



“双碳”目标下赋煤区新能源开发

王双明 刘浪 赵玉娇 张波 王晶钰 朱梦博 王美 张小艳

引用本文：

王双明, 刘浪, 赵玉娇, 等. “双碳”目标下赋煤区新能源开发[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 59–79.

WANG Shuangming, LIU Lang, ZHAO Yujiao. New energy exploitation in coal-endowed areas under the target of “double carbon”: a new path for transformation and upgrading of coal mines in the future[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 59–79.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2169>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双碳目标下煤层发育区CO₂地质封存研究与评价

Carbon dioxide geological storage system in coal seam development area under the premise of double carbon target

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 206–214 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0538>

“中等收入”与新“双控”背景下煤炭行业转型发展新机遇

New opportunities for coal industry transformation and development under the background of the level of a moderately developed country and a new “dual control” system

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 45–58 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2196>

煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径

Development achievements of China’s coal industry during the 13 th Five-Year Plan period and future prospects

煤炭科学技术. 2021, 49(9): 1–8 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7a9864f5-c3e4-43bc-8aa7-b3878cc896f0>

国外废弃矿井可再生能源开发利用现状及展望

Status and prospect on development and utilization of renewable energy in abandoned mines abroad

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/dc07faac-2453-4b8c-b9b1-a66dc425462a>

矿用自卸车新能源技术研究现状与展望

Research of energy-efficient mining truck: current status and perspectives

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 343–350 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0999>

双碳战略中煤气共采技术发展路径的思考

Thoughts on the development path of coal and gas co-mining technology in dual carbon strategy

煤炭科学技术. 2024, 52(1): 138–153 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1689>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王双明, 刘浪, 赵玉娇, 等. “双碳”目标下赋煤区新能源开发——未来煤矿转型升级新路径[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 59–79.

WANG Shuangming, LIU Lang, ZHAO Yujiao, et al. New energy exploitation in coal-endowed areas under the target of “double carbon”: a new path for transformation and upgrading of coal mines in the future[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 59–79.

“双碳”目标下赋煤区新能源开发 ——未来煤矿转型升级新路径

王双明^{1,2}, 刘浪^{1,3}, 赵玉娇^{1,3}, 张波^{1,3}, 王晶钰^{1,3}, 朱梦博^{1,3}, 王美^{1,3}, 张小艳^{1,3}

(1. 西安科技大学 煤炭绿色开采地质研究院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室, 陕西 西安 710054;

3. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: “双碳”目标下我国能源结构正加速转型升级, 以太阳能、风能、地热能等为代表的新能源正逐步替代传统煤、油、气等化石能源。推动煤炭和新能源优化组合是实现“双碳”目标提出的新要求, 也是未来煤矿绿色低碳转型的重要路径。分析我国赋煤区能源分布特点, 发现以煤为主的化石能源分布区域, 往往也是太阳能、风能、热能等新能源富集区, 适宜于在赋煤区大规模开发新能源。研究结果如下: ①提出了赋煤区全生命周期能源发展理念, 将赋煤区能源发展历程划分为煤炭、煤炭与新能源优化组合、新能源3个阶段, 并搭建了赋煤区新能源开发总体框架; ②在太阳能开发方面, 基于赋煤区与太阳能资源富集区的重叠关系对赋煤区太阳能理论储量与开发潜力进行评估, 提出了分布式/集中式光伏发电、太阳能热利用和太阳能制氢等光化利用耦合的太阳能分级综合利用方案, 实现太阳能多元高效转化与利用以及与煤炭资源的协同开采; ③在地热能开发方面, 基于赋煤区与地热能资源富集区的重叠关系对赋煤区地热能开发潜力进行评估, 结合矿井地热形成机理、分布规律和矿井采掘情况, 构建深部矿产资源与地热资源协同开发系统, 形成包含矿井热水型、岩温型、混合型的矿井地热能分级开采与热用户梯级利用的综合应用方案, 实现矿井地热化“害”为“利”的战略转移; ④在风能开发方面, 基于赋煤区与风能资源富集区的重叠关系对赋煤区风能开发潜力进行评估, 提出赋煤区风力发电、风力提水、风力致热技术的应用途径, 构建了井上井下设施电力供应、水循环动力、供暖自足以及并网发电的风能利用框架; ⑤考虑到目前煤炭地下开采普遍以垮落法管理顶板, 垮落空间无法有效用于地下储能, 提出“储能库超前规划→功能性储能库构筑→储释能运行管控”的矿井采空区储能技术路径; ⑥针对赋煤区多能互补综合能源系统(MCIES)复杂多变特征, 建立了赋煤区能源生产、供给单元的异质能量流耦合模型, 统一了MCIES内部不同能源集线器的数学表达式, 提出了赋煤区MCIES能源管理与优化逻辑方法以及运营模式。旨在探讨煤炭和新能源的组合路径, 论证赋煤区规模化开发新能源可行性, 赋予赋煤区全生命周期能源供给的功能, 形成集“矿—风—光—热—储”一体化的煤炭企业能源产业发展新模式。

关键词: “双碳”目标; 全生命周期; 新能源开发; 采空区储能; 多能源互补

中图分类号: TD82 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2023)01-0059-21

New energy exploitation in coal-endowed areas under the target of “double carbon”: a new path for transformation and upgrading of coal mines in the future

WANG Shuangming^{1,2}, LIU Lang^{1,3}, ZHAO Yujiao^{1,3}, ZHANG Bo^{1,3}, WANG Jingyu^{1,3}, ZHU Mengbo^{1,3},
WANG Mei^{1,3}, ZHANG Xiaoyan^{1,3}

收稿日期: 2022-12-12

责任编辑: 周子博

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-2169

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52222404, 52074212); 陕西省自然科学基金陕煤联合基金重点资助项目(2019JL-01)

