

DOI: 10.7672/sgjs2025240064

抽水蓄能电站排水系统应用小直径 TBM 施工的高效物料运输系统*

吴宗林¹, 李寒松¹, 胡天浩¹, 刘龙飞²

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 611730;

2. 四川通发广进人力资源管理咨询有限公司, 四川 成都 610041)

[摘要] 近年来我国抽蓄领域蓬勃发展,其抽水蓄能电站排水系统逐步采用小直径 TBM 施工,但针对排水系统的小直径、小曲线、多弯道、长距离等隧洞特性下 TBM 的高效协同物料运输研究较少。高效物料运输系统作为 TBM 施工的重要影响因素之一,通过已完工的抽水蓄能电站工程中排水系统采用小直径 TBM 不同的物料运输系统施工实际应用效果对比,分析有轨运输、无轨运输及连续皮带机运输的适用及效率情况,总结不同情况下排水系统应用小直径 TBM 的配套高效物料运输系统选型。考虑现场等诸多因素影响,采用单一运输方式虽可行,但 2 种及以上的组合作为最优效果。

[关键词] 抽水蓄能电站;排水系统;隧道掘进机;物料运输

[中图分类号] TV743;TV554

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)24-0064-06

Efficient Material Transportation System for Small-diameter TBM Construction in Drainage System of Pumped Storage Power Station

WU Zonglin¹, LI Hansong¹, HU Tianhao¹, LIU Longfei²

(1. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611730, China;

2. Sichuan Tongfa Guangjin Human Resources Management Consulting Co., Ltd.,
Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: In recent years, China's pumped storage field has experienced booming development, with small-diameter TBM construction gradually being adopted in the drainage system of pumped storage power station. However, little information has been published on efficient and coordinated material transportation for TBM in tunnel characterized by small diameters, tight curves, multiple bends, and long distances in these drainage systems. As one of the critical factors influencing TBM construction, efficient material transportation systems are compared based on practical application effects in completed pumped storage power station projects utilizing small-diameter TBM in drainage systems. This comparative analysis examines the adaptability and efficiency of track-based transportation, trackless transportation, and continuous conveyor system, ultimately summarizing the selection of matching efficient material transportation systems for small-diameter TBM application in drainage systems under varying conditions. Although the use of a single transportation method is feasible considering various on-site constraints, a combination of two or more methods may yield optimal results.

Keywords: pumped storage power stations; drainage system; tunnel boring machine (TBM); material transportation

0 引言

国内首次 TBM 排水廊道施工在 2019 年山东文登抽水蓄能电站项目试验成功,抽水蓄能电站排水

* 中国水利水电第七工程局有限公司科技项目(2025-1020-95-81)

[作者简介] 吴宗林,高级工程师,E-mail:379373730@qq.com

[收稿日期] 2025-04-09

系统近年来在设计上突破传统分层布置的设计思路,将排水廊道大部分洞段整体优化调整为螺旋型一体化布置并与自流排水洞形成一条互相连接贯通的长隧洞。随着 TBM 试验项目在抽水蓄能电站排水廊道的成功应用和隧洞线路设计的调整及国产 TBM 设备不断优化提升,在国家号召安全环保高效的大目标下,未来抽水蓄能电站排水系统采用 TBM 施工将是大势所趋(见表 1)。后续 TBM 设备如何在抽水蓄能排水系统更经济、更安全、更高效应用将是重点,而其中的 TBM 法在小断面、小曲线、多弯道、长距离隧洞的高效物料运输系统中的应用是一个值得研究的方向。

表 1 近年来国内抽蓄项目排水系统应用 TBM 法统计

Table 1 Statistics of TBM construction applications in drainage systems for domestic pumped storage projects in recent years

