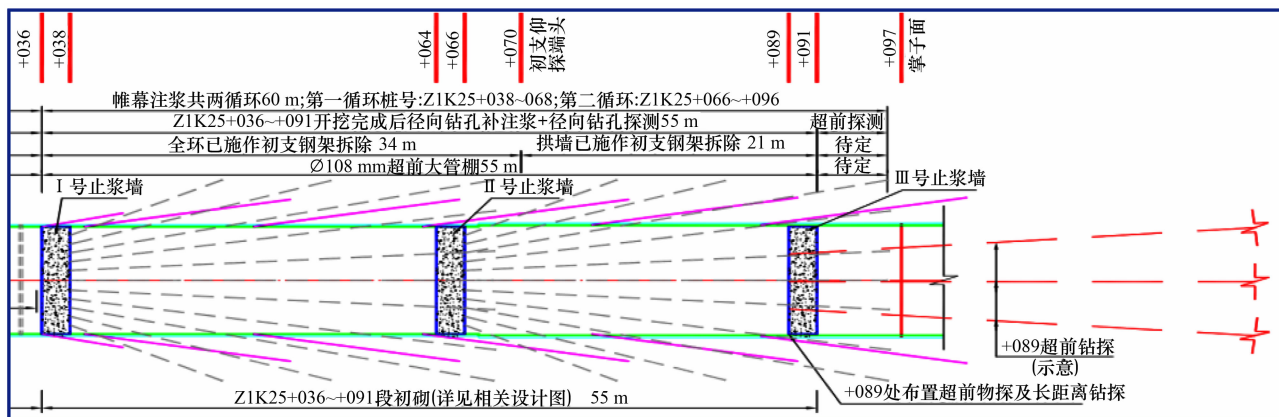


图 5 隧道进口左洞处置方案

3.1.3 堵排结合

根据前期开挖情况揭示, 已开挖段地层岩性以薄层状泥岩夹杂砂岩、石英砂岩为主, 围岩稳定性差。左洞注浆加固期间, 盲目进行注浆堵水可能造成加固区域前方水流汇集承压, 造成再次突涌。注浆加固期间, 针对地下水以“堵排结合”为方针, 打设高位泄水孔, 将注浆加固区域外围的地下水提前引流排泄出去, 针对注浆加固区域内的水以注浆封堵为主。

3.1.4 径向注浆

隧道进口突涌量累计超过 45 万方, 初支结构背后较大深度范围内疏松, 后期有支护结构变形、渗漏水等风险。基于此, 采用径向注浆的方法, 对初支背后的松散体进行加固。

3.2 超前帷幕注浆

3.2.1 注浆加固范围

突涌段超前周边帷幕注浆加固分为两循环: Z1K25+032~Z1K25+064 (30 m), Z1K25+062~094 施作 2 m 厚 C25 钢筋混凝土止浆墙, 止浆墙底部嵌入岩体不小于 100 cm, 止浆墙和掌子面之间采用 M10 砂浆填充。注浆开孔直径不小于 110 mm, 终孔直径不小于 90 mm。注浆长度为 30 m, 开挖 27 m。注浆孔按浆液扩散半径 2 m, 孔底间距 2.5 m 布设, 共 110 孔。注浆范围为隧道开挖线以外 6 m。超前帷幕注浆加固断面布置见图 6 所示。