作者简介: 王双明(1955—), 男, 陕西岐山人, 中国工程院院士。Tel: 029-85587131, E-mail: sxmtwsm@163.com

(1. Geological Research Institute for Coal Green Mining, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological Support for Coal Green Exploitation Xi'an 710054, China; 3. College of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Under the “dual carbon” goal, China’s energy structure is accelerating transformation and upgrading, and new energy represented by solar energy, wind energy, geothermal energy is gradually replacing traditional coal, oil, gas and other fossil energy. Promoting the optimal combination of coal and new energy is a new requirement for achieving the “double carbon” goal, and also an important path for the green and low-carbon transformation of coal mines in the future. Based on the analysis of the energy distribution characteristics of coal-endowed areas in China, it is found that the fossil energy distribution areas dominated by coal are often also areas rich in solar energy, wind energy, thermal energy and other new energy, which are suitable for large-scale development of new energy in coal-endowed areas. The research results are as follows: ① Put forward the concept of full life cycle energy development in coal-endowed areas, divide the energy development process in coal-endowed areas into three stages: coal, coal and new energy optimization combination, and new energy, and build a general framework for new energy development in coal-endowed areas; ② In terms of solar energy development, the theoretical reserves and development potential of solar energy in the mining area are evaluated based on the overlapping relationship between the coal occurrence and the solar energy resource rich area, and a hierarchical comprehensive utilization scheme of solar energy coupled with photochemical utilization, such as distributed/centralized photovoltaic power generation, solar thermal utilization and solar hydrogen production, is proposed to achieve diversified and efficient conversion and utilization of solar energy and collaborative mining with coal resources; ③ In terms of geothermal energy development, the potential of geothermal energy development in coal-endowed areas is evaluated based on the overlapping relationship between the coal bearing area and the geothermal energy resource rich area. In combination with the formation mechanism, distribution law and mining situation of the mine geothermal, a collaborative development system of deep mineral resources and geothermal resources is established to form a comprehensive application scheme for the graded mining of mine geothermal energy and the cascade utilization of thermal users, including the hot water type, rock temperature type and mixed type of the mine, realizing the strategic transfer of “harm” to “benefit” of mine geothermal; ④ In terms of wind energy development, the potential of wind energy development in the mining area is evaluated based on the overlapping relationship between the coal occurrence and the wind energy resource rich area, and the application approaches of wind power generation, wind water lifting, and wind heating technologies in the coal bearing area are proposed, and the wind energy utilization framework for power supply, water cycle power, heating self-sufficiency, and grid connected power generation of underground and underground facilities is constructed; ⑤ Considering that the roof is generally managed by the caving method in the current underground coal mining, and the caving space cannot be effectively used for underground energy storage, a technical path of energy storage in the goaf of the mine is proposed, which is “advanced planning of energy storage reservoir → construction of energy storage reservoir using functional backfilling → Energy storage and release operation control”; ⑥ In view of the complex and changeable characteristics of multi energy complementary integrated energy system (MCIES) in coal-endowed areas, a heterogeneous energy flow coupling model of energy production and supply units in coal-endowed areas is established, the mathematical expressions of different energy hubs in MCIES are unified, and the energy management and optimization logic method and operation mode of MCIES in coal-endowed areas are proposed. This paper aims to explore the combination path of coal and new energy, demonstrate the feasibility of large-scale development of new energy in coal-endowed areas, endow coal bearing areas with the function of energy supply in the whole life cycle, and form a new mode of energy industry development of coal enterprises integrating “mine-wind-light-heat-storage”.

Key words: “double carbon” target; full-life-cycle; new energy development; energy storage in goaf; multi-energy complementation

0 引言

随着气候变暖问题日益严重,全球高温干旱、暴雨洪灾等极端气候事件出现的频率与强度持续增加,严重威胁人类经济社会发展和地球生命系统安全。现阶段全球超过137个国家制定了碳中和目标^[1],覆盖了全球88%的温室气体排放、90%的世界经济体量和85%的世界人口,“碳达峰、碳中和”已成为世界各国的共识性选择。我国自2006年以来碳排放一直位于世界第一位,2021年CO₂排放量约100亿t,

其中80%源于煤炭的消费使用^[2]。与此同时,2021年煤炭在我国一次能源消费占比中高达56%。习近平总书记在二十大报告中指出:积极稳妥推进碳达峰碳中和。实现“双碳”目标,从煤炭主体能源向新能源转型已是大势所趋。2021年12月8日至10日召开的中央经济工作会议明确提出:要立足以煤为主的基本国情,抓好煤炭清洁高效利用,增加新能源消纳能力,推动煤炭和新能源优化组合。这为我国煤炭产业长期健康发展指明了方向。

发展太阳能、风能、水能、地热能等绿色低碳新

能源是实现煤炭能源有序减量替代的基本路径。统计数据显示,2021年我国非化石能源消费的比重由2005年的7.4%提高到16.6%,煤炭占能源消费总量的比重由2005年的72.4%下降到57.7%,碳排放强度较2005年下降48.4%^[3]。由此可见,发展绿色低碳新能源对降低碳排放量具有决定性作用。我国风能、太阳能、地热能资源丰富,且广泛分布在我国产煤大省(自治区),包括内蒙古、陕西、宁夏、山西、新疆等。上述省市自治区可再生能源富集区一般为沙漠、戈壁,人口稀少、地面建构筑物少,尤其适合大规模建设新能源生产基地。以陕西省榆林市为例:年平均日照时数2 600~2 900 h,年太阳总辐射量介于4 970~5 163 MJ/m²,全域属于太阳能资源丰富区,太阳能总储量为 6.13×10^{13} kWh^[4];长城沿线20 m高度处年有效风速时数在5 600 h以上、年平均风功率密度166 W/m²,50 m高度处年有效风速时数在6 100 h以上、年平均风功率密度194 W/m²,整体风能资源储量 2.75×10^7 kWh^[5]。现阶段可再生新能源大规模高效开发利用的难点包括:①新能源普遍具有波动性、周期性等特征,这使得新能源开发利用需要配备较大容量的储能系统,以提高电力系统对高比例新能源接网和消纳的适应性;②太阳能、风能等新能源能量密度较低,开发占地面积大,土地资源约束明显。

