

基于隧洞突涌水防控的长距离反坡施工排水系统设计

狄 鹏

(中铁四局集团第三建设有限公司, 天津市 300171)

摘要: 某输水隧洞钻爆法区间逆坡排水长度3 410 m, 穿越多条富水断层破碎带和可溶岩, 其斜井支洞全长1 872 m, 高差167.4 m, 隧洞突涌水风险极高; 预测最大稳定突涌水量30 000 m³/d, 断裂带处最大单点突涌水量增加20 000 m³/d。通过涌水量确定、支洞/主洞泵站级数和位置比选、水泵选型等确定了“支洞三级+主洞两级固定泵站”的两阶段反坡接力排水系统; 计算了排水管路配置, 利用快速切换装置将高压风管作为应急排水管路; 应用智能控制系统加强排水运行管理, 实现了节约成本、降低能耗、防范风险的目标, 解决了长距离高反坡隧洞排水和突涌水防范难题, 为长距离复杂地质富水隧洞安全、高效施工提供了重要保障, 可为同类工程提供经验参考和借鉴。

关键词: 隧洞; 反坡排水系统; 长距离; 高反坡; 突涌水

中图分类号: TU992.05

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)03-0248-05

Design of Long-distance Counter-slope Construction Drainage System Based on Prevention and Control of Tunnel Sudden Water Inflow

DI Peng

(CTCE Group Third Construction Co., Ltd., Tianjin 300171, China)

Abstract: The length of the counter-slope drainage in the drilling and blasting section of a water conveyance tunnel is 3 410 m, crossing the multiple water-rich fault fracture zones and soluble rocks. The total length of its inclined shaft branch tunnel is 1 872 m and a height difference is 167.4 m. The risk of sudden water inflow in the tunnel is extremely high. It is predicted that the maximum stable sudden water inflow is 30 000 m³/d, and the maximum single-point sudden water inflow at the fault zone increases by 20 000 m³/d. The two-stage counter-slope relay drainage system of "three-level branch tunnel + two-level main tunnel fixed pumping station" is determined through the determination of water inflow, comparison of the level number and location of branch tunnel / main tunnel pumping stations, and type selection of water pumps. The configuration of drainage pipeline is calculated. A quick switching device is used as the emergency drainage pipeline for the high-pressure air duct. The intelligent control system is applied to strengthen the drainage operation management, which realizes the goals of cost saving, energy consumption reduction and risk prevention, and solves the problems of drainage and water inflow prevention in long-distance high counter-slope tunnels, providing the important guarantees for the safe and efficient construction of long-distance complex geological water-rich tunnels, and experiential reference and inspiration for similar projects.

Keywords: tunnel; counter-slope drainage system; long distance; high counter-slope; sudden water inflow

0 引言

隧洞施工期排水方法根据隧洞反坡或顺坡的不同, 顺坡隧洞可通过水的重力自流作用, 将围岩渗漏水汇集至排水沟内并排出洞外。反坡隧洞排水则一般需采用水泵将积水抽排至洞外。同时, 根据排水

量和隧洞高差等需要, 隧洞反坡排水系统一般采用分级接力排水, 设置多座排水泵站、多台水泵及配套管道等。一些工程技术人员^[1-3]在反坡隧洞排水施工中, 通过设计多级泵站、多台水泵接力排水, 并计算水泵型号、数量、管路等排水参数, 加强排水系统管理, 保障反坡隧洞长期、高效排水。同时隧洞穿越富水断裂带、岩溶等不良地质洞段时, 突涌水风险高, 科学、合理的排水系统设计是防范突涌水、确保隧洞施工安全的重要保障^[4-5]。

收稿日期: 2025-08-27

作者简介: 狄鹏(1983—), 男, 本科, 高级工程师, 从事施工技术管理工作。

1 工程概况

某输水隧洞工程主洞长 15.1 km,设计流量 110 m³/s,隧洞成洞洞径 8.1 m,纵坡 1/2 000,设置施工支洞作为交通兼检修支洞。支洞全长 1 872 m,综合纵坡 9.23%,最大纵坡 10.26%,主支交汇段高程 1 07.6 m,支洞洞口高程 275.0 m,支洞高差 167.4 m。主洞下游方向为钻爆法区间,顺坡掘进逆坡排水长度为 3 410 m,高差 1.7 m。