3.2.2 注浆材料

注浆材料采用水泥砂浆和水泥浆混合使用, 根

据超前探孔, 对存在空腔的区域, 首先采用水泥砂浆, 用于填充拱部围岩内空腔。待空腔填充完毕, 更换为普通水泥单液浆, 通过浆液的填充和挤密, 降低地层孔隙率, 提高密实度。如注普通水泥单液浆长时间不起压力, 则调整浆液为水泥-水玻璃双液浆, 缩短浆液凝结时间, 控制浆液在有效范围扩散。针对拱顶存在的砂层, 普通水泥浆液在砂层中扩散能力差, 注浆量少, 起压快, 难以保证注浆加固效果的问题, 采用超细水泥进行注浆加固。超细水泥与普通水泥浆液渗透性对比试验结果见下图 7 所示。现场水泥砂浆配比, 水泥浆和超细水泥浆水灰比 0.8:1~1:1, 灰砂比 1:4, 水泥采用 42.5 普通硅酸盐水泥, 超细水泥采用超细硅酸盐水泥 (D90I 级执行 GB/T35161—2017 标准), 水泥-水玻璃双液浆本比为 1:1 (体积比), 水玻璃模数 2.8, 水玻璃浓度 35~38Be' (波美度)。

3.2.3 注浆工艺

注浆顺序按发散-约束型注浆原则进行, 由外向内、由上到下、间隔跳孔施工作业。先外圈后内圈, 同一圈先上部孔后下部孔, 间隔跳孔, 逐渐加密, 先注无水区, 后注有水区, 钻一孔注一孔。根据地质探测成果, 本段围岩破碎程度较高, 岩层破碎容易造成塌孔卡钻等现象, 采用分段前进式注浆结合 PVC 管孔底注浆的方式。分段前进式注浆工艺流程图如图 8 所示。

对于注浆过程中出水量及反渣情况特殊的孔采取重复扫孔, 区域增加注浆孔的方法。注浆结

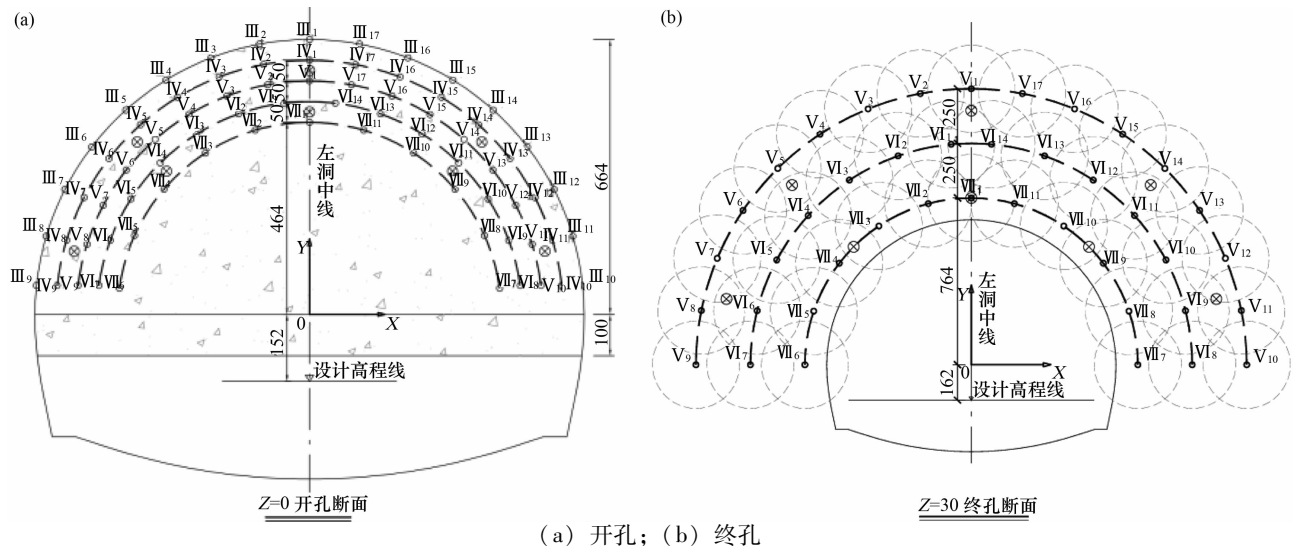
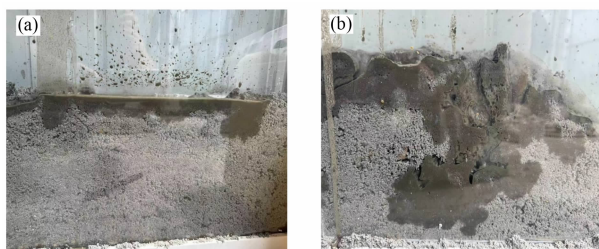


