

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230264

矿井式抽水蓄能电站地下巷道群水力过渡过程特性研究

张沛顶¹, 苗梅², 朱丽至³, 韩云¹, 邬敏², 周建旭³, 马枫林¹,
王育芳¹, 张洪亮¹, 滕云龙¹, 李尊龙¹

(1. 上海大电源股份有限公司, 江苏 徐州 221611; 2. 中电联电力发展研究院有限公司, 北京 100053;
3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 矿井式抽水蓄能电站利用地下巷道群作为下库, 在水力过渡过程中存在复杂多变的明满流流态, 直接影响系统的运行稳定性和巷道群的水力安全。基于水力系统 3D 数值模拟技术, 考虑下库充水、发电甩荷和抽水断电 3 个控制工况, 分析巷道群水流的过渡过程特性及水力参数的演变规律, 评估其对巷道群水力安全的影响。研究表明, 下库(巷道群)在初次充水过程中无明显的不利流态, 下库死水位发电甩荷时调节池水位下降幅度小于 0.4 m, 下库正常蓄水位抽水断电时调节池水位上升幅度小于 10.0 m; 巷道群在过渡过程均能正常进排气, 巷道断面明满流等流态过渡平稳, 调节池和通风道满足水力优化布置要求, 可保障巷道群的水力安全。

关键词: 矿井式抽水蓄能电站; 地下巷道群; 通风道; 过渡过程; 数值模拟

中图分类号: TV671 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)12-0113-04

1 引言

为充分利用煤矿废弃的矿井资源, 提出利用废弃矿井改建抽水蓄能电站的新技术, 即矿井式抽水蓄能电站^[1]。其利用地下巷道群作为下库^[2], 巷道群布置关系、断面结构和支护型式多样, 具有明显的多场耦合特性^[3], 表现为水流流态复杂, 存在明满流等水力现象。目前, 结合地下巷道群水力特性开展针对性的研究很少, 而与其结构类型类似的输水隧洞在首次充水和过渡过程中水力特性的研究较为完善。如 TRINDADE B C 等^[4]结合数值模拟和模型试验揭示了有压输水系统考虑空气增压的充水过程; 郭永鑫等^[5]结合暗涵充水试验, 建立了长输水管道充水过程的水气两相流数值模型; 王威等^[6]阐明了变坡长隧洞内明满流交替过程的压力波动特征和截留气团的影响; 何相慧等^[7]基于 1D 和 3D 数值模拟技术, 研究了隧洞明满流过渡过程中明满流分界面移动等问题; 刘强等^[8]基于 3D 数值模拟, 分析了超长输水隧洞断面频繁突变对水流流态及水头损失变化规律的影响。隧洞水力学的相关理论和方法亦适

用于地下巷道群水力特性的研究。鉴于, 本文以某煤矿地下巷道群为研究对象, 考虑地下巷道群布置复杂性, 结合 3D 数值模拟技术, 研究了矿井式抽水蓄能电站下库(巷道群)在初期充水、发电甩荷和抽水断电工况下水力过渡过程特性和局部水流流态, 对利用地下巷道群作为抽水蓄能电站下库的合理设计具有重要的实际意义。

2 地下巷道群及其 3D 数值模型

2.1 地下巷道群布置

某煤矿退出运行后, 地下巷道群经过改造和支护后作为抽水蓄能电站的下库, 其容积满足抽水蓄能系统的正常运行要求(图 1), 巷道总长度

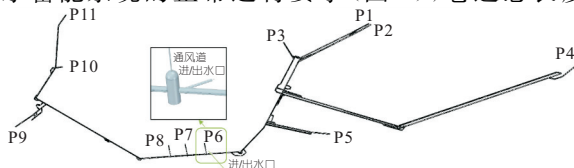


图 1 地下巷道群及其全局边界示意图

Fig. 1 Underground roadway group and its global boundary diagram

收稿日期: 2023-02-28, 修回日期: 2023-03-18

作者简介: 张沛顶(1976-), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为煤炭开采技术, E-mail: zhangpeiding@dtcec.com

通讯作者: 周建旭(1971-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为水电站过渡过程, E-mail: Jianxuzhou@163.com

