

废弃矿井抽水蓄能面临的关键问题与对策思考

文志杰¹, 姜鹏飞¹, 宋振骥¹, 蒋宇静^{1,2}

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 长崎大学 工学研究科, 日本 长崎 852-8521)

摘要: 为向低碳清洁能源转型, 我国风、光等新能源高速发展, 新型电力系统对调节电源的需求更加迫切, 抽水蓄能逐渐成为储能技术开发与利用的热点。本文在系统梳理抽水蓄能电站技术研究现状的基础上, 从电站选址、库容计算、地下空间改造及安全运维四个视角分析了废弃矿井抽水蓄能电站建设面临的主要难题; 从工程角度提出亟待研究解决的四项关键技术: 地上水库安全性评价方法与治理技术、地下水库库容计算模型及调蓄技术、地下水库损伤变形机理及加固技术、二次开挖地下结构变形失稳机制及治理技术。利用废弃矿井遗留的大量地下空间资源建设抽水蓄能电站, 有助于构建清洁低碳能源体系, 增强能源供给稳定性。

关键词: 抽水蓄能; 电站; 废弃矿井; 关键技术

中图分类号: TD989

文献标志码: A

Key problems and countermeasures of abandoned mine pumped storage

WEN Zhijie¹, JIANG Pengfei¹, SONG Zhenqi¹, JIANG Yujing^{1,2}

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology,

Qingdao 266590, China;

2. Graduate School of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 852-8521, Japan)

Abstract: To make the transition to clean energy, China's new energy sources such as wind energy and light energy are developing at a high speed and the new power system has a more urgent demand for regulating power supply. Pumped storage has gradually become a hot spot in the development and utilization of energy storage technology. On the basis of systematically combing the current research situation of pumped storage, this paper analyzed the main problems existing in the construction of pumped storage power stations using abandoned mines from the four perspectives: Power station location, storage capacity calculation, underground space transformation, and safe operation and maintenance. From the perspective of engineering technology, four key technologies that needed to be solved urgently were put forward: The safety evaluation method and governance technology of underground reservoir, the storage capacity calculation model and regulation technology of underground reservoir, the damage deformation mechanism and reinforcement technology of underground reservoir, and the deformation instability mechanism and governance technology of the secondary excavation underground structure. The construction of pumped storage power stations by using large amount of underground space resources left over by abandoned mines is conducive to building a clean low-carbon energy system and enhancing the stability of energy supply.

Key words: pumped storage; power station; abandoned mines; key technology

收稿日期: 2022-10-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51974174, 52274130); 山东省自然科学基金项目(ZR2019YQ26)

作者简介: 文志杰(1982—), 男, 山东平度人, 教授, 博士生导师, 主要从事采动力学与围岩控制研究。

E-mail: wenzhijie@sdust.edu.cn

宋振骥(1935—), 男, 山东泰安人, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 主要从事矿山压力与岩层控制研究。

在全球气候变暖大背景下,全世界已有超过 137 个国家提出“碳中和”目标或愿景,“绿色”“低碳”的经济发展模式深入人心。2020 年,我国宣布了碳达峰、碳中和目标,并加快实施供给侧结构性改革,着力构建人与自然生命共同体^[1-2]。我国风能、光能储量丰富,“十三五”期间每年新增装机容量 50 ~ 120 GW,2020 年首次突破 100 GW 大关。“十四五”第一年,我国风电、光伏年新增装机合计 102.45 GW,发电量近 10 000 亿 kW·h 时,占当年总发电量 11.73%(图 1)。到 2030 年,风电、光伏总装机将达到 12 亿 kW,占比达到 50%^[3]。同时,新能源的随机性、波动性为新能源的稳定开发利用带来新的挑战,加快发展新型储能体系是保障绿色低碳能源安全供给的重要保障。随着我国经济进入新常态,经济发展对煤矿的要求逐渐提高,因产能落后而关井的现状日益凸显。据不完全统计,“十三五”期间全国累计关闭落后产能矿井约 5 500 座^[4],期间每年矿井关停数量如图 2 所示。根据中国工程院院士袁亮牵头的中国工程院重点咨询项目“我国煤炭资源高效回收及节能战略研究”预测,到 2030 年,我国关闭矿井数量将达到 15 000 座,按每个矿井 60 万 m³ 计算,将包含 90 亿 m³ 地下空间资源^[5-6]。如何利用废弃矿井资源,越来越成为社会关注的热点。

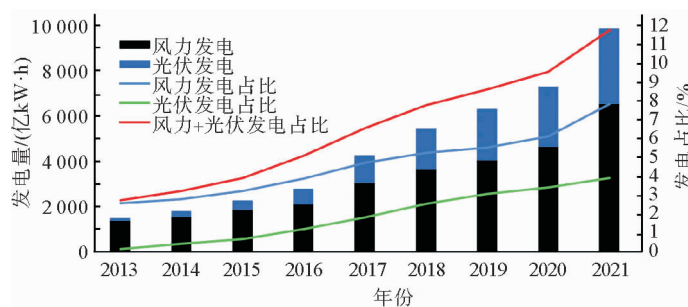


图 1 我国 2013—2021 年风力及光伏发电量变化

Fig. 1 Changes of wind and photovoltaic power generation in China from 2013 to 2021