工程简称	设备信息			
	开挖直径/m	应用年份	状态	应用洞室
文登抽蓄	3.53	2019	完工	排水廊道
宁海抽蓄	3.53	2020	完工	排水廊道/ 自流排水洞
洛宁抽蓄	3.53	2021	完工	排水廊道/ 自流排水洞
桐城抽蓄	3.53	2021	完工	排水廊道/ 自流排水洞
南宁抽蓄	3.53	2022	完工	排水廊道/ 自流排水洞
衢江抽蓄	3.53	2022	完工	排水廊道/ 自流排水洞
天台抽蓄	3.53	2023	完工	排水廊道/ 自流排水洞
抚宁抽蓄	3.53	2023	完工	排水廊道/ 自流排水洞
浑源抽蓄	3.53	2024	在建	排水廊道/ 自流排水洞

1 抽水蓄能电站排水系统应用 TBM 施工的物料运输系统概述

1.1 排水系统的 TBM 直径选择

在抽水蓄能电站中,主要由自流排水洞、厂房排水廊道、压力管道排水廊道等组成排水系统。排水系统主要围绕厂房修建,以满足电站运行期间厂房等洞室群渗漏、检修用水的排水功能要求,并兼顾行人检修和通风要求。传统的排水系统钻爆法隧洞洞径一般为 2.5~3.5m,断面为城门洞形或马蹄形,基于其开挖断面尺寸限界与排水功能的考虑,并通过行业内的类比分析,现基本统一采用 3.53m 作为 TBM 的开挖直径。

1.2 排水系统的 TBM 掘进路线选择

抽水蓄能电站排水系统 TBM 法施工一般分为

2 种施工路线:①第 1 种方式为 TBM 在自流排水洞洞口组装始发,先沿自流排水洞掘进,再自下而上螺旋环绕地下厂房排水廊道,于上层排水廊道和通风洞交叉部位拆机运出;②第 2 种方式与其相反。在施工条件许可条件下,两相对比,第 1 种方式洞口独立,无交叉干扰且为上坡掘进,便于排水,建议优先采用(见图 1)。

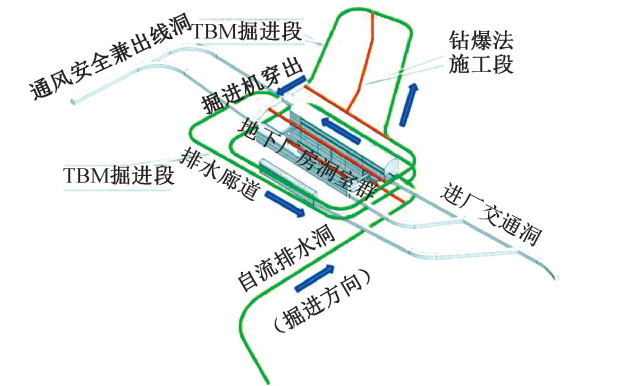


图 1 抽水蓄能电站排水系统 TBM 洞线三维示意(上坡掘进)

Fig.1 3D TBM tunnel alignment in drainage system of pumped storage power station (uphill excavation)

1.3 排水系统的 TBM 洞口布置选择

当排水系统 TBM 上坡掘进时,相应物料运输系统需布置于自流排水洞洞口,其常位于河流或冲沟两岸,洞口地形相对狭窄,若布置 TBM 则需进行洞口扩挖或沿洞口进行场地平整。当排水系统 TBM 下坡掘进时,相应物料运输系统需布置于上层排水廊道和通风洞交叉部位的地下洞室,该地下洞室须经扩挖方能形成 TBM 布置场地。

2 抽水蓄能电站排水系统应用 TBM 施工的物料运输系统配置

小直径 TBM 在超小曲线排水系统长隧洞中施工,离不开一个高效协同的物料运输系统,该系统是否高效可靠直接决定施工效率。其中,TBM 法洞内物料运输一般分为材料运输和渣土运输。

