

水工隧洞渗漏综合治理与生态修复关键技术研究

何勇

湖南涇天河工程建设投资有限责任公司，湖南永州，525500；

摘要：本研究针对湖南涇天河灌区隧洞群渗漏问题，创新性地提出“地质-工程-生态”三位一体的治理模式。通过构建“精细化地质勘察→渗流-应力耦合参数优化→三维分序灌浆→智能生态监测”的技术体系，结合室内材料试验与现场工程验证，系统地解决了岩溶区隧洞渗漏控制与生态修复协同优化的技术难题。研究结果显示，优化后的灌浆工艺使隧洞渗漏量降低了98.7%以上，周边地下水位恢复率达到91.3%；创新的三维灌浆网络设计显著提升了溶槽区的封堵效率，封堵效率提高了42.5%；渗流-应力耦合模型的预测精度达到93% ($R^2=0.93$)。该研究成果为类似地质条件下的水工隧洞安全运维与生态可持续发展提供了理论支撑和技术范式。

关键词：水工隧洞；渗漏控制；生态修复；固结灌浆；渗流-应力耦合；岩溶地质

DOI：10.69979/3060-8767.25.06.012

1 引言

1.1 研究背景

水工隧洞渗漏是我国水利工程中普遍存在的难题，在岩溶发育区问题尤为突出。最新统计数据表明，我国在建水利工程中约37.5%的隧洞存在渗漏问题，而在岩溶区，隧洞事故率高达68.3%。渗漏问题不仅会引发衬砌开裂、围岩失稳等工程病害，每年造成的直接经济损失超过20亿元，还会导致区域性地下水位下降、地表植被退化、农田减产等一系列生态连锁反应。

1.2 研究现状与瓶颈

当前，针对水工隧洞渗漏问题的研究主要集中在两个方向：一是材料开发，如纳米改性水泥基浆液、化学高分子注浆材料等；二是工艺优化，如分段灌浆、脉动注浆等技术。然而，这些研究仍存在以下瓶颈：首先，岩溶区渗流路径复杂，传统灌浆方法的封堵率仅为61.2%；其次，生态修复与工程防渗相互脱节，导致后期渗漏复发率超过25%；最后，缺乏对渗流-变形-生态多场耦合作用机制的研究。

1.3 研究内容与技术路线

本研究以涇天河灌区隧洞群为研究对象，重点突破以下三个方面的问题：一是揭示渗漏-围岩变形-地下水运动的动态相互作用耦合机制；二是实现地质靶向勘察、灌浆参数智能优化、生态适应性施工的技术集成；三是建立工程防渗效能与生态恢复效应的协同量化评价体

系。

2 工程地质特征与问题诊断

2.1 工程概况

本次研究的对象为大石山2#隧洞及黄土岭-大湾岭隧洞，隧洞穿越泥盆系石磴子组灰岩，岩溶中等发育。两个隧洞的关键地质参数对比如表1所示：

表1 隧洞参数对比表

参数	大石山隧洞	黄土岭隧洞
岩体完整性系数	0.42~0.55	0.38~0.47
渗透系数 (m/d)	3.2×10^{-2}	2.7×10^{-2}
优势渗流通道类型	溶洞管道流	裂隙网络渗流
地下水位埋深 (m)	8.2~15.7	6.5~12.3

2.2 问题多维诊断

(1) 工程结构损伤

- 衬砌裂缝发展系数达到0.38mm/m，最大缝宽为4.7mm；
- 底板渗透压力峰值为2.3MPa，超过设计值2.3倍；
- 围岩塑性区深度大于3m。

(2) 生态环境效应

其中农田减产占比45%，饮用水源枯竭占比32%，

地表塌陷占比 18%，生物多样性下降占比 5%。

了 29.7%。

3 关键技术突破与实施方法

3.1 渗流-应力耦合参数优化模型

建立了灌浆参数动态决策函数：

$$P_{opt} = \alpha \cdot e^{\beta K} + \gamma \cdot \ln\left(\frac{\sigma}{h}\right) + \delta \cdot \frac{1}{RQD}$$

式中，K 为岩体渗透系数 (m/s)； σ 为地应力主值 (MPa)；h 为作用水头差 (m)；RQD 为岩石质量指标； α 、 β 、 γ 、 δ 为区域修正系数，通过正交试验进行标定。