隧洞沿线地质为黑云母二长花岗岩、大理岩、泥灰岩及云母石英片岩、变质石英砂岩,隧洞穿越包含 I 级断裂 1 条、II 级断裂 6 条、III 级断层 2 条等共 9 条断层破碎带(以 F4、F88 断层尤为突出),且叠加大理岩、灰岩的可溶岩洞段,突涌水风险极高。按照隧洞贯通后裸洞计算,穿越断层洞段最大涌水量共计 84 858 m³/d;支洞、主洞钻爆段正常涌水量达 9 808 m³/d、38 689 m³/d;合计正常涌水量达 4.85 万 m³/d,最大涌水量达 13.3 万 m³/d。

2 方案比选

2.1 涌水量确定

隧洞反坡排水方案是基于设计涌水量而制定的,故确定科学合理的涌水量尤为重要;李方东^[6]介绍了基于涌水量预估和动态监测的公路隧道长距离反坡排水施工技术,提出成本最小化排水优化公式,优化泵站分级设计及水泵功率选择;赵宇等^[7]提出基于水量监测和限量排放的分阶段反坡排水技术,提出不同涌水量的限量排放标准等。

根据设计勘测计算和推测数据,结合已开挖段揭露水文地质情况和实测排水量数据,遵循“先探水后掘进,防堵排结合,多道设防,综合治理”的原则,综合考虑后确定涌水量标准:

支洞贯通后全长涌水量按 10 000 m³/d 进行排水系统设计;主洞贯通后全长涌水量按 20 000 m³/d 进行排水系统设计,并于 F4 断层位置在施工期间增设 20 000 m³/d 的应急排水系统。

2.2 支洞泵站级数和位置比选

支洞全长 1 872 m,支洞综合纵坡约 9.23%,高差为 167.4 m;支洞洞段采用分级反坡排水系统进行抽排水。经分析对比,对单级、两级~四级排水等共 6 种方案进行了比选和确定,见表 1。

从支洞固定泵站级数方面分析,支洞三级固定泵站和支洞四级固定泵站均具备可操作性,但、支洞

表 1 支洞反坡排水分级和固定泵站布设位置比选表

方案	固定泵站级数	支洞长度/m	设计排水量/(m ³ ·h ⁻¹)	高程差/m	沿程水力损失/m	最小扬程/m
一	单级	1 872	1 250.00	167.40	17.97	185.37
	1 级	532	875.00	47.32	5.08	52.40
二	2 级	490	1 208.33	46.45	4.71	51.16
	3 级	460	1 229.17	36.85	4.43	41.28
	4 级	390	1 250.00	36.78	3.75	40.53
三	1 级	472	858.33	41.51	4.50	46.01
	2 级	450	1 191.67	42.00	4.33	46.33
	3 级	500	1 225.00	40.95	4.81	45.76
	4 级	450	1 250.00	42.94	4.33	47.27
四	1 级	642	875.00	56.87	6.14	63.01
	2 级	580	1 208.33	55.34	5.58	60.92
	3 级	650	1 250.00	55.19	6.25	61.44
五	1 级	872	1 166.67	78.39	8.35	86.74
	2 级	530	1 208.33	44.01	5.10	49.11
	3 级	470	1 250.00	45.00	4.52	49.52
六	1 级	922	1 166.67	83.51	8.83	92.34
	2 级	950	1 250.00	83.89	9.14	93.03