约 22 km,在下库(巷道群)进/出水口侧增设 3 座调节池,以下库(巷道群)进/出水口为准,由近及远依次为# 1、# 2、# 3 调节池,分别对应图 1 中的 P6、P7、P8,其中# 1 调节池直径 10.0 m,底高程-290.0 m,顶高程-269.0 m,顶部通风道直径 1.0 m;下库(巷道群)运行特征水位,包括正常蓄水位-241.0 m,死水位-281.0 m。

为保证地下巷道群在运行过程中的水力稳定性,避免出现复杂的气液两相流问题,在巷道系统合适位置设置必要的通风道,如图 1 中 P1~P11。图 1 给出了抽水蓄能电站下库(巷道群)进/出水口位置,即# 1 调节池的进/出流边界,进/出水口中心线高程为-285.0 m。

2.2 巷道群 3D 数学建模和边界条件

鉴于地下巷道群整体尺度较大、结构关系复杂,并涉及复杂的明满流和气液两相流过程,在巷道群系统 3D 数学建模中,湍流模型选用剪切应力输运 $\kappa-\omega$ 模型(简称 SST $\kappa-\omega$ 模型),使用混合函数从壁面附近的标准 $\kappa-\omega$ 模型逐渐过渡到边界层外部的高雷诺数 $\kappa-\epsilon$ 模型,增加了横向耗散导数项,同时在湍流粘度定义中考虑了湍流剪切应力的输运过程。

考虑到研究对象整体尺寸大,且存在局部特征结构和气液两相流问题,选用 SIMPLE 作为速度压力耦合算法,以保证流体仿真计算快速收敛。湍动能和湍流耗散项的处理均选用二阶迎风格式。

在地下巷道群 3D 数值模型中,采用 ANSYS Mesh 进行地下巷道全局网格划分并进行优化处理,同时借助 Fluent Meshing 模块,采取基于“马赛克”技术的多面体—六面体(Poly-Hexcore)网格进行划分,提升网格中六面体的数量,以提高求解效率与精度。

通风道 P1~P11 与外部大气环境直接连通,其端部设置为压力进/出口边界,下库(巷道群)进/出水口设置为流量边界。

3 过渡过程监测断面

考虑到下库(巷道群)首次充水,巷道群和调节池实现从无水到蓄水,从无压到有压的动态过渡,流态转换复杂多样,且与巷道群结构安全密切相关,同时发电甩荷和抽水断电工况是抽水蓄能系统过渡过程和下库(巷道群)水位动态变幅的主要控制工况,直接影响下库(巷道群)进/出水口和调节池通风道的布置合理性,因此结合初期充水、发电甩荷和抽水断电工况,分析地下巷道群水流的过渡过程特性和局部流态。为了实时获得巷道

内控制断面的测压管水头和流量等信息,在调节池附近巷道建立多个监测断面,以巷道群最低点(底高程-285.13 m)为原点 $x=0$ m,分别定义监测断面 x 为 15、150、400、600、1 200 m。同时,在 3 个调节池底部分别设置 1 条监测线,从# 1~# 3 调节池依次为“line1”、“line2”、“line3”,实时观测监测线上压力变化,即反映调节池内的水位波动过程。

4 地下巷道群的水力过渡过程分析

4.1 巷道群初期充水工况

地下巷道群初始状态为完全充满气体,将巷道群进/出水口充水流量设为 $0 \text{ m}^3/\text{s}$,历经 12 s 后流量线性增加为 $10.51 \text{ m}^3/\text{s}$,并维持该流量向调节池和地下巷道群充水。以# 1 调节池为基准,水流向两侧巷道群并向远端流动为正,反之为负,5 个监测断面的流量动态过程见图 2(a),测压管水头动态过程见图 2(b),3 个调节池水位波动过程见图 3,巷道监测断面水力参数的控制值分析见表 1。

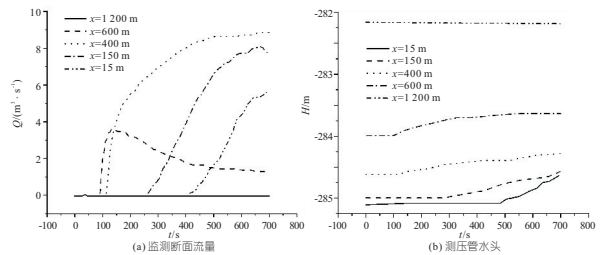


图 2 充水工况巷道监测断面的流量和测压管水头动态过程

Fig. 2 Histories of flow rate and piezometric head at monitoring sections along the underground roadway under water filling process

