

废弃矿井抽水蓄能电站基础建设装备 关键问题及对策

何涛^{1,2,3,4}, 王传礼^{1,3,4*}, 高博⁵, 陈凡⁵, 王伟俊^{1,3}, 赵凯平^{1,3}

1. 安徽理工大学机械工程学院, 淮南 232001
2. 安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 淮南 232001
3. 安徽理工大学安徽省智能矿山技术与装备工程实验室, 淮南 232001
4. 安徽矿山机电装备协同创新中心, 淮南 232001
5. 国网安徽省电力有限公司电力科学院, 合肥 230061

摘要 为了充分利用煤矿废弃矿井遗留的大量资源及地下空间, 促进能源枯竭城市更好地转型与发展, 引入煤矿废弃矿井抽水蓄能电站新技术。分析了电站建设的总体改造方案, 指出了电站建立的必要性、可行性和战略意义; 结合现有的工程机械装备, 从掘扩支护、土方作业、辅助机械、智能机器人等4个方面论述了电站基础建设装备群的构成及其应用场景; 针对电站的具体施工与运维过程, 总结了电站在输水系统的稳定支护与密闭、多巷道间的节流与引流、地下厂房的防渗与加固、厂房周围天然地下水的抽排、人员及大型设备的高效与安全运输等技术难题, 并给出了相应的解决方案。

关键词 废弃矿井; 抽水蓄能电站; 基础建设装备

近年来, 中国部分矿井生命周期已经或即将结束, 同时随着去产能的深入, 大量资源枯竭及落后产能的煤矿矿井和露天矿坑被关闭。中国工程院重大咨询项目“我国煤矿安全及废弃矿井资源开发利用战略研究”、重点咨询项目“我国煤炭资源高效回收及节能战略研究”预测: 2020年中国关闭矿井数量达到1.2万处, 2030年将到达1.5万处^[1-2]。目前, 关

闭矿井的主要转型模式是建设成矿山公园或改造成沉陷区湖泊, 其未能实现废弃煤炭资源的最大化利用, 造成了地下资源和空间的极大浪费^[3-4], 关闭/废弃矿井再利用刻不容缓, 废弃煤矿如何更好地转型与利用已成为社会关注和研究的焦点问题^[5]。

关闭矿井中赋存大量可利用资源, 直接关闭或废弃不仅会造成资源的巨大浪费, 还可能引发安全

收稿日期: 2020-12-06; 修回日期: 2021-04-08

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(SGAHDK00DJJS1900077)

作者简介: 何涛, 讲师, 研究方向为矿山装备与机器人, 电子信箱: taoheust@163.com; 王传礼(通信作者), 教授, 研究方向为矿山流动传动与控制, 电子信箱: chlwan@aust.edu.cn

引用格式: 何涛, 王传礼, 高博, 等. 废弃矿井抽水蓄能电站基础建设装备关键问题及对策[J]. 科技导报, 2021, 39(13): 59-65; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.13.007

事故、环境污染及系列社会问题^[6]。中国 69 个资源枯竭城市中,煤炭资源枯竭型城市占 35 座。袁亮、姜耀东^[7-9]等多次建言“政府应尽快制定废弃矿井资源开发利用中长期规划,健全废弃矿井能源资源治理机制”。谢和平等^[3,10]多次强调了煤矿井下抽水蓄能发电技术的重要性,为未来关停矿井资源化利用、立体式开发和全面转型升级提供解决思路。

国外针对煤矿井下抽水蓄能电站的研究起步较早,少数国家已进入应用阶段,其中德国进展较快,并于 2017 年基于 Prosper-Haniel 煤矿建设了世界上第 1 个废弃煤矿抽水蓄能电站,其装机容量为 200 MW,下水库由井下 25 km 巷道构成^[11]。而国内相关研究较少,曹飞等^[12]以京西某废弃矿井为对象,将其与其他储能方式进行了对比研究,结果表明废弃矿井抽水蓄能电站的储能成本与其他方式基本相同,但其在技术成熟度以及使用寿命方面更具优势,且在环境治理、煤矿转型、矿业人口安置等方面的综合效益更佳。李庭等^[13]初步构建了一种基于废弃煤矿采空区的矿井水抽水蓄能调峰系统;王丽等^[14]以神东矿区大柳塔煤矿为对象,建立了相关物理模型,针对水库在循环的注水放水过程中水库库容的变形与渗漏问题开展研究,研究表明只要相关参数合理则有效库容系数大于 0.8,容许渗漏率不超过 1%。王婷婷等^[15]从站址选择、动能估算、工程布置 3 个方面进行了工程技术可行性分析,结果表明其技术方面是可行的,且单位蓄能量建设成本为 2993 元/(kW·h),与其他储能技术基本相当。许雨喆^[16]则以淮南潘一矿为例,对废弃矿井抽水蓄能电站进行了初步规划和设计。