2.1 材料运输

材料运输主要涉及 TBM 设备耗材、隧洞周转材及支护材料等倒运工作,结合抽水蓄能电站排水系统隧洞路线存在多次小转弯段,故一般采用物料起重机和物料小车 2 种方式进行材料运输(见图 2)。准直线段时,采用物料起重机进行材料运输;转弯段时,物料起重机轨道不能适应(物料起重机轨道需从拖车尾端布置到主机区域,轨道接缝处在转弯段会发生偏移),因此采用物料小车配合进行材料运输。

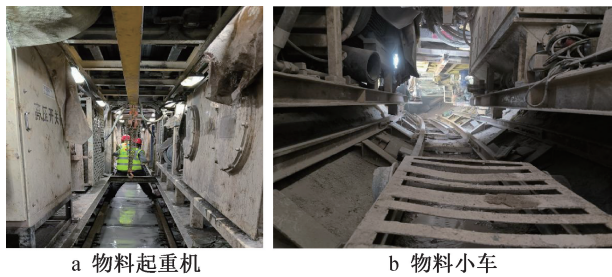


图 2 物料起重机及物料小车

Fig. 2 Material crane and material trolley

2.2 渣土运输

渣土运输主要为TBM开挖渣料运输,即将TBM掘进中产生的石渣通过出渣系统运至洞外。结合抽水蓄能电站排水系统隧洞特性,目前主要出渣系统分为有轨运输、无轨运输和连续皮带机运输3种。

2.2.1 有轨运输

有轨运输指编组列车运行在由钢轨和轨枕组成的隧洞运输轨线上,目前隧洞有轨运输一般有土斗车编组、侧卸车编组、梭矿车编组3种方式,其中运输编组列车一般由牵引机车+装渣车厢+材料平板车等组成。

1)土斗车编组。TBM采用土斗车编组时,通过TBM主机皮带机将开挖渣土卸料到土斗车中,由牵引机车拖曳出洞,当满载土斗车编组运行至洞口时,利用门式起重机进行吊运翻渣卸到储渣池内,再由装载机装运到自卸车运输到指定渣场(见图3)。



图 3 土斗车编组

Fig.3 Muck car formation

2)侧卸车编组。TBM采用侧卸车编组时,通过TBM主机皮带机将开挖渣土卸料到装渣车厢中,由牵引机车拖曳出洞,当满载侧卸车编组运行至洞口时,利用厢体液压装置进行渣土自动侧向卸渣到储渣池内,再由装载机装运到自卸车运输到指定渣场(见图4)。

3)梭矿车编组。TBM采用梭矿车编组时,通过TBM主机皮带机将开挖渣土卸料至后配套台车处挂靠的储渣梭矿车中,经储渣梭矿车将渣土转卸到运输梭矿车中,由牵引机车拖曳出洞,当满载运输梭矿车编组运行至洞口时,通过运输梭矿车自卸到



图 4 侧卸车编组

Fig. 4 Side-dumping muck car formation

转渣皮带机,经转渣皮带机提升卸料到自卸车运输至指定渣场(见图5)。

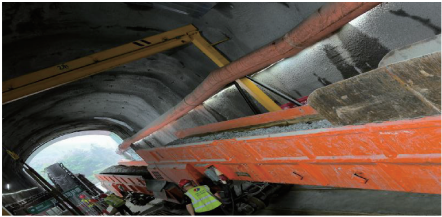


图 5 梭矿车编组

Fig. 5 Shuttle car formation

受小直径隧洞净空、运输车辆尺寸、安全距离和人员通道等方面因素制约,抽水蓄能电站排水系统洞内编组运输只能采用传统单线轨道,但单轨运输交通不便,极大限制了机、料、工的施工效率,为满足TBM法长隧洞编组列车洞内调度、交通高效率及TBM高速掘进的要求,需在TBM掘进隧洞入口工业广场布置双线停车线,以便列车编组停车上料;在长距离隧洞中合理布置道岔,可实现洞内综合调度运输及多部运输列车同步作业以缩短TBM工序间隔时间。其中,隧洞洞内道岔一般分为固定式和可移动式。固定式道岔用于物料定点运输,该系统在隧洞底部由型钢加工成道床,铺设轨道后整体固定于隧洞侧壁。可移动式道岔为厂内预制,分设移动轨道平台和倾斜轨道平台,平台下部设有移动平车可在行走轨道上移动,从洞外拖入适当位置连接固定后便可使用,相较于固定式可节省铺设固定岔道的时间(见图6)。