对标“双碳”目标,在确保煤炭能源在国家能源安全兜底作用的同时,有序降低煤炭能源消耗,需要构建煤炭能源与新能源互补耦合的新型能源体系。煤炭能源—新能源耦合发展优势明显:①赋煤区煤炭与新能源富集区高度重合,新能源开发可以利用赋煤区的基础设施,包括高压输电线、公路、厂房、生活设施等,大幅度降低新能源开发成本;②赋煤区范围广阔,有效解决新能源开发过程中的土地资源约束问题;③新能源开发利用可以确保赋煤区保留基本生产条件,确保能源供应紧张时,煤炭资源采得出、可转化;④煤矿地下开采形成巨大体量的采空区,如果能超前规划采煤工艺和采空区利用等事宜,则能将地下采空区改造为规模庞大的能源储备基地,以妥善应对新能源的不稳定性^[6-7]。煤炭能源与新能源互补耦合发展对煤炭行业低碳化转型升级至关重要,也有望成为碳中和科学技术体系的关键内涵。

在国家“双碳”背景下,赋煤区受煤炭资源储量与政策变化的影响,如果仅将煤炭开采作为唯一产业,必将面临闭矿的结局。据不完全统计,“十三五”期间全国累计退出煤矿5 500处左右,截至2021年

底,全国煤矿数量减少至4 500处以内^[8]。预计到2030年,我国关闭/废弃矿井达到1.5万处^[9]。面对国家“减煤化”的趋势,煤炭企业急需考虑转型升级以应对未来能源体系变革。基于以上考虑,笔者提出从赋煤区全生命周期能源发展视角探讨煤炭和新能源的组合路径,以期推动煤矿转型升级,助力我国“双碳”目标实现。

1 煤矿全生命周期能源开发理念与框架

1.1 煤矿全生命周期能源开发理念

考虑到赋煤区煤炭与新能源富集区高度重合的特点,提出煤矿全生命周期能源开发理念,即煤企产业由单一的煤炭资源开采逐步向新能源开发延伸,煤矿能源输出由不可再生的煤炭能源向可再生能源转变,使煤矿具备持续承载能源供给的能力。即使煤矿煤炭资源枯竭,煤矿仍可发挥能源供应“稳定器”“压舱石”作用。如图1所示,在全生命周期能源开发理念下,将煤矿能源发展历程划分为3个阶段:①煤炭阶段。在煤矿发展初级阶段仅将煤炭开采作为唯一要务,未引入新能源或其他能源形式前,煤炭也是这些煤矿供给的唯一能源;②煤炭与新能源优化组合阶段。考虑到煤矿本身具备发展新能源的优势,将煤炭开采与太阳能、风能、地热能、储能等有机融合,利用大量的采煤沉陷区发展太阳能、风能等,利用高温矿井开发地热能,利用大规模采空区发展储能等;③新能源阶段。煤矿受国家政策影响或资源枯竭,进入后采煤时代,关闭/废弃矿井可转变为新能源开发基地,以延续煤矿生命周期,使煤矿再现经济活力。

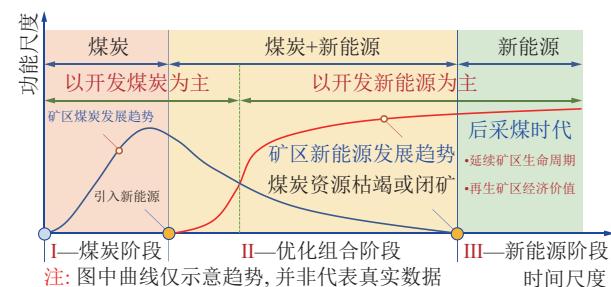


图1 典型煤矿全生命周期能源开发理念

Fig.1 Concept of full life cycle energy development in typical coal mines

关于煤炭与新能源的优化组合,可以从2个方面进行理解:①从应用端,煤炭与新能源供给侧结构优化组合,实现“双碳”战略的关键在于优化能源结构,其核心在于供需平衡,特别是对供给,像光伏、风能和用能需求(如电力负荷)进行准确预测。②从生

产端,煤炭与新能源协同开发。在全生命周期能源视角下,煤炭与新能源的优化组合为煤炭企业转型升级指明了方向。在“双碳”目标下,煤炭企业正在承受保供与“减碳”的双重压力,为了让煤炭企业在能源领域有持久的生命力,必须做到未雨绸缪。煤炭企业应当适应煤炭与新能源优化组合的新形势,发挥煤炭与新能源各自优势,将赋煤区转变为集“矿-风-光-热-储”一体化的传统能源与新能源耦合基地。

1.2 赋煤区全生命周期能源开发总体框架

以实现赋煤区风、光等可再生能源为基础的新能源综合开发利用,促进传统赋煤区升级转型为目的,融合光伏发电、光热转换、风力发电、地热开采和矿山功能性充填等技术,利用赋煤区地面和地下丰富的物理空间,构建赋煤区多能互补的新能源综合开发利用系统,总体构架如图2所示。

