

图 1 接力泵船浮动锚定系统布置图

隙从 12mm 收窄至 8mm，确保破碎充分。

接力泵船的布置采用浮动式锚定系统（见图 1），4 根直径 48mm 的锚链以 45° 角固定船体，允许 ±5m 范围内随水位变化自动调整位置。泵船上配备的变频控制系统根据进口压力实时调节泵速，压力低于 0.4MPa 时转速提升至 900rpm，高于 1.5MPa 时降至 600rpm，避免管道超压。第二艘接力泵船除常规输送功能外，还承担应急旁通任务，当检测到主管路堵塞征兆（压力突增超过 2.0MPa）时，自动开启旁通阀，将 30% 流量分流至备用管路。整个输送系统的能耗控制通过智能调度实现，根据实时输送量和管道压降计算最优泵速组合，使综合能耗维持在 125~145kWh/1000m<sup>3</sup>。

施工期间，接力泵船的维护周期设定为每运行 120h 进行一次叶轮间隙检查，间隙超过 15mm 时立即调整，确保输送效率始终保持在设计值的 92% 以上。

#### 4 效益分析

本工程实施复合式挖泥船作业模式后，围绕“破碎效率、输送稳定性、环保控制”三个核心指标进行了全过程监测与评估。通过分段分层开挖策略，实现了不同岩层对应不同切削工况的动态适配，特别是在微风化花岗岩层引入 150 MPa 高压水射流预切削，使绞刀切削深度由改造前的 15~20 mm/次提升至 28~32 mm/次；装舱溢流法配合三级沉降与 0.5 mm 滤网，实现了溢流水悬浮物浓度 ≤ 150 mg/L，有效达到了生态区排放标准；新增两艘 800 kW 接力泵船后，长距离输送压降降低 12.4%，管道堵塞次数减少至施工初期的 1/3。同时，实时监控与自动参数调整算法的应用，使设备运行扭矩超过 85% 额定值的持续时间减少了 56%，延长了绞刀齿和叶轮的使用寿命。经连续 45 天监测，总体开挖效率提升 35%，单位能耗下降 14%，设备维护费用降低 31%，并保持边坡精度偏差不超过 ±0.3 m。

可以看到，分段分层开挖有效提高了不同硬度岩层的匹配度，减少过度负荷；装舱溢流法的梯级沉降与动

态流量控制不仅减少水体污染，还提高了舱容利用率；接力泵船辅助大幅改善了长距离输送的能耗与稳定性。

表 3 结果统计

指标类别	改造前数值	改造后数值	提升/降低幅度
平均切削深度 (mm/次)	15~20	28~32	+58%
平均开挖效率 (m <sup>3</sup> /h)	2200	2970	+35%
输送系统压降 (MPa/km)	0.33	0.289	-12.4%
管道堵塞次数 (次/月)	9	3	-66.7%
单位能耗 (kWh/1000m <sup>3</sup> )	165	142	-14%
绞刀齿损耗率 (个/h)	0.8	0.55	-31.3%
边坡精度偏差 (m)	±0.45	±0.3	提高精度 33%
悬浮物浓度 (mg/L)	820	≤150	符合环保标准

#### 5 结语

本研究针对硬质岩层条件下航道开挖效率低、设备损耗高、环保要求严等问题，构建了以改装绞吸式挖泥船为核心，融合斗轮预处理、高压水射流破岩与接力泵船输送的复合式挖泥工艺体系。通过分段分层作业、动态工况调整以及装舱溢流与沉降控制，实现了破碎、输送与环保的综合优化，验证了该模式在复杂地质与敏感环境下的可行性与经济性。

#### 参考文献：

- [1] 周继辉, 路萍. 绞吸挖泥船疏浚成本分析与控制策略研究 [J]. 水运工程, 2025, (08): 250-254.
- [2] 马忠贤, 王玉国, 闻长生. “新海鲟”轮双燃料耙吸挖泥船液化天然气系统设计方案研究 [J]. 中国港湾建设, 2025, 45(07): 91-96.
- [3] 任禹陪, 杨剑涛, 何炎平, 等. 不对称自航绞吸挖泥船回转性能预报 [J]. 船舶工程, 2025, 47(07): 51-58.
- [4] 肖泽伟, 戴浪海, 张兴任. “海海”系列耙吸挖泥船泥门行程传感器国产化研究 [J]. 中国设备工程, 2025, (13): 237-240.
- [5] 刘荣凯, 李傲挺. 底部泥门开启时的耙吸挖泥船水动力特性分析 [J]. 造船技术, 2025, 53(03): 27-32+82.
- [6] 李付马, 张君锋. 绞吸式挖泥船疏浚施工技术 [J]. 产品可靠性报告, 2025, (06): 141-143.