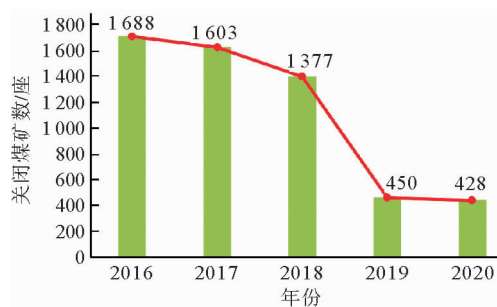


图 2 “十三五”期间我国每年关停煤矿矿井数量变化

Fig. 2 Changes in the number of closed coal mines of “13th Five-Year” in China

2021 年,国家能源局印发了《抽水蓄能中长期发展规划(2021—2035 年)》,提出到 2030 年抽水蓄能投产总规模 1.2 亿 kW 左右。利用废弃矿井抽水蓄能不仅可对废弃矿井地下资源进行高效合理的二次利用,也为实现煤炭行业的“双碳”目标提供有效的路径和助力^[7-9]。废弃矿井具备修建地下储能电站的独特优势:煤炭开采后在煤岩层中遗留大量的巷道和采空区,并且具有天然的高差;此外,煤炭在开采过程中会产生大量的矿井水储存在废弃矿井内,利用废弃矿井建造地下储能电站,具有广阔的经济前景和社会效益。

1 抽水蓄能电站建设现状

根据上、下位水库与地表的相对位置关系,抽水蓄能电站可分为三类:地上抽水蓄能电站、半地下式及全地下式抽水蓄能电站(图 3)^[10-11]。国外对抽水蓄能电站的研究始于十九世纪末,并于 1882 年建成了世界上最早的地上抽水蓄能电站(瑞士苏黎世的奈特拉抽水蓄能电站),随后各国根据本国国情相继提出了建造抽水蓄能电站的设想方案。1999 年底,新泽西州利用废弃铁矿作为下水库建成了霍普山抽水蓄能电站;2006 年,世界上首个半地下抽水蓄能电站(Nassfeld)建于奥地利的阿尔卑斯山^[12];2012 年,Gridflex Energy 公司研究在一座石灰岩矿中建造抽蓄电站的下位水库^[13];维也纳 Pablo Spitzer 公司以人工隧道群为抽蓄系统中的上位水库,以天然湖泊为下位水库建设半地下抽水蓄能电站^[14];西班牙设计将一座废弃的煤矿改建为半地下抽蓄电站^[15];2016 年,南非的约翰内森堡也开始尝试将废弃金矿改建成全地下抽水蓄能电站^[16];德国鲁尔区 Prosper-Haniel 煤矿于 2018 年 12 月关停,其有望被改建成全球首个全地下抽水蓄能电站^[17]。

1968 年,我国首次在河北岗南水库安装了 1 台从日本引进的容量为 11 MW 的抽水蓄能机组;1994 年,我国第一座大型地上抽水蓄能电站——广州抽水蓄能电站一期工程完工^[18]。同时,我国也积极开展废弃露天矿坑建设抽水蓄能工程,如河北滦平利用小营乡哈叭沁村西沟铁矿的采空区作下位水库建设抽水蓄能

电站;辽宁省阜新市利用海州废弃露天煤矿作下位水库改建抽水蓄能电站^[19]。2015年,顾大钊院士^[20]提出将废弃矿井改建成地下水库的设想,并在神东矿区大柳塔煤矿进行了工程实践。目前,国内外暂无建成的半地下式或全地下式废弃矿井抽水蓄能电站。

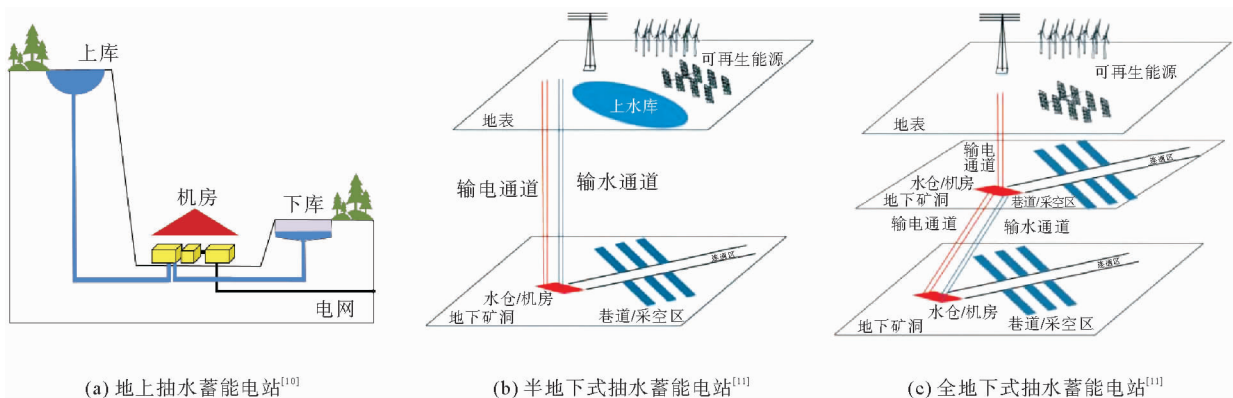


图3 抽水蓄能电站分类示意图

Fig. 3 Classification diagram of pumped storage power station

2 废弃矿井抽水蓄能面临的主要难题

建设废弃矿井抽水蓄能电站,可丰富电网调峰手段,改善电源布局与负荷分布不协调问题,也是有效利用废弃矿井资源的一种创新,但目前仍面临诸多困难。

2.1 废弃矿井选址要求高

废弃矿井抽水蓄能电站选址受经济、安全和法律法规等诸多因素制约,目前尚缺少系统、科学的电站选址理论与方法,仅有少数学者采用模糊多准则决策模型^[10]、多能互补原则^[11]对废弃矿井抽蓄电站选址开展了初步研究。