图 6 周边帷幕注浆断面布置



(a) 普通水泥(水灰比:1:1);(b)超细水泥(水灰比:1:1)

图 7 超细水泥与普通水泥渗透性试验对比结果

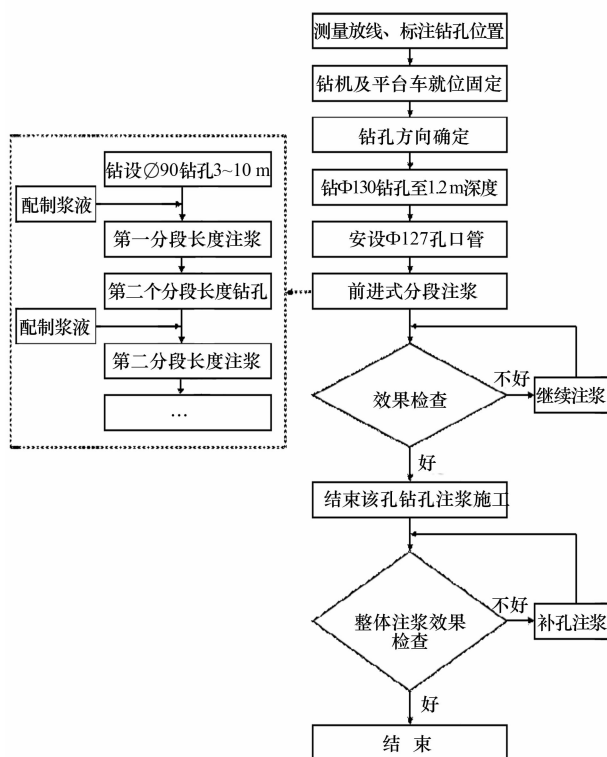
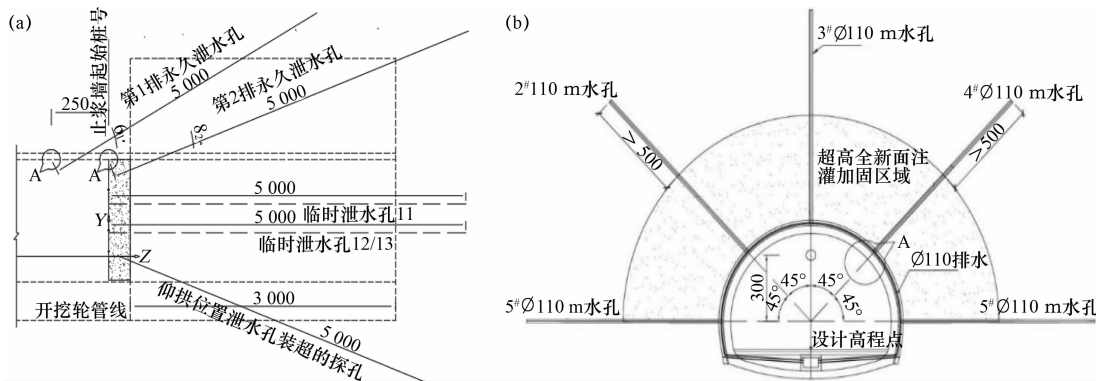


图 8 分段前进式注浆工艺流程

束后,待浆液凝固,将注浆孔重新扫开,验证其注浆效果,若注浆效果较差,使用超细水泥等特殊水泥材料注浆,普通水泥~水玻璃双液浆进行



(a) 泄水孔纵断面布置;(b)泄水孔横断面布置

图 9 泄水孔布置

封孔。同时,根据周围注浆孔出水量情况,判断其裂隙方向,针对出水裂隙增加注浆孔,结合PVC管孔底注浆工艺,逐步对出水区域进行加固,将水封堵在开挖轮廓线6 m以外位置。