注:方案二、方案四固定泵站设于支洞断层下坡侧;方案三、方案五固定泵站设于支洞断层面上坡侧。

三级泵站较支洞四级泵站节约一座固定泵站的洞室开挖和回填、土建工程、水泵配置数量,且在水泵抽水用电能耗、反坡排水系统及其管理、维护成本等方面采用三级泵站方式成本更优。其次,考虑到支洞断层处涌水量较为集中,约占支洞全长涌水量的 74%,为便于支洞断层处涌水可就近自流至下方的固定泵站处,将固定泵站布置于支洞断层的下坡侧。最终确定支洞采用三级固定泵站排水。

2.3 主洞泵站级数和位置比选

主洞下游区间长 3.4 km,纵坡 1/2 000,高差 1.7 m;主洞洞段采用分级反坡排水系统进行抽排水,并于 F4 断层位置在施工期间增设 20 000 m³/d 的应急排水;经分析对比,对三种方案进行了比选和确定,见表 2。

为防范断层处突涌水问题和便于突涌水的应急处置,将主洞固定泵站分别布置在 F4 断裂带、F88 断层群的附近位置。结合断层分布位置、主洞长度区间和突涌水防范的需要,主洞采用两级固定泵站排水:第 1 级固定泵站距离 F4 大断裂带的距离约 110 m,第 2 级固定泵站距离 F88 断层群的距离约 200 m。

2.4 水泵配置

隧洞排水主要为围岩裂隙水,考虑到地下水成分,排水用水泵可采用潜水泵、潜污泵、离心泵等^[8]。根据对不同厂商、型号的水泵的比选分析和经济性

表2 主洞反坡排水分级和固定泵站布设位置比选表

方案	固定泵站级数	主洞涌水量/(m ³ ·h ⁻¹)	断层应急涌水量/(m ³ ·h ⁻¹)	高程差/m	沿程水力损失/m	最小扬程/m
一	单级	833.33	833.33	0.41	7.79	8.20
二	1级	833.33	833.33	0.41	7.79	8.20
	2级	833.33	0.00	0.65	12.51	13.16
三	1级	833.33	833.33	0.41	7.79	8.20
	2级	833.33	0.00	0.40	7.70	8.10
	3级	833.33	0.00	0.45	8.66	9.11

对比,确定了水泵配置方案。

隧洞反坡排水水泵按照“一用一备一检修”的配置原则,支洞固定泵站设置3台卧式离心泵(预留1台水泵机位、用电容量),单泵流量625 m³/h、扬程67 m、功率180 kW,每级固定泵站设置1台800 kVA变压器。主洞固定泵站设置3台卧式离心泵(预留1台水泵机位),单泵流量450 m³/h、扬程15 m、功率37 kW,两级固定泵站共设置1台500 kVA变压器,见表3。

表3 固定泵站水泵及用电配置表

序号	部位	里程位置	水仓	水泵型号	单泵流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	扬程/ m	单台电机 功率/kW	水泵 数量	水泵使用功 率/kW	变压器 型号	
1	支洞 1 级 固定泵站	K1+872	污水仓	YOS200-520(A)	625	67	180	1	180	540	800 kVA
2			清水仓	YOS200-520(A)	625	67	180	2	360		
3	支洞 2 级 固定泵站	K1+230	污水仓	YOS200-520(A)	625	67	180	1	180	540	800 kVA
4			清水仓	YOS200-520(A)	625	67	180	2	360		
5	支洞 3 级 固定泵站	K0+650	污水仓	YOS200-520(A)	625	67	180	1	180	540	800 kVA
6			清水仓	YOS200-520(A)	625	67	180	2	360		
7	主洞 1 级 固定泵站	K80+500	污水仓	YOS150-290	450	15	37	1	37	111	500 kVA
8			清水仓	YOS150-290	450	15	37	2	74		
9	主洞 2 级 固定泵站	K81+800	污水仓	YOS150-290	450	15	37	1	37	111	
10			清水仓	YOS150-290	450	15	37	2	74		