首先,井下水文地质条件决定了矿井改造利用的可行性。我国是世界上煤矿开采数量、规模最大的国家,其中约有1/3的矿井为水资源丰富型矿井^[21]。水库选址地区内水资源条件是否满足抽水蓄能电站建设的需求是决定废弃矿井是否可再利用的关键。富水矿井因井下涌水量大,致使上、下位水库水循环不匹配,使得抽水成本逐渐大于发电收益;而水资源匮乏矿井,抽水蓄能电站建设时需首先考虑补给水源的稳定性,如地下可利用含水层、地表径流、当地降水量等^[22],增加了调蓄工程建设成本。其次,断层在煤矿井下地质构造类型中较为常见,蓄水空间或水循环通道内的断层受水体侵蚀冲刷、水岩作用劣化、循环加卸载等作用影响易活化,致使蓄水空间或水循环通道失稳,因此电站选址需规避断层活化风险^[23]。上位水库大坝及库区渗漏率同样受岩土的层理发育、结构面及产状稳定状况的影响^[24-25]。此外,电站的经济性受上、下位水库之间的水平距离与水头之比影响,且抽水蓄能电站建设要求水头适中,其范围为200~700 m^[26]。作为地下蓄水空间的废弃矿井,其开拓空间所处高程由资源分布决定,水头高度具有不可控性;而地表水库的选址受地形、地表构筑物、农田耕地、生态保护区等诸多限制因素制约,上、下位水库之间的水平距离具有不确定性。

2.2 地下水库库容计算难

为保障合理的装机容量,地下水库应具备充足的可利用空间,地下水库有效库容是反映抽蓄能力最直观、最重要的指标^[27]。准确计算有效库容可为废弃矿井地下水库装机容量提供准确、可靠的科学依据。有效库容的大小取决于废弃矿井内可利用空间的布置特点及巷道网络的空间关系,并受地下水文条件、蓄水位、水循环频率、地下空间构成、围岩性质及其稳定性、改造措施等因素影响^[28]。对于以巷道及其关联硐室群作为地下水库的利用模式,由于采动后期巷道变形的不确定性、水气时空变化的复杂性,目前暂无计算废弃矿井有效库容的方法。

少数学者针对煤矿采空区地下水库库容计算进行了研究。文献[29]认为煤矿地下水库的蓄水系数等于冒落带孔隙率或裂隙带孔隙率;文献[30]研究了煤矿地下水库岩体碎胀特性,为煤矿地下水库蓄水量的预测提供理论依据;文献[31]根据蓄水水位在覆岩垮裂带内的不同位置,建立了地下水库蓄水容量的数学表达式;文献[32]综合考虑煤矿地下水库蓄水系数的潜在影响因素,建立了考虑有效应力影响的煤矿地下水库蓄水系数模型,并确定了模型解析解;文献[33]提出一种基于CAD的库容快速精准计算方法;文献[34]提出一种利用岩层的垂直位移轨迹方程计算冒落前后体积差的有效蓄水空间计算方法。学者们普遍认为煤矿地下水库蓄水空间为采场冒落的采空区及其上部断裂岩层中的空间,但采空区为非均质多孔介质,工作面推采后的采空区内空隙率受破断覆岩自重载荷压实等影响逐渐降低直至趋于稳定,采空区空隙率的变化极易形成非自由的无效蓄水空间,并且现有方法中的蓄水系数难以确定,因而无法精准计算采空区地下水库有效蓄水体积。同时,抽水口泥沙淤积易造成水泵堵塞不能设置在仓底,并且由于压缩空气的存在导致水库无法完全充满,进一步增加了难以计算的无效库容。此外,对于已关停的部分矿井,由于人员分流导致井巷布局等基础资料缺失,也增加了蓄水空间体积计算的难度。

2.3 地下空间改造难度大

废弃矿井在已完成的煤炭开采过程中,形成了包括不同开采水平的井下巷道及其关联硐室等在内的大量地下空间^[35]。由于废弃矿井二次开发利用意识淡薄,多数矿井直接将巷道封闭回填,造成地下空间资源浪费,为后续开发利用带来了巨大的挑战。同时,废弃矿井原有支护系统仅为满足服务年限内矿山安全生产需求设计^[36],在废弃矿井巷道再利用时,尤其在抽水蓄能电站水体长期循环往复运行过程中,应考虑蓄水巷道及其关联硐室支护系统抗疲劳、抗腐蚀特性和围岩裂隙渗流特性,需增加支护系统优化、围岩表面防渗处理等工程投入。为安放发电机组等大型设备,或为降低电站千瓦投资成本而对地下水库扩容,需拓宽或新开拓硐室。此外,对半地下式废弃矿井抽水蓄能电站,需在地表重新开掘水库与引水工程,在建设中将进行大量的土石方开挖。以京西某煤矿建设抽水蓄能电站工程为例,其估算静态总成本约为89 796万元,单位千瓦投资为17 959元,而常规抽水蓄能电站单位千瓦投资为5 000~6 000元,目前利用废弃矿井建设抽水蓄能电站工程的投资较高(表1)^[37]。

表1 各类储能方式主要技术参数对比^[37]