图 6 TBM 法洞内可移动式道岔

Fig. 6 Movable turnout in tunnel construction by TBM method

2.2.2 无轨运输

无轨运输指车辆在隧洞内行驶时无须铺设运输钢轨而直接在已开挖洞壁上行走,目前一般为胶轮运输车或履带运输车运输出渣。洞壁行走通常配置斜轮对,具有实施快捷方便、成本低等优点,但在极小转弯半径工况下应用效果不好,因其一般车身较长且无轨道限制,车身小转弯时姿态难以精准控制,易发生碰撞、无法行走等,同时长距离行走时纠偏难、控制难,洞内会车风险大,大坡度时易发生溜车。故小转弯隧洞的小直径 TBM 法无轨运输通常在国内外隧洞开挖工程中应用,国内少有应用(见图 7)。



图 7 无轨运输车
Fig. 7 Trackless transport vehicle

2.2.3 连续皮带机运输

TBM 法采用连续皮带机出渣时,通过 TBM 主机皮带机将开挖渣土卸料至连续皮带机上,由输送带带动转运出洞,经卸料塔卸料到自卸车运输至指定渣场。其中,连续皮带机是一种主要由驱动、传动、张紧装置及机架、输送带、托辊、滚筒等组成的综合机械(见图 8)。



图 8 连续皮带机
Fig. 8 Continuous belt conveyor

2.3 物料运输系统应用效果分析

与传统水利、铁路隧洞大直径 TBM 施工不同,其配套的常规连续皮带机、无/有轨列车编组出渣不能满足抽水蓄能电站排水系统隧洞小断面空间布置和适应多次连续小转弯的工况需求。其中,考虑无轨运输国内少有实施实例且不适用于此工况,暂不进行分析,下面主要针对已有项目实例的有轨运输和连续皮带机运输进行应用效果总结分析(见表 2)。

2.3.1 物料运输系统应用总结

1)以浙江 QJ 抽水蓄能电站排水系统 TBM 法采

表 2 小直径 TBM 施工物料运输编组总结
Table 2 Summary of material transportation marshalling for small-diameter TBM construction

项目	有轨运输			连续皮带机运输
	土斗车编组	侧卸车编组	梭矿车编组	
机械化程度	高	高	高	高
故障率	低	低	较低	较低
TBM 通道空间	大	大	小	小
TBM 拖车长度	长	长	短	短
施工文明程度	无漏水漏渣	有漏水漏渣	有漏水漏渣	无漏水漏渣
洞口占地大小	大	较小	小	大
渣池配置情况	必须配置	必须配置	无须配置	无须配置
大型辅助设备	门式起重机	无需	转渣皮带机	无需
材料场地转运	无需起重机	须配起重机	须配起重机	须配起重机
物料运输线	同步运输	同步运输	同步运输	分开运输
资金投入情况	较小	较小	较小	一次投入大

用土斗车编组运输施工实例分析其优缺点。其优点在于设备简单、故障率低,TBM 后配套人员及物料运输通道空间大,运输过程中无漏水漏渣,实现文明施工;缺点在于须配置门式起重机翻渣、渣池储渣,占地面积较大,同时需增加 TBM 后配套有轨门架式拖车长度。

