

深埋隧洞断层破碎带突泥涌水灾害机理与综合控制技术研究——以滇中引水工程香炉山隧洞桩号 DL I 3+570~3+680 涌水突泥为例

和超¹ 郭勇²

1 云南省滇中引水有限公司，云南昆明，650000；

2 云南省滇中引水工程建设管理局，云南昆明，650000；

摘要：随着我国西部大开发与“十四五”水利规划的实施，深埋长隧洞工程在复杂地质条件下的建设日益增多，突泥涌水灾害成为制约工程安全与进度的关键难题。本文以香炉山隧洞 DL I 3+570~3+680 段突泥涌水事件为工程背景，系统开展了断层破碎带地质条件下突泥涌水灾害机理分析，提出了“地质预报先行、清淤封闭同步、灌浆固结为主、排水降压为辅、结构加固协同、动态调控贯穿”的综合治理技术体系。通过超前地质探测、分段高压灌浆、反滤排水系统、止浆墙结构优化及智能监测等手段，实现了高压富水断裂带条件下隧洞围岩稳定与渗流控制。工程实践表明，该体系在突泥涌水治理中表现出良好的适用性、可靠性与经济性，可为类似深埋隧洞地质灾害防治提供理论支持与技术参考。

关键词：深埋隧洞；突泥涌水；断层破碎带；灌浆固结；动态调控；灾害治理

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.031

1 引言

1.1 研究背景与意义

近年来，随着我国水利水电、交通、能源等重大基础设施向西南高山峡谷区域延伸，深埋长隧洞工程面临的地质条件日趋复杂。突泥涌水作为隧洞施工中最具破坏性的地质灾害之一，具有突发性强、水量大、携渣量大、持续时间长、治理难度高等特点，严重威胁施工人员安全、设备安全与工程进度。据统计，我国近五年在建隧洞工程中，约 30% 遭遇过不同程度的突水突泥灾害，其中断层破碎带、岩溶通道、富水软弱围岩段是灾害高发区。因此，开展深埋隧洞突泥涌水灾害机理与综合治理技术研究，具有重要的理论价值与工程实践意义。

1.2 国内外研究现状

国内外学者在突水突泥机理、预测预报、治理技术等方面开展了广泛研究。在机理方面，多聚焦于水力劈裂、渗透失稳、颗粒迁移等物理过程；在预报方面，超前地质钻探、物探技术（如 TSP、地质雷达）、微震监测等逐步成熟；在治理方面，灌浆堵水、排水降压、结构加固等传统方法不断优化，注浆材料、工艺参数、智能调控等方面也取得新进展。然而，针对高压富水断层破碎带这一特殊地质条件，仍缺乏系统性的治理技术体系与动态调控机制，尤其在实际工程中如何实现“预报

—治理—监测—调整”一体化流程，仍需进一步探索。

1.3 研究内容与方法

本文以香炉山隧洞突泥涌水治理工程为案例，采用理论分析、现场试验与工程验证相结合的方法，开展以下研究：

- (1) 分析断层破碎带地质特征与突泥涌水成因机制；
- (2) 构建“预报—治理—监测”三位一体的综合治理技术体系；
- (3) 阐述关键工艺参数与施工控制要点；
- (4) 通过效果检测与工程反馈，验证治理效果并提出优化建议。

2 工程概况与地质条件分析

2.1 工程背景

香炉山隧洞为某调水工程关键线路，地质条件极端复杂，2021 年 2 月 26 日，1#支洞下游掌子面 DL I 3+681.5 处发生突泥涌水，初始为渗水，随后发展为持续性涌水携渣，最大涌水量约 $120\text{m}^3/\text{h}$ ，携带碎屑物约 800m^3 ，导致掌子面坍塌、设备掩埋，施工中断。

2.2 地质条件与灾害特征

该段围岩为灰白～灰黄色大理岩，微风化，岩质较坚硬；围岩呈厚～中厚层结构，局部次块状结构，岩

体总体较完整，局部因陡倾裂隙切割，完整性差，部分岩体较破碎，有轻微掉块现象；洞室总体呈潮湿状，局部渗滴水或线状出水；该段围岩类别为III2类。掌子面揭露一次级断层，主断带宽约1m，断层带物质成分为碎裂岩～碎块岩夹碎粉岩，原岩为大理岩及石英片岩，受构造挤压迹象明显，局部有泥化现象，围岩性状差，地下水沿断层破碎带产生渗透破坏，造成突泥涌水及围岩垮塌。

2.3 灾害成因初步判断

- (1) 地质因素：断层破碎带物质松散、胶结差，为突泥提供物源；
- (2) 水文因素：富水断裂带形成高压水头，水力梯度大；
- (3) 施工因素：开挖扰动打破围岩—水压平衡，诱发渗透失稳。

