

中国废弃矿山地下抽水蓄能电站技术要点与可行性分析

郝富瑞¹, 张进德¹, 王延宇², 颜瑞雯^{3*}

1. 中国地质环境监测院, 北京 100081

2. 中航勘察设计研究院有限公司, 北京 100098

3. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

摘要 为应对全球气候变化、化解资源环境危机, 中国需推进能源结构调整与优化, 逐步提高可再生能源开发利用比例, 加快解决可再生能源存储的瓶颈问题。中国废弃矿山数量巨大, 利用废弃矿山遗留下来的大量地下空间建造抽水蓄能电站为中国可再生能源存储提供了新的思路。基于德国利用废弃金属矿山和煤矿地下空间建造地下抽水蓄能电站的实例, 从岩石力学、矿山规划、机械构置、能源系统规划、法律、环境影响以及经济性等方面深入探讨了中国利用废弃矿山建造地下抽水蓄能电站的相关评价原则与技术要点, 并进一步提出了中国废弃矿山地下抽水蓄能电站研究的基本方向和主要内容。

关键词 可再生能源存储; 废弃矿山; 地下抽水蓄能电站

矿产资源是人类赖以生存的重要物质基础, 长久以来, 矿产资源的开发利用对世界经济和社会发展做出了巨大的贡献。然而, 全球矿产资源总量有限, 特别是以煤炭、石油、天然气为主的化石能源不可再生, 工业社会的发展极大地加快了化石能源的消耗速度, 导致了诸多生态环境问题。大规模、高强度的化石能源开发利用引发的酸雨、雾霾等环境问题日益突出, 同时化石燃料燃烧释放的大量 CO₂

引起的全球温室效应也成为了国际社会关注的热点, 全球气候变暖的不争事实正对生态环境造成不可逆转的重大影响。因此, 面对能源消耗持续增加、资源约束不断趋紧、环境压力逐步加剧的不利局面, 降低传统化石燃料的消耗量、增大清洁可再生能源的开发利用是破解目前资源环境难题、实现资源环境耦合系统可持续发展的重要举措。以风能、太阳能为主的可再生能源受自然地理条件约

收稿日期: 2019-11-30; 修回日期: 2020-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41907402); 中央高校基本科研业务专项资金项目(2019QD03)

作者简介: 郝富瑞, 工程师, 研究方向为矿山地质环境调查评价与生态修复, 电子信箱: xifurui@hotmail.com; 颜瑞雯(通信作者), 讲师, 研究方向为矿山生态环境修复, 电子信箱: yanruiwen819@hotmail.com

引用格式: 郝富瑞, 张进德, 王延宇, 等. 中国废弃矿山地下抽水蓄能电站技术要点与可行性分析[J]. 科技导报, 2020, 38(11): 41-50; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.11.005

束,具有间歇性、波动性等不稳定特征,相比于传统能源,高效、稳定和安全的利用可再生能源需要相应的能源存储设施保障。长期的应用实践证明,抽水蓄能电站是一种清洁高效的可再生能源存储设施。然而,地势落差、大量地表土地空间占用等限制因素严重制约了抽水蓄能电站的适建性。而利用废弃矿山遗留的巨大落差和大量地下空间将消除抽水蓄能电站选址的制约因素,大大增加了其在平原以及地表空间紧张地区的适建性。中国废弃矿山数量巨大,遗留下大量地下空间,充分利用这些空间建造地下抽水蓄能电站,可有效缓解中国可再生能源存储危机,推进能源结构优化升级,并极大节约地表建设用地,避免了大量地下空间浪费,实现对废弃矿山“深层次的生态修复”,对资源枯竭型城市转型升级、促进生态文明建设具有十分重大的现实意义。

1 抽水蓄能电站简介

抽水蓄能电站是通过水的重力势能作为能源媒介来完成能源的转化存储,存在能源存储需求时,利用电能驱动水泵将水从位置较低的蓄水区域抽到位置较高的蓄水区域,将电能转化为水的重力势能存储起来;而在有能源利用需求时,将水从高蓄水区域释放并通过涡轮机驱动发电机发电,将水的重力势能重新转变为电能进行利用。

抽水蓄能电站的应用历史可追溯到 100 多年前,1901 年世界上第一座抽水蓄能电站原型专利在美国提交,并于 1917 年获美国专利局批准,该专利的内容是将地上风车产生的风能通过地下水泵、涡轮机以及发电机等装置转化为水势能,用于在能源危机时代利用该装置存储风能^[1]。

虽然抽水蓄能技术发明较早,但直到 20 世纪 70 年代,伴随着欧洲核能的大规模开发利用,抽水蓄能电站才真正得到了广泛应用,主要用于平衡不稳定核能造成的日均电力供给波动^[2]。相比于其他能源存储设施,抽水蓄能电站拥有较高的能源转化效率(最高可达到 80% 左右),同时,抽水蓄能电站的蓄能容量可通过蓄水区域面积和水力落差