# 滇中引水工程香炉山隧洞 TBM 洞段 地面预注浆探查方案研究

王旺盛<sup>1,2\*</sup>, 沙松龄<sup>3</sup>, 任宇翔<sup>1,2</sup>

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2. 长江三峡勘测研究院有限公司(武汉), 湖北 武汉 430074;  
3. 云南滇中引水工程有限公司, 云南 昆明 650000)

**摘要:** 香炉山深埋长隧洞是滇中引水工程控制性工程, 隧洞总长约 63km, 最大埋深 1450m, 具有线路长、埋深大、地质构造背景与岩溶水文地质条件复杂、地下水环境影响敏感等工程特点, 施工过程中面临断层破碎带、软岩大变形、涌水突泥、高外水压力、高地应力等诸多难题。鉴于香炉山隧洞复杂特殊的地质条件, 常规的地质勘探深度已不能够满足施工需要, 本文重点研究了香炉山隧洞 TBM 洞段采用“L”型地面定向钻探查方案, 计划采取定向取芯、岩屑录井、钻时录井、钻井液录井、综合测井、钻孔电视、压水试验等多种技术手段实现探查目的, 并根据探查结果综合判断需要灌浆的洞段, 最终达到探查地层及灌浆堵水加固的目的。

**关键词:** 香炉山隧洞; 深埋长隧洞; 复杂地质条件; 地面预注浆; 探查方案

中图分类号: TV22 文献标识码: A 文章编号: 1006—7973 (2025) 21—0141—04

## Research on the Ground Pre-grouting Exploration Scheme for the TBM Section of Xianglushan Tunnel in the Central Yunnan Water Diversion Project

Wang Wang-sheng<sup>1,2\*</sup>, Sha Song-ling<sup>3</sup>, Ren Yu-xiang<sup>1,2</sup>

(1. Changjiang Surveying Planning Design Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, Hubei, China; 2. Changjiang Three Gorges Survey Research Institute Co., Ltd. (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Yunnan Province Dianzhong Water Diversion Project Co., Ltd., Kunming 650000, Yunnan, China)

**Abstract:** The Xianglushan deep-buried long tunnel is a key project of the Central Yunnan Water Diversion Project, with a total length of about 63 km and a maximum burial depth of 1450 m. It has the engineering characteristics of long route, great burial depth, complex geological structure background and karst hydrogeological conditions, and sensitive groundwater environmental impact. During the construction process, it faces many difficulties such as fault broken zone, soft rock large deformation, water gushing and mud bursting, high external water pressure, and high ground stress. Given the complex and special geological conditions of the Xianglushan Tunnel, the conventional geological exploration depth can no longer meet the construction needs. This paper focuses on the “L”-shaped ground directional drilling exploration scheme for the TBM section of the Xianglushan Tunnel. It is planned to use various technical means such as directional coring, cuttings logging, drilling time logging, drilling fluid logging, comprehensive logging, borehole television, and pressure water test to achieve the exploration purpose. The sections that need grouting are comprehensively judged according to the exploration results, and the purpose of exploring strata and grouting for water blocking and consolidation is finally achieved.

**Keywords:** Xianglushan Tunnel; deep-buried long tunnel; complex geological conditions; ground pre-grouting; exploration scheme

香炉山隧洞是滇中引水工程的关键控制性工程, 采用钻爆法+TBM 施工, 其地质条件具有“三高两活跃”的特点, 即“地应力高、外水压力高、地震烈度高, 地下水环境活跃、地质构造活跃”<sup>[1]</sup>。香炉山隧洞 TBM 施工段共采用 3 台 TBM, 截至 2025 年 3 月 25 日, 香炉山隧洞 TBM 掘进段合计还剩余 27.38km, 施工面临涌水突泥、断裂破碎带、高地应力软岩大变形、硬岩岩爆等不良地质问题, 后续 TBM 掘进任务仍十分艰巨, 施工的综合难度仍非常大。其中 3-1# 支洞下游的“弘毅

号” TBMa, 自 2022 年 9 月掘进施工以来, 累计掘进了 2245.66m, 还剩余 5085.46m。

香炉山隧洞后续 TBM 掘进段的 TBM 适应性, 将直接影响香炉山隧洞工期, 从目前开挖揭露的地质条件分析, 香炉山隧洞 III 类围岩占比约 30%, IV 类、V 类围岩占比约 70%。鉴于香炉山隧洞复杂特殊的地质条件, 常规的地质勘探深度已不够, 需要采用非常规且创新的地勘手段<sup>[2]</sup>, 香炉山隧洞 TBM 后续掘进段地面钻探灌一体共涉及 12 处洞段, 探灌洞段总长约 9.2km, 其中 3-1#

支洞下游 XLDXZK1 探灌洞段长度 500m, 本文重点研究 3-1# 支洞下游 XLDXZK1 地面定向钻实施及相应的探查方案。

地面钻探实施过程可结合取芯、录井、综合测井、钻孔电视、压水试验等多种技术手段实现探查目的; 同时, 采用地面钻探灌工艺, 可充分“一孔多用”, 通过探查成果加深对沿线地质条件的认识, 为施工方案、措施及工法的针对性、及时性和有效性奠定基础, 最终达到探查地层及灌浆堵水加固的目的<sup>[3]</sup>。