Table 1 Comparison of key technical parameters of various energy storage modes

储能类别	自行放电率 /(%/月)	循环次数/次	寿命/年	转换效率 /%	能量密度 /(W·h/kg)	装机成本 /(元/kW)
压缩空气储能	—	—	40~50	65~70	—	2 500~5 000
飞轮储能	—	20 000	—	90	50~100	3 000
传统铅蓄电池	1	200~800	10	70~85	50	500~1 000
铅炭电池	1	2 000~3 000	10	70~85	50	800~1 200
锂离子电池	1.5~2	5 000~7 000	10	90~95	70~250	1 500~1 800
全钒液流电池	低	>10 000	15	75~85	100	3 500~3 900
锌溴液流电池	10	5 000	—	75~80	100	2 500~3 000
钠硫电池	低	3 000	10	80~90	150	2 000
超导磁储能	10~15	—	15~25	95	1~10	3 000~4 000
超级电容器储能	20~40	>10 000	—	95	30	2 500~3 000
某废弃矿井建设抽水蓄能站	—	—	>50	75	—	2 993

2.4 运行期间安全风险高

一方面,国内煤矿井巷穿过的岩层多为富水且孔隙发育的泥岩、砂岩等沉积岩,该类岩石孔隙度大、吸水性强且分布范围较广^[38]。岩石内部孔隙的存在直接影响岩石物理、力学性质,导致围岩强度降低、渗透性增

大。同时,围岩易受水岩作用而发生溶蚀、崩解^[39],在废弃矿井抽水蓄能电站运行过程中,水锤效应将诱发本就脆弱的围岩失稳,从而危及蓄水空间和水循环通道的流通性与完整性。另一方面,在煤炭资源开采过程中,覆岩受采掘扰动而损伤破坏,其内部孕育大量裂隙^[40]。地上水库抽蓄运行时,蓄存水体的自重载荷作用于基岩,使已损伤破坏的基岩再次受到扰动而活化失稳,将引起地上水库坝体失稳、地下巷道、硐室坍塌破坏,严重威胁电站安全。

此外,因煤田范围较大,已建成的废弃矿井抽蓄电站仍可能受邻近生产矿井开采诱发的矿震或区域地震的影响,使地下水库处于动载作用环境中^[41-42]。抽蓄电站运行期间,地下蓄水巷道及其关联硐室长期处于应力-渗流耦合效应下,受水压循环加卸载作用,易发生渗流变形破坏^[43-44],尤其在内水压作用下,水的渗流以渗透应力作用于衬砌结构,衬砌混凝土受拉开裂并受施工质量等因素影响形成宏观裂缝^[45]。衬砌裂缝出现后,其内水体沿裂缝外流致使围岩变形增大,易发生衬砌因钢筋约束作用径向变形与围岩不一致而导致两者脱离,衬砌单独承担该范围内水体压力,降低衬砌结构有效服务年限^[46-47]。

3 废弃矿井抽水蓄能关键技术

针对抽水蓄能电站建设面临的主要难题,可从地上水库安全性评价与治理、地下水库库容计算及调蓄优化、地下水库损伤变形机理及加固、二次开挖地下结构变形失稳与治理等四个方面开展技术攻关,研究解决废弃矿井改建抽水蓄能电站的成套关键技术(图4)。

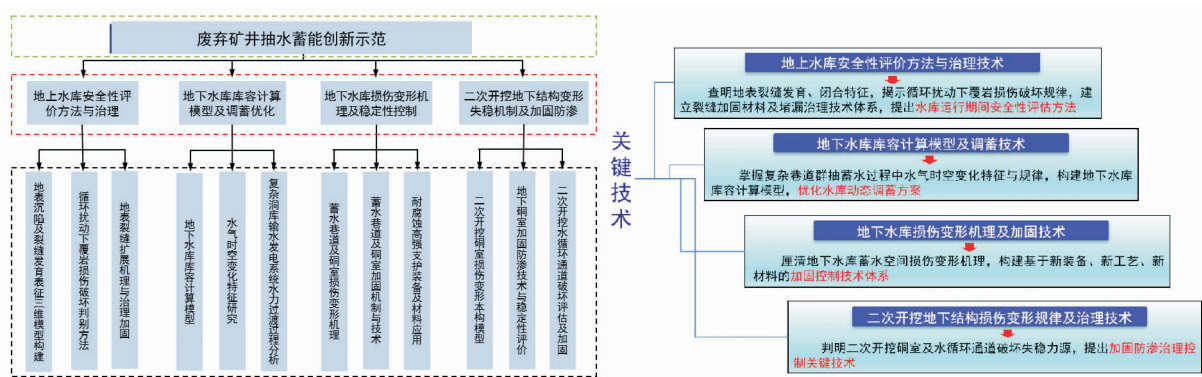


图4 废弃矿井“抽水蓄能”关键技术

Fig. 4 Key technology of “pumped storage” by using abandoned mines

3.1 地上水库安全性评价方法与治理技术

在地下资源开采时基岩产生大量裂隙,建设地上水库需厘清采空区沉陷范围及受采动影响下地表裂缝发育及闭合特征,把握其受水体初次载荷作用下基岩的二次运动规律。在水库运行期间,循环抽放水体对基岩产生循环加卸载载荷,同时受地下水库水体循环冲刷、侵蚀作用,也进一步增加基岩结构失稳风险。因此,需要掌握多因素循环扰动下基岩损伤破坏规律,提出相应的风险评估方法。对已产生的地表裂缝,要厘清其在不同埋深、岩性、地质构造等综合条件下的发育扩展机理,开展相应堵漏防渗技术、效果探测与评价技术等研究。