灵活调节。凭借着容量大、寿命长、稳定可靠、灵活高效等特点,抽水蓄能电站逐渐成为了能源存储领域理想的存储设施。巨大的应用需求也极大促进了抽水蓄能行业的发展,从 20 世纪 70 年代起,欧洲许多科研机构开始着手进行抽水蓄能相关科学研究,期间发表了许多有代表性的科研报告^[3-9]。

随着抽水蓄能技术的不断应用发展,地上抽水蓄能电站对地形的要求以及对地面景观的干扰效应逐渐显露。抽水蓄能电站要求较大的落差完成水势能的转化,只能在地形起伏较大的地区(比如丘陵山地区域)建造,平原等地区平缓的地形限制了抽水蓄能技术的应用。同时,地表蓄水设施会对生态景观造成一定程度的美学影响,随着人们生态环保意识的增强,地上抽水蓄能电站的环境影响也限制了其大规模推广应用。基于此,欧美等国的科研人员逐渐将研究视角从地上转入地下,开始着手进行地下抽水蓄能电站的可行性研究,包括地下抽水蓄能电站的建造要求、选址原则、潜力分析以及建造成本评估等。近年来,为促进能源转型战略顺利实施,解决可再生能源存储瓶颈问题,德国有关科研机构率先选取典型废弃金属矿山和煤矿山,开展了利用废弃矿山地下空间建造抽水蓄能电站的可行性研究。

2 德国废弃矿山抽水蓄能电站现状

2.1 德国能源转型战略

为缓解工业化进程中大量化石能源消耗造成的全球气候环境危机,作为世界第五大、欧盟第一大能源消费国的德国从 21 世纪初期开始着手实施能源转型战略。2010 年 9 月,随着《能源方案》^[10]报告的发布,德国中长期能源转型发展计划正式拉开了序幕。该报告指明了德国中长期化石能源、核能源和可再生能源的开发利用方向,制定了国家电力网络建设发展路线,确定了逐步缩减化石能源与核能开发利用、至 2050 年退出核能、全面实现以可再生能源为主、低碳环保、可持续发展的能源转型战略目标。2014 年 12 月德国公布了《能源转型进展报告》^[11],明确了德国能源供给体系从传统的以化

石能源和核能为主体向以可再生能源为主体转变的能源转型思路,并确定了将在2022年前全面退出核能、2038年全面停止使用煤电的战略方针,化石能源与核能退出造成的能源亏空将全部由可再生能源填补。因此,从2010年开始,德国陆续出台了促进可再生能源发展的政策法规,制定了区域可再生能源开发利用详细行动计划,逐步加快了以风能和太阳能为主的可再生能源开发利用速度。

2.2 废弃矿山存储可再生能源构想

相比于传统化石能源,受区域自然地理气候条件影响,风力和光照强度等的不规则、随机变化导致风能和太阳能等可再生能源具有显著的间歇性、波动性等不稳定特征。无法提供长效、安全、稳定的能源输出是制约以风能和太阳能为主的可再生能源大规模开发利用的主要限制因素。为克服这一挑战,需要一种中间能源存储技术,以完成在用电低峰期存储过剩可再生能源(削峰)和在用电高峰期释放蓄存能源发电(平谷)的目标。通过近百年来大量应用实践证明,抽水蓄能电站是一种高效稳定的可再生能源存储设施。

抽水蓄能电站要求相对大的落差来完成水力势能的转化,但平原地区相对平缓的地形限制了抽水蓄能电站的大规模应用发展。为此,建造地下抽水蓄能电站成为解决可再生能源存储瓶颈问题的必然选择。废弃矿井存在高落差和大量地下空间,充分利用废弃矿井遗留的结构稳定的地下空间建造地下抽水蓄能电站,一方面可以有效节省开拓地下蓄水空间产生的建设成本,另一方面又可以避免地上蓄水工程设施建造对于地表生态景观的影响,降低生态扰动效应。20世纪80年代,荷兰代尔夫特工业大学(TU Delft)就开展了利用废弃煤矿地下空间建造抽水蓄能电站的可行性研究,虽然最终研究成果表明,在当时的技术与经济条件下,还不具备利用废弃煤矿建造地下抽水蓄能电站的可行性^[12],但是该研究为后继相关研究指明了方向,开拓了思路。

德国推进的能源转型战略一方面促使可再生能源开发利用比例、可再生能源存储需求逐年增加,另一方面导致以硬煤和褐煤为主的化石燃料消

耗量逐年降低。来自德国联邦经济与能源部(BMWi)的统计显示(图1),至2016年底德国超过35%的能源消耗量来自于可再生能源,而德国硬煤消耗量则减少到只占能源总消耗量的5%左右。充分利用大量废弃和即将闭坑矿山遗留下来的地下空间建造抽水蓄能电站,填补可再生能源急速增长造成的能源存储能力缺口,将是破解德国能源转型期可再生能源大规模开发利用瓶颈问题的必然之路。为此,德国相关研究机构开展了利用金属矿山和煤矿地下空间建造抽水蓄能电站的有益尝试。