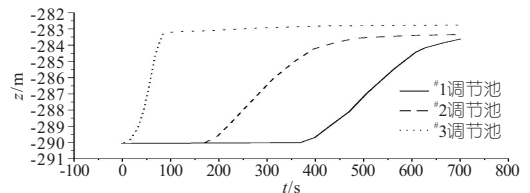


图 3 充水工况调节池水位的动态过程

Fig. 3 Histories of water level in the regulation pools under water filling process

表 1 巷道监测断面水力参数

Tab. 1 Hydraulic parameters at monitoring sections along underground roadway

监测断面/m	断面底高程/m	断面高度/m	水流通过时刻/s	$t=700 \text{ s}$ 瞬时流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$t=700 \text{ s}$ 测压管水头/m
$x=15$	-285.08	4.3	371.0	5.63	-284.62
$x=150$	-285.00	4.3	235.6	7.71	-284.57
$x=400$	-284.63	4.3	112.5	8.87	-284.30
$x=600$	-284.00	4.3	75.0	1.27	-283.65
$x=1\ 200$	-282.18	4.3		0	

由图 2、3 及表 1 可知: ①随着 #1 调节池水位上升并高于两侧衔接的主巷道底部, 水流通过距离 #1 调节池较近的两个断面 $x=600、400$ m, 并先后进入 #2、#3 调节池, 当 #2、#3 调节池水位相继达到衔接的主巷道底部时, 水流相继通过 $x=150、15$ m 断面; $t=700$ s 时断面 $x=400、600$ m 对应的流量分别为 $8.87、1.27$ m^3/s , 此时 #1 调节池至断面 $x=400$ m 巷道顺水流方向为正坡, 而 #1 调节池至断面 $x=600$ m 巷道顺水流方向为反坡, 流量明显较小, 两个断面的流量之和为 10.14 m^3/s , 略低于稳定充水流量; 考虑到调节池的调蓄作用, $t=700$ s 时断面 $x=150$ m 的流量低于断面 $x=400$ m, 断面 $x=15$ m 的流量低于断面 $x=150$ m; 在给定的充水时段内相距较远的 $x=1200$ m 断面过流量仍为 0 m^3/s , 对应图 2(b) 中的测压管水头线保持断面底高程不变, 在此充水过程中各断面流量变化过程平稳; 各监测断面的测压管水头变化缓慢, 水流流经巷道水位平稳的过渡和上升。②随着 #1 调节池水位上升, 底部监测线上测压管水头逐渐增大, 当水面到达两侧衔接主巷道底部后, #1 调节池水位上升趋缓, 随后水体从主巷道流进 #2 调节池, #2 调节池水位逐渐升高, 对应地, #3 调节池水位在滞后一段时间后逐渐上升; $t=700$ s 时 #3、#2、#1 调节池的瞬时水位分别为 $-283.62、-283.36、-282.78$ m, 考虑到此时巷道内监测断面水深很小, 流速较大, 调节处水位明显高于两侧相应监测断面的测压管水头。

进一步分析初期充水过程调节池局部的流态及演变特性, #1 调节池在不同时刻中轴面上水相体积分数分布云图演变见图 4, 图 5 为 #1、#2 调节池及巷道内典型时刻的水相体积分数分布。分析表明在巷道群初次充水过程中, 随着充水水流

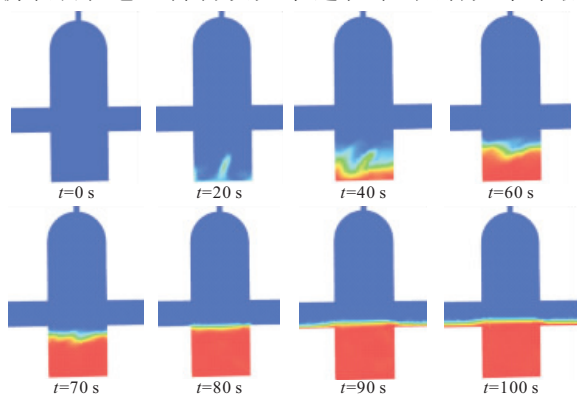


图 4 #1 调节池中轴面水相体积分数分布演变过程

Fig. 4 Evolution of axial water volume fraction distribution in #1 regulating pool