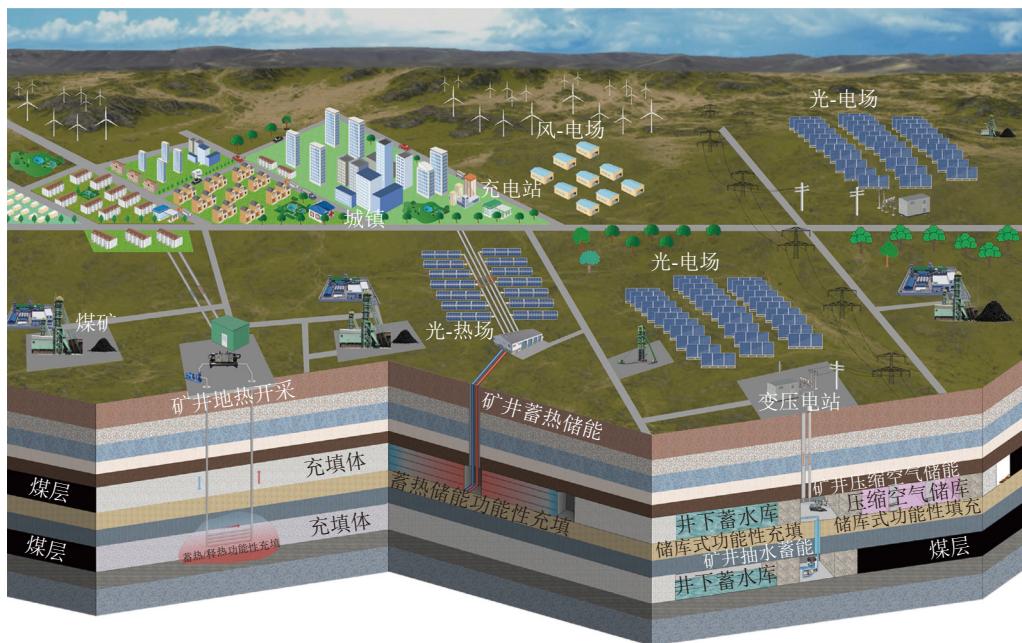


图2 煤炭与新能源协同开发框架示意

Fig.2 Schematic framework of coal and new energy collaborative development

我国主要矿产分布与太阳能、风能高度吻合,为矿山与太阳能、风能结合提供了有利的自然条件^[10-11]。借助赋煤区广阔而且平坦的工业场地铺设太阳能聚光器和太阳能光伏板,借助赋煤区周边山势架设风力发电机组,可实现赋煤区太阳能和风能的有效开发,提供高品质的清洁热能和电能。但是太阳能和风能最大的困境就是不稳定,与用户需求无法实时匹配,严重限制其利用效率。为解决这一问题,需要在矿床开采过程中,借助矿山功能性充填技术充分利用井下巨大采空区发展储能,通过削峰填谷解决此类能源的间歇性、波动性,改善用能质量。例如采用矿山储库式功能性充填方法,同步构建井下蓄水库和压缩空气储库,可实现矿井抽水蓄能和压缩空气储能,将光电和风电转换为势能形式存储。采用矿山蓄热储能功能性充填方法,协同构建井下蓄热储能库,可实现光热的跨季节存储。地热资源作为一种重要的可再生能源,随着开采深度的不断增加,其可利用价值逐渐凸显。采用蓄热/释热功能性充填

方法,构建蓄热/释热充填体换热器,借助矿井已有井巷工程和机电设施,可实现深部地热开采,节省了勘查钻探产生的大量投资。

2 赋煤区发展新能源开发潜力

2.1 赋煤区太阳能开发潜力

2.1.1 赋煤区太阳能分布特征

我国太阳能总辐射资源丰富,总体呈“高原大于平原、西部干燥区大于东部湿润区”的分布特点。按年太阳总辐照量,我国可划分为太阳能最丰富带(I级)、很丰富带(II级)、较丰富带(III级)和一般带(IV级)4个区域,其中最丰富带、很丰富带和较丰富带占我国国土面积的96%以上^[12]。西藏、新疆、青海、内蒙古、甘肃、宁夏等省份大部分都拥有很丰富的太阳辐照量。图3为我国赋煤区与太阳能总辐射资源分布图^[13],从图中可以看出大部分煤炭资源集中地都拥有较多的太阳能资源,如西北赋煤区的太阳能辐照量多为I~II级,为赋煤区发展太阳能产

业,实现生产矿井煤炭资源与可再生能源协同开采,以及废弃矿井能源升级转型,延续矿山生命周期,提供了可行性。

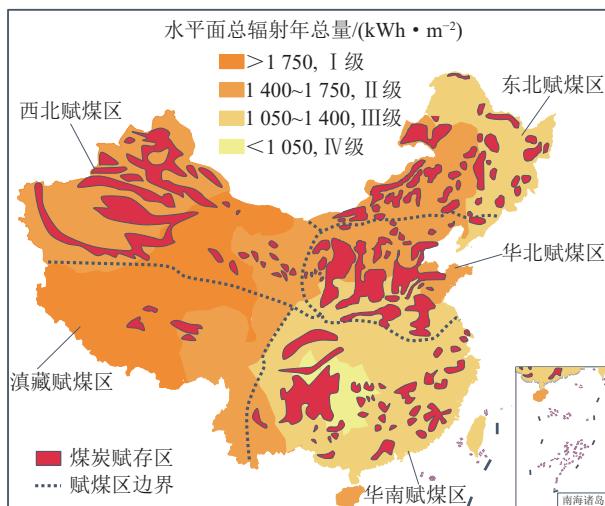


图3 我国赋煤区与太阳能总辐射资源分布

Fig.3 Distribution of coal-endowed areas and total solar radiation resources in China

2.1.2 赋煤区太阳能资源评估

按照年总辐射量进行计算,我国陆地面积每年接受的太阳辐射能相当于 4.9×10^4 亿t标准煤^[14],太阳能资源丰富。除以年总辐射量表征丰富性以外,太阳能资源开发潜力评估还需要考虑稳定性和时效性^[15-17]。根据我国各地区太阳能理论储量^[14]和光伏装机容量^[18]估算各赋煤区面积内的太阳能理论储量和光伏装机潜力,见表1。由表1可知,我国赋煤区太阳能理论储量可达 2053.67×10^{15} kJ/a,折合标准煤703.95亿t/a,可减少CO₂排放量1892.56亿t/a;赋煤区光伏装机容量为 1.55×10^{15} kJ/a,折合标准煤0.53亿t/a,可减少CO₂排放量1.43亿t/a,开发潜力巨大。内蒙古和新疆赋煤区太阳能理论储量居全国前两位,远超其他省份,赋煤区太阳能理论储量排在第3~10位的分别为山西、贵州、山西、甘肃、云南、河南、四川、青海。对于煤炭资源储量,排在前10位的省份分别为新疆、内蒙古、山西、陕西、贵州、宁夏、甘肃、河南、安徽、河北。由此可见,煤炭资源富集区与太阳能资源富集区具有很大的重叠性。图4展示了煤炭资源储量前10名的省份相应的太阳能储量,这10个省份的煤炭和太阳能资源总储量分别达到全国总储量的95.34%和82.17%,且大部分省份的煤炭资源和太阳能资源的全国占比比较接近。因此,可在赋煤区充分利用太阳能资源,实现煤与太阳能共采,将赋煤区打造成能源集中地,开启矿业转型升级新方向。