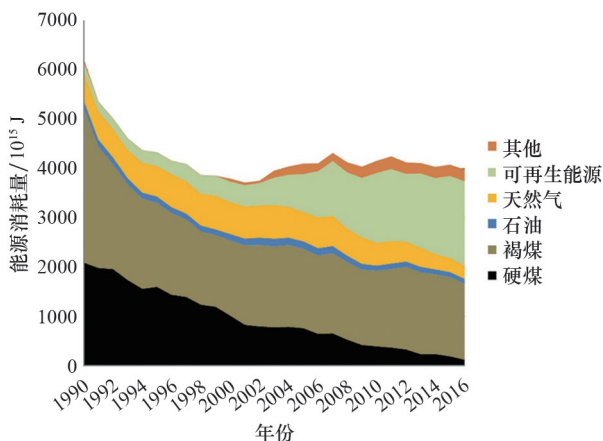


图1 1990—2016年德国能源消耗趋势

2.3 废弃金属矿山地下抽水蓄能电站实例

2009年,德国下萨克森州能源研究中心(EFZN)受德国联邦环境保护与核能安全部(BMU)资助,开展了“利用废弃矿井建造地下抽水蓄能电站存储风能的可行性研究”^[13],旨在通过采矿、地质、法律、生态、经济、电力等多交叉学科协同研究,探讨利用废弃矿井建造地下抽水蓄能电站的限制性因素,明确适合建造地下抽水蓄能电站的废弃矿山筛选原则,继而确定全德范围内适宜建造抽水蓄能电站的矿区。同时,选取了典型矿山开展地下抽水蓄能电站试点研究,探讨工程设计、施工建造以及运营维护过程中可能产生的社会、经济、环境和工程方面的问题及相应解决方案,由点带面分析全德范围内建造废弃矿山地下抽水蓄能电站的可行性。

研究表明,全德国范围内包括 Erzgebirge、

Harz 以及 Siegerland 在内的 6 个矿区适合或部分适合建造地下抽水蓄能电站。据初步估算,理想条件下在这些矿区可建造高达 10 GW 装机容量、总蓄电容量超过 40 GWh 的地下抽水蓄能电站。同时,项目组选取了 Harz 地区废弃金属矿井 Wiemannsbucht 作为建造地下抽水蓄能电站的实验并开展试点模拟研究。

Wiemannsbucht 矿井位于 Harz 山区 Grund 矿区,竖井深 761 m,横截面直径超过 3.5 m,矿井闭坑后矿口已由混凝土封闭。由于缺少必要的抽水措施,Ernst-August 巷道(距地表约 130 m)以下矿井空间皆被矿井水淹没。据此工程地质条件,工程师在以 Wiemannsbucht 竖井为中心的废弃金属矿山制定了如图 2^[13]的地下抽水蓄能电站设计方案。



图2 废弃金属矿山地下抽水蓄能电站示意

1) 现存 Wiemannsbucht 竖井用作交通运输通道。

2) 由于现存金属巷道地下空间无法满足大容量蓄水空间要求,抽水蓄能电站的上下蓄水池需在井深 100 m 和 800 m 处重新开挖,蓄水池由彼此相距 15 m、平行布设的横截面为 5 m×7.5 m 的巷道构成,巷道组由中央巷道连通,预计可以存储约 24 万

~26 万 m³ 水量,上下蓄水池由重新开挖的压力管道连通。

3) 由于地下废弃矿井硐室围岩稳定性较好,机器硐室(由抽水泵、涡轮机、发动机、电动机等组成)将由原有废弃矿井硐室改造,通风、逃生、电力传输竖井需额外开挖建造。

4) 预计在 4 h 满负荷运转情况下电站总装机容量可达到 100 MW;转化的电能经过地表变电站升压后通过 110 kV 高压电线传输至主电网。

通过试点模拟研究发现,废弃金属矿山虽然闭坑已久,但是矿井可达性良好,超过 700 m 的采深提供了巨大的水力落差,贯通的竖井为抽水蓄能电站提供了便利的交通条件;地下空间具有相对稳定的围岩力学性质,为地下抽水蓄能电站的施工建造提供了有力的基础安全保障;充足的矿井水经过净化处理后可为上下蓄水池提供充足的水源;充分利用矿井地下空间有效避免了地上蓄水工程设施对地表生态环境的影响,具有较高的民众接受度。这些有利条件都为抽水蓄能电站的审批与施工建造提供了有利基础保障。但是,由于在目前政策与施工条件下,大面积地下蓄水空间开挖会使工程成本显著提高,可能导致电站短期内无法达到稳定盈利状态,还有待政府在能源转型过渡时期出台相应激励政策,用以改善新能源存储投资环境,提高企业参与的积极性。