综上,借助废弃矿井开展抽水蓄能电站建设在技术和经济上都是可行的,但国内相关研究还处于概念设计阶段,缺少施工建设经验。为加快中国煤矿抽水蓄能电站基础研究与应用进程,迫切需要开展基础建设装备及施工方法研究。

1 煤矿井下抽水蓄能电站基本原理

图 1 为 Prosper-Haniel 抽水蓄能电站示意,其基本原理如图 2 所示。煤矿井下抽水蓄能电站主

要是通过水体位势能、电能和机械能间的能量转换,在用电低谷时借助电网过剩电力将水从下水库抽至上水库,在用电高峰时放水发电。利用废弃矿井建设抽水蓄能电站主要是对煤矿已有设施进行改造和扩建,在地表建造控制楼、升压开关站、上水库,地下构造上下水库、输水系统、地下厂房及辅助洞室等。

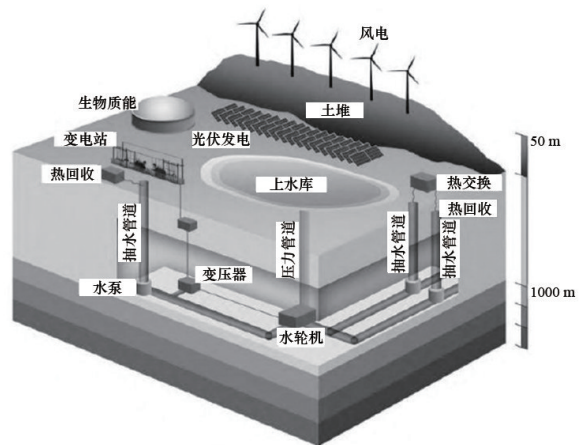


图 1 抽水蓄能电站示意

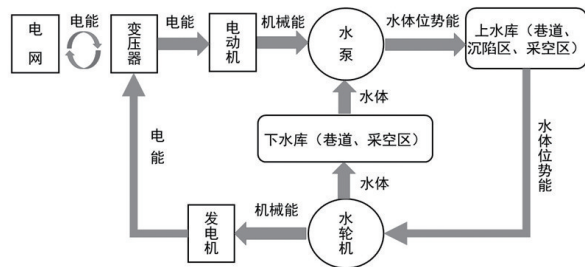


图 2 电站工作原理

煤矿抽水蓄能电站分半地下式和全地下式 2 种。半地下式是以地表露天矿坑或沉陷区为上水库,地下巷道或预留煤柱采空区作为地下厂房和下水库;全地下式是由地下不同高度差的地下巷道或预留煤柱的采空区作为上下水库和地下厂房。借助已有竖井和斜井改造为引水、输水隧洞,对副井进行改造和扩建为交通线,已有通风井可扩建为通风洞等,并将地下硐室扩建或改造为地下厂房。通过废弃矿井已有构造改建抽水蓄能电站,相对于传统抽水蓄能电站具有天然高程大、引水输水管道短、无库区人口移民成本、电站选址难度小等特点,

可与现有常规抽水蓄能电站优势互补,具有重要应用前景。

2 基础建设装备需求

废弃矿井抽水蓄能电站建设均在现有设施基础上改建,尽量避免大规模开挖建造,结合已有煤矿施工装备,分别从掘扩支护、土方作业、辅助机械、智能机器人等4方面阐述其基础建设装备需求。

2.1 掘扩支护装备

掘扩支护装备如图3所示,其中隧洞及管道的施工主要涉及伞钻、顶管机、全断面硬岩隧道掘进机(TBM)、掘进机等装备。竖井全液压凿岩伞钻构建了超大直径深立井快速掘进工艺,可对已有竖井扩建成引水、输水隧洞及调压井;顶管机可用于部分废弃矿井地下小型通道开挖;TBM、掘进机主要用于巷道、隧道、压力管道等的掘扩支护一体化作业。