3.3 泄水降压

注浆验收评定合格后,每循环开挖之前止浆墙后方设置2排泄水孔,所有泄水孔均内设 $\Phi 108$ mm钢花管,孔口设置 $\Phi 127$ mm孔口管。每排泄水孔设置于止浆墙和止浆墙后方2.5 m位置,每排泄水孔均在隧道拱部施作不少于5个 $\Phi 110$ mm泄水孔。泄水孔布置见图9所示。

在止浆墙底部设置1个 $\Phi 110$ mm泄水孔兼超前探孔,仰角 -23.31° ,长度50 m,探明止浆墙前方仰拱位置水文地质情况,泄水孔下方预埋无孔双壁波纹管HDPE DN/ID100排水盲管将地下水引排至中心水沟。掌子面设置3个临时 $\Phi 110$ mm泄水孔用于施工期间的探水和排水。

3.4 超前大管棚支护

拱部 180° 范围设 $\Phi 108 \times 6$ 超前管棚支护,首环管棚长9 m,环向间距0.3 m,外插角 $\leq 25^\circ$;后续管棚长18 m,环向间距0.3 m,外插角 $\leq 12^\circ$,管棚纵向搭接长度不小于3 m,管棚末端套打超前小导管;超前管棚注浆材料采用水泥浆,水灰比:0.8:1~1:1。注浆终压设置1 MPa。针对目前注浆加固段初支背后为突涌后的松散淤积体,现场采用无工作室管棚进行施工,在保证管棚加固效果的同时,避免扩挖管棚工作室造成的安全风险。超前大管棚纵断面施工示意如图10所示。

3.5 注浆效果检查

注浆结束待浆液凝固7 d后,采取压水实验+

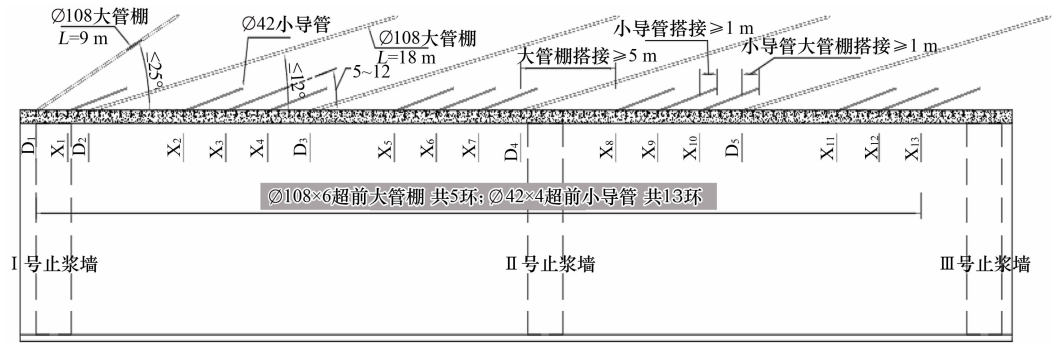


图 10 超前大管纵横断面示意

孔内呈像法对注浆效果进行检查。观察浆液的充填情况(浆液填充系数必须达到 80% 以上), 并检查孔内涌水量(涌水量小于 $0.2 \text{ L}/(\text{m} \cdot \text{min})$), 通过压水试验进行验证, 要求透水率不大于 2 Lu 。