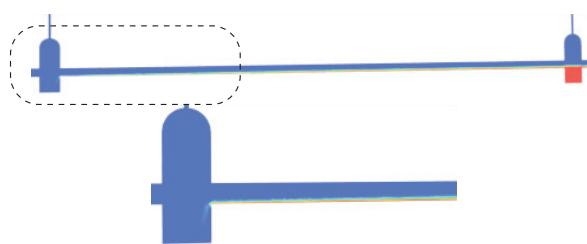


图 5 $t=180$ s 时 #1、#2 调节池中轴面水相体积分分布

Fig. 5 Axial water phase volume fraction distribution in #1 and #2 regulating pools at $t=180$ s

跌入 #1 调节池, #1 调节池水位逐步上升, 水位较低时, 因水流跌落, 水面振荡较为明显; 随着调节池水位逐渐上升, 水流的冲击逐渐减缓, 调节池水面整体上升逐步趋于平稳, 水体掺气和水面振荡现象并不明显; #1 调节池水位平稳上升至两侧巷道底高程并继续上升, 水流平缓地进入两侧巷道, 逐步实现 #2、#3 调节池的充水, 水面平稳上升, 无明显的不利流态和气液两相流现象。

4.2 发电甩荷工况

抽水蓄能系统在发电甩荷工况下, 拟定下库(巷道群)进/出口流量在 12 s 内由 10.51 m^3/s 线性降为 0 m^3/s , 以探究地下巷道群和调节池内水体的振荡特性, 各监测断面的流量和测压管水头动态过程见图 6, 3 个调节池水位波动过程见图 7。由图 6、7 可知, 在系统发电运行并用甩荷工况下, 调节池和巷道群的水流流态平稳, 因下库(巷道群)水面面积较大, 调节池两侧的巷道较长, 水

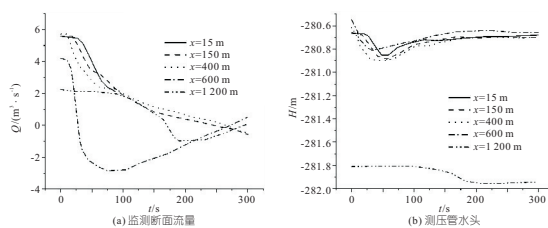


图 6 发电甩荷工况巷道监测断面流量和测压管水头的动态过程

Fig. 6 Histories of flow rate and piezometric head at monitoring sections along the underground roadway under load rejection

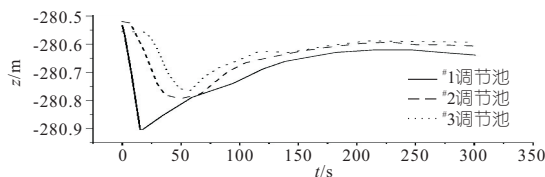


图 7 发电甩荷工况调节池水位的动态过程

Fig. 7 Histories of water level in the regulation pools under load rejection

流在惯性作用下流出调节池,调节池和巷道群水位存在明显的下降,其中[#]1调节池最低水位为-280.91 m,水位下降幅度为0.39 m,对下库(巷道群)进/出水口淹没深度的影响很小;沿程各断面压力和流量等水力参数动态过程平缓,其中监测断面 $x=15、150、400、600$ m为满流或接近满流流态,相应的测压管水头偏差较小,而[#]1调节池至断面 $x=1200$ m为长900 m的反坡巷道,且包括复杂的回形巷道,断面 $x=1200$ m的测压管水头较小,发电甩荷后趋于稳定的时间较长;因巷道群布置坡度较缓,流速较小,同时调节池和巷道群系统进排气过程顺畅,相关水力参数动态特性变化平缓,系统水力过渡过程是稳定的。

4.3 抽水断电工况

融合机组正常启动抽水进行抽水断电工况的瞬态仿真,机组正常抽水启动,进/出口流量由 $0\text{ m}^3/\text{s}$ 线性增加为 $8.71\text{ m}^3/\text{s}$,而后保持 $8.71\text{ m}^3/\text{s}$ 的抽水流量,在某一时刻机组抽水断电,流量在4 s内线性降为 $0\text{ m}^3/\text{s}$,以探究水力过渡过程中地下巷道群和调节池的水流振荡特性。各监测断面流量和测压管水头动态过程见图8,3个调节池水位动态过程见图9。