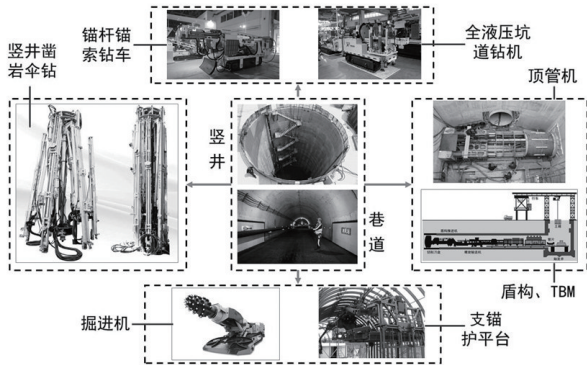


图3 掘扩支护装备

支锚护主要涉及支锚护平台、锚杆锚索钻车、钻机等装备,支锚护平台与掘进机组合构成了快速掘进系统,适用于煤巷和半煤岩巷以及软岩巷道掘进;锚杆锚索钻车、钻机等适用于煤矿巷道支护锚固作业以及地质勘探孔、抽放瓦斯孔、探放水孔及注水孔等钻孔作业。主要掘扩支护装备功能特点见表1。

2.2 土方作业装备

土方作业装备如图4所示,主要包括巷道修复、混凝土作业及铲运装备。其中巷道修复机具备挖掘毛水沟、卧底、破岩、清理、平整巷道及小型配

表1 掘扩支护装备功能特点

掘扩支护装备	功能特点
竖斜井伞钻	竖斜井扩建引水隧洞、交通井和调压井
顶管机	地下出线、通风、水道等管道开挖铺设
盾构机、TBM	巷道、压力管道、管路通道的掘扩支护
掘进机	地下巷道快速扩建,地下空间快速构筑
支锚护平台	衔接掘进,永久支护,保证施工安全
锚杆锚索钻车	地下巷道、地下厂房空间的支护锚固
全液压钻机	地下工程用孔的钻孔需要

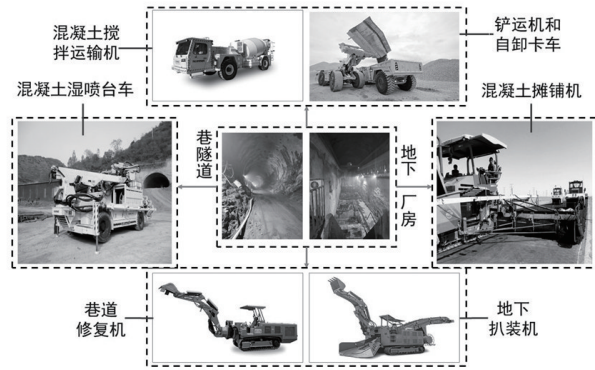


图4 土方作业装备

件吊装等多种功能;配备破碎锤、锚杆机及锚杆切断器,可完成破岩、钻锚杆孔、锚杆(索)切割作业以及部分断面排险、清沟等工作。

混凝土作业装备中混凝土湿喷台车可满足长大隧道混凝土喷射;混凝土摊铺机集混凝土摊铺、布料、振实、提浆、找平、整平等功能为一体,与混凝土搅拌运输机协作可高效完成井下摊铺整平作业。

铲运装备包括铲运机、自卸卡车、扒装机等。其中铲运机集铲、装、运、卸于一体,适用于回采出矿和巷道掘进出渣,以及道路修筑平整、材料运输等辅助作业。部分土方作业装备功能特点见表2。

2.3 辅助机械装备

辅助机械装备如图5所示,地下厂房配有大型水泵水轮机、大型球阀或蝶阀及其他配套重型装备,为满足安装及运维需求,主厂房需要配备双梁桥式起重机。其他井下专用人员运输车、人举工作平台车、剪式升降机、机械除垢机、机械破碎机辅助机械装备功能特点见表3。

表2 土方作业装备及功能特点

土方作业装备	功能特点
巷道修复机	巷道、煤巷、半煤岩巷及岩巷扩帮、起底、扩修
连续扒装机	掘进装载、引水洞、隧道施工、断面、水沟排险
混凝土湿喷车	巷道、连通区、采空区、隧道混凝土喷射支护
铲运机	矿石装运、掘进出渣、材料运输等
自卸卡车	运输掘进开采的矿石和需要的设备材料
搅拌运输机	巷道底、地下通道、厂房路面摊铺、布料、振实

