

富水断层带隧道注浆堵水效果评估与优化

杨 林

四川康新高速公路有限责任公司 四川 康定 626000

【摘要】：富水断层带是隧道施工中的高风险区域，注浆堵水是保障施工安全的核心技术。本文结合注浆堵水基本原理，构建包含定性与定量指标的综合评估体系，通过工程实例验证评估方法的有效性，针对评估中暴露的问题提出优化措施，为富水断层带隧道注浆施工提供技术参考。

【关键词】：富水断层带；隧道注浆；堵水效果；评估体系；优化措施

DOI:10.12417/2811-0528.26.06.036

1 引言

随着交通基础设施建设向复杂地质区域延伸，穿越富水断层带的隧道工程日益增多。富水断层带地质条件破碎，透水性强，隧道开挖过程中极易出现突水突泥灾害，不仅会延误工期、增加造价，还可能威胁施工人员生命安全。注浆堵水技术通过向地层注入浆液，填充裂隙、胶结破碎岩体，形成隔水帷幕，从而降低地层透水性、提高围岩稳定性。但注浆效果受地质条件、注浆材料、施工参数等多种因素影响，若评估不到位或方案不合理，会导致堵水失效。因此，建立科学的注浆堵水效果评估体系，并针对性优化注浆方案，对保障隧道施工安全具有重要现实意义。

2 富水断层带注浆堵水基本原理与注浆方案

(1) 注浆堵水基本原理：注浆堵水的核心原理是利用注浆泵产生的压力，将浆液注入富水断层带的裂隙、孔隙等通道中。浆液在裂隙内扩散、渗透、凝固，一方面填充地质缺陷，阻断地下水渗流通道；另一方面胶结破碎的岩块，提高围岩的整体性和承载能力，最终形成兼具隔水和加固双重功能的注浆帷幕，为隧道开挖创造安全环境。根据浆液扩散方式，可分为渗透注浆、劈裂注浆、压密注浆和充填注浆，富水断层带多采用渗透注浆与劈裂注浆相结合的方式。

(2) 常规注浆方案设计：注浆方案设计需结合地质勘察资料，重点明确注浆材料、注浆参数和注浆工艺。注浆材料选择需满足流动性、凝固时间、强度及抗渗性要求，常用材料包括水泥浆、水泥-水玻璃双液浆、化学浆液等，不同材料特性不同，适用场景存在差异，具体对比见表1。注浆参数主要包括注浆压力、注浆量、浆液配比，需根据断层厚度、裂隙发育程度、地下水压力等因素确定，常规取值范围为注浆压力1.5-3.0MPa，水泥-水玻璃双液浆体积比1:0.5-1:1。注浆工艺采用分段前进式注浆，分段长度2-5m，每段注浆完成后进行封孔处理，避免浆液流失。

表1 注浆材料类型

注浆材料类型	优点	缺点	适用场景
水泥浆	强度高、成本低、环保性好	凝固时间长、流动性一般	裂隙较大、地下水流速慢的区域
水泥-水玻璃双液浆	凝固时间可控、流动性好	后期强度增长缓慢、成本适中	富水断层带主流选用材料
化学浆液	渗透性强、凝固时间精准可控	成本高、部分材料环保性差	细微裂隙、地下水流速快的区域

3 注浆堵水效果综合评估体系

(1) 施工过程动态评估：施工过程评估主要通过实时监测注浆压力、注浆量变化，判断浆液扩散情况和裂隙填充效果。正常情况下，注浆压力随注浆进行逐渐上升，注浆量逐渐下降并趋于稳定；若压力持续偏低且注浆量过大，说明存在浆液流失通道；若压力骤升且注浆量极小，可能是注浆孔堵塞或浆液凝结过快。同时，监测地下水水位变化，若水位稳定上升或保持不变，说明堵水效果初步显现；若水位持续下降，需排查是否存在未封堵的渗流通道。

(2) 后期检测定量评估：后期检测是评估注浆效果的核心环节，采用多种检测手段相结合的方式，获取定量指标。主要检测项目及评估标准见表2。其中，钻孔取芯检测可直观观察浆液填充情况和结石体强度，芯样完整性系数 ≥ 0.8 为合格；涌水量监测是最直接的评估指标，隧道开挖后掌子面单位面积涌水量 $\leq 0.1\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 为满足施工要求；地质雷达检测可快速判断注浆帷幕厚度和完整性，无明显低阻异常区域即为合格；渗透系数检测通过抽水试验获取，注浆后地层渗透系数需降低一个数量级以上。

表2 后期检测定量评估标准

检测项目	检测方法	评估标准	权重占比
浆液填充情况	钻孔取芯	芯样完整性系数 ≥ 0.8	30%
涌水量	现场量测	单位面积涌水量 $\leq 0.1\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$	35%
注浆帷幕完整性	地质雷达	无明显低阻异常区域	20%
渗透系数	抽水试验	较注浆前降低 ≥ 1 个数量级	15%

