

抽水蓄能电站绿色施工技术*

王 炜, 窦锦钟, 袁青云, 韩 磊, 孙 旻
(中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200122)

[摘要] 抽水蓄能电站建设发展迅猛,但在工程施工过程中存在高投入、高消耗、高污染、低效率等现象,迫切需采取措施推进绿色施工。为此,基于绿色施工的核心理念,介绍了近年来抽水蓄能电站绿色施工技术,包括抽水蓄能电站新坝型、绿色输水隧洞施工技术、绿色混凝土制备技术、绿色砂石加工技术、边坡生态修复技术、二氧化碳爆破技术及施工车辆电气化等,取得了良好效果。

[关键词] 抽水蓄能电站; 绿色施工; 大坝; 输水隧洞; 混凝土; 砂石

[中图分类号] TV743; TV52 **[文献标识码]** A **[文章编号]**

Green Construction Technology of Pumped Storage Power Station

WANG Wei, DOU Jinzhong, YUAN Qingyun, HAN Lei, SUN Min

(China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200122, China)

Abstract: The construction of pumped storage power station develops rapidly, but there are phenomena such as high investment, high consumption, high pollution, and low efficiency during the construction process. Thus, green construction urgently needs to be promoted into the construction of pumped storage power station. Based on the core concept of green construction, the green construction technologies of pumped storage power station in recent years are introduced, including new dam types, construction technology of green water conveyance tunnel, green concrete preparation technology, green sand and stone processing technology, slope ecological restoration technology, carbon dioxide blasting technology, and electrification of construction vehicles, good results are obtained.

Keywords: pumped storage power stations; green construction; dams; water conveyance tunnels; concrete; sand and gravel

0 引言

随着“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”目标推进,风、光等新能源大规模高比例发展,新型电力系统对调节电源的需求更加迫切。抽水蓄能是目前应用最广、技术最成熟的大规模储能技术,国家和各地方政府机构出台了一系列政策推动抽水蓄能行业发展,提出要加快抽水蓄能电站建设。“十四五”期间抽水蓄能电站建设数量>200座,预计到2025年,其累计投产总规模将>6200万kW,到2030年,这一规模将接近1.2亿kW^[1]。

绿色施工的核心理念是通过科学管理和技术创新,在工程建设过程中实现资源的最大限度节约,同时降低对环境的负面影响,实现“四节一环保”(节能、节地、节水、节材和环境保护)的目标^[2-4]。抽水蓄能电站施工存在建设成本高、时间长,且易

对周围环境造成破坏等缺点,工程施工活动中高投入、高消耗、高污染、低效率现象较普遍。因此,迫切需采取措施推进绿色施工,以确保在满足质量和安全等基本要求的前提下,最大限度地节约资源并减少对环境的不良影响。

本文针对近年来出现的抽水蓄能电站绿色施工技术和应用进行介绍,包括抽水蓄能电站新坝型、绿色输水隧洞施工技术、绿色混凝土制备技术、绿色砂石加工技术、边坡生态修复技术、二氧化碳爆破技术及施工车辆电气化等,为其他抽水蓄能电站工程项目提供参考。

1 抽水蓄能电站新坝型

1.1 胶凝砂砾石坝

胶凝砂砾石坝(CSG)是介于混凝土面板堆石坝和碾压混凝土重力坝的一种新坝型,其采用少量胶凝材料(包括水泥、粉煤灰等),将砂砾料的散粒体固结成整体,然后通过混凝土或沥青混凝土覆盖坝面以实现防渗功能^[5]。该技术在国外已有较多成功应用案例,2019年我国建成首座CSG坝即大同守

*中建八局2023年度科技研发项目:抽水蓄能电站施工技术研究(2023-2-27)

[作者简介]王 炜,高级工程师, E-mail:ww096014@foxmail.com

[收稿日期]2023-09-28

口堡水库大坝。CSG 坝施工工艺流程如图 1 所示。

在 CSG 坝在选材方面，可充分利用坝址附近的天然河床原状砂砾料或在坝基挖掘过程中产生的弃料作为骨料，减少了采石场、拌合场及废水处理设备等设施，从而减少建设工程费用，还可实现环境保护；在施工方面，采用土石坝施工方法和机械设备，在碾压过程中，无须分割施工区域，施工速度快、工程周期短；在材料性能方面，CSG 材料的胶凝作用赋予了其一定强度和抗冲击性能，因此 CSG 坝体的边坡比传统土石坝更陡，从而减少施工材料用量。