3 反坡排水系统设计

3.1 支洞施工阶段排水系统

支洞掘进施工期间,按照三级固定泵站、清污合流进行排水系统及管路的设计布置,设计抽排水量为416.67 m³/h。

掌子面附近设置移动污水泵站,移动污水泵站主要包括:作业面集水箱、移动水箱、提升泵、配电柜及相关管路,掌子面污水通过临时排水沟将施工过程中产生的污水及掌子面涌水汇集到集水箱内,通过小型提升泵将集水箱内水提升至移动污水水箱内,再通过移动污水水箱内的提升泵通过管路将污水提升到最近的固定泵站的污水仓。之后逐级传递到支洞洞口后,排至洞外污水处理池(见图1)。

3.2 主洞施工阶段排水系统

主洞施工期间,支洞已贯通,按照主洞两级固定泵站+支洞三级固定泵站、清污分流进行排水系统及管路的设计布置,清水设计抽排水量为1 250 m³/h,污水设计抽排水量为200 m³/h。

掌子面区域污水收集、汇集至掌子面附近的移动污水泵站并抽排至就近的固定泵站排出。清水通

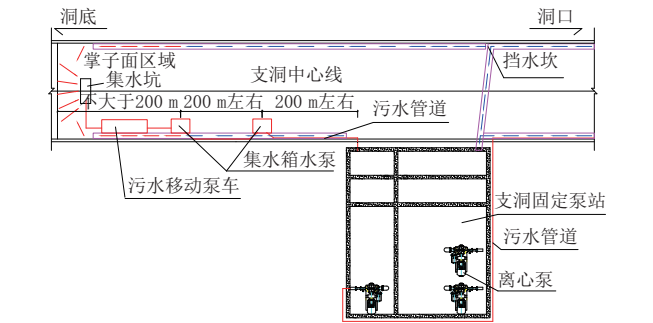


图1 支洞施工阶段排水系统平面布置图

过主洞两侧水沟顺坡流至端头集水坑,通过管道汇集至移动清水泵车附近的集水箱,利用清水提升泵并提升至清水移动泵车连接的清水管道上,每400 m左右设1处清水集水箱和水泵,再通过清水管道抽排至就近的固定泵站的清水仓。之后逐级传递到支洞洞口后排至附近水域(见图2)。

3.3 固定泵站设计

固定泵站设计参照以下原则^[9]:水仓容积按泵站10~15 min排水能力设计,分为清水仓和污水仓。根据计算和布置,支洞、主洞固定泵站污水仓、清水仓均分为3级沉淀;污水仓总容积168.35 m³、清水仓总容积336.7 m³,支洞固定泵站总存水能力约为450 m³;