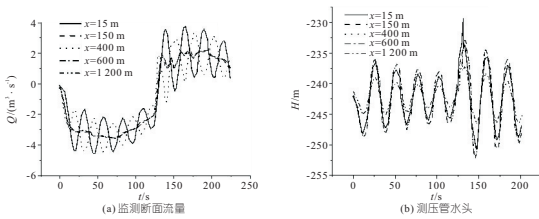


图8 抽水断电工况巷道监测断面流量和测压管水头的动态过程

Fig. 8 Histories of flow rate and piezometric head at monitoring sections along the underground roadway under pumping power failure

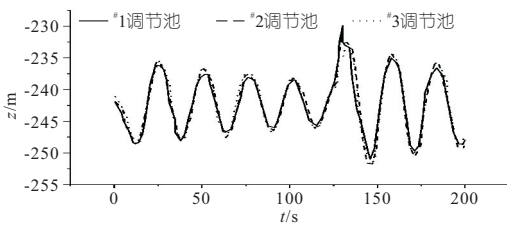


图9 抽水断电工况调节池水位的动态过程

Fig. 9 Histories of water level in the regulation pools under pumping power failure

由图8、9可知,在系统抽水运行并断电时,调节池水位处在通风道的位置,水面面积较小,且受机组启动引起的巷道群水位振荡的影响,调节池水位及附近巷道的测压管水头处于振荡峰值;在机组抽水断电后,流量减小,考虑到此时下库(巷

道群)运行水位在调节池的通风道和巷道末的进排气通道位置,相对水面面积较小,且调节池两侧巷道群较长,调节池通风道内自由液面存在明显的瞬时升高过程,[#]1~[#]3调节池的最高水位分别为-230.18、-231.60、-233.02 m,上升幅度不超过10.0 m,沿程各断面测压管水头和流量等水力参数动态过程平稳且趋于振荡稳定,调节池水位和巷道监测断面测压管水头线的振荡特征一致;调节池和巷道群系统巷道群进排气过程顺畅,相关水力参数动态特性变化平缓。

5 结论

基于3D水力学数值模拟分析,揭示了矿井式抽水蓄能电站典型工况下地下巷道群的水力过渡过程特性,发现初期充水过程中调节池和巷道群沿线水面平稳上升,并向两侧延伸,无明显的不利流态;发电甩荷工况下调节池水位降幅低于0.4 m,对进/出水口淹没深度影响很小,水力参数动态过程平稳;抽水断电工况下调节池水位位于通风道断面处,水位波动明显,上升幅度低于10.0 m,水力参数趋于振荡稳定。

参考文献:

- [1] 刘峰,李树志.我国转型煤矿井下空间资源开发利用新方向探讨[J].煤炭学报,2017,42(9):2205-2213.
- [2] 张保,曹志国,池明波,等.煤矿地下水库建设适应性条件及其设计体系[J].煤矿安全,2022,53(2):93-98.
- [3] 陈宁,李琦,袁亮.废弃矿洞抽水蓄能地下储水空间多场耦合特性研究[J].水电与抽水蓄能,2022,8(1):7-12.
- [4] TRINDADE B C, VASCONCELOS J G. Modeling of water pipeline filling events accounting for air phase interactions[J]. Journal of hydraulic engineering,2013,139(9):921-934.
- [5] 郭永鑫,杨开林,郭新蕾,等.长输水管道充水的气液两相流数值模拟[J].水利水电技术,2016,47(9):61-64,69.
- [6] 王威,吴时强,黄标,等.变坡长隧洞明满流水力特性研究[J].人民黄河,2017,39(6):94-98.
- [7] 何相慧,杨桀彬,杨建东,等.乌东德水电站明满流尾水洞瞬态水力特性研究[J].中国农村水利水电,2021(11):176-181.
- [8] 刘强,刘亚坤,张帝,等.复杂频繁突变断面输水隧洞水力特性的数值模拟研究[J].水电能源科学,2022,40(9):154-157,209.

[3] KIM SANG-GYUN, LEE KYE-BOCK, KIMK YUNG-YUP. Water hammer in the pump-rising pipeline system with an air chamber[J]. Journal of hydrodynamic, 2014, 26(4): 960-964.