此外,针对地上水库边坡稳定性问题,还要掌握其受内部地质结构、初始采动损伤、水循环作用等因素影响引起的边坡滑移动态演化机制,制定边坡稳定性监测评估方法,并提出合理的加固措施。最终,根据各影响因素与机制的研究,建立健全地上水库选址科学评价指标体系,形成系统的地上水库安全性评价方法与治理技术。

3.2 地下水库库容计算模型及调蓄技术

首先,需研究分析废弃矿井内可利用空间的布置特点及巷道网络的空间关系,考虑地下水文条件、蓄水

水位、水循环频率、地下空间构成、围岩性质及其稳定性、改造措施等因素影响,研究不同积水标高时储水空间横向径流情况及稳态水位。其次,在确定稳态水位体积后,通过激光全断面扫描、激光测距等手段获取蓄水巷道及硐室物理几何参数、空间拓扑结构等,建立有效蓄水库容的科学计算模型。

此外,受地下蓄水巷道及其关联硐室空间分布复杂性与结构局限性影响,需要根据其抽蓄水工况下水气时空变化特征,分析既有巷道利用的可能性,提出地下巷道群补气、排气综合措施。在蓄能发电系统运行过程中,由于放水控制闸门的开停,易在水循环通道或蓄水巷道中形成水锤效应,破坏其结构的稳定性,因而需要根据地下蓄水巷道布置、调压井布置,结合运行方式、机组特性,开展复杂洞库输水发电系统水力过渡过程分析。

同时,受地上水库水体自然蒸发、地下水库渗漏等因素影响,需建立补水调蓄机制,优化补水方法与路径,最终构建地下水库容精准计算模型,形成科学调蓄技术与方法。

3.3 地下水库损伤变形机理及加固技术

由于地质构造、开掘扰动以及长期静载蠕变等作用^[48],致使巷道及其关联硐室围岩形成初始损伤,水循环时产生渗流场的循环加卸载作用,改变其原有的受力平衡状态(图5)。同时,因抽水蓄能电站运行生命周期长,受离子置换作用的影响,金属支护结构在地下水库全生命周期下易腐蚀从而失效。

因此,应着力研究应力-渗流耦合作用下具有初始损伤的蓄水巷道及其关联硐室围岩长时损伤规律与变形机理,对蓄水区域围岩稳定性进行科学分级评价;开展循环水压、水质、矿压等因素影响下多相、多元、多应力场环境中围岩加固机制研究,探究流变-动载作用下不同锚固方式对损伤岩体的强化程度与时效性,制定合理加固方案并开展加固效果检测与评价;基于蓄水环境(温度、pH值等)研发新型抗腐蚀、高强度支护加固新装备、新工艺、新材料,最终形成一套科学的加固治理新技术。

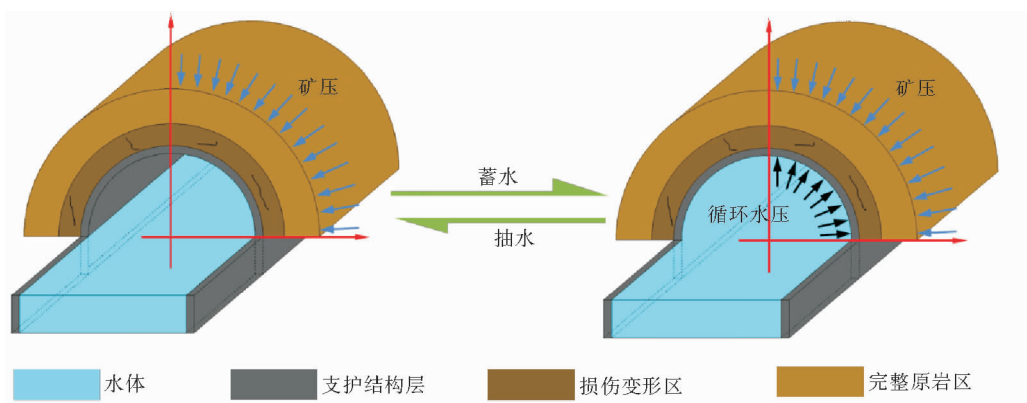


图5 蓄水巷道内循环抽蓄水示意图

Fig. 5 Schematic diagram of circulating water pumping and storage in roadway

3.4 二次开挖地下结构变形失稳机制及治理技术

因发电系统安放、地下蓄水空间扩容等需求,需在地下新开挖大型硐室或巷道。受地质构造或采掘扰动影响,地下岩体已存在初始损伤,在其内二次开挖大型硐室或巷道具有一定安全风险。因此,首先开展时效效应下二次开挖硐室围岩损伤力学特征研究,获得二次开挖扰动影响下硐室围岩体内时间-应力-位移的耦合演化关系,建立二次开挖下硐室围岩体损伤变形本构模型,科学评价二次开挖硐室结构稳定性。其次,应基于二次开挖地下结构损伤特征,研究加固及防渗的有效方法,开展加固防渗效果及其时效性检验与监测技术研究。此外,在伴有初始损伤地层内新开挖水循环通道,受水循环动能、水岩作用等多重因素影响,其结构易变形失稳,需深入研究抽、蓄水循环对水循环通道围岩内裂隙结构尺度、充填物溶解等方面产生的二次影响,获得其与水循环次数耦合关系,提出抽、蓄水循环过程中通道破坏程度判别准则,制定相关加固技术方案并开展加固效果及其耐久性检验与评价。