2.1.3 赋煤区太阳能利用方式

1) 太阳能发电。太阳能发电包括光伏发电和光热发电两种形式。截至2022年10月底,全国太阳能发电装机容量约3.6亿kW^[21],其中光伏装机容量超过3亿kW^[22],是太阳能发电的主要形式。对于太阳能资源丰富的煤矿,开发光伏电站对于构建传统能源与新能源耦合系统以及节能减排具有重大意义。光伏电站的应用主要包括生产矿井和废弃矿井两方面。

对于生产矿井,可以以分布式光伏发电为主,以满足赋煤区用电自供给为首要目标。通过在赋煤区或其周围空地布置光伏板发电,既减少了从电网供电的长距离运输成本,又为当地太阳能消纳提供了去路,实现了传统能源和新能源的耦合。例如宁夏梅花井6MW分布式光伏项目^[23]和新疆哈密大南湖17.7MW分布式光伏项目^[24]均实现了赋煤区用电自供给。对于废弃矿井,应以集中式光伏发电为主,为煤矿转型升级,创造二次收益提供解决方案。根据2021年6月国家发改委印发的《关于请提供利用采煤沉陷区受损土地发展光伏发电有关情况的函》^[25],利用光伏电站推动采煤沉陷区综合治理已成为重点发展对象。“光伏+采煤区沉陷区治理”是土地资源利用、赋煤区生态修复、新能源开发的有机结合,是优化当地能源产业结构,推动资源型城市转型发展的重要手段^[26],具体包括光伏+生态治理、光伏+水产养殖以及光伏+农业种植3种主要模式^[27]。根据我国采煤沉陷区面积^[1]初步估算,煤矿光伏电站理论规模可达3000GW。国内已有学者对采煤沉陷区建造光伏电站的场地稳定性^[28]、关键技术^[29]等进行了研究。

2) 太阳能热利用。除发电外,热利用是赋煤区太阳能利用的另一种主要方式。赋煤区热需求主要包括采暖、井筒防冻和生活用热等^[30]。对赋煤区供热,可采用多能协同互补的供能模式,即优先采用矿井余热供热,其次开发太阳能等新能源供热模式,在前两者不能满足供热要求的情况下,再考虑电辅热形式。这种多热源协同互补供热模式可提高能源利用效率,同时可有效减少能源多次转化过程的火用损失,对于节能减排具有重要意义。

3) 太阳能化学利用。通过化学反应,可以将能量密度低的太阳能转化为能量密度高的化学能,既可实现太阳能大规模存储,也能制备高价值化学品,是太阳能利用的重要途径,其主要包括光催化CO₂^[31]、光/电水解制氢^[32]等。2021年12月,工信部等五部门联合印发了《智能光伏产业创新发展行动

表1 我国赋煤区太阳能资源估算
Table 1 Estimation of solar energy resources in coal-endowed areas in China

省(自治区)	赋煤区面积占比 ^{[19]/%}	煤炭储量 ^[19] /亿t	水平面总辐照量年平均值 ^[20] /数 ^[17] /h(kWh·m ⁻²)		太阳能理论储量 ^[14] /(10 ¹⁴ kWh·a ⁻¹)	光伏装机潜力 ^[18] /万kW	赋煤区					
			太阳辐照量年平均值 ^[20] /数 ^[17] /h	(kWh·m ⁻²)			太阳能理论储量/(10 ¹⁵ kJ·a ⁻¹)	光伏开发潜力/(10 ¹² kJ·a ⁻¹)	理论储量折合标煤/(亿t·a ⁻¹)	理论储量折合减排CO ₂ /(亿t·a ⁻¹)		
北京	8.54	86.72	1 405.94	2 640	95.04	1 418	8.11	11.50	9.97	26.80	39.32	105.71
天津	3.33	44.52	1 402.74	2 580	58.32	710	1.94	2.20	2.39	6.42	7.51	20.20
河北	3.76	601.39	1 438.98	2 670	1 038.96	8 963	39.07	32.40	48.00	129.06	110.73	297.69
山西	21.31	3 899.18	1 426.89	2 870	829.44	7 050	176.79	155.26	217.21	583.96	530.61	1 426.55
内蒙古	8.88	12 250.43	1 581.32	2 930	6 391.80	43 791	567.38	410.02	697.08	1 874.11	1 401.30	3 767.40
辽宁	2.23	59.27	1 381.25	2 210	742.68	5 209	16.56	9.24	20.35	54.70	31.58	84.91
吉林	2.45	30.03	1 344.27	2 280	895.32	7 820	21.98	15.76	27.00	72.59	53.85	144.77
黑龙江	0.97	176.13	1 294.16	2 340	2 149.56	12 437	20.90	10.19	25.68	69.05	34.82	93.62
江苏	1.21	50.49	1 307.84	2 020	595.44	8 842	7.22	7.80	8.87	23.85	26.65	71.65
浙江	0.02	0.44	1 251.88	2 040	463.68	5 997	0.09	0.09	0.11	0.30	0.30	0.80
安徽	4.21	611.59	1 242.51	2 210	610.20	7 650	25.70	25.63	31.57	84.88	87.60	235.51
福建	1.07	25.57	1 291.07	1 990	561.96	3 667	6.02	2.81	7.39	19.88	9.61	25.85
江西	2.94	40.84	1 194.24	2 150	735.12	8 292	21.58	18.84	26.52	71.29	64.40	173.13
山东	6.08	405.13	1 379.78	2 280	789.12	15 541	47.98	77.55	58.94	158.47	265.05	712.59
河南	9.04	919.71	1 269.41	1 920	786.96	10 327	71.16	64.54	87.42	235.04	220.58	593.03
湖北	0.11	2.04	1 151.51	1 790	804.96	9 586	0.87	0.66	1.06	2.86	2.27	6.11
湖南	1.27	45.35	1 077.03	1 610	890.64	10 929	11.35	8.08	13.95	37.50	27.60	74.20
广东	0.78	9.11	1 256.01	1 690	866.52	6 005	6.75	2.85	8.29	22.30	9.73	26.15
广西	0.55	17.64	1 186.35	1 470	1 022.76	10 853	5.60	3.14	6.88	18.48	10.74	28.87
海南	0.00	0.01	1 503.04	1 870	171.36	7 883	0.01	0.02	0.01	0.02	0.08	0.21
四川	2.35	303.79	1 385.8	1 790	2 265.48	13 528	53.14	20.45	65.29	175.53	69.88	187.89
贵州	18.10	1 896.9	1 021.26	1 630	681.84	7 977	123.44	84.75	151.66	407.74	289.63	778.66
云南	3.50	437.87	1 490.81	2 340	2 078.64	16 453	72.79	48.53	89.43	240.42	165.87	445.94
西藏	0.04	8.09	1 920.11	3 050	8 498.16	32 038	3.46	1.43	4.25	11.43	4.89	13.16
陕西	11.38	2 031.1	1 321.47	2 910	936.36	9 446	106.57	112.63	130.93	352.01	384.91	1 034.84
甘肃	3.94	1 428.87	1 636.62	3 000	2 412.00	16 339	95.14	69.61	116.89	314.27	237.89	639.57
青海	1.07	380.42	1 798.11	3 190	4 917.60	25 287	52.42	30.96	64.41	173.16	105.80	284.45
宁夏	11.45	1 721.11	1 617.78	2 980	392.76	4 294	44.95	52.73	55.23	148.49	180.20	484.46
新疆	4.56	18 037.3	1 626.3	2 920	9 741.60	57 124	444.69	274.11	546.34	1 468.85	936.82	2 518.63