3.5.1 检查孔布置

注浆结束后设计 8 个检查孔, 钻孔直径 $\varnothing = 90 \text{ mm}$, 设计孔深 33 m。检查孔的断面布置如图 11 所示。

3.5.2 压水试验

注浆效果检查孔一般采用一级压力的单点法压水试验, 压水试验的成果以透水率 q 表示, 单位为吕荣(Lu)。在 1 MPa 压力下, 每米试段长度每分钟注入水量为 1 L 时, $q = 1 \text{ Lu}$ 。单点法压水试验的成果计算公式如下。

$$q = \frac{Q}{PL} \quad (1)$$

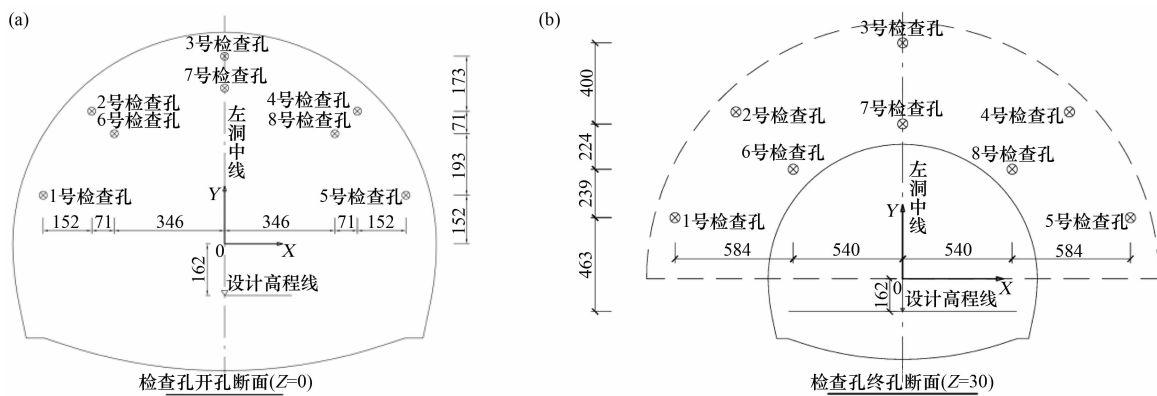
式中: q 为试验段透水率, Lu ; Q 为压入流量, L/min ; P 为作用于试验段内的全压力, MPa ; L 为试段长度, m 。

注浆结束后, 8 个检查孔试验透水率均小于 2 Lu , 满足规范及设计要求。

3.5.3 孔内成像

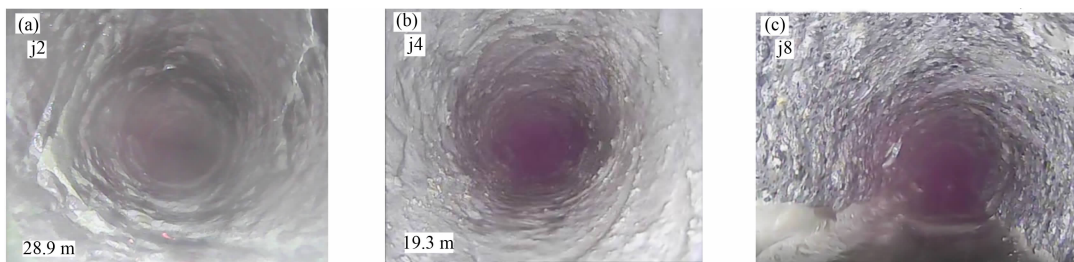
通过孔内成像设备对钻孔孔壁进行全景观察, 发现检查孔成孔完整, 不存在塌孔、涌水等现象, 孔壁有明显的浆脉分布, 说明注浆加固效果良好。个别检查孔孔内成像照片如图 12 所示。