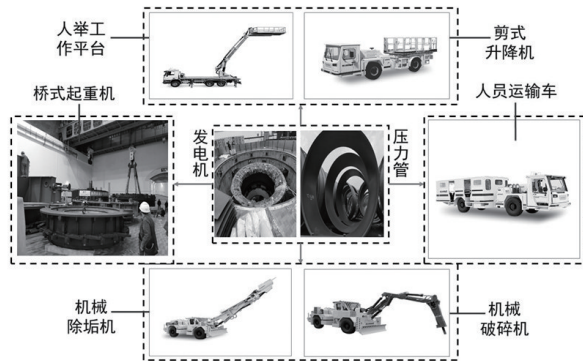


图5 辅助机械装备

表3 辅助机械装备及功能特点

辅助机械装备	功能特点
桥式起重机	厂房系统大型设备的安装、调试和维修
人员运输车	节省人员体力,提高效率,保证人员安全
工作平台车	通风管道、电气化工程、水服务的管道安装
剪式升降机	为隧道内的各种安装工程提供安全的工作平台
机械除垢机	地下巷道、采空区水路管道进行除垢清理
机械破碎机	处理巷道、采空区中较大块岩石,扫清路障

2.4 智能机器人装备

煤矿井下地下空间错综复杂,部分地下空间稳定性差,且存在瓦斯等易燃易爆气体,空间有限,环境恶劣,作业难度大,研发应用智能机器人可降低

安全风险、提高生产效率、减轻人员劳动强度,部分智能机器人装备如图6所示。



图6 智能机器人装备

智能机器人装备涉及支护、巡检、运维、抢险及喷涂作业等方面。其中临时支护机器人适用于复杂、危险地下空间的围岩支护作业,可有效提高掘进效率及安全性;两栖运维机器人可完成地下水系巡检及运维作业;巡检机器人可完成室内管路、水泵房和配电房等项目检测;管道巡检机器人具备气体测定、管壁检测、缺陷定位、清淤、除垢等功能。小型混凝土喷涂机器人主要用于狭小空间及危险区域喷涂自动化作业。部分智能机器人装备功能特点见表4。

表4 智能机器人装备及功能特点

机器人种类	功能特点
临时支护	复杂危险地下空间的扩建和支护
水陆两栖维护	地下水库水陆两栖巡航作业
轮式探测巡检	地下空间、厂房的消防、救援、破障等
管道巡检	通风管、输水管道等的巡检作业
井下抢险救灾	井下消防灭火及救灾作业
智能掘进	危险地下巷道和矿洞的扩建和改造
小型喷涂	危险或大型装备无法进入区域的喷浆支护

3 存在的技术问题及解决办法

中国废弃矿井抽水蓄能电站研究起步晚,基础理论研究薄弱,关键技术不够成熟,且煤矿地质条件复杂,抽水作业过程交变应力-冲击应力-热应力影响大,亟需开展相关问题分析与对策研究,以

预估在施工及运维过程中可能遇到的技术难题。

3.1 输水系统稳定支护及密闭问题

输水系统是电站的重要组成部分,其内部周期性抽注水、水流速大、湍动现象剧烈,而煤矿巷道仅进行锚喷支护,支护强度低,大规模储水可能诱发围岩软化、失稳,且矿洞巷道围岩节理、裂隙可能成为天然渗透通道。如何加强输水系统密闭、防止内渗、消除湍流冲击是输水系统首要解决的难题。

针对上述问题,拟采用拼接方式安装内部高压管道,在管道外层安装柔性塑料保护套,管道外部与岩层之间采用护网支护,并使用钢筋混凝土加固;管道内部采用表面强化处理,以增强其硬度和强度。同时在发电室周围设置保护层,其内部充满可控压力静压水介质,以耗散发电室周边高压冲击,实现输水系统柔性加固;为确保水道畅通,管道内部可设置移动拦污栅,清理水道杂物。此外,为提高作业效率、降低作业难度,可考虑开发专用施工作业装备。

3.2 多巷道间节流和引流问题

废弃矿井地下巷道错综复杂、高低不平,多巷道交接的局部区域会产生涡流,对巷道内壁产生间断水锤作用,进而威胁整个输水系统稳定性。因此,在多巷道交接处应设置引流和节流装置,且对偏深巷道还应设置专门水泵、引流和导流装置。