注:赋煤区太阳能理论储量=太阳能理论储量×赋煤区面积占比, 赋煤区光伏开发潜力=光伏装机潜力×年日照时数×赋煤区面积占比, 29 270 kJ=1 kg 标准煤, 1 t标煤产生2.688 t CO₂。

计划(2021—2025年)》^[33], 提出支持智能光伏制氢等试点示范项目建设, 加快开展制氢系统与光伏耦合技术研究。为此, 可在赋煤区光伏电站场地配套建设制氢系统, 有效消纳光伏发电并离网制氢, 在传统煤炭基地实现太阳能与氢能2种新能源的耦合开发, 为煤炭行业升级转型提供有效解决方案。

图5展示了赋煤区太阳能综合利用方案。如

图5所示, 对于生产矿井, 可以以太阳能发电与热利用为主要方式, 实现赋煤区用电/用热自供给, 减少对电网的需求; 在满足赋煤区自用的基础上, 多余电力可并网发电, 创造额外收益。随着采煤寿命缩短, 可扩建太阳能发电系统, 增建太阳能制化学品系统, 布局矿井关闭后的转型产业, 将矿井打造为集传统能源与新能源为一体的能源集中地。

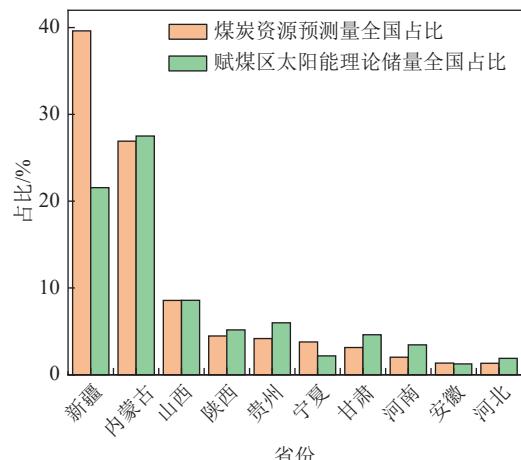


图4 煤炭储量排名前10省(自治区)相应太阳能资源储量
Fig.4 Corresponding solar energy resource reserves of top 10 provinces in terms of coal reserves

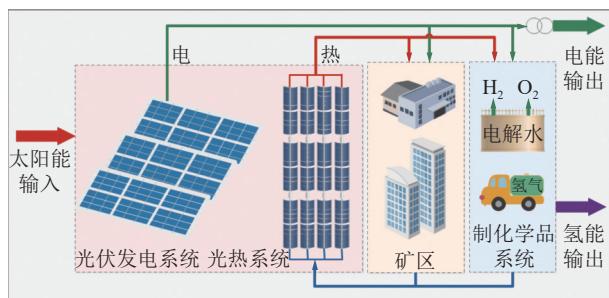


图5 赋煤区太阳能综合利用示意

Fig.5 Schematic of the comprehensive utilization system of solar energy in coal-endowed areas

2.2 赋煤区地热能开发潜力

2.2.1 赋煤区地热能分布特征

地热能源在我国未来能源结构调整中发挥着重要作用。我国地热资源可分为浅层地热能、水热型地热(地下热水)和干热岩3种类型。浅层地热能资源主要分布在我国中东部京津冀、山东、江苏、安徽、河南、陕西和东北部分地区。水热型地热资源主要分布于东南沿海、胶东、辽东半岛、藏南、滇西、川西、华北平原、江淮平原、松辽盆地等地区。干热岩主要分布在我国东南沿海、关中、东北、西南及青藏高原等地区^[34]。图6为我国地热能与煤矿资源富集区分布图,从图6中可以看出我国地热资源与煤炭资源赋存高度重合,深部地热能开发是深部矿井开采的延伸与结合,开展矿产资源-清洁能源资源的绿色协同开发与利用,对于实现深部矿山的绿色可持续发展具有重要意义。