3.2 三维灌浆网络创新设计

(1) 结构拓扑优化

-主帷幕孔采用菱形网格布设，孔距为 1.2m，孔深 8~15m；

-辅助孔以 45° 放射状布置，针对性地封堵溶蚀通道；

-灌浆顺序遵循“先外围后内核、先下盘后上盘”的原则。

(2) 材料配伍体系

材料配伍体系如表 2 所示，以 P.O 42.5 水泥基浆为基础，掺入 2.5% 的纳米 SiO₂，可使抗渗性提高 40%，28d 强度大于 45MPa；掺入 0.8% 的速凝剂，初凝时间为 8min。

表 2 水泥基浆性能对比表

基浆类型	掺加物质	掺加比例	性能提升	具体指标
P.O 42.5 水泥基浆	纳米 SiO ₂	2.5%	抗渗性	提升 40%
	速凝剂	0.8%	初凝时间	8 分钟
-	-	-	28 天强度	>45MPa

3.3 智能分序灌浆工艺

优化后的施工流程与传统工艺的对比如表 3 所示，优化工艺在布孔、灌浆控制、质量检测 and 生态保护等方面均有显著改进，覆盖效率提高了 35.7%，材料损耗降低了 22.3%，数据精度提高了 8.2 倍，植被恢复率提高

表 3：灌浆工艺效果对比

工序	传统工艺	优化工艺	改进效益
布孔	单排直线	三维动态网格	覆盖效率提升 35.7%
灌浆控制	固定水灰比 0.8:1	实时调浆系统	材料损耗减少 22.3%
质量检测	人工压水试验	分布式光纤监测	数据精度提高 8.2 倍
生态保护	无专项措施	灌浆-水位联动调控	植被恢复率提高 29.7%

4 实施过程与质量控制

4.1 动态灌浆控制体系

压力管理方面，采用分级升压的方式，从 0.3P₀ 逐步升至 1.5P₀，同时控制抬动变形不超过 0.15mm；浆液调控上，严格控制密度偏差在 ±0.02g/cm³，并实时监测粘度；引入智能物联技术，嵌入传感器网络，实现异常工况的自动停机。

4.2 生态保护专项措施

水位调控：在灌浆期间启动备用水源补给，防止地下水水位骤降；

植被缓冲带：在施工区外围设置 20m 宽的原生植物保护区；

5 效果评估与机制解析

5.1 工程防渗效能

渗流量从 12.7L/(m·d) 降至 0.16L/(m·d)，降幅达到 98.7%；

透水率平均 Lu 值由 7.8 降至 0.2；

衬砌裂缝发展速率下降了 96.4%，结构安全系数提升至 2.1。

5.2 生态恢复响应

(1) 地下水系统

地下水位恢复率 91.3%，形成可持续的生态正反馈机制。

(2) 地表生态

修复前后的地表生态指标对比如表 3 所示，植被覆盖度从 42.3% 提升至 68.9%，变化率为 62.9%；地下水依赖物种数从 17 种增加至 23 种，变化率为 35.3%。

表 3 环境修复效果对比表

指标	修复前	修复后 1 年	变化率
植被覆盖度	42.3%	68.9%	↑62.9%
地下水依赖物种数	17 种	23 种	↑35.3%

5.3 多场耦合作用机制

渗透阻断：浆脉网络切割渗流路径，界面结合强度达到 1.8MPa；

水岩协同：灌浆体改善了围岩应力场，使变形模量提升了 52%；

生态正反馈：工程屏障促使水位回升，进而推动植被恢复，最终强化水土保持，形成生态正反馈。

6 主要结论

三维灌浆网络设计显著提升了溶槽区的封堵效率，封堵效率提高了 42.5%，复发率低于 5%；

渗流-应力耦合模型具有较高的预测精度，达到 93%，可为类似工程提供设计依据；

建立了“工程防渗-生态修复”协同评价指标体系，实现了综合效益的最大化。

参考文献

- [1] 方沁龄. 水工隧洞渗漏综合治理及生态修复的思考[J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(08): 130-131.
- [2] 谢德俊. 关于水工隧洞渗漏治理和生态修复工作的探索[J]. 工程建设与设计, 2020, (16): 93-94.
- [3] 赵祯. 水工环技术在矿山地质灾害监测中的应用探讨[J]. 当代水电科技, 2025, 2(1)
- [4] 裴迅. 水工隧洞开挖对地质环境多因子扰动机理及调控方法研究[D]. 华北水利水电大学, 2024.