受矿震、区域地震等因素影响,还应开展二次开挖地下结构抗震性能优化研究,掌握其破坏变形机制。针对构筑物材料适用性、煤柱与坝体结构优化、煤柱与人工坝体加固方式优化、蓄水空间与坝体抗震稳定性评价等开展技术攻关。

4 建议与展望

废弃矿井抽水蓄能是一项复杂的系统工程,要从国家、社会层面,把抽水蓄能工程作为节能减排的重要组成部分,正视废弃矿井改建抽水蓄能电站面临技术创新动力不足、人才配备缺乏、行业发展规划模糊等问题,加快推进工程研究与示范建设,推动新产业的落地与长期发展。

1) 加强技术创新研究与人才培养。坚持技术创新在抽水蓄能产业发展全局中的核心地位,加大科技攻关投入,坚决补齐技术方面的短板,激发人才创新活力,提升人才国际化视野。完善高校、科研院所与企业联合培养人才的有效机制,推动教育链、人才链与产业链、创新链的有机衔接。

2) 坚持理论研究与抽水蓄能产业发展相结合。坚持应用牵引、问题导向,从产业需求角度加强先进理论研究,优化施工工艺与方法,形成有利于新理论、新技术应用的独特优势,加速理论成果向现场应用的转化,最终为废弃矿井蓄水电站设计、灾害预警与防控提供理论基础与科学指导。

3) 把握国家政策导向。认真解读国家相关政策,积极争取国家政策中各项优惠措施,争创和建设一批国家级废弃矿山抽水蓄能产业示范基地。围绕废弃矿山二次开发利用与国家“双碳”目标,积极推进废弃矿山抽水蓄能新技术、新模式、新产业发展。

参考文献:

- [1] 张楠,张保留,吕连宏,等.碳达峰国家达峰特征与启示[J].中国环境科学,2022,42(4):1912-1921.
ZHANG Nan,ZHANG Baoliu,LÜ Lianhong,et al.Peaking characteristics and enlightenment based on carbon peak countries[J].China Environmental Science,2022,42(4):1912-1921.
- [2] 袁亮.废弃矿井资源综合利用助力实现“碳达峰、碳中和”目标[J].科技导报,2021,39(13):1.
YUAN Liang.Comprehensive development and utilization of abandoned mine resources,help achieve the goal of “emission peak and carbon neutralization”[J].Science and Technology Review,2021,39(13):1.
- [3] 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.
YUAN Liang,YANG Ke.Further discussion on the scientific problems and countermeasures in the utilization of abandoned mines[J].Journal of China Coal Society,2021,46(1):16-24.
- [4] 谢和平,任世华,谢亚辰,等.碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J].煤炭学报,2021,46(7):2197-2211.
XIE Heping,REN Shihua,XIE Yachen,et al.Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J].Journal of China Coal Society,2021,46(7):2197-2211.
- [5] 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.
YUAN Liang,JIANG Yaodong,WANG Kai,et al.Precision exploitation and utilization of closed/abandoned mine resources in China[J].Journal of China Coal Society,2018,43(1):14-20.
- [6] 中国煤炭工业协会.2020年煤炭行业发展年度报告[R].北京:中国煤炭工业协会,2021.
- [7] 卞正富,朱超斌,周跃进,等.黄河流域九省区废弃矿井抽水蓄能利用潜力评估[J/OL].煤田地质与勘探:1-13[2022-11-25].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1155.p.20221014.1143.002.html>.
BIAN Zhengfu,ZHU Chaobin,ZHOU Yuejin,et al.Potential evaluation of pumped storage power plants using abandoned mines in nine provinces of the Yellow River basin[J/OL].Coal Geology & Exploration:1-13[2022-11-25].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1155.p.20221014.1143.002.html>.
- [8] 谢和平,高明忠,刘见中,等.煤矿地下空间容量估算及开发利用研究[J].煤炭学报,2018,43(6):1487-1503.
XIE Heping,GAO Mingzhong,LIU Jianzhong,et al.Research on exploitation and volume estimation of underground space in coal mines[J].Journal of China Coal Society,2018,43(6):1484-1503.
- [9] 刘欣,杨威.抽水蓄能电站建设发展探讨[C]//抽水蓄能电站工程建设文集2019.北京:中国电力出版社,2019:48-50.
LIU Xin,YANG Wei.Development of Pumped-storage power station construction[C]//Proceedings of Pumped-storage