基于地下多巷道的特殊性,可开发相应引流装置,安装在多巷道的交接处,根据水流方向调整导流片方向,实现巷道间引流。在发电机周边安装容积较大格栅节流装置,降低湍流强度,维持抽水稳定,保障水泵水轮机安全。此外,可据流固耦合及寿命评估模型,结合疲劳损伤评估算法,进行数值分析,确保输水系统稳定及引流便捷。

3.3 地下厂房防渗及加固问题

大空间地下厂房设计和施工将是废弃矿井抽水蓄能电站工程的难点之一。地下厂房及辅助洞室不仅受围岩压力,还受水道振动冲击,且发电机室周壁也承受较大冲击应力,可产生汽蚀和水锤效应,直接影响电站效率和安全性。同时发电装备和一些检测设备将也将承受地下水和输水系统慢渗透及水流冲击,为确保相关装备安全和可靠运行,

亟需对地下厂房及周边洞室进行防渗和加固。

地下厂房布置应充分发挥围岩条件,优化结构,并对地下厂房周边巷道、采空区围岩破碎面的裂隙注浆加固,必要时进行二次衬砌;部分薄弱区域应采用钢板衬砌或混凝土+锚杆的柔性支护方案;为提高作业效率应开发专用衬砌及锚护装备。此外,还应根据水文地质条件进行渗流分析,估算厂房最大渗水量及地下水位线,做好厂房通风、防潮、防火及防淹预案;并针对围岩收敛、拱顶下沉、围岩位移和松弛范围、锚杆和锚索应力、围岩内部温度及地下水渗流等环境工况实时监测工作。

3.4 厂房周围天然地下水抽排问题

中国矿井深度较深,部分达千米以上,地下水积水增加了地下厂房的改造、施工和维护难度,积水还会对洞顶和洞壁围岩长期侵蚀,使围岩力学指标下降,进而对厂房系统安全造成威胁,且积水还会导致环境潮湿,不利于人员身体健康和电力设备安全可靠运行,故厂房周围天然地下水的抽排也是亟需重点解决的问题之一。

厂房地下水抽排措施包括直接和间接2种方法。直接方法为在厂房设计时使发电机房高程大于周围天然地下水浸润线在洞壁溢出点高程,确保厂房大部分洞壁处于干燥环境。间接方法为在厂房四周设置垂直排水孔幕,由排水孔幕收集渗水至排水幕廊道抽排,且部分抽排系统汇集的渗水杂质少、水量大,可作为机组冷却水和生活用水,实现废水再利用。

3.5 人员和大型设备高效与安全运输问题

电站施工或后期检查维修,需将大型设备和检修人员输送至地下,为确保输送过程快捷、安全,除借助煤矿副井扩建成交通井外,还应针对煤矿井下特种工况及输送装备的特点设计专门的输送装备工具,方便后续施工、维修及装备更换。

电站交通井可由已有竖井改造和扩建而成,且矿洞内部可能含有瓦斯和水,为确保下井人员的安全,可设计用于矿井升降输送的胶囊运输舱,具有承载能力高、密封性能好、升降平稳、安全可靠的特点,并具有防爆性能;到达井下后,人员乘坐专用运输车到达指定作业区域。大型装备主要通过升降

设备由交通洞进入地下,并设计匹配的成套运输、吊装、转载及拆装设备,借助单轨吊或者地面轨道实现运输、拆装、更换一体化作业。

4 结论

1) 在分析废弃矿井抽水蓄能电站改建方案基础上,论述了电站基础建设装备群的构成及其应用,并重点研究了电站建设所面临的技术难题及其对应的解决方案。从已有条件看,借助废弃矿井开展抽水蓄能电站建设不仅在环境治理、煤矿转型、矿业人口安置等方面具有重要社会意义,而且在技术和经济层面上也具有很强的可行性,可见煤矿废弃矿井抽水蓄能电站具有很好的发展前景。

2) 针对基础建设装备匮乏的难题,建议首批电站的建设施工应优先选用已有的成熟的工程机械装备,以减少成本、降低难度;而在一些特种施工场合应选择性地研发专用配套作业装备,以提高效率、确保安全。随首批电站建成后,施工工艺及流程逐渐规范成熟,届时应重点逐步完善专用施工装备体系,以期最终在电站建设的勘、掘、扩、支、固、运、维等所有环节均实现智能化和无人化。