3 突泥涌水综合治理技术体系构建

3.1 治理原则与总体思路

坚持“以堵为主、堵排结合、先固后挖、动态调控”原则，形成以下治理流程：

地质预报→清淤封闭→灌浆固结→排水降压→结构加固→效果检测→补充治理

3.2 超前地质预报与风险评估

采用TSP303地震波探测与地质雷达扫描相结合，初步探明前方30m范围内岩体破碎程度与含水特征。根据预报结果，将DL I 3+680~3+720段划为高风险区，制定专项施工预案。

3.3 清淤与临时封闭技术

清淤采用“机械开挖+人工修整”方式，铺设洞渣道路，设专人监测涌渣体变形。在DL I 3+659处浇筑C30混凝土挡渣墙（宽2m、高3.1m），墙基与边墙设置砂浆锚杆（Φ25mm，L=2m），增强抗滑移与抗倾覆能力。渣体表面铺设Φ6@15×15cm双层钢筋网，喷射50cm厚C25混凝土，形成封闭壳层。

3.4 灌浆固结与排水降压系统

灌浆孔：Φ89mm，孔深10~20m，孔距1.0m×1.0m，梅花形布置；浆液类型：普通水泥浆（水灰比0.6~1:1）与水泥—水玻璃双浆液（体积比1:1）；注浆压力：0.5~1.0MPa（初期），2.5~5.0MPa（补充灌浆）；分段长度：5~10m，采用下行式分段注浆。

在拱顶与侧墙布置Φ110mm泄水孔，外偏20°~25°，孔内设反滤包与孔口阀门，将前方水体引至后方

排水沟，降低掌子面水压力。

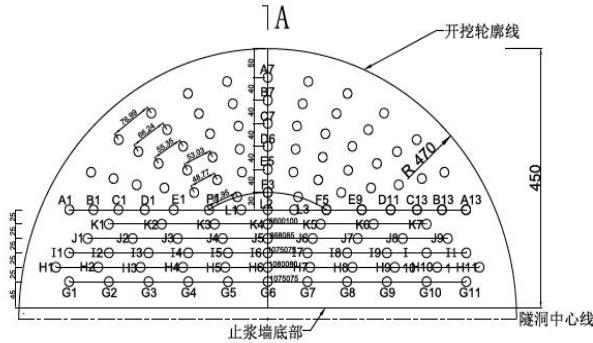


图 1 DLI3+670 处钻孔灌浆布置示意图 (横断面)

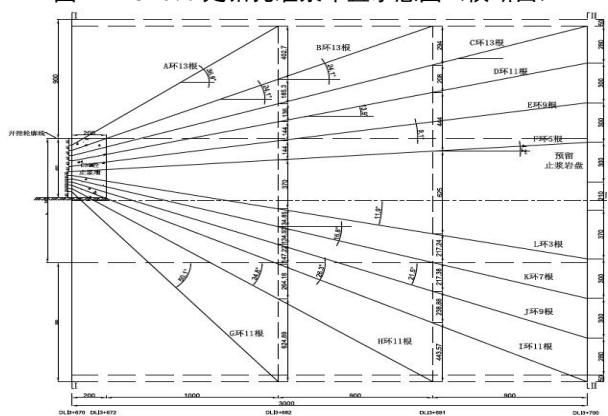


图 2 DLI3+670 处钻孔灌浆布置示意图 (纵断面)

3.5 止浆墙结构优化与底板加固

在DL I 3+672处浇筑C30止浆墙（宽2m、高4.5m），墙后渣体表面采用0.5m厚C30混凝土封闭，防止浆液外漏。针对注浆过程中底板开裂问题，采用I20a工字钢（L=10m，间距1m）与Φ8@15×15cm双层钢筋网加固，重新浇筑50cm厚C30混凝土。

3.6 灌浆效果检测与补充治理

通过Φ91mm取芯孔检测发现，隧洞下部围岩注浆效果不佳，存在富水断裂带。随即增设Φ110mm排水孔，拆除部分挡渣墙，在DL I 3+665~668段浇筑3m厚C30止浆墙（下墙），并进行扰动灌浆，压力提升至2.5~5.0MPa，确保下部围岩固结。