- Power Station Construction 2019.Beijing:China Electric Power Press,2019:48-50.
- [10] 王兵,刘朋州,邓凯磊.基于模糊多准则决策模型的废弃矿井抽水蓄能电站选址研究[J].矿业科学学报,2021,6(6):667-677.
WANG Bing,LIU Pengshuai,DENG Kailei.Site selection of pumped storage power station in abandoned mines:Results from fuzzy-based multi criteria decision model[J].Journal of Mining Science and Technology,2021,6(6):667-677.
- [11] 任岩,侯尚辰.基于多能互补的抽水蓄能电站站址选择的研究[J].水电与抽水蓄能,2021,7(6):37-39.
REN Yan,HOU Shangchen.Study on site selection of pumped storage power station based on multiple complementarity [J].Hydropower and Pumped Storage,2021,7(6):37-39.
- [12] BECK H,SCHMIDT M.Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke:Schriftenreihe des Energie-Forschungszen trums Niedersachsen,Band 7[M].Gttingen:Cuvillier Verlag,2011.
- [13] Seiwald S.Erweiterung Kraftwerk Naßfeld-ErhÖhung Bockhartseedamm[J].Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft, 2007,59(7):91-97.
- [14] 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.
XIE Heping,HOU Zhengmeng,GAO Feng,et al.A new technology of pumped-storage power in underground coalmine: Principles,present situation and future[J].Journal of China Coal Society,2015,40(5):965-972.
- [15] JAVIER M,JORGE L.Use of Coal Mines Facilities in Northern Spain for the Production of Sustainable Energy[J].International Journal of Environmental Science,2017,2:324-328.
- [16] WINDE F,KAISER F,ERASMUS E.Exploring the use of deep level gold mines in South Africa for underground pumped hydroelectric energy storage schemes[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2017,78:668-682.
- [17] ANDRE N.Proposed underground pumped hydro storage power plant at Prosper-Haniel colliery in Bottrop:State of play and prospects[J].Mining Report Gluckauf,2018,154(3):214-223.
- [18] 靳亚东,唐修波,赵杰君,等.我国抽水蓄能电站的现状与发展前景分析[C]//抽水蓄能电站工程建设文集 2019.北京:中国电力出版社,2019:21-25.
JIN Yadong,TANG Xiubo,ZHAO Junjie,et al.Current situation and development trend of pumped-storage power stations in China[C]//Proceedings of Pumped-storage Power Station Construction 2019.Beijing:China Electric Power Press,2019: 21-25.
- [19] 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.
WANG Tingting,CAO Fei,TANG Xiubo,et al.Technical feasibility analysis of utilizing mine to construct pumped storage plant[J].Energy Storage Science and Technology,2019,8(1):195-200.
- [20] 顾大钊.煤矿地下水库理论框架和技术体系[J].煤炭学报,2015,40(2):239-246.
GU Dazhao.Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J].Journal of China Coal Society,2015,40(2):239-246.
- [21] 秦容军,任世华,陈茜.我国关闭(废弃)矿井开发利用途径研究[J].煤炭经济研究,2017,37(7):31-35.
QIN Rongjun,REN Shihua,CHEN Qian.Study on development and utilization path of closed (abandoned) coal mines in China[J].Coal Economic Research,2017,37(7):31-35.
- [22] 潘文国,杨彪.抽水蓄能电站上水库渗漏对环境的影响[J].区域治理,2019(49):149-151.
PAN Wenguo,YANG Biao.Effect of the upper reservoir leakage at pumped storage power stations on environment[J].Regional Governance,2019(49):149-151.
- [23] 卞正富,周跃进,曾春林,等.废弃矿井抽水蓄能地下水库构建的基础问题探索[J].煤炭学报,2021,46(10):3308-3318.
BIAN Zhengfu,ZHOU Yuejin,ZENG Chunlin,et al.Discussion of the basic problems for the construction of underground pumped storage reservoir in abandoned coal mines[J].Journal of China Coal Society,2021,46(10):3308-3318.
- [24] 王海涛.陕西镇安抽水蓄能电站上水库渗漏问题分析与评价[J].资源环境与工程,2020,34(3):439-444.
WANG Haitao.Analysis and evaluation on leakage of upper reservoir of Zhen'an pumped storage power station in Shaanxi province[J].Resources Environment & Engineering,2020,34(3):439-444.
- [25] 赵海阔,余小光,周海峰,等.山西垣曲抽水蓄能电站上水库粘土质砂岩工程特性研究[J].三峡大学学报(自然科学版), 2019,41(增 1):41-48.
ZHAO Haikuo,SHE Xiaoguang,ZHOU Haifeng,et al.Engineering characteristics of clay sandstone in upper reservoir of