2.4 废弃煤矿地下抽水蓄能电站实例

德国鲁尔工业区(Ruhr)拥有十分悠久的采矿历史,硬煤开采业可以追溯到 19 世纪初。100 多年来随着采矿业不断发展,由数百家矿业、钢铁和化工公司组成的鲁尔工业区逐渐发展成为德国“工业心脏”、欧洲煤炭开采和钢铁制造中心。第二次世界大战后德意志联邦共和国的经济腾飞,即所谓的“经济奇迹”,主要是基于硬煤产量的迅速增长,鲁尔区丰富的煤炭资源保障了新兴重工业产业的能源需求,为经济的迅速腾飞提供了重要的物质基础。然而,从 20 世纪 50 年代后期开始,受到国际能源市场冲击,鲁尔区煤炭行业开始逐步走向衰落,2018 年 12 月,鲁尔工业区长达数百年的煤炭开采历史正式宣告结束。后矿业时代遗留了大量废弃

煤矿地下空间,如何利用这些宝贵的地下空间促使鲁尔区工业转型升级、实现社会经济可持续发展成为了北威州政府面临的重要课题。这其中,大力开发可再生能源、利用废弃煤矿地下空间建造抽水蓄能电站存储可再生能源,为北威州能源转型发展提供了新的思路。

为此,鲁尔集团(RAG)联合多家本地科研院所即将闭坑的 Prosper-Haniel 矿区开展了废弃煤矿地下抽水蓄能电站的可行性研究^[14],结合本地条件制定了相应工程设计方案(图3^[14])。

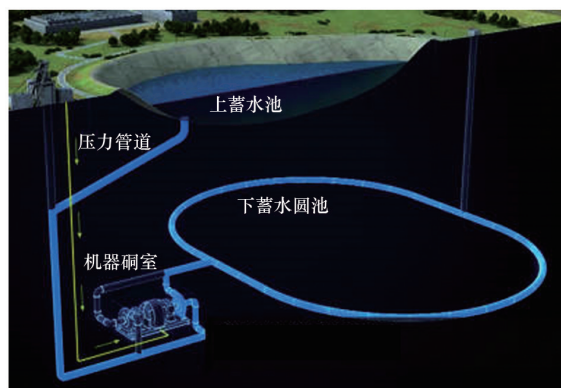


图3 煤炭矿山地下抽水蓄能电站示意

1) 充分利用现有竖井资源,将4个现存竖井改造为运输、电力输送、逃生以及通风竖井。

2) 上蓄水空间利用地表采空沉降区低洼稳沉地势,人工建造堤坝拦截筑造。

3) 下蓄水空间在地下岩石力学性质稳定区域重新开挖,由一个超过15 km长的环形蓄水池组成(由于相对昂贵的防水支护措施,经测算,重新开挖蓄水圆池成本低于改造加固同等体积的采煤地下空间)。

4) 连接上下蓄水区域的压力管道需重新开挖。

5) 地下机器洞室可利用现有地下车场、硐室改造加固而成。

6) 110 kV 高压输电经升压后与220 kV 高压主电网连接。

通过试点研究显示,Prosper-Haniel 矿山为新闭坑矿山,闭坑工程措施还未实施,拥有优良的可

达性;矿山按照最新安全标准建造,地下巷道拥有完好支护措施,地下车场、硐室围岩稳定性良好;矿山采深超过1200 m,拥有巨大的水力落差;同时,地下存在丰富矿井水资源,满足大容量抽水蓄能电站建设要求。综上,利用鲁尔区典型废弃煤矿建造地下抽水蓄能电站理论上是可行的。但是,由于煤炭矿区地下不稳定的沉积岩构造限制了地下蓄水区域施工建造,工程设计前期需要投入大量资金在围岩稳定性相对良好区域重新建造地下蓄水区域,加之改造现存地下空间需要采取适当支护加固措施,相比金属矿山,工程建造成本显著提高。其中,建造地下蓄水空间是电站成本过高的主要原因。据初步核算,在目前条件下,废弃矿山地下抽水蓄能电站建造成本大约为同等规模地上抽水蓄能电站的1.5倍左右。

3 中国废弃矿山抽水蓄能电站研究

3.1 中国废弃矿山分布概况

中国矿山数量众多,但大中型矿少、小型矿多,建材等非金属矿多、能源和金属矿少。根据中国地质调查局全国以市、县为单元的矿山地质环境调查数据统计,截至2018年,中国共有各类废弃矿山约9.9万座。按矿产类型划分,能源类废弃矿山1.2万余座,金属类废弃矿山1.2万余座,非金属类废弃矿山约7.5万座;按生产规模划分,大型废弃矿山共有2000余座,中型废弃矿山共有4200余座,小型废弃矿山共有9.3万余座;按开采方式划分,露天开采的废弃矿山共有8万余座,井工开采的废弃矿山共有1.7万余座,其他混合开采的废弃矿山2000余座。全国废弃矿山空间分布稀疏不均,整体呈现出东多西少的趋势。