图 1 CSG 坝施工工艺流程

Fig.1 Construction process of CSG dam

1.2 堆石混凝土坝

堆石混凝土坝是以自密实混凝土技术为基础而发展的一种新型大体积混凝土坝，利用自密实混凝土高流动、抗分离性能好及自流动特点，在粒径较大块石（30cm 以上）内随机充填自密实混凝土而形成混凝土堆石体^[6]。该技术突破了传统混凝土施工工艺限制，通常堆石占比约为 55%，混凝土的粗细骨料约 27%，堆石混凝土中砂石料总占比约为 82%，能显著减少水泥生产和浇筑量，已在国内外 100 余座大坝中得到成功应用。堆石混凝土坝施工工艺流程如图 2 所示。



图 2 堆石混凝土坝施工工艺流程

Fig.2 Construction process of rubble concrete dam

与传统的大体积混凝土施工方法相比，堆石混凝土坝具有明显优势：显著减少水泥用量，节能减排效益显著；体积稳定及抗裂性能突出；施工过程中一体化浇筑，显著提高工效，缩短工期；充分利用块状废弃混凝土，实现固体废弃物的循环再利用。相较于常态混凝土坝，堆石混凝土坝减少单位二氧化碳排放量 2/3 甚至更高，减少单位能耗 55%。

删除[Wang Wei]: 更低

2 绿色输水隧洞施工技术

2.1 全断面硬岩隧道掘进技术

抽水蓄能电站地下隧洞群规模大、项目繁多、工程量大，目前主要采用钻爆法、反井钻法开挖，存在施工机械化程度低、劳动力投入大、安全风险高、施工工期长、环境污染、混凝土超耗等问题。全断面硬岩隧道掘进（TBM）施工技术具有安全环保、施工速度快、节约劳动力等优点，已在山东文登、浙江宁海、河南洛宁等抽水蓄能电站中成功应用，月平均进尺可达人工钻爆施工的 3~4 倍。

TBM 是一种大型高效隧道施工机械，集导向、掘进、出渣、支护、通风防尘等多功能于一体（见图 3）。施工时，安装在刀盘上的盘形滚刀在推力作用下紧压岩面，伴随刀盘旋转，盘形滚刀下的岩石被直接破碎，在掌子面上形成多道同心圆沟槽。随着沟槽深度增加，岩体表面裂纹加深扩大，相邻同心圆沟槽间的岩石成片剥落^[7]。TBM 硬岩掘进机不像爆破那样大的冲击和环境污染，对围岩损伤小，同时超欠挖少，可减小支护工作量和材料消耗，施工进度快，特别是在稳定的围岩中长距离施工时，此特征尤其明显。



图 3 “洛宁号” TBM

Fig.3 “Luoning” TBM

2.2 全断面竖井掘进机钻井技术

竖井是抽水蓄能电站工程施工中常遇到的项目，施工受地质情况制约较大，工程风险及施工风险较高。目前主要采用钻爆法及竖井钻机、反井钻机开挖，存在施工环境恶劣、污染浪费严重、需开挖出渣通道且施工速度较慢等问题。全断面竖井掘

进机（SBM）具有安全环保、开挖速度快等优点，已在浙江宁海抽水蓄能电站成功应用^[8]。

全断面竖井掘进机采用全断面刀盘自上而下开挖竖井（见图4），刀盘采用滚刀挤压破岩，破碎的岩渣通过机械系统排出洞外，比泥水、真空等传统出渣方式效率更高、能耗更低，施工时无须开挖溜渣孔和井下出渣通道，减少工程开挖量，施工效率高，适用于各类地层中的竖井施工^[9]。



图4 竖井掘进机

Fig.4 Shaft boring machine

3 绿色混凝土制备技术

3.1 环保型高耐久喷射混凝土制备技术

抽水蓄能电站地下洞群复杂交错，地质条件参差不齐，开挖过程中需及时进行支护施工。喷射混凝土材料是喷锚支护的重要组成部分，施工方法分为干喷和湿喷。干喷工艺采用粉体速凝剂，施工过程中粉尘大、有环境污染；湿喷工艺采用有碱液体速凝剂，含碱量高，易产生水土污染，且混凝土耐久性不佳^[10]。环保型低碱或无碱速凝剂，因其优良的适应性、速凝效果、绿色环保及安全施工性能，已成为抽水蓄能电站绿色低碳施工的关键材料。