- Yuanqu pumped-storage power station in Shanxi province[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2019, 41(S1): 41-48.
- [26] 靳亚东,董化宏,马登清.建设蓄能电站解决风电消纳经济性分析[J].水力发电,2011,37(10):8-9.
JIN Yadong, DONG Huahong, MA Dengqing. Economic analysis on constructing storage stations for consuming wind power[J]. Water Power, 2011, 37(10): 8-9.
- [27] 商大成.毕节地区利用废弃煤矿地下空间建设抽水蓄能电站的研究[D].贵阳:贵州大学,2021.
SHANG Dacheng. Study on the construction of pumped storage power stations by using abandoned underground coalmines in Bijie district, Guizhou province[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [28] 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.
XU Yuzhe. Design of pumped storage power station based on abandoned mines[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019.
- [29] 陈苏社.神东矿区井下采空区水库水资源循环利用关键技术研究[D].西安:西安科技大学,2016.
CHEN Sushe. Research on the key technology of water resources recycling utilization in the underground goaf reservoir in Shendong mining area[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016.
- [30] 汪北方,梁冰,王俊光,等.煤矿地下水库岩体碎胀特性试验研究[J].岩土力学,2018,39(11):4086-4092.
WANG Beifang, LIANG Bing, WANG Junguang, et al. Experiment study on rock bulking of coal mine underground reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(11): 4086-4092.
- [31] 鞠金峰,许家林,朱卫兵.西部缺水矿区地下水库保水的库容研究[J].煤炭学报,2017,42(2):381-387.
JU Jinfeng, XU Jialin, ZHU Weibing. Storage capacity of underground reservoir in the Chinese western water-short coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 381-387.
- [32] 方杰,宋洪庆,徐建建,等.考虑有效应力影响的煤矿地下水库蓄水系数计算模型[J].煤炭学报,2019,44(12):3750-3759.
FANG Jie, SONG Hongqing, XU Jianjian, et al. Storage coefficient calculation model of coal mine underground reservoir considering effect of effective stress[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3750-3759.
- [33] 姜琳婧,方杰,杨宗,等.基于GIS与CAD的煤矿地下水库库容计算平台开发研究[J].煤炭科学技术,2020,48(11):166-171.
JIANG Linjing, FANG Jie, YANG Zong, et al. Study on precision computing platform development of coal mine underground reservoir capacity based on GIS and CAD[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 166-171.
- [34] 庞义辉,李全生,曹光明,等.煤矿地下水库蓄水空间构成分析及计算方法[J].煤炭学报,2019,44(2):557-566.
PANG Yihui, LI Quansheng, CAO Guangming, et al. Analysis and calculation method of underground reservoir water storage space composition[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 557-566.
- [35] 郭平业,王蒙,孙晓明,等.废弃矿井地下空间反季节循环储能研究[J].煤炭学报,2022,47(6):2193-2206.
GUO Pingye, WANG Meng, SUN Xiaoming, et al. Study on off-season cyclic energy storage in underground space of abandoned mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2193-2206.
- [36] 康红普,王国法,姜鹏飞,等.煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J].煤炭学报,2018,43(7):1789-1800.
KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, et al. Conception for strata control and intelligent mining technology in deep coal mines with depth more than 1 000 m[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1789-1800.
- [37] 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:中国电力出版社,2020:66-71.
CAO Fei, WANG Tingting, TANG Xiubo. Discussions on the benefits of constructing pumped storage power stations by using abandoned coal mines[C]// Proceedings of Pumped-storage Power Station Construction 2020. Beijing: China Electric Power Press, 2020: 66-71.
- [38] 肖鹏,于海洋,王东,等.充填开采超前段主动支护替代被动支护技术与应用[J].山东科技大学学报(自然科学版),2022,41(3):41-49.
XIAO Peng, YU Haiyang, WANG Dong, et al. Technology and application of active support replacing passive support in advance section of backfill mining[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 41(3): 41-49.
- [39] 李海祥,曹志国,吴宝杨,等.煤矿覆岩裂隙地下水渗流特征的实验研究[J/OL].煤炭科学技术, <https://kns.cnki.net/kc->

ms/detail/11.2402.TD.20220311.0840.002.html.

LI Haixiang, CAO Zhiguo, WU Baoyang, et al. Experimental study on characteristics of groundwater fracture in coal mine overlying rock[J/OL]. Coal Science and Technology. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20220311.0840.002.html>.

- [40] 智国军, 刘润, 杨瑞刚, 等. 煤矿地下水库相邻采空区水力联系及渗流规律研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(2): 9-15.
ZHI Guojun, LIU Run, YANG Ruigang, et al. Study on hydraulic connection and seepage law of adjacent goaf of underground reservoir in coal mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(2): 9-15.
- [41] 池明波, 李鹏, 曹志国, 等. 煤矿地下水库平板型人工坝体抗震性能分析[J/OL]. 煤炭学报. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2021.1991.
CHI Mingbo, LI Peng, CAO Zhiguo, et al. Seismic performance analysis of flat artificial dam of underground in coal mine reservoir[J/OL]. Journal of China Coal Society. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2021.1991.
- [42] 智国军, 刘润, 杨瑞刚, 等. 煤矿地下水库人工坝体嵌入煤柱/体的构筑参数优化研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(2): 18-22.
ZHI Guojun, LIU Run, YANG Ruigang, et al. Research on optimization of cutting parameters for structuring artificial dam around underground reservoir in coal mine[J]. Coal Technology, 2022, 41(2): 18-22.
- [43] 姚文理. 废弃矿井采动覆岩裂隙导通特征及蓄水蓄能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
YAO Wenli. Study on fracture conduction characteristics and water and energy storage of overburden strata in abandoned mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [44] 文志杰, 姜鹏飞, 景所林, 等. 煤矿地下水库底板渗流模拟试验系统研制及验证[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1487-1497.
WEN Zhijie, JIANG Pengfei, JING Suolin, et al. Development and verification of simulation testing system for floor seepage in coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1487-1497.
- [45] 刘仲秋, 章青. 考虑渗流-应力耦合效应的深埋引水隧洞衬砌损伤演化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 2147-2153.
LIU Zhongqiu, ZHANG Qing. Damage evolution analysis of permeable lining of deep diversion tunnel based on seepage-stress coupling theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 2147-2153.
- [46] 苏凯, 伍鹤皋, 周创兵. 内水压力下水工隧洞衬砌与围岩承载特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2407-2412.
SU Kai, WU Hegao, ZHOU Chuangbing. Study of combined bearing characteristics of lining and surrounding rock for hydraulic tunnel under internal water pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2407-2412.
- [47] ZHOU Y, SU K, WU H. Hydro-mechanical interaction analysis of high pressure hydraulic tunnel[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2015, 47: 28-34.
- [48] 文志杰, 黄景, 蒋宇静, 等. 动静组合循环加载试验系统研制及试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2817-2827.
WEN Zhijie, HUANG Jing, JIANG Yujing, et al. Development and experiment of a coupled static-dynamic cyclic loading test system[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(8): 2817-2827.

(责任编辑: 齐敏华)