2.2.2 赋煤区地热能资源评估

我国储存丰富着的地热资源。地热资源总量约占全球的7.9%,水热型地热资源量,每年可开采量折

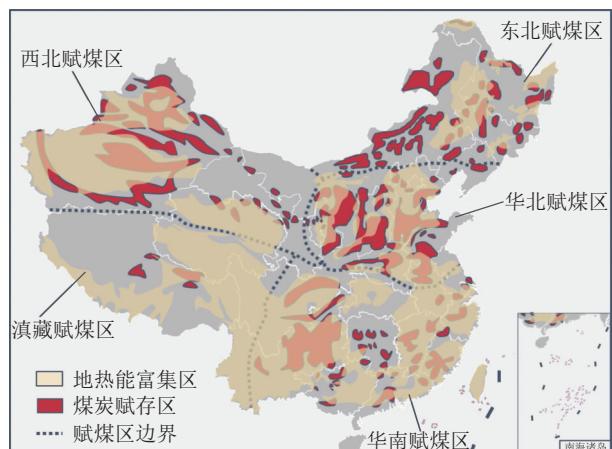


图6 全国地热能与煤矿资源富集区重叠关系

Fig.6 The overlapping relationship between geothermal energy and coal resource rich areas in China

合标准煤18.65亿t,相当于我国2020年煤炭消费量的66%;336个地级以上城市浅层地热能资源每年可开采量折合标准煤7亿t,相当于我国2020年煤炭消费量的24%;干热岩资源量折合标准煤856万亿t^[34],具有极为广阔的发展空间。地热资源评价方法主要有地表热流量法、热储法、热流量法、开采动态法等。根据中国地热资源储量数据^[35],估算我国煤矿富集区范围内地热能资源的理论储量,见表2。由表2可知,我国赋煤区地热资源储量丰富,理论地热能储量可达 778.88×10^{15} kJ,按100年估算,可折合标准煤2.66亿t/a,可减少CO₂排放量达7.15亿t/a。赋煤区地热能理论储量排在第1~10位的分别为山西、四川、山东、河北、新疆、河南、贵州、内蒙古、天津,与煤炭资源储量排在前10位的省份具有较大的重叠性。其中,山西赋煤区地热资源储量最高,可达 191.35×10^{15} kJ,折合标煤约0.65亿t/a,可减少CO₂排放1.76亿t/a。这10个省份的煤炭和地热能资源总储量分别达到全国总储量的85.3%和92.5%,且部分省份的煤炭资源和地热能资源的全国占比比较接近。因此,部分赋煤区具备开发利用地热能资源的条件,实现煤矿资源与地热资源的协同开发。

2.2.3 赋煤区地热能利用方式

矿井是实现地热开发的最佳选择,利用煤矿已有生产系统进行地热能开发,可以减少从地面至采深的钻探工作,大幅降低开发地热的成本。根据矿井地温赋存类型,可采用矿井水热开发、岩温开发、混合型地热开发三大类。矿井水热开发的主要利用矿井水的热量,我国约有1/3的矿井为水资源丰富型矿井。在矿井开采过程中,或是当矿井关闭或废弃

表2 我国赋煤区地热资源估算

Table 2 Estimation of geothermal resources in coal-endowed areas in China

地区	赋煤区面积/ 万km ² ^[19]	赋煤区面积 占比/% ^[19]	地热资源储量/ 10 ¹⁵ kJ ^[35]	赋煤区地热资源 理论储量/10 ¹⁵ kJ	折合标煤/ (万t·a ⁻¹)	折合减排CO ₂ / (万t·a ⁻¹)
北京	0.14	8.54	94.81	8.10	276.73	743.86
天津	0.04	3.33	394.51	13.14	448.92	1 206.71
河北	0.71	3.76	3 052.00	114.76	3 920.74	10 538.94
山西	3.34	21.31	897.92	191.35	6 537.41	17 572.56
内蒙古	10.51	8.88	176.35	15.66	535.02	1 438.13
辽宁	0.33	2.23	339.91	7.58	258.97	696.11
吉林	0.46	2.45	96.00	2.35	80.29	215.81
黑龙江	0.46	0.97	236.50	2.294	78.37	210.67
江苏	0.13	1.21	266.13	3.22	110.01	295.71
浙江	0.002	0.02	1.20	0.024	0.82	2.20
安徽	0.59	4.21	60.52	2.55	87.12	234.18
福建	0.13	1.07	44.70	4.78	163.31	438.97
江西	0.49	2.94	66.66	1.96	66.96	180.00
山东	0.96	6.08	2 092.86	127.49	4 355.65	11 708.00
河南	1.51	9.04	404.68	36.58	1 249.74	3 359.31
湖北	0.02	0.11	87.81	0.097	3.31	8.91
湖南	0.27	1.27	10.46	0.132 8	4.54	12.20
广东	0.14	0.78	222.91	1.74	59.45	159.79
广西	0.13	0.55	256.12	1.41	48.17	129.49
海南	0.000 15	0.42	20.439	8.584	293.27	788.31
四川	1.14	2.35	6 525.40	153.35	5 239.15	14 082.84
贵州	3.19	18.10	88.08	15.943	544.69	1 464.12
云南	1.38	3.50	197.71	6.92	236.42	635.50
西藏	0.05	0.04	4 807.70	1.923	65.70	176.60
陕西	2.34	11.38	68.943	7.845 7	268.05	720.51
甘肃	1.68	3.94	95.401 6	3.758 8	128.42	345.19
青海	0.77	1.07	142.50	1.52	51.93	139.59
新疆	7.60	4.56	961.00	43.82	1 497.10	4 024.19

注：地热资源储量(kJ)×赋煤区面积占比(%)=赋煤区地热资源理论储量(kJ)。

后^[36]，可以充分利用井下丰富的水、热和空间资源，进行矿井地热资源的开发利用，延续矿山生命周期^[37-38]。矿井水热开采常用地源热泵系统相结合，冬季供暖，夏季供冷。矿井岩温开发分为低温和中高温地热能开发2种模式。矿井开采深度所属岩温均属于低温地热资源，刘浪等^[7,39]提出基于矿山功能性充填技术的地热协同开采理论，提出在充填体内预制埋管换热器提取井下地热能，并对蓄热充填材料^[40]、埋管换热器类型^[41-43]、系统参数^[44-46]、长效机制^[47]等展开了一系列研究，实现了深部矿床开采、空区治理、固废处置与可再生地热能开发的有机融合。随着开采