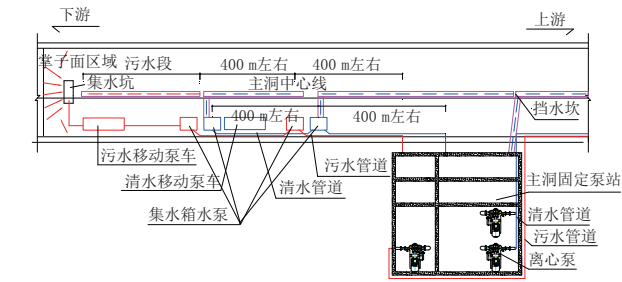


图2 主洞施工阶段排水系统平面布置图

主洞固定泵站总存水能力约为 300 m³(见图3)。

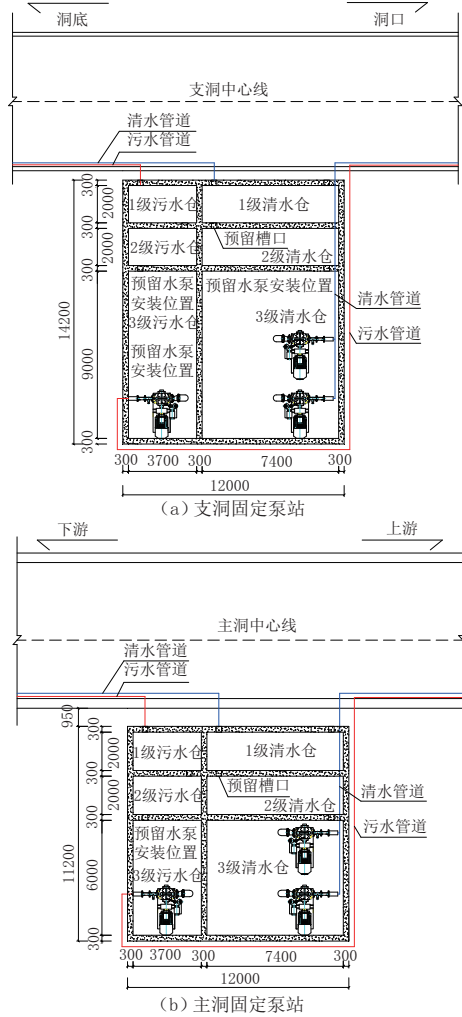


图3 固定泵站平面布置图(单位:mm)

3.4 管道设计

隧洞反坡排水系统设计正常抽排水量 30 000 m³/d (2 台水泵), 应急排水时排水量 50 000 m³/d (3 台水泵), 排水管道采用压力流时, 压力管道的设计流速宜采用 0.7 ~ 2.0 m/s^[10]。当输送浑水时, 为避免管内淤积, 最小流速应大于 0.6 m/s。排水管道直径 D 计算如下:

$$D = \sqrt{4Q/\pi V_p} \tag{1}$$

式中: Q 为管道流量, m³/s; V_p 为排水管内水流流速, m/s。

采用式(1)计算, 正常排水时, 正常流速取 1.5 ~ 2.0 m/s, 计算后选取 2 根内径 300 mm 钢管进行排水, 其中排水管“一用一备”, 与水泵相对应。应急排水时考虑最大流量, 应急排水流速取 2.5 m/s, 计算后选取 3 根内径 300 mm 钢管进行排水。

为防止水锤作用影响管道稳定性, 在支洞洞段 DN300 的主管道上每隔 200 m 布置一处高压止回阀和高压球阀, 以消除水锤压力, 防止截止阀损坏并便于设备检修更换。

4 应急排水系统

4.1 双回路供电系统

支洞固定泵站配备 3 台 180 kW 的离心泵, 并预留 1 台离心泵安装机位, 每级泵站最大用电量达 720 kW, 每级支洞固定泵站对应在洞内设置 1 处变压器洞室, 由 1 台 800 kVA 变压器进行配电, 能够满足正常排水和应急排水需要。

为保证洞内排水正常顺畅, 隧洞反坡排水供电系统采用双回路电源供电, 同时配置 1 台 800 kW 的移动发电机保障应急发电。

4.2 应急排水管路

根据计算, 正常排水时需配备 2 根 DN300 管道进行排水, 应急排水时需配备 3 根 DN300 管道进行排水。为充分应用已安装的管道, 利用钻爆法施工高压供风管作为应急排水管, 通过设置多道三通阀门实现管路功能由供风向排水的快速切换。高压供风管作为应急排水管的快速切换装置见图 4。

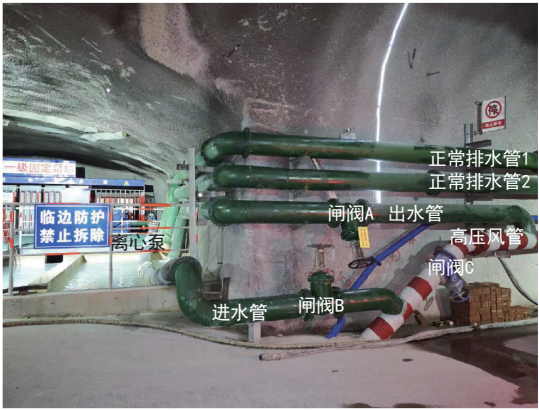


图4 高压供风管作为应急排水管切换装置示意图

每个固定泵站处在高压供风管上设置风路、水路阀门, 正常情况下把水路阀门关闭, 作为高压供风使用。一旦遇到突涌水情况, 立即把供风闸阀关闭, 停止高压供风, 关闭风路阀门, 打开水路阀门, 通过提前预装好的软管与泵站内的应急水泵相连, 进行