孔内成像视频显示检查孔内浆液充填情况及孔内完整性情况相对较好, 满足下一步开挖要求。



(a) 开孔; (b) 终孔

图 11 检查孔断面布置

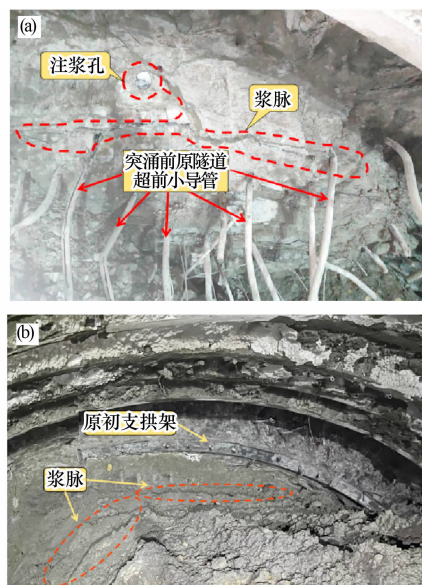


检查孔编号: (a) 2#; (b) 4#; (c) 8#

图 12 检查孔孔内成像

3.5.4 开挖结果

以第二循环注浆加固施工开挖后掌子面开挖情况为例,对掌子面的情况实施跟踪,现场跟踪开挖图片如图 13 所示。掌子面开挖揭示情况表明:掌子面开挖后以突涌后的黑、黄色突涌松散堆积体为主。开挖进尺 10 m 时,掌子面整体干燥稳定,掌子面注浆孔浆液填充饱满,劈裂注浆形成的浆脉明显;开挖进尺 20 m 时,掌子面仍有较明显的浆脉分布,但核心土部分整体松散易垮塌,分析原因为超前周边注浆加固主要加固范围基本在开挖轮廓线外,掌子面内核心土部分为未加固的突涌松散堆积体。综合考虑施工风险,防止核心土部分发生溜坍,最终开挖长度为 25 m。



(a) 进尺 10 m; (b) 进尺 20 m

图 13 开挖揭示情况

4 结 论

(1) 现场施工过程中,在加固段长前 25 m 范围内,注浆加固效果良好;建议注浆加固段长控制在 25 m 左右。

(2) 针普通水泥浆液在砂层中难以扩散的问题,现场更换注浆材料为超细水泥,通过超细水泥在砂层中的扩散挤密,达到较好的固砂堵水效果。

(3) 终孔深度较深,现场采用下 PVC 管孔底注浆的方法,通过 PVC 管直接将水泥浆液送至孔

底,进而扩散至塌陷体内,提高其承载力,取得了较好的效果。

参考文献:

- [1] 林之恒,袁东,徐正宣. 隧道富水断层破碎带突涌预报与工程对策研究[J]. 铁道标准设计,2024,68(9): 113-121.
- [2] 许劲松,李国锋,王秋懿,等. 王家寨隧道第三系强富水粉细砂半成岩段突涌灾害防治施工关键技术[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(增刊1):514-521.
- [3] 戴志仁,胡瑞青,王泽宇,等. 岩溶山区运营隧道突涌沙机制及处理措施研究[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(增刊2):369-377.
- [4] 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.
- [5] 凌涛,汤宇,彭学军,等. 某隧道注浆治理突泥涌水效果分析[J]. 工程建设,2022,54(2):29-33.
- [6] 贾建波,高广义,温兴明. 高黎贡山隧道大规模突涌综合治理技术[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(增刊1):394-400.
- [7] 杨华,许继琪,闫优. 大瑞铁路老红坡隧道穿越接触带单侧涌泥处理技术[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(增刊2):241-248.
- [8] 龙洪,杨晓华,晏长耕. 岩溶隧道突泥成因分析及综合处治措施研究[J]. 公路,2012(10):200-204.
- [9] 尚海敏,崔庆国,于进庆,等. 岩溶山区某隧道工程突涌水风险分析[J]. 现代隧道技术,2025,62(1):48-55.
- [10] 冯应,朱星宇,张志强. 基于水-岩相互作用的富水断层破碎带隧道突涌灾害演化特征[J]. 科学技术与工程,2024,24(10):4276-4286.
- [11] 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.
- [12] 李维瑞,张玉芳,李健,等. 突涌水隧道掌子面开挖方法对比研究[J]. 中国安全生产科学技术,2022,18(增刊1):128-134.
- [13] 许增光,熊伟,柴军瑞,等. 隧道裂隙突涌水过程中注浆技术研究进展及展望[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(2):185-193.