## 2 工程概况

香炉山隧洞 3-1# 施工支洞下游主洞“钻探灌”洞段桩号范围为 DL I 20+402 ~ 20+902 段, 钻场 (XLDXZK1) 位于白汉场槽谷南侧与汝南河槽谷北侧之间山体平台, 隧洞沿线地面高程一般 2950 ~ 3092m, 隧洞一般埋深 920 ~ 1060m, 最大埋深 1068m。XLDXZK1 钻场“钻探灌”的地层岩性为二叠系峨眉山组 (P<sub>2</sub>) 玄武岩夹凝灰岩, 凝灰岩呈层状 (或透镜体), 玄武岩岩质较坚硬, 主要为致密状结构, 少量为斑晶状结构, 岩体完整性差至较破碎; 凝灰岩为紫红色或灰绿色、性软且大多呈碎裂、碎屑状散体结构, 总体胶结较差至差, 岩体较破碎~破碎。工程区地层分布见图 1。

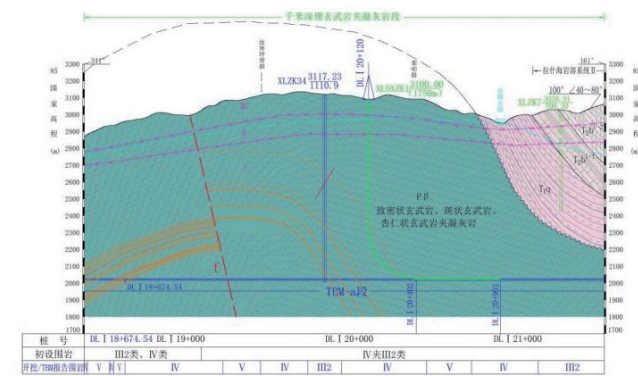


图 1 XLDXZK1 钻场“钻探灌”洞段地质剖面示意图

1. 北衙组下段上部条带状灰岩夹碳、泥质灰岩; 2. 北衙组下段下部砂泥岩与灰岩互层; 3. 青天堡组砂岩、泥岩及页岩互层; 4. 峨眉山组玄武岩夹凝灰岩; 5. 地层分界线; 6. 不整合界线; 7. 正断层及编号; 8. 风化带及下限 (强 / 弱 / 微); 9. 地下水位线; 10. 设计水位线; 11. 可研勘探钻孔; 12. 新增勘探钻孔; 13. 钻探灌一体定向钻布置钻孔。

## 3 探查工作内容与工作量

XLDXZK1 钻场共布置 2 个钻孔, 其中第一个钻孔 (XLDXZK1-1) 作为探查孔, 探查计划安排定向取芯、录井、声测井、核测井、热测井、工程测井、电阻率测试、钻孔电视、压水试验等试验项目, 先对隧洞拟处理洞段 (桩号 DL I 20+402 ~ 20+902) 进行地质条件探查, 然后根据探查结果决定是否进行灌浆, 为隧洞掘砌提供可靠的地质依据<sup>[4]</sup>。

### 3.1 定向取芯

本次计划在探灌段平均每 100m 取 1 次岩芯, 钻孔进尺不小于 2m, 取芯位置尽可能在岩性变化的部位实施, 且可动态调整, 特殊部位加密, 取芯工作量 10m/5 次。

### 3.2 录井

录井包括钻时录井、岩屑录井、钻井液录井, 其中钻时录井每钻进 1m 记录 1 个点; 岩屑录井每 2m 取一次岩屑; 钻井液录井全孔做, 每 2 小时检测一次返出钻井液的密度、黏度、失水量、泥饼、含砂量、pH 值等, 调整钻孔钻井液时, 加密测量, 每 1h 测定一次简易性能测定 (密度、粘度)。

### 3.3 随钻测井

随钻测井是指在探灌段成孔灌浆之前, 采取核测井 (自然伽玛, GR)、热测井 (井温, TEM)、电阻率测井方法随钻进行测试。测试工作量均为探灌段长度 500m。

### 3.4 综合测井

综合测井一般包括: 声测井 (声波速度、CV)、核测井 (自然伽玛, GR)、热测井 (井温, TEM)、工程测井 (井径)、电阻率测井等。其中核测井 (自然伽玛, GR)、热测井 (井温, TEM)、电阻率测试等随钻测试在探灌段成孔灌浆之前进行, 测试长度即为探灌段长度; 声测井 (声波测试、CV)、工程测井 (井径) 在探灌段前部 50 ~ 100m (根据现场情况进行动态调整) 成孔灌浆前进行裸孔测试; 成孔灌浆后全部探灌段进行全要素综合测井工作。通过对探灌段成孔灌浆前、后各项物性指标进行对照, 可用于指标修正。

### 3.5 钻孔电视

主要做钻孔摄像, 即利用可视化探测钻孔, 通过可见光数字化摄像系统, 采集孔壁图像、孔内视频, 获取直观地质信息的工作。本次在钻孔 XLDXZK1-1 的垂直孔段进行钻孔摄像, 测试长度 200m。具体测试位置及长度视地质条件调整。