



针对废弃矿井的可再生能源综合开发利用

■ 李宝山¹ 肖明松^{1*} 周志学² 徐玉杰² 王婷婷³ 赵栋利⁴ 朱家玲⁵

(1. 中国可再生能源学会; 2. 中国科学院工程热物理研究所; 3. 中国水电顾问集团北京勘测设计研究院; 4. 北京科诺伟业科技股份有限公司; 5. 天津大学)

0 引言

我国是世界采矿大国之一, 各类大中小型矿山企业达 8 万余个。2016 年 2 月, 国务院发布的《关于煤炭行业化解过剩产能 实现脱困发展的意见》中指出, 在近年淘汰落后产能的基础上, 用 3~5 年时间, 再退出煤炭产能 5 亿 t 左右, 减量重组 5 亿 t 左右。据相关专家预测, 到 2020 年, 我国废弃矿井数量将达到 1.2 万个, 按每个矿井地下空间资源 60 万 m³ 计算, 相当于 1 座拥有千万人口的大城市的空间。针对废弃矿井的合理利用已经迫在眉睫。实现关停矿井成功转型升级, 不仅仅是当前煤炭革命中的一个重要的经济问题, 更是一个重要的科学问题。

本文主要针对废弃矿井的可再生能源综合开发利用, 重点提出了废弃矿井开发利用应遵循的基本原则, 以及开发利用时可采用的关键技术与工程建设中的相关问题, 并提出利用废弃矿井实现可再生能源转型升级的解决思路。

1 废弃矿井利用原则

废弃矿井不仅遗留了巨大的地下空间资源, 还伴随着广阔的土地资源。为了更好地发挥这些

资源的作用, 必须根据资源的类型、特点及地理环境等因素, 对废弃矿井进行合理的开发利用, 使资源得到最大化的利用。同时, 在有效保护工业遗产的前提下, 将工业遗产保护与老工业区的更新改造有机结合, 确保经济、文化、环境等方面的共同协调发展, 在社会发展中发挥更大的经济效益和社会效益。根据可再生能源赋存特点和废弃矿井的地理环境特性, 全面推进“废弃矿井沉陷土地光伏+生态治理”“废弃矿井沉陷土地光伏+农业种植”“废弃矿井沉陷土地光伏+温室大棚”“废弃矿井沉陷区光伏+水产养殖”等开发利用模式。为实现废弃矿井的合理利用这一目标, 可再生能源与废弃矿井资源的有机结合是根本保证, 所以, 在推广应用过程中应遵循规划先行、生态优先、立体式开发利用、可持续发展 and 经济可行的原则。

1) 规划先行。废弃矿井的地面、地下资源应整体规划、统筹发展、一体化开发, 实现立体式、科学合理的开发利用。

2) 生态优先。废弃矿井转型升级以构建自循环生态恢复为优先选择。生态恢复是废弃矿井的地下空间和土地资源利用的核心组成部分, 废弃

收稿日期: 2019-01-22

通信作者: 肖明松 (1954—), 男, 本科、高级工程师, 主要从事可再生能源技术推广应用方面的研究。mingsongxiao@163.com



矿井的产业规划、工程建设和运行维护管理都应在完善生态功能的前提下进行。废弃矿井地下空间和土地资源转型升级与利用的可持续发展要以生态恢复为基础,自循环生态恢复是废弃矿井开发利用应遵循的原则之一。

3) 立体式开发利用。废弃矿井往往拥有复杂的、分层的地下空间连通网络,而且不同的矿井具有各自独特的结构。废弃矿井在升级转型过程中,开发利用区域是全方位式的立体空间。比如,光伏发电系统的推广应用必须将废弃矿井地下空间纵向和横向的开发利用紧密结合起来,集成地下交通体系,地下供水系统,地下能源供应体系,地下排水及污水处理系统,地下生活垃圾的清除、处理和回收利用系统,以及地下综合管线廊道的建设,从而保证废弃矿井转型升级的综合化、系统化、高效化、空间化应用。

4) 可持续发展。废弃矿井地下空间是一种不可逆的自然资源,开发利用一定要慎重,既要服务当下,更要有长期效益。废弃矿井的利用必须考虑可持续性,规划建设要贯彻全链条、全领域、全寿命周期。比如光伏,其最大优势在于能够提供清洁、可持续的能源供应,符合国家产业政策,有较好的发展前景,并且其在我国的发展现状也已经证实了这一点。

5) 经济可行。对废弃矿井进行科学的转型升级和合理的开发利用,既可避免煤矿采空区被充填,造成极大的空间浪费,又可解决废弃矿井带来的一系列社会、经济问题。将光伏与废弃矿井的治理相结合,在确保国家能源安全的同时,还可为我国煤矿产业转型、社会稳定、生态文明建设和科技创新做出贡献。但由于废弃矿井的资源特点各不相同,所以规划设计时的财务指标也应作为重点考核指标,以确保项目建成后能够可持续的运行。