[4] 王丽, 吴建华, 李琨, 等. 庄头泵站蝶阀关闭参数对停泵水锤的影响[J]. 中国农村水利水电, 2018(4): 137-140.

[5] 蒋白懿, 李博, 刘培请, 等. 多功能水泵控制阀对短距离高扬程输水管线水锤防护效果的模拟研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(3): 171-174.

[6] 王丽, 吴建华, 韩亚男, 等. 管道特性参数对庄头泵站停泵水锤的影响[J]. 人民长江, 2019, 50(7): 206-210.

[7] 刘金昊, 吴建华. 西山供水工程事故停泵水力过渡过程计算及水锤防护[J]. 水电能源科学, 2021, 39(7): 113-116.

[8] 肖伟, 郑彪, 刘富峰, 等. 新疆某供水工程停泵水锤计算与防护措施选择[J]. 水电能源科学, 2016, 34(1): 170-172, 114.

[9] 高传昌, 高余鑫, 孙龙月. 基于标准 κ - ϵ 紊流模型的泵站进水管路水力特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(5): 106-113.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 泵站设计标准: GB 50265-2022 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2022.

Study on Hydraulic Transition Process Before and After Pipeline Optimization of Pumping Station Water Delivery System Based on Bentley Hammer

ZHANG Yong¹, GAO Yu-xin², GAO Chang-jing¹, GAO Zhi-kai³

(1. Jinan Water Conservancy Engineering Service Center, Jinan 250400, China; 2. Henan Water Conservancy Survey and Design Research Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China; 3. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In order to study the characteristics of the hydraulic transition process of accidental pump stoppage before and after the pipeline optimization of pumping station water delivery system, based on the actual project, Bentley Hammer software was used to establish a mathematical model of the pumping station water delivery system with two pumps in parallel units to study the effects of the most unfavorable water hammer parameters such as water hammer pressure and unit speed before and after the pipeline optimization under different two-stage valve shutdown schemes. The results show that the maximum water hammer pressure decreased by 3.76%-8.85%, the minimum water hammer pressure increased by 4.89%-8.85%, and the maximum reversal speed increased by 1.47%-81.35% after pipeline optimization; The fast shutdown time had a significant effect on the most unfavorable water hammer parameters, and the most unfavorable water hammer parameters of the pumping station water delivery system all occurred before than before the optimization after pipeline optimization. It shows that the pipeline optimization effectively improved the water hammer characteristics and the safety of the pumping station water delivery system.

Key words: pumping station water delivery system; pipeline optimization; hydraulic transition process; Bentley Hammer; water hammer parameter

(上接第 116 页)

Hydraulic Transient Process Characteristics of Underground Roadway Group in Mine-type Pumped Storage Power Station

ZHANG Pei-ding¹, MIAO Mei², ZHU Li-zhi³, HAN Yun¹, WU Min², ZHOU Jian-xu³, MA Feng-lin¹, WANG Yu-fang¹, ZHANG Hong-liang¹, TENG Yun-long¹, LI Zun-long¹

(1. Shanghai Datun Energy Co., Ltd., Xuzhou 221611, China; 2. China Electric Power Development Research Institute Co., Ltd., Beijing 100053, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The phenomenon of mixed free-surface-pressure flow exists in the process of water level variation in the lower reservoir (roadway group) of mine-type pumped storage power station, which directly affects the operation stability of the system and the hydraulic safety of the roadway group. Based on 3D numerical simulation technology of hydraulic system, considering the three controlling cases including lower reservoir water filling, load rejection and pumping power failure, the characteristics of the transition process of water flow in roadway group and the evolution law of related hydraulic parameters were analyzed, and its influence on the hydraulic safety of roadway group was evaluated. The research shows that there is no obvious unfavorable flow pattern in the initial water filling process of the lower reservoir (roadway group); For load rejection with dead water level of the lower reservoir, the water level of the regulating pool decreases by less than 0.4 m, and for pumping power failure with the normal water level of the lower reservoir, the water level of the regulating pool increases by less than 10.0 m; The roadway group can enter and exhaust normally during the transition process, and the hydraulic transitions in the roadway section is smooth including the possible free-surface-pressure flow; The regulating pool and the ventilation channel meet the requirements of hydraulic optimization to ensure the hydraulic safety of the roadway group.

Key words: mine-type pumped storage power station; underground roadway group; ventilation duct; hydraulic transient process; numerical simulation