(3) 综合判定方法: 采用加权评分法进行综合判定, 根据表2中各指标权重占比, 对检测结果进行打分, 总分 ≥ 80 分为优秀, 60-79分为合格, < 60 分为不合格。若评估结果为不合格, 需分析原因并制定补注浆方案; 合格及以上可进入下一阶段施工。

4 工程实例分析

(1) 工程概况: 某高速公路隧道穿越F1富水断层带, 断层破碎带厚度约12m, 主要由碎裂岩、角砾岩组成, 地下水类型为孔隙潜水和裂隙水, 初见水位埋深3.5m, 渗透系数 $1.2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$, 掌子面原始涌水量达 $1.8\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$, 严重影响施工安全。采用水泥-水玻璃双液浆进行注浆堵水, 注浆孔按梅花形布置, 孔距1.5m, 排距1.2m, 注浆压力控制在2.0-2.5MPa。

(2) 注浆效果评估: 施工过程中监测显示, 注浆压力从初始1.2MPa逐渐上升至2.3MPa并稳定, 注浆量从每孔 8m^3 逐渐降至 2.5m^3 , 地下水水位上升0.8m, 初步判断注浆效果良好。后期检测结果如下: 钻孔取芯芯样完整性系数0.85, 满足合格标准; 掌子面单位面积涌水量降至 $0.06\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$, 达到施工要求; 地质雷达检测显示注浆帷幕厚度均匀, 无明显低阻异常; 渗透系数降至 $8.5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$, 较注浆前降低1个多数量级。加权评分计算得分为86分, 评估结果为优秀。

(3) 存在问题分析: 尽管整体评估合格, 但检测中发现断层带边缘区域存在局部细微裂隙未完全填充, 芯样完整性系数仅0.72, 且该区域渗透系数下降幅度不足, 说明注浆参数针对性不足, 边缘区域浆液扩散不充分。

参考文献:

- [1] 伍小方, 周志纯, 贤良华, 等. 富水断层破碎带隧道稳定性分析与注浆优化研究[J]. 西部交通科技, 2025, (07): 79-82.
- [2] 李超. 断层富水隧道DCG注浆加固关键技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2025, (04): 171-175.
- [3] 胡浩然, 廖峻, 胡青平, 等. 高地应力断层破碎带富水段隧道帷幕注浆效果及注浆圈参数研究[J]. 公路交通技术, 2024, 40(03): 141-150.

5 注浆堵水方案优化措施

(1) 优化注浆材料配比: 针对断层不同区域地质条件差异化调整浆液配比。核心区域采用水泥-水玻璃体积比1:0.6的浆液, 保证结石体强度; 边缘区域采用1:0.8的配比, 提高浆液流动性和渗透性, 同时添加0.5%的高效减水剂, 增强浆液扩散能力, 确保细微裂隙得到充分填充。

(2) 动态调整注浆参数: 采用“分区段、差异化”注浆参数设计, 根据地质雷达超前探测结果, 对裂隙发育密集区域适当提高注浆压力至2.5-3.0MPa, 缩小孔距至1.2m; 对边缘裂隙较细微区域, 降低注浆压力至1.8-2.2MPa, 延长注浆时间, 避免浆液过度劈裂导致流失。同时, 采用实时流量监测系统, 根据流量变化动态调整注浆速率, 确保浆液均匀扩散。

(3) 改进注浆工艺: 采用“超前探测-分段注浆-即时检测”的闭环施工工艺。通过地质雷达超前探测明确断层边界和裂隙分布, 划分核心注浆区和边缘补充区; 核心区采用分段前进式注浆, 分段长度2m, 边缘区采用后退式注浆, 分段长度3m; 每段注浆完成后, 立即采用钻孔抽样检测, 若芯样完整性系数 < 0.8 , 及时进行补注浆。此外, 在注浆孔端部设置止浆塞, 提高注浆压力利用率, 减少浆液串浆现象。

(4) 强化施工过程管控: 建立注浆施工质量责任制, 明确各岗位职责, 加强对注浆材料进场检验、注浆参数调试、注浆过程监测等环节的管控。定期对注浆设备进行维护校准, 确保压力和流量监测数据准确; 加强施工人员技术培训, 提高对注浆压力、流量变化的判断和处置能力, 及时处理注浆过程中出现的堵孔、串浆等问题。

6 结论

富水断层带隧道注浆堵水效果评估需结合施工过程动态监测和后期多手段检测, 构建包含浆液填充情况、涌水量、帷幕完整性、渗透系数的加权评分体系, 可实现对注浆效果的科学判定。注浆方案优化应针对评估中暴露的问题, 从材料配比、参数调整、工艺改进和过程管控四个方面入手, 采用差异化设计和闭环施工模式, 提高注浆堵水的针对性和有效性。工程实例表明, 优化后的注浆方案可显著提升堵水效果, 降低施工风险, 为类似工程提供了可靠的技术借鉴。后续研究可结合数值模拟技术, 进一步优化注浆参数设计, 提高注浆堵水的智能化水平。