支护用环保型高耐久喷射混凝土，其核心材料为环保型低碱或无碱速凝剂，与传统粉体或有碱速凝剂相比，具有高环保、高适应性、高速凝性、高耐久性、低成本的优势。该类型混凝土碱含量（按氧化钠计算） $<0.8\%$ ，氯离子含量 $<0.08\%$ ，可解决传统有碱速凝剂碱、氯含量高问题。此外，环保型低碱或无碱速凝剂的生产过程不产生粉尘和有毒有害气体，环境负荷低，可有效解决传统喷射混凝土施工绿色化程度低、服役年限短的共性难题。根据全生命周期成本理论，采用基于环保型无碱速

凝剂的支护喷射混凝土的综合成本显著降低。其适用于环保效益要求较高的地下洞室或边坡支护等需采用喷射混凝土的部位。

3.2 全封闭混凝土拌合站

抽水蓄能电站建设过程中需使用大量混凝土。随着人民生活水平提高，国家对环保、绿色建造管控的日趋严格，为满足抽水蓄能电站绿色施工的管理要求，建设全封闭的拌合站是发展趋势^[11]。全封闭混凝土拌合站通过厂站全封闭、喷淋覆盖、污水回用、空气监测等方法，确保污染不扩散，已在洛宁、衢江抽水蓄能电站工程中成功应用。

该技术中混凝土拌合站料仓、运输皮带机及罐体采用彩钢全封闭，可采用刚架结构作为支撑，并通过风力、雪载等荷载计算，确保整体结构稳定，基础全部硬化处理，做好雨污分离；混凝土拌合站四周布设喷雾系统，砂石料仓顶棚布设喷淋系统，定时洒水喷淋，进一步降低扬尘；混凝土拌合站布置一套专用污水处理系统，收集混凝土生产过程中全部污水，通过加药、沉淀等措施将拌合站污水回收用于道路洒水、绿植养护等；混凝土拌合站布置扬尘监测系统，并接入拌合站整体控制系统，确保实时在线监测、实时处理。

4 绿色砂石加工技术

4.1 除尘降噪控制技术

砂石骨料作为抽水蓄能电站工程建筑的基础材料，是工程建设的重要物资。砂石加工过程中会产生大量粉尘和噪声污染，不能满足绿色施工要求。

砂石加工除尘降噪控制技术通过在砂石生产车间配置扬尘在线监控系统，实时监测PM2.5、PM10及温湿度和风速等参数，并将监测数据及时上传至后台管理系统。当监测数值超过一定限值时，控制器自动启动顺流组合脉冲布袋除尘器及喷淋除尘系统，直至监测数值符合预定要求（见图5）。噪声监控系统对现场噪声数据进行采集和处理，对噪声超标车间进行预警，及时调整加工工艺及设备工况，加强噪声较大区域隔声设施建设，从而完成声环境的监控管理。该技术能实现砂石加工生产的自动化扬尘控制和噪声控制，已在五一河砂石加工项目成功应用^[12]，有效改善了作业环境。

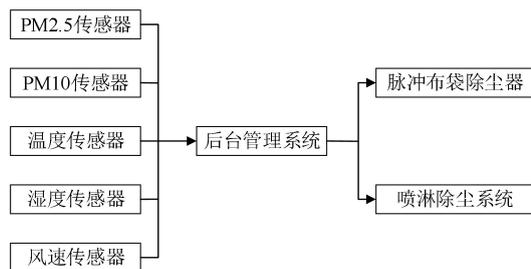


图5 扬尘控制系统结构

Fig.5 Structure of dust control system

4.2 竖流式污水处理技术

抽水蓄能电站建设过程中砂石加工系统采用湿法工艺会产生大量废水，生产 1t 成品料会产生 1~2m³ 废水，废水规模大、处理难度大，按环保要求需对废水进行处理后回用^[13]。常规三级沉淀池存在自动化程度较低、占地面积较大等问题。

竖流式污水处理系统主要由调节池、竖流澄清罐、泥浆搅拌罐、板框压滤机、清水池、加药间、电控系统及管道系统组成。生产废水经过污水管道进入调节池，通过静态管道混合器添加药剂，使悬浮物颗粒絮凝。之后废水进入竖流澄清罐进行处理，其主要功能是使泥、水分离，使水澄清和进行污泥浓缩，将进入竖流式沉淀罐的泥砂、细小悬浮物与水进行分离，泥砂沉降在底部的集泥斗中，通过静压排泥到泥浆搅拌罐中浓缩处理。竖流澄清罐泥斗中泥浆沿污泥管道输送到泥浆搅拌罐，投加药剂进行浓缩，上清液则排入污水调节池，浓缩泥浆经渣浆泵打入板框式压滤机进行机械脱水处理。