谢和平等根据煤矿规模、利用系数以及新中国成立以来煤炭开采总量,估算出截至2016年底,全国煤矿采空区地下空间体积约为138.36亿 m^3 ;按照平均每年开采34亿t原煤速度计算,至2030年全国煤矿采空区地下空间将达约234.52亿 m^3 ^[15]。加之其他金属、非金属废弃矿山遗留的地下空间,中国废弃矿山地下空间综合利用潜力十分巨大。

3.2 中国废弃矿山抽水蓄能电站研究背景

中国是世界最大的矿产资源消费国,长期以来,大规模、高强度的矿产资源开发活动在为国家能源安全、经济发展做出重大贡献的同时,也付出了巨大的生态环境代价。采矿活动诱发崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害,导致土地损毁、含水层破坏、地下水位下降、水土污染、水土流失、水源涵养功能下降、植被覆盖率降低等不良生态环境影响,严重影响了矿区居民的生存环境和生命财产安全,制约了区域社会经济的可持续发展。此外,化石能源的开发利用导致大量CO₂排放,致使全球气候变化加剧,极端气候灾害频现。为缓解全球气候变暖趋势,中国做出到2020年减排CO₂量9.70~12.80 Gt的承诺^[16],大力调整能源结构、加速可再生能源开发利用成为中国能源发展战略的基本思路。基于此,一方面国家相继出台了资源整合和去产能政策,加快关闭具有严重安全生产隐患、开发成本高、亏损严重、环境污染问题突出或资源枯竭型的生产矿山,逐渐遗留下大量废弃矿山^[17]。另一方面,中国大力发展以水电、风电和太阳能为主的可再生能源,截至2019年,中国水电、风电、太阳能发电装机规模和核电在建规模连续多年稳居世界第一^[18]。同时,可再生能源存储能力的不足也逐渐显露,成为了制约中国可再生能源发展的重要掣肘。因此,借鉴德国废弃矿山可再生能源存储方面的经验,利用中国废弃矿山遗留的大量地下空间,建造废弃矿山地下抽水蓄能电站存储可再生能源,在促进可再生能源开发的同时利用废弃矿山的“剩余价值”,是实现资源环境可持续发展、促进区域生态文明建设的重要手段。

3.3 中国废弃矿山抽水蓄能电站研究现状

相较于欧美主要矿业发达国家,中国废弃矿山综合利用研究起步较晚,大部分废弃矿山再利用实例主要集中在工矿废弃地、采煤塌陷地的生态修复利用方面^[19-28],而对于废弃矿山地下抽水蓄能电站研究还相对较少,目前仅有中国电力科学研究院、中国矿业大学(北京)、中国电力建设集团北京勘测设计研究院有限公司、水电水利规划设计总院、四川大学等少数几家研究机构先后开展了类似研

究^[29-31],对于废弃矿山抽水蓄能电站规划设计理论研究还需进一步加强。为此,借鉴学习德国在废弃金属矿山和煤矿山建造抽水蓄能电站可行性研究中积累的丰富经验,为中国开展相关设计研究工作提供了宝贵的参考模板。

4 废弃矿山地下抽水蓄能电站技术要点

德国废弃矿山抽水蓄能电站实例探讨了利用不同矿种废弃矿山建造地下抽水蓄能电站进行可再生能源存储的可能性及其技术要点。研究表明,利用废弃矿山建造地下抽水蓄能电站可作为新能源转型战略条件下可再生能源存储的有效手段,在技术条件、风险评估、环境规划、经济效益以及工程审批方面,也具有建造实施的可操作性。但规划和建造废弃矿山地下抽水蓄能电站是一项复杂的多学科挑战,需要统筹考虑包括岩石力学、采矿学、矿山测量学、机械制造学、电力系统学、经济学、生态学以及法学在内的多种学科,协同各专业学科科研力量开展综合评估。

在工程设计方面,必须解决岩土力学、矿山测量和空间设计等方面问题,为机械及电力系统布设创造条件;在成本效益分析方面,必须回答关于投资和盈利能力方面的问题,特别是作为鼓励企业投资建设的先决条件,需要对比评价废弃矿山地下抽水蓄能电站的经济优势;在建设审批程序方面,必须评估工程建造以及运行维护过程中对于当地生态环境特别是水环境造成的潜在影响,并提出相应生态保护预案。

结合上述工程设计方案实例,以下从岩石力学、矿山空间规划、机械构置、能源系统规划、法律、环境影响以及经济性等方面探讨在中国废弃矿山建造地下抽水蓄能电站的评价原则与技术要点。

4.1 岩石力学方面

废弃矿山地下空间围岩稳定性是建造抽水蓄能电站的先决条件,其中包括地下蓄水空间、机械硐室以及其他交通运输巷道的力学稳定性。评判矿山地下空间围岩稳定性的基本指标包括:地层岩