2)以广西 NN 抽水蓄能电站排水系统 TBM 法采用侧卸车编组运输施工实例分析其优缺点。其优点在于设备机械化程度高、故障率低,自动侧卸,渣池储渣,省去现场门式起重机辅助装置,占地面积相对较小,TBM 后配套人员及物料运输通道空间大;缺点在于需单独配置材料吊运装置,运输过程中存在一定的漏水漏渣现象,同时需增加 TBM 后配套有轨门架式拖车长度。

3)以河南 LN 抽水蓄能电站排水系统 TBM 法采用梭矿车编组运输施工实例分析其优缺点。其优点在于设备机械化程度高、故障率低,自动梭渣,皮带转渣,省去现场门式起重机辅助装置及渣池,占地面积较小,TBM 后配套有轨门架式拖车长度可相对缩短;缺点在于需单独配置材料吊运装置,运输过程中存在一定的漏水漏渣现象,同时 TBM 后配套人员及物料运输通道空间小。

4)以安徽 TC 抽水蓄能电站排水系统 TBM 法采用连续皮带机运输施工实例分析其优缺点。其优点在于设备机械化程度高、故障率低,连续皮带出渣无须等待渣车,TBM 利用率高,可使 TBM 后配套系统设计更短,出渣线与材料运输线分离,干扰小,运输过程中无漏水漏渣,实现文明施工;缺点在于需单独配置材料吊运装置,皮带机端头直线占地长,对洞口场地布置要求较高,同时目前连续皮带机技术只能做到最小转弯半径 50m,无法延伸至排水廊道施工。

2.3.2 物料运输系统效果分析

有轨运输编组列车适应性强,可根据洞口场地位置及大小情况采用不同编组方式和通过定制车厢长度适应极小转弯半径隧洞及配置多列编组和道岔适应长距离隧洞,同时采购运输设备可根据施工进度分阶段实施,有利于减少工程初期资金投入;但洞内调度运输管理困难且有“跳道”风险(见表 3)。

连续皮带机运输系统无须等待渣车,连续运输能力强,出渣效率高,TBM 利用率高;同时,出渣线与材料线分离不干扰,洞内调度运输管理简单;但初次设备资金投入大,对洞口场地要求较高。

2.3.3 物料运输系统未来展望

面对现如今抽水蓄能电站排水系统工程特点和新型设计,一套合适的高效协同物料运输系统是小直径 TBM 高效掘进的保障。经过上述分析,排水系统小直径 TBM 法出渣方式选择受洞口场地、转弯半径、运输距离等诸多因素影响,采用单一出渣方式虽可行,但面对超小曲线长距离隧洞时难以实现效率、技术、经济最优化,往往需根据工程特点采用 2 种及以上出渣方式进行优化组合方可达到高效经

济的效果。

一般而言,排水廊道受结构布置条件影响,转弯半径较难增大,各转弯段均设置为 30m 转弯半径且连续转弯较多,而自流排水洞洞线半径均>30m 且转弯较少。当 TBM 独头连续掘进时,在穿过自流排水洞进入排水廊道后,一方面由于排水廊道弯段转弯半径小,连续皮带机不能伸展延续;另一方面与排水廊道平面相交的地下厂房附属洞室可作为新的出渣通道。故在抽水蓄能电站排水系统洞口条件满足的情况下,隧洞采用连续皮带机运输与有轨运输相结合,可达到取长补短、相辅相成的最优效果,可作为小直径 TBM 施工的高效物料运输系统最佳选择。

以安徽 TC 抽水蓄能电站排水系统 TBM 施工为例,其自流排水洞长 6 121m,排水廊道长 2 451m。在长距离隧洞下结合洞口条件和隧洞情况,掘进面到达排水廊道与厂房洞室平面相交处之前采用连续皮带机+有轨牵引机车编组,经自流排水洞出渣,为第 1 阶段;掘进面穿过排水廊道与主变交通支洞平面相交处之后采用有轨牵引机车编组+转载皮带机,经进厂交通洞出渣,为第 2 阶段(见表 4 与图 9~11)。