该技术自动化程度高、结构简单、运行稳定、容易操作、经久耐用，减少占地面积，提高了土地利用效率，沉淀效果好，处理效率高。其适用于水处理回用要求较高、施工场地较小的抽水蓄能电站湿法砂石系统水处理，已在赤峰抚宁抽水蓄能电站中成功应用。

5 边坡生态修复技术

5.1 植被混凝土生态防护绿化技术

传统施工中，对于岩质边坡或混凝土边坡通常采取 2 种方式进行处理，一种是通过生态的自然恢复，但这种方式往往需数十年时间，复绿周期长；另一种是通过人工辅助复绿，目前国内外常采用的复绿方法均存在喷层强度低、不抗冲刷、保水性能差等缺点，在强降雨和台风天气下极易出现喷层流失、垮塌等情况，导致边坡复绿效果较差。

植被混凝土生态防护绿化技术是采用特定混凝土配方和混合植绿种子配方对岩质（或混凝土）边坡进行防护和绿化的新技术，该技术通过掺拌混

凝土绿化添加剂（中和水泥碱性），增加植被混凝土中水泥含量，进而增强植被混凝土层护坡强度和抗冲刷能力，使其在不龟裂的同时，改变其物理、化学特性，营造较好的植物生长环境。植被混凝土生态防护绿化技术工艺流程为：坡面整治→铁丝网和锚钉铺设安装→植被混凝土基材配制→植被混凝土喷植→强制性养护与管理。其适用于坡度为 85° 以下的岩质或喷混凝土边坡，已在宁海、白莲河、溧阳等抽水蓄能电站成功应用^[14]。

5.2 三维植被网喷播植草技术

在抽水蓄能电站施工过程中，边坡规模大、地质条件复杂、稳定性要求高，边坡生态修复是难点。采用土工材料结合植草护坡是一种有效的边坡生态修复方法。土工材料结合植草护坡早期系由二维结构的土工格网结合植草进行，但在水土流失控制方面效果较差。

三维植被网喷播植草技术通过在坡面植被形成前，采用致密三维土工网覆盖边坡表面形成锚固（见图 6），降低地表径流和暴雨冲刷对坡面的影响。坡面植被生长形成腐殖质层，为边坡表层土壤提供保护，同时坡面植被根系与三维土工网及坡面紧密结合，有效减少雨水对坡面侵蚀，减少水土流失，确保坡面整体稳定。其主要工艺流程为挂网、喷播、覆盖、养护，适用于边坡坡度 < 60° 且高度 < 8m 的土质或坡面平整的岩质边坡，已在荒沟、丰宁、平江、洛宁等抽水蓄能电站成功应用^[15]。

删除[Wang Wei]: 长成形成腐殖层

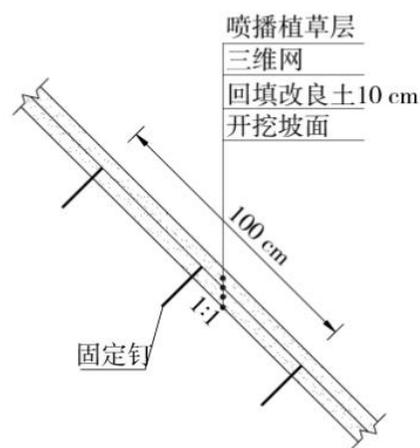


图6 三维植被网喷播植草技术示意

Fig.6 3D vegetation net spraying and grass planting technology

6 二氧化碳爆破技术

爆破法在抽水蓄能电站坝基、边坡、料场等项目作业中应用广泛，具有经济、快速等优点，但爆破施工时易产生振动、粉尘、噪声、有害气体等污

染,对周围环境影响较大。

二氧化碳爆破技术将液态二氧化碳压入爆破筒内,装入安全膜、破裂片、导热棒和密封圈(见图7),并插入预先钻好的钻孔固定,连接起爆器电源。当电流通过高导热装置时,短时间内产生高温并击穿安全膜,液态二氧化碳瞬间气化,气体急剧膨胀产生高压导致基岩破裂。二氧化碳爆破过程中不产生任何有害气体,整个施工过程绿色低碳,能解决石料开采中爆破振动与次生危害、爆破粉化与资源浪费、安全距离控制与土地占用等问题,并大幅度降低施工成本。白云抽水蓄能电站采用了二氧化碳爆破技术并取得良好的应用效果^[16]。