性、岩石力学强度、地下空间初始应力状态、岩石应力-应变、水力学特性、水岩耦合效应、矿山开采深度、开采方法以及支护措施等指标。一般来说,相比于沉积岩,渗透率低的侵入岩和变质岩更加适合建造地下抽水蓄能电站。在进行电站设计之初,首先应进行地下空间围岩稳定性相关的岩石力学分析研究,开展水岩相互作用、力学流固耦合模拟分析,通过经验、理论以及数值模拟计算,分析水岩耦合作用下围岩力学性质变化规律,揭示围岩失稳边界条件,评估地下空间围岩稳定性。并根据分析结果,开展地下蓄水区、机械硐室空间规划以及围岩稳定性薄弱区支护方案的设计工作。

4.2 矿山规划方面

根据矿产资源赋存、矿山开采状况以及矿山遗留地下空间结构等条件,分析矿床类型、矿山采深、地下空间容量及其拓扑关系、支护条件、竖井通行性以及矿山闭坑时间等限制指标,初步评估废弃矿山地下抽水蓄能电站的适建性。

1) 矿床类型。根据矿床走向可将矿床分为倾斜和水平走向矿床,根据矿床分布方式可将矿床大体分为透镜状或块状分布矿床。一般来说,对于地下抽水蓄能电站建造,水平分布的块状矿床类型是实现大容量存储的理想条件。

2) 矿山采深。矿山采深决定着抽水蓄能电站的水力落差大小,间接决定着抽水蓄能电站的储能容量。一般来说,水力落差也可以通过多个竖井和巷道系统组合实现。

3) 地下空间容量及其拓扑关系。地下空间容量是除矿山采深外决定抽水蓄能电站储能容量的另一项重要指标,地下空间的拓扑关系决定了抽水蓄能电站包括蓄水空间、机器硐室以及其他辅助硐室在内的地下空间的规划构置。

4) 支护条件。废弃矿井地下空间支护条件是提高围岩稳定性的重要因素。通常情况下,地下车场与辅助硐室的支护措施较为完整,围岩稳定性较好,而采空区支护措施则相对薄弱,围岩稳定性较差;相比于废弃时间较长的矿山,闭坑时间较短的废弃矿山支护条件相对更好。

5) 竖井通行性。抽水蓄能电站的大型机器设

备需要通过竖井运输到地下机械硐室,对于大储能容量电站来说,竖井的横截面积是制约机器运输通行性的重要因素。

6) 矿山闭坑时间。矿山闭坑时间不仅可以作为评判支护措施完好程度的指标,它还决定着废弃矿山再利用的难易程度。一般来说,即将闭坑矿山尚未执行闭坑程序,不用消耗工程成本就可打通矿井交通通道,且即将闭坑矿山保留有较为完整的地下空间以及实时的矿井水赋存变化状态信息,便于开展抽水蓄能电站工程建设规划。

通过对废弃矿山相关指标的分析评估,可基于原有矿山地下空间及其拓扑关系,利用地理信息系统和矿山开采辅助设计等软件,构建废弃矿山地表和地下空间三维可视化模型,结合围岩力学特性,统筹开展上下蓄水区、压力管道、机器硐室、辅助交通井道以及地表地下输电线路的规划设计。

4.3 机械构置方面

主要包括根据抽水蓄能电站的水力落差、蓄能容量、废弃矿山竖井通行状况以及机械硐室空间体积等评价指标遴选相应水力机械组件,合理配置抽水泵、涡轮机、电动机以及发电机(组),规划机械空间位置,调试机械性能并结合能源电力系统开展机械运行情景仿真模拟及优化配置等工作。

4.4 能源系统规划方面

基于能源管理系统设计原理,分析可再生能源并网框架条件,通过专业电力系统模拟软件模拟火力涡轮机和地下抽水蓄能电站之间通过公共电网的耦联情景,分析不同情景下电力转化效率,合理规划电力系统布局,力求电力转化损失率最小化。同时,开展不同耦联情景下的经济效益评估,配合其他学科科研人员,分析公共电网瓶颈数据,根据电力系统传输要求辅助废弃矿山地下抽水蓄能电站选址,依据抽水蓄能电站储能容量设计电力传输转化系统,优化能源转化效能。

4.5 法律方面

开展现有废弃矿山和抽水蓄能电站相关法律法规以及国家和地区专项规划研究,围绕建造、运行和维护地下抽水蓄能电站涉及的相关工程领域,根据各领域现行法律法规及专项规划分析潜在的

法学约束,研判废弃矿山地下抽水蓄能电站的法理合规性,探讨当前法规框架下的工程审批流程,为废弃矿山地下抽水蓄能电站工程的正常施工、运行以及维护提供法理依据与支持。

4.6 环境影响方面

地下抽水蓄能电站的建设运营过程不可避免会对当地生态环境造成影响。因此,在规划设计之初,就应根据废弃矿山实际状况及拟实施的工程活动开展详细的环境影响评估,重点分析工程活动对水资源、水环境以及水生态可能造成的潜在影响,评估抽排水过程中水岩作用对矿井中有害物质的活化效应等。另外,地表输电线路布设以及变电设施建造对地表生态景观的潜在影响也要考虑在内,特别是电站建造在城市周边的情况,应在开展环境影响评估的基础上提出相应环境保护对策措施。