4 施工工艺与动态调控机制

4.1 分区分步施工组织

采用“竖向分层、横向分块”施工策略，先处理下部富水区，再逐步向上推进。每循环进尺不超过3m，全程实施变形与渗压监测。

4.2 灌浆工艺控制要点

- (1) 钻孔顺序：先外围后内部、先下部后上部；

(2) 浆液调配：根据出水情况动态调整水灰比与胶凝时间；

(3) 压力控制：采用“低压慢灌—逐步升压”模式，避免劈裂围岩；

(4) 结束标准：灌浆压力达到设计值且吸浆量小于2L/min。

4.3 动态监测与预警系统

布设多点位移计、渗压计、视频监控装置，实时采集围岩变形、水压变化与施工影像数据。设定变形速率 $\geq 2\text{mm/d}$ 、水压上升 $\geq 10\%$ 为预警阈值，触发应急预案。

4.4 应急预案与协同决策机制

建立“项目部—监理—设计—勘察”四方应急联动机制，遇异常情况立即停工、撤离、会商，调整治理参数或工艺。

5 治理效果评价与工程启示

5.1 治理效果检测

通过取芯、压水试验与物探复测，表明：围岩完整性显著改善，岩体波速提高18%；渗水量由 $120\text{m}^3/\text{h}$ 降至 $5\text{m}^3/\text{h}$ 以下；掌子面稳定，具备继续开挖条件。

5.2 技术经济性分析

本方案虽初期投入较大（灌浆材料、设备、人工），但避免了长期停工与设备损失，总体工期较传统方法缩短约45天，经济效益显著。

5.3 工程启示与推广建议

(1) 深埋隧道施工应强化超前地质预报与风险评估；

(2) 灌浆堵水需结合地质条件灵活选择浆材与工艺；

(3) 动态监测与多方协同是灾害治理成功的关键；

(4) 建议推广“智能灌浆系统”与“地质灾害预警平台”，提升治理效能。

6 结论

本文以香炉山隧道突泥涌水治理为例，系统阐述了断层破碎带条件下突泥涌水灾害的成因机制，构建了以“地质预报、灌浆固结、排水降压、结构加固、动态调控”为核心的综合治理技术体系。工程实践表明：

(1) 采用分段高压灌浆与反滤排水相结合，能有效控制高压富水断裂带渗流；

(2) 优化止浆墙结构与底板加固措施，可提升整体抗渗与承载性能；

(3) 全过程动态监测与协同决策机制，是实现安全高效治理的重要保障。

该体系可为类似深埋隧道突泥涌水灾害防治提供系统性的技术参考，具有较好的推广应用价值。

参考文献

- [1] 吴辉, 张微, 徐鹏. 复合地层隧道涌水突泥处置技术研究[J/OL]. 水利水电快报, 1-5[2025-12-13]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1142.TV.20251031.1639.002>.
- [2] 郭悦宝. 高原隧道富水断层破碎带段突泥涌水分析及处治技术[J]. 铁道建筑技术, 2025, (09): 184-188.
- [3] 贺兴和. 水工隧洞断层破碎带坍塌处理技术研究[J]. 江西建材, 2025, (06): 262-264.
- [4] 徐传江. 引水隧洞突泥涌水灾害处理施工技术研究[J]. 四川水利, 2025, 46(02): 60-63.
- [5] 李建贺, 牛利敏, 王帅, 等. 深埋隧洞穿高压富水断层涌水突泥分析与处置技术[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(10): 149-156.
- [6] 戴澄, 余洁, 叶国平. 引水隧洞工程施工突涌水灾害处理技术研究[J]. 建筑安全, 2025, 40(08): 51-54.
- [7] 康与超, 王青松. 复合地层隧道突涌水灾害机理及治理研究[J]. 北方交通, 2025, (01): 91-94. DOI: 10.15996/j.cnki.bfjt.2025.01.023.
- [8] 喻久康, 童蕾, 严俊, 等. 深埋长隧洞穿越富水断层带涌水突泥风险预判与处理措施研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(S2): 371-378. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2024.S2.058.
- [9] 钟黎阳. 隧道断层破碎带涌水突泥地质灾害处治技术研究[J]. 工程机械与维修, 2023, (05): 104-106.
- [10] 段江鹏, 舒建梅, 李培富, 等. 隧洞突泥涌水灾害处理施工[J]. 云南水力发电, 2023, 39(04): 136-140.
- [11] 杨超, 邹永木, 李磊, 等. 深大断层破碎带隧道突泥机理研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(03): 173-179. DOI: 10.13204/j.gyjzG22061409.
- [12] 马业钜. 断层破碎带隧道突水治理措施研究[J]. 西部交通科技, 2023, (02): 150-152+199. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2023.02.045.

作者简介：和超（1989.01），男，云南维西人，工程师，本科，主要从事水利水电工程建设管理工作。

郭勇（1987.01），男，云南镇雄人，高级工程师，本科，主要从事水利水电工程建设管理工作。