图7 二氧化碳爆破致裂管示意

Fig.7 Carbon dioxide explosion induced cracking tube

7 施工车辆电气化

抽水蓄能电站建设期燃油消耗量大,产生的污染物和废气多,不利于现场减排。机械设备电气化的推广能改善施工工作环境,尤其是大大改善有限空间作业环境,减少车辆尾气、振动对现场工作人员的影响^[17]。探索电气化施工设备在抽水蓄能电站建设中的应用,推动抽水蓄能电站主要施工设备电气化进程具有重要意义。

该技术在施工过程中将自卸车、装载机、挖掘机、混凝土搅拌车、振动碾等设备由传统用油设备替换为用电设备,解决“三电(电池、电动机、电控)”问题,大幅度减少电站建设施工过程中施工设备产生的尾气、噪声和振动,明显改善地下硐室施工环境。该技术适用于抽水蓄能电站较封闭空间施工作业,尤其是重载下坡施工车辆,已在易县、缙云、潍坊等抽水蓄能电站成功应用^[18]。

8 结语

抽水蓄能电站施工具有高投入、高消耗、高污染、低效率等特点,迫切需推进绿色施工技术,以节约资源并减少对环境的影响。本文介绍了近年来抽水蓄能电站绿色施工技术,包括抽水蓄能电站新坝型、绿色输水隧洞施工技术、绿色混凝土制备技术、绿色砂石加工技术、边坡生态修复技术、二氧化碳爆破技术及施工车辆电气化等,得到以下主要结论。

1) 胶凝砂砾石坝和堆石混凝土坝可有效利用天然和废弃材料,减少水泥使用量,节能减排效益显著。

2) 全断面硬岩隧道掘进技术和全断面竖井掘

进机钻井技术,实现了隧洞和竖井开挖的全机械化绿色施工,有效保证了现场施工环境,降低了材料和能源消耗,提升工作效率。

3) 基于绿色混凝土的相关理念,环保型高耐久喷射混凝土制备技术和全封闭混凝土拌合站实现了混凝土制备的无污染、高耐久及低成本。

4) 砂石除尘降噪控制技术和竖流式污水处理技术能有效控制砂石骨料生产过程中的粉尘、噪声和污水问题,满足绿色施工要求。

5) 植被混凝土生态防护绿化技术和三维植被网喷播植草技术能解决抽水蓄能电站岩质或混凝土边坡的生态修复问题。

6) 二氧化碳爆破技术无传统爆破中的飞石、振动、粉尘、噪声、有害气体等问题,整个施工过程绿色低碳。施工设备电气化大幅度减少了施工设备产生的尾气、噪声和振动问题,施工环境明显改善。

参考文献:

- [1] 马良.碳达峰、碳中和背景下抽水蓄能建设发展研究[J].中国工程咨询,2021(9):35-38.
MA L. Research on the development of pumped storage energy construction under the background of carbon peak and carbon neutrality [J]. China engineering consultants,2021(9):35-38.
- [2] 肖绪文,刘星.关于绿色建造与碳达峰、碳中和的思考[J].施工技术(中英文),2021,50(13):1-5.
XIAO X W, LIU X. Thinking on green construction and carbon peak and carbon neutralization [J].Construction technology, 2021, 50(13):1-5.
- [3] 肖绪文.绿色建造发展现状及发展战略[J].施工技术,2018,47(6):1-4,40.
XIAO X W. State and development strategy for green construction [J]. Construction technology, 2018, 47(6):1-4,40.
- [4] 肖绪文,冯大阔.建筑工程绿色施工现状分析及推进建议[J].施工技术,2013,42(1):12-15.
XIAO X W, FENG D K. Review and promoting suggestions of green construction for buildings [J]. Construction technology, 2013,42(1):12-15.
- [5] 丁泽霖,高昱芑,张宏洋,等.胶凝砂砾石坝深层抗滑稳定模型试验研究[J].岩土工程学报,2022,44(2):392-398.