4.7 经济性方面

通过对废弃矿山抽水蓄能电站建造过程分析,确定影响建造成本的主要因素。开展不同工程条件、不同蓄能容量条件下地下抽水蓄能电站的成本效益模拟研究,分析成本优化潜力。联合其他学科科研人员,统筹分析地下蓄水空间布局、机械构置、电力系统规划、能源市场行情等多方面因素,提出降低废弃矿山地下抽水蓄能电站建设成本方案。

5 中国废弃矿山地下抽水蓄能电站应用前景

与德国相比,中国拥有辽阔的国土面积和优良的资源环境禀赋,太阳能、风能资源丰富且分布广泛,全国绝大多数地区均属于适宜太阳能利用区,每个省级行政区都拥有较为丰富的可开发风能资源。经过几十年快速发展,风电已成为中国第三大电源,光伏电池及相关产业的发展规模已经处于世界领先地位^[32]。同时,全国数量众多且分布广泛的废弃矿山遗留下来的巨大地下空间为可再生能源存储奠定了良好的基础条件,中国具有比德国更为广阔的废弃矿山地下抽水蓄能电站应用前景。因此,中国应充分借鉴德国废弃矿山地下抽水蓄能电站试点研究实例,统筹岩石力学、采矿学、矿山测量

学、机械制造学、电力系统学、经济学、生态学以及法学在内的交叉学科理论体系,开展废弃矿山地下抽水蓄能电站试点示范研究。同时也应注意到,中国与德国自然环境本底条件以及社会经济发展水平差异决定了两国废弃矿山再利用存在不同的特点。相比于德国,中国废弃矿山具有矿山地质环境复杂、历史遗留问题众多、治理修复力度不足以及生态环境影响严重等突出特征。因此,中国废弃矿山再利用过程应首先要着重解决废弃矿山生态环境问题,在对矿山开展生态修复治理、消除安全隐患以及生态环境影响的基础上,基于不同区域不同类型废弃矿山的工程地质属性和地下空间分布特征,开展地下空间勘查与地下抽水蓄能电站建造关键技术研究,分析地质条件对于地下抽水蓄能电站适建性的影响规律,从技术角度和经济角度开展多交叉学科的废弃矿山地下抽水蓄能电站规划设计研究,提出规划设计构想,形成一套有实践指导意义、切实可行的废弃矿山可再生能源存储技术方法体系与工程设计实施方案,实现中国废弃矿山地下空间资源化综合利用,促进资源枯竭型城市社会经济转型和持续发展。

6 结论

德国废弃金属矿山和煤矿山地下抽水蓄能电站可行性研究表明:利用废弃矿山地下空间建造抽水蓄能电站一方面克服了以风能、太阳能为主的可再生能源间歇性、波动性等不稳定特征,实现了可再生能源的高效存储;另一方面避免了建造地上蓄水设施导致的土地占用和景观环境破坏问题,是破解可再生能源存储难题、促进能源转型战略顺利实施的有效手段。中国矿产资源丰富,数量众多的废弃矿山遗留下大量地下空间,同时,可再生能源开发利用潜力也十分巨大。相比于德国,中国具有更为广阔的废弃矿山地下抽水蓄能电站应用前景。充分借鉴德国废弃矿山地下抽水蓄能电站研究经验,提炼中国废弃矿山地下抽水蓄能电站规划建设技术要点,并基于中国废弃矿山特征,开展多学科交叉的废弃矿山抽水蓄能电站适建性分析,对于中

国废弃矿山生态修复与综合利用、节能减排、促进资源型城市转型和可持续发展具有十分重要的现实意义。

参考文献(References)