3) 基于煤矿井下的特种工况,未来煤矿抽水蓄能电站应重点关注其在输水系统、地下厂房、节流和引流、人员设备运输及厂房积水抽排等方面存在的技术问题,并结合所提出的对策和预案,有针对性地做好前期预研工作,从而为中国未来煤矿井下抽水蓄能电站特种装备的前瞻性研究奠定基础,进而缩短电站建设周期,加速中国首座煤矿抽水蓄能电站的落地建成和生产运营。

参考文献(References)

- [1] 袁亮. 我国煤炭资源高效回收及节能战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [2] 霍冉, 徐向阳, 姜耀东. 国外废弃矿井可再生能源开发利用现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 267-273.
- [3] 谢和平, 高明忠, 高峰, 等. 关停矿井转型升级战略构想与关键技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1355-1365.
- [4] 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.
- [5] 袁亮, 杨科. 再论废弃矿井利用面临的科学问题与对策[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 16-24.
- [6] 袁亮, 姜耀东, 王凯, 等. 我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 14-20.
- [7] 王中伟. 关闭煤矿的资源利用可系统开发六大资源——独家专访全国人大代表、中国工程院院士袁亮[N]. 中国煤炭报, 2018-03-05(1).
- [8] 李平. 三番建言, 袁亮院士为废弃矿井操“废”心[EB/OL]. [2020-05-26]. http://www.zgkyb.com/yw/20200526_62597.htm.
- [9] 姜耀东. 关闭煤矿不能简单一封了之[EB/OL]. [2018-03-05]. <http://www.ccoalnews.com/special/201803/05/c63-676.html>.
- [10] 谢和平, 侯正猛, 高峰, 等. 煤矿井下抽水蓄能发电新技术: 原理、现状及展望[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 965-972.
- [11] 德国首创废弃煤矿储能水电站[J]. 能源与环境, 2017(6): 25.
- [12] 曹飞, 王婷婷, 唐修波. 利用废弃矿井建设抽水蓄能电站的效益探讨[C]//抽水蓄能电站工程建设文集(2020). 北京: 中国水利水电出版社, 2020: 66-71.
- [13] 李庭, 顾大钊, 李井峰, 等. 基于废弃煤矿采空区的矿井水抽水蓄能调峰系统构建[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 93-98.
- [14] 王丽, 李宗泽, 陈结, 等. 废弃煤矿采空区抽水蓄能水库初步可行性研究[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(4): 47-54.
- [15] 王婷婷, 曹飞, 唐修波, 等. 利用矿洞建设抽水蓄能电站的技术可行性分析[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(1): 195-200.
- [16] 许雨喆. 基于废弃矿井的抽水蓄能电站设计[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [1] 袁亮. 我国煤炭资源高效回收及节能战略研究[M]. 北

Key problems and countermeasures for infrastructure equipment of abandoned mine pumped storage power station

HE Tao^{1,2,3,4}, WANG Chuanli^{1,3,4*}, GAO Bo⁵, CHEN Fan⁵, WANG Weijun^{1,3}, ZHAO Kaiping^{1,3}

1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China
2. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China
3. Anhui Key Laboratory of Mine Intelligent Equipment and Technology, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China
4. Anhui Collaborative Innovation Center of Mine Mechanical and Electrical Equipment, Huainan 232001, China
5. Academy of Electric Power Sciences, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd, Hefei 230061, China

Abstract In order to make better use of the large amount of resources and underground space left by abandoned coal mines and promote the transformation & development of energy-exhausted cities, a new technology for abandoned coal mine pumped storage power station is introduced. The overall reconstruction plan of power station construction is preliminarily analyzed. The necessity, feasibility and strategic significance of the construction of power station are pointed out. Combined with the existing construction machinery and equipment, the composition and application of power station infrastructure equipment group are discussed in terms of excavation and expansion support, earthwork, auxiliary machinery and intelligent robot. Then, in view of construction, operation and maintenance of the power station, the technical problems are summarized, such as stable support and sealing of water transmission system, throttling and drainage between multiple tunnels, anti-seepage and reinforcement of underground powerhouse, pumping and draining of natural groundwater around powerhouse, and efficient and safe transportation of personnel and large equipment. Finally, corresponding solutions are proposed for construction of underground pumped storage power station and special equipment.

Keywords abandoned mine; pumped storage power station; infrastructure equipment ●



(责任编辑 刘志远)