应急抽排水,有效防范隧洞突涌水所造成的淹井等。

5 排水运行管理

隧洞反坡排水系统可从建立管理领导小组或工作专班、设置智能控制系统、加强核算分析制度等方面,强化日常管控,确保隧洞排水通畅。

成立施工排水管理领导小组,安排专人对每天抽排水、能耗情况进行记录,并对数据及时分析,形成变化曲线图等;成立隧洞风水电管理专班,对隧洞排水、电力、管路等系统进行日常巡检和维护,保障隧洞排水系统正常运行。

固定泵站配置智能控制系统,分为清水泵站管理系统和污水泵站管理系统;排水管理系统站由中控室、传输系统、就地控制柜、动力柜、就地设备及仪表等部分组成,通过软件的设置实现无人值守,实现所有固定泵站自动启泵排水、自动停机、历史数据记录、故障报警、警戒水位报警、视频监控、排水数据监测记录等功能,实现实时监控、远程智能操作、自动控制等功能,强化排水系统智能运行管控。

以该工程施工排水为例,应用该隧洞反坡排水系统及应急排水系统,截至2025年6月,累计抽排水量达140余万 m^3 ,未发生因涌水量超过排水能力造成的淹井灾害。同时成功应对了多次掌子面突发涌水事件(最大涌水约 $130\text{ m}^3/\text{h}$),检验了隧洞排水系统能力,有效防范了反坡隧洞因突发涌水造成淹井的风险。

6 结 语

根据设计要求和工程实际工况,本文设计了正常排水、应急排水两种模态的隧洞反坡排水系统,满足最大稳定突涌水量 $3\text{万 m}^3/\text{d}$ 的正常抽排水量及最大单点突涌水量增加 $2\text{万 m}^3/\text{d}$ (合计 $5\text{万 m}^3/\text{d}$)应急

抽排水的要求,确保长距离隧洞反坡排水顺畅,并具备防范突涌水的抽排能力。

(1)设计了支洞三级固定泵站+主洞两级固定泵站的两阶段反坡接力排水系统,针对突涌水风险高的部位调整固定泵站位置,优化固定泵站结构设计,以实现快速抽排。

(2)根据计算优化排水管路配置,利用快速切换装置将高压风管作为应急排水管路,配备必要的排水电力设计,节约排水管路的同时又可保障应急抽排。

(3)建立隧洞施工排水工作专班、应用智能控制系统加强排水运行管理,实现了节约成本、降低能耗、防范风险的目标,解决了长距离高反坡隧洞排水和突涌水防范难题,为长距离复杂地质富水隧洞安全、高效施工提供了重要保障,可为同类工程提供经验参考。

参考文献:

- [1] 徐昕,纪鸿朋,徐帅军,等.长斜井施工期大纵坡反坡排水技术研究[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(7):40-43.
- [2] 解攀.富水隧道大坡度斜井反坡排水施工技术研究——以黎霍高速太岳山隧道富水大坡度斜井施工项目为例[J].工程技术研究,2022,7(18):65-67.
- [3] 李欣.特长隧道大纵坡反坡排水施工技术研究[J].四川水泥,2022(9):214-216.
- [4] 许锡甲.高寒地区长大隧道反坡排水施工技术分析[J].路基工程,2017(4):218-220.
- [5] 罗舟.输水隧洞斜井高反坡长距离排水施工技术研究[J].中国水运(下半月),2020,20(10):160-162.
- [6] 李方东.基于涌水量预估和动态监测的公路隧道长距离反坡排水施工技术及其应用[J].隧道建设,2015,35(12):1321-1330.
- [7] 赵宇,全斐,沈家君,等.基于限量排放的大坡度富水隧道反坡排水技术[J].中国铁路,2020(12):191-198.
- [8] GB 50265—2010 泵站设计规范[S].
- [9] TB 10109—95 铁路隧道辅助坑道技术规范[S].
- [10] GB 50014—2021 室外排水设计标准[S].