- [1] Fessenden R A. System of storing power: US, US1247520 [P]. 1917-11-20.
- [2] Boust M. Europa beschleunigt den Pumpspeicher-Ausbau [J]. Wasserwirtschaft, 2012, 102(3): 42-44.
- [3] Willett D C. Underground pumped storage research priorities. Technical planning study[M]. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1976.
- [4] Electric Power Research Institute. An assessment of energy storage systems suitable for use by electric utilities [M]. Newark: Public Service Electric and Gas Company Newark, 1976.
- [5] Walia M, McCreath D R. Siting potential for compressed air and underground pumped hydro energy storage facilities the United States[M]. Oxford: Pergamon Press, 1976.
- [6] Harza Engineering Company. Underground pumped hydro storage facilities and compressed air energy storage. An analysis of regional markets and development potential[R]. Chicago: Harza Engineering Company, 1977.
- [7] Chas T M. Underground hydroelectric pumped storage: An evaluation of the concept[M]. Boston: Main, 1978.
- [8] Tam S W, Blomquist C A, Kartsounes G T. Underground pumped hydro storage—An overview[J]. Energy Sources, 1979(4): 329-351.
- [9] Chang G C, Thompson P A, Allen R D, et al. Pumped storage hydroelectric plants with underground lower reservoirs[A]. Proceedings of the International Symposium (Rockstore 80), Oxford: Pergamon Press, 1980: 579-585.
- [10] Federal Ministry of Economics and Technology. Energy Concept[R]. Berlin: Federal Ministry of Economics and Technology, 2010.
- [11] Federal Ministry of Economics and Technology. Die energie der Zukunft: Erster fortschrittsbericht zur energiewende[R]. Berlin: Federal Ministry of Economics and Technology, 2014.
- [12] Busch W, Kaiser F. Unkonventionelle pumpspeicher: Schlüsseltechnologie der zukünftigen energielandschaft [M]. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2013.
- [13] Beck H P, Schmidt M. Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke[M]. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2011.
- [14] Niemann A. Sachstand zur machbarkeitsstudie einer nachfolgenutzung der anlagen des steinkohlebergbaus im ruhrgebiet als pumpspeicherwerke[EB/OL]. (2014-01-28) [2020-05-13]. http://www.upsw.de/files/artikel-bilder/Dokumente_und_Screenshots_28.01.2014/20140128_SA-NAA-Niemann.pdf.
- [15] 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.
- [16] 廖夏伟, 计军平, 马晓明. 2020年中国发电行业碳减排目标规划相符性分析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(3): 553-559.
- [17] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1-7.
- [18] 姜伟. 中国可再生能源技术的发展(1949—2019)[J]. 科技导报, 2019, 37(18): 155-161.
- [19] 卢璟莉, 常江, 杨洋. 淮北市采煤塌陷地利用现状分析[J]. 煤炭工程, 2015, 47(4): 118-120.
- [20] 王海, 赵华甫, 吴克宁. 门头沟产业转型背景下采煤塌陷土地开发利用模式和战略[J]. 现代城市研究, 2014(3): 10-15.
- [21] 张伟, 张文新, 蔡安宁, 等. 煤炭城市采煤塌陷地整治与城市发展的关系——以唐山市为例[J]. 中国土地科学, 2013, 27(12): 73-79.
- [22] 陈新生, 岳庆如, 王巧妮, 等. 我国采煤塌陷地复垦模式研究[J]. 林业科技开发, 2013, 27(3): 5-9.
- [23] 刘飞, 陆林. 采煤塌陷区的生态恢复研究进展[J]. 自然资源学报, 2009, 24(4): 612-620.
- [24] 周士园, 常江, 罗萍嘉, 等. 资源型城市转型中的规划引导研究: 以徐州市为例[J]. 中国矿业, 2016, 25(11): 88-92.
- [25] 彭玉玲, 林爱文, 王珂, 等. 资源枯竭型城市的工矿废弃地复垦利用综合效益评价——以黄石市七约山矿区为例[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(3): 161-166.
- [26] 唐泽政. 淮北: 工矿废弃地变废为宝[J]. 中国土地, 2015(4): 54-55.
- [27] 刘向敏, 岳永兵. 工矿废弃地复垦利用机制优化分析与思考[J]. 中国矿业, 2014, 23(4): 62-64, 78.
- [28] 吴迪, 赵华, 李钢. 江苏省徐州市工矿废弃地复垦潜力评价研究[J]. 中国煤炭, 2013, 39(8): 119-123, 129.
- [29] 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.

- [30] 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.
- [31] 罗魁, 石文辉, 曹飞, 等. 利用废弃矿洞建设抽水蓄能电站初探[J]. 中国能源, 2018, 40(10): 42-47.
- [32] 李耀华, 孔力. 发展太阳能和风能发电技术加速推进我国能源转型[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 426-433.

Technical key points and feasibility analysis of underground pumped storage power station in built abandoned mines in China

XI Furui¹, ZHANG Jinde¹, WANG Yanyu², YAN Ruiwen^{3*}

1. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China

2. Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100098, China

3. College of Geoscience and Surveying, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China

Abstract In order to cope with the global climate change and the resource and environmental crisis, the energy structure in China should be adjusted and optimized, to gradually increase the proportion of the renewable energy development and utilization, and to solve the bottleneck problem of the renewable energy storage. In China, there are a large number of abandoned mines, which provide a large underground space to construct underground pumped storage power stations for the renewable energy storage. Based on two examples in Germany, this paper reviews related issues from the viewpoints of the rock mechanics, the mining planning, the mechanical settings, the energy system planning, the legal, environmental impacts, the economic applicability, the evaluation principles and other technical key points. The basic directions and the main contents of the related researches are discussed.

Keywords storage of renewable energy; abandoned mines; underground pumped storage power station ●



(责任编辑 傅雪)