2 废弃矿井可再生能源开发利用新技术

2.1 光伏

废弃矿区及露天废弃矿井可选择“光伏+农

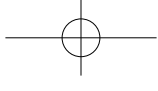
业”模式。采用此类模式的工程以“上光下牧”和“上光下农”的立体化技术方案为主,研究光伏与养殖、光伏与农作物相互影响的规律,探索互利共赢的合作发展模式。

“上光下牧”是指在光伏组件下大面积种植苜蓿等植物,以放养牛、羊、马等牲畜为主。为避免限制动物活动,该类项目的光伏支架要比普通光伏电站的高1~2 m。光伏组件的遮阴效果可减少土壤的水分蒸发,有助于植物生长。

“上光下农”是光伏农业一体化的现代化种植方案,其综合考虑了农作物对光照的需求,优化设计了光伏发电系统的安装形式。光伏支架采用可调式双轴跟踪系统,实现了一年四季倾角的智能调节,既可增加发电量,还可以为农作物生长提供合适的光照。该类项目的支架距离地面的高度约为4 m,将阴影对农作物的遮挡降到最低,同时不影响农业的大规模现代化机械生产。

光伏农业大棚作为“上光下农”方案的一种表现形式,是指在大棚的部分或全部向阳面上铺设光伏组件,既能够发电,又能为农作物提供适宜的生长环境,以此创造更好的经济效益和社会效益。光伏农业大棚内可种植反季的蔬菜、水果等,光伏组件主要安装在大棚的南面区域,北面采用透光性好的玻璃,从而保证蔬菜、水果等农作物的光照需求。采用光伏农业大棚方式时,需要统筹考虑透光性、保温散热性、耐久性和光伏发电性能等因素。对于不同的光伏农业大棚形式,棚内的汇流电缆敷设方式、路径、汇流箱安装位置等均会不同。此外,对于逆变器的容量选择,容量大的可考虑采用集中式逆变器,容量小的可采用组串式逆变器,且应与光伏发电系统安装容量相匹配。

从现有废弃矿井的光伏利用状况来看,“光伏+农业”的应用模式可以根据矿区当地的具体情况,开展农光、林光、渔光、牧光等多种模式的应用。对于土地资源较好且较为平坦的矿区,



可以建设光伏农业大棚；而对于沉降严重、地势低洼的废弃矿井，由于填埋成本太高，则可以考虑储水，采用漂浮式安装方式建设水上光伏电站。

2.2 压缩空气储能

压缩空气储能是针对废弃矿井地下空间综合利用的一种方式。

2.2.1 压缩空气储能的储存空间的基本条件与要求

可进行压缩空气储能的废弃矿井的地下空间主要有 2 类：一类是矿井的开拓巷道和准备巷道，另一类是采场老空区。

建设废弃矿井压缩空气储能系统对地层的厚度、渗透率、孔隙度、不均质性等均有特定要求，一般来说，其应该具有较高的结构强度、大体积和低渗透率。地层的渗透率应不大于 $0.12 \sim 0.13 \mu\text{m}^2$ ，孔隙度应不低于 10%，可接受的空气泄漏率为每日 4% 以内。

由于废弃矿井压缩空气储能系统需要承压，这有可能引起采场覆岩裂隙带的“气压致裂”。因此，应首先确定采场覆岩裂隙带最大标高处的埋深，然后根据该处地应力场的大小，求出极限存储压力，最后再按一定的安全系数确定最大储气压力。

2.2.2 新型压缩空气储能系统

近年来，为解决传统压缩空气储能技术的瓶颈问题，国内外学者开展了新型压缩空气储能技术的研发工作，包括蓄热式压缩空气储能（或称为“绝热压缩空气储能”，不使用燃料）、液态空气储能、超临界压缩空气储能等。

3 抽水蓄能

抽水蓄能是将废弃矿井地下空间和地上水塘相结合的一种利用方式，是目前解决弃光弃风问题，实现储能最可靠、最经济、寿命最长、容量最大的有效方式。通过利用煤炭开采过程中形成的巨大的高落差地下空间，使发展抽水蓄能发电成为可能。

抽水蓄能系统由上水库、下水库、水泵、水

轮机、风力发电机（光伏组件）、电动机、发电机等构成。其原理为：利用风电场或光伏电站发出的电力驱动水泵将水从位置低的水库（下水库）抽到位置高的水库（上水库），将不稳定的电能转换为重力势能储存；然后，根据电网的调度计划安排上水库规律性放水，水借助地势差冲向下水库，推动水轮机转动，实现机组并网发电。这一过程将不稳定的可再生能源电力转变成了可控可调的友好电力。