表 3 小直径 TBM 施工物料运输编组工效分析

Table 3 Efficiency comparison of material transportation marshalling for small-diameter TBM construction										
项目名称	施工部位	洞线长度/m	围岩地质情况	TBM 直径/m	掘进方向	掘进时间			运输方式	平均工效/(m·d ⁻¹)
						始发时间/(年·月·日)	到达时间/(年·月·日)	用时/d		
浙江 QJ 抽水蓄能电站	自流排水洞+排水廊道	4 165	凝灰岩Ⅱ类为主	3.53	上坡掘进	2022-10-24	2024-04-19	543	土斗车编组	7.67
广西 NN 抽水蓄能电站	自流排水洞+排水廊道	4 778	花岗岩Ⅱ,Ⅲ类为主	3.53	上坡掘进	2022-11-01	2024-02-08	464	侧卸车编组	10.30
河南 LN 抽水蓄能电站	自流排水洞+下层排水廊道	5 021	花岗岩Ⅱ,Ⅲ类为主	3.53	下坡掘进	2021-06-03	2022-08-01	424	梭矿车编组	11.84
安徽 TC 抽水蓄能电站	自流排水洞+排水廊道	6 121 (自流排水洞段)	片麻、闪长岩Ⅱ,Ⅲ类为主	3.53	上坡掘进	2022-02-22	2023-06-22	485	连续皮带机	12.62

注:各项目实际施工过程中所遇情况不同,各运输系统效率仅供参考

表 4 小直径 TBM 施工组合式物料运输工效分析

Table 4 Efficiency analysis of combined material transportation for small-diameter TBM construction										
项目名称	施工部位	洞线长度/m	围岩地质	TBM 直径/m	掘进方向	掘进时间			运输方式	平均工效/(m·d ⁻¹)
						始发时间/(年·月·日)	到达时间/(年·月·日)	用时/d		
安徽 TC 抽水蓄能电站	自流排水洞	6 121	片麻、闪长岩Ⅱ,Ⅲ类为主	3.53	上坡掘进	2022-02-22	2023-06-22	485	连续皮带机	12.62
	排水廊道	2 451				2023-06-22	2024-06-05	349	梭矿车编组	7.02
	自流排水洞+排水廊道	8 572				2022-02-22	2024-06-05	834	组合式	10.28

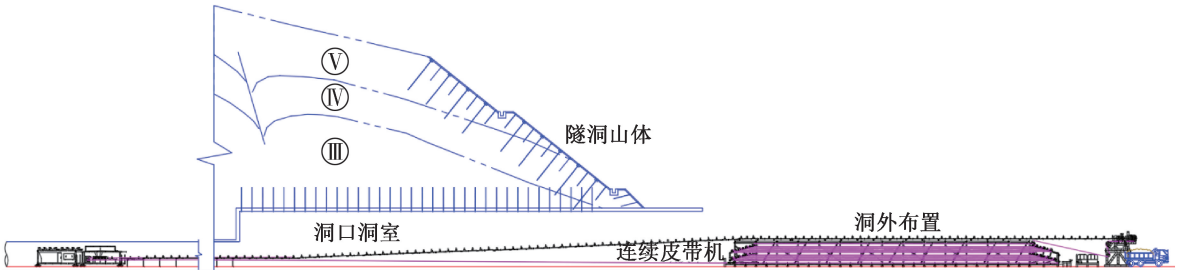


图 9 隧洞洞口到第 1 次小转弯段洞内运输布置(连续皮带机运输)

Fig. 9 In-tunnel transportation layout from tunnel portal to the first small curve section
(continuous belt conveyor transportation)

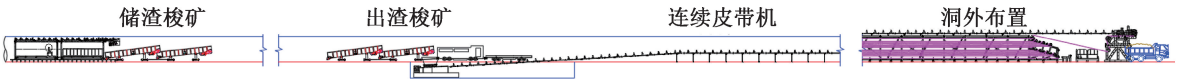


图 10 隧洞第 1 次小转弯到经过交叉洞口段洞内运输布置(有轨运输+连续皮带机)