- DING Z L, GAO Y P, ZHANG H Y, et al. Model tests on deep anti-sliding stability of cemented sand-gravel dam [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2022, 44(2):392-398.
- [6] 徐小蓉,金峰,周虎,等.堆石混凝土筑坝技术发展与创新综述[J].三峡大学学报(自然科学版),2022,44(2):1-11.
- XU X R, JIN F, ZHOU H, et al. Review on development and innovation of rock-filled concrete technology for dam construction [J]. Journal of China Three Gorges University (natural sciences), 2022, 44(2):1-11.
- [7] 王玉杰,李秀文,曹瑞琅,等.水工隧洞 TBM 施工适宜性围岩分类研究 [J]. 水利学报, 2023, 54(7):880-888.
- WANG Y J, LI X W, CAO R L, et al. Study on classification of surrounding rock suitable for TBM construction of hydraulic tunnel [J]. Journal of hydraulic engineering, 2023, 54(7):880-888.
- [8] 刘志强,陈湘生,蔡美峰,等.我国大直径钻井技术装备发展的挑战与思考[J].中国工程科学,2022,24(2):132-139.
- LIU Z Q, CHEN X S, CAI M F, et al. Challenges and thoughts on the development of large-diameter drilling technology and equipment [J]. Strategic study of CAE, 2022, 24(2):132-139.
- [9] 陈湘生,付艳斌,陈曦,等.地下空间施工技术进展及数智化技术现状 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(1):1-12.
- CHEN X S, FU Y B, CHEN X, et al. Progress in underground space construction technology and technical challenges of digital intelligence [J]. China journal of highway and transport, 2022, 35(1):1-12.
- [10] 苟蓬勃.一种新型环保喷射混凝土速凝剂的研制与应用模拟分析[D].西安:西安建筑科技大学,2020.
- GOU P B. Development and application simulation analysis of a new environmental protection shotcrete accelerating agent [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [11] 马辉,刘仁智,董庆,等.混凝土拌合站生产过程动态监控系统的开发与应用 [J]. 路基工程, 2012(2):144-147.
- MA H, LIU R Z, DONG Q, et al. Development and application of dynamic monitoring system for production process at concrete mixing plant [J]. Subgrade engineering, 2012(2):144-147.
- [12] 徐全基,许昌永,崔亚军.水电工程绿色智慧砂石加工系统设计研究 [J]. 云南水力发电, 2023, 39(2):215-220.
- XU Q J, XU C Y, CUI Y J. Design and research on green wisdom sandstone processing system of hydropower project [J]. Yunnan water power, 2023, 39(2):215-220.
- [13] 孙华艳.环保施工技术在长龙山抽水蓄能电站中的应用[J].红水河,2022,41(2):68-71.
- SUN H Y. Application of environmental protection construction technology in Changlongshan Pumped Storage Power Station [J]. Hongshui River, 2022, 41(2):68-71.
- [14] 钱继源,张鹏,袁翔.植被混凝土生态修复技术在抽水蓄能电站边坡中的应用 [J]. 人民黄河, 2022, 44(S1):147-148, 150.
- QIAN J Y, ZHANG P, YUAN X. Application of vegetation concrete ecological restoration technology in the slope of pumped storage power station [J]. Yellow River, 2022, 44(S1):147-148, 150.
- [15] 孙晋儒.三维网喷播植草技术在边坡防护工程中的应用[J].山西水利,2021,37(1):37-38.
- SUN J R. Application of 3D network spraying grass planting technology in slope protection engineering [J]. Shanxi water resources, 2021, 37(1):37-38.
- [16] 吴友旺,张华精,郭荣.白云抽蓄电站二氧化碳液—气相变膨胀破岩技术应用试验[J].山西建筑,2020,46(18):85-87.
- WU Y W, ZHANG H J, GUO R. Application test of carbon dioxide liquid-gas phase variable expansion rock breaking technology in Baiyun Pumped Storage Power Station [J]. Shanxi architecture, 2020, 46(18):85-87.
- [17] 梁川.水利工程施工对环境的影响及防治措施 [J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2011(2):202.
- LIANG C. Environmental impact and prevention measures of water conservancy engineering construction [J]. Management & technology of

SME, 2011(2):202.

[18] 樊启祥,林鹏,魏鹏程,等.高海拔地区水电工程智能建造挑战与对策 [J]. 水利学报,2021,52(12):1404-1417.

FAN Q X, LIN P, WEI P C, et al. Intelligent

construction of hydraulic engineering in high altitude areas: challenges and strategies [J]. Journal of hydraulic engineering,2021, 52(12):1404-1417.