3.1 抽水蓄能的利用模式

1) 纯抽水蓄能电站。该类电站是指发电量绝大部分来自抽水蓄存的水能。用于发电的水量基本上等于抽水蓄存的水量，重复循环使用；仅需少量天然径流来补充蒸发和渗漏损失，补充水量既可来自上水库的天然径流，也可来自下水库的天然径流。纯抽水蓄能电站要求有足够的库容来蓄存发电水量，上、下水库形式多样，在山区、江河梯级、湖泊，甚至地下均可修建，构成了不同类型的抽水蓄能电站格局。我国所建的抽水蓄能电站大多数属于纯抽水蓄能电站，其约占我国总蓄能装机规模的 95%。

2) 混合式抽水蓄能电站。该类电站既设有抽水蓄能机组，也设有常规水轮发电机组。上水库有天然径流来源，既可利用天然径流发电，也可从下水库抽水蓄能发电。该类电站的上水库一般建于河流上，下水库根据抽水蓄能需要的容积觅址另建。

3) 调水式抽水蓄能电站。该类电站的上水库一般建于分水岭高程较高的地方。利用方式为：在分水岭某一侧拦截河流建下水库；并设水泵站抽水到上水库；在分水岭另一侧的河流设常规水电站从上水库引水发电，尾水流入水面高程最低的河流。

3.2 抽水蓄能电站的主要功能和作用

抽水蓄能电站不仅能产生调峰填谷的静态效益，而且由于其启动迅速、运行灵活，特别适宜在电力系统中承担调频、调相、负荷调整、负荷



备用和事故备用等“动态”任务，满足系统运行上的需要，其由此而产生的经济效益统称为动态效益。总之，抽水蓄能具有节能、环保、经济等多重效益。

4 废弃矿井可再生能源开发利用的可行性

我国的能源供应体系正在由高环境成本的煤炭向低碳、环境友好的可再生能源转型。当前，我国政府已出台了一系列政策措施，全面推进能源系统向可持续和低碳的方向转变。可再生能源的发展与国家的能源转型紧密结合，其技术创新可有效推动煤炭利用的减少。政策措施是可再生能源创新发展及高效实施的关键，实现能源系统的平稳转型，摆脱长期以来以煤炭为主的束缚，可持续的政策措施和执行力度是可再生能源技术创新发展及其与能源系统整体融合的重要保障。

随着国家“去产能”政策的稳步实施，大批煤矿将被淘汰，成为废弃矿井，我们必须积极应对由此带来的生态环境方面的影响。我国废弃矿井资源化利用，要采取智能、精准开发的方法，科学合理、讲求实效。比如，地下空间抽水蓄能和储能发电站的开发、农光互补模式的开发，以及水资源智能精准开发、非常规天然气开发、生态修复开发和工业旅游开发等。

废弃矿井的可再生能源应用，可以将目前已经非常成熟的可再生能源技术与废弃矿井资源开

发有机结合起来，比如，地上部分采用农业与光伏或光热结合，地下坑道部分可采用抽水蓄能和压缩空气储能技术等。同时，利用废弃矿井的资源特点，发挥可再生能源装备可大可小的灵活性，通过先进的技术手段，最终实现资源的有效和最大化利用。

废弃矿井作为可再生能源技术的典型应用场所，光伏发电作为利用方式之一已经有了较为广泛的应用，并取得了较好的成效，起到了引领和示范的作用，可以加大加快推广力度，实现从点到面的成效。抽水蓄能和空气储能技术在国外已经有成功的案例，但在国内还处于实验和中试阶段，所以对这部分技术需加大研发投入，以期在最短的时间内突破关键制约因素，实现对废弃矿井地下坑道部分的利用。

5 结语

随着煤炭使用减量化的推进，我国废弃矿井资源的数量会逐年增加，如何将这些资源科学有效、充分合理地开发利用，如何实现废弃资源再利用已经成为摆在人们面前的现实问题。其中，废弃矿井的地面资源及地下空间都为可再生能源的开发和利用提供了良好条件。然而，从目前情况来看，本文提到的开发思路的盈利能力和工程经验尚不足，需国家出台一系列政策措施予以支持，启动科技计划进行探索。**太阳能**

(接第12页)

承担消纳责任的市场主体完成消纳量情况的考核，由所在省级能源主管部门会同经济运行管理部门负责，并负责督促未履行消纳责任的电力市场主体限期整改，对逃避消纳社会责任且在规定时间内不按要求进行整改的市场主体，依规列入不良信用记录，纳入失信联合惩戒。

第二个层次为对省级行政区域的消纳责任权重完成情况，以及国家电网、南方电网对所属省级电网企业消纳责任权重组织实施和管理工作，

由国务院能源主管部门进行监测评价；各省级能源主管部门会同经济运行管理部门对省属地方电网企业、配售电公司，以及未与公用电网联网的拥有自备电厂企业的消纳责任实施进行督导考核。对省级行政区域消纳责任权重完成情况主要通过公布监测评价信息的方式提醒省级行政区域改进相关工作，并将有关监测评价信息作为对其能耗“双控”考核的依据。**太阳能**