Fig. 10 In-tunnel transportation layout from the first small curve to the intersecting tunnel portal section
(track-based transportation + continuous belt conveyor transportation)

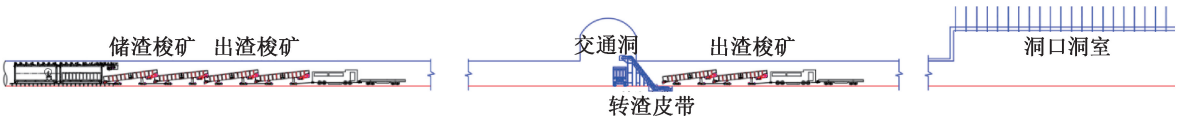


图 11 隧洞交叉洞口到出洞段洞内运输布置(有轨运输)

Fig. 11 In-tunnel transportation layout from the intersecting tunnel portal to the exit section
(track-based transportation)

3 结语

综上所述,各施工实例中的物料运输系统均以少劳动力、高机械化、高效率的优势证明了其都有适用性和经济合理性。物料运输系统具体实施要根据工程特点,在保证安全和满足效率的前提下,经过充分论证比较技术可行性、经济合理性、施工工序及进度安排等综合因素后确定具体方式。后续还需专业人员进一步研究物料运输系统先进的装备、技术在排水系统小直径 TBM 施工中的推广应用,以促进抽水蓄能电站的施工技术发展。

参考文献:

[1] 李富春,徐艳群,施云龙.我国抽水蓄能领域 TBM 应用探讨[J].建筑机械,2021(S1):6-8,16.
LI F C,XU Y Q,SHI Y L. Discussion on application of TBM in pumped storage field in China [J]. Construction machinery, 2021(S1):6-8,16.

[2] 潘福富,张菊梅.TBM 在抽水蓄能电站排水洞中的应用[J].水电与抽水蓄能,2023,9(2):101-105.
PAN F Y,ZHANG J M. Application of TBM in drainage tunnel of pumped storage power station [J]. Hydropower and pumped storage,2023,9(2):101-105.

[3] 赵青,关宗印,周小溪.抽水蓄能电站排水系统应用 TBM 法和人工钻爆法差异分析[J].海河水利,2024(7):52-55.

ZHAO Q,GUAN Z Y,ZHOU X X. Differences between TBM and drilling and blasting methods applied to the underground drainage system of pumped storage power stations [J]. Haihe water resources,2024(7):52-55.

[4] 徐艳群,刘志飞,鲁义强,等.抽水蓄能电站 TBM 洞内材料运输系统研究[J].建筑机械,2023(S1):113-116.
XU Y Q,LIU Z F,LU Y Q, et al. Research on material transportation system in TBM tunnel of pumped storage power station[J]. Construction machinery,2023(S1):113-116.

[5] 潘伟.TBM 掘进施工技术在桐城抽水蓄能电站中的应用[J].广东水利水电,2023(6):58-62,68.
PAN W. Application of TBM construction technique in Tongcheng Pumped Storage Power Station [J]. Guangdong water resources and hydropower,2023(6):58-62,68.

[6] 王炜,窦锦钟,袁青云,等.抽水蓄能电站绿色施工技术[J].施工技术(中英文),2024,53(18):129-133,153.
WANG W,DOU J Z,YUAN Q Y, et al. Green construction technology of pumped storage power station [J]. Construction technology,2024,53(18):129-133,153.

[7] 殷国权.抽水蓄能电站上水库趾板灌浆工程施工技术[J].施工技术(中英文),2023,52(19):145-150.
YIN G Q. Construction technology of upper reservoir toe board grouting engineering in pumped storage power station [J]. Construction technology,2023,52(19):145-150.