深度进一步增加，围岩温度会继续增长至90℃以上，已不适合进行矿产资源开发，唐春安等^[48]提出了基于开挖的增强型地热系统，为高温区域地热资源大规模开采提供了全新的解决方案。当矿井既有岩温问题，也有热水问题时，可采用混合型地热开发系统。在矿井大纵深开采跨度的基础上，如图7所示，建立矿井水热开发与岩温开发耦合系统，实现矿井地热资源的多元开采与分级利用。

2.3 赋煤区风能开发潜力

2.3.1 赋煤区风能分布特征

风能开发是缓解化石能源危机和实现能源可持

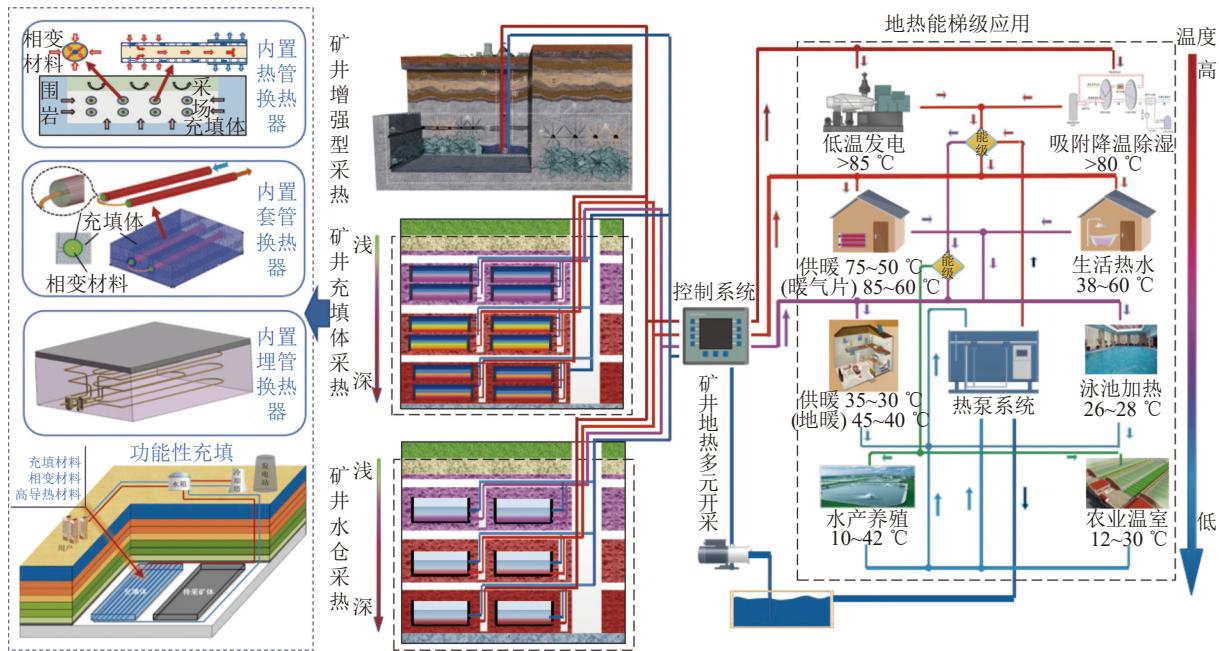


图 7 赋煤区地热能综合利用示意

Fig.7 Schematic of the comprehensive utilization system of geothermal energy in coal-endowed areas

续发展的主要途径,根据国际可再生能源署统计报告,2021年全球可再生能源总装机容量中风能占比为25.8%,新增的可再生能源装机容量中风能为93GW,占比达36.2%^[49]。我国幅员辽阔,风能资源丰富,2021年我国累计装机容量340GW,新增装机容量约56GW^[50],已成为全球最大的风电市场。

受地理位置与地形因素影响,我国风电分布极不均衡,如图8所示,风能丰富的大陆地区主要集中在受西北季风影响的北方地区、受东南季风影响的东南沿海地区、受高海拔影响的青藏高原地区。值得注意的是,风能开发中风电机组对土地的占用以及噪声等问题导致了选址上的制约。国家能源局多

次表示,“三北地区”及以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电基地建设是“十四五”新能源发展的重中之重^[51]。在以上我国风能富集地区中,东北西部和东北部、内蒙古中东部、新疆北部和东部的部分地区、甘肃西部、青藏高原等地年平均风速和平均功率密度甚至超过7.0m/s和300W/m²。图8为我国100m高度风能富集区与赋煤区的分布重叠关系,从图8中可以看出在国家倡导发展风的区域内,煤炭资源分布地区与风能分布地区具有一定的重合度。若能在矿山开采的同时,实现风能的协同开发利用,为矿山提供清洁能源补给,可降低矿山开采成本;在矿山开采结束后,风能资源仍可持续开发,矿山地区能源开采生命周期得以延长。

2.3.2 赋煤区风能资源评估

风能资源精细化评估的关键是高分辨率的风资源时空分布图谱和未来20~30年长期平均风速,同时,风能发电量的计算还与地形条件、机组选型及布机方式等具体因素有关。精细化评估计算适用于风电建设的微观选址与经济性评价,对于我国赋煤区风能资源潜力总体评估,采用风功率密度针对不同区域进行估算更具可行性。2021年,全国70m高度年平均风功率为196.7W/m²,100m高度年平均风功率密度为234.9W/m²^[52]。按照100m高度层风能资源各地区平均值进行统计,对赋煤区范围内风能资源进行开发潜力计算,见表3。由表3可知,我国赋煤区每年风能理论可开发量为 72.92×10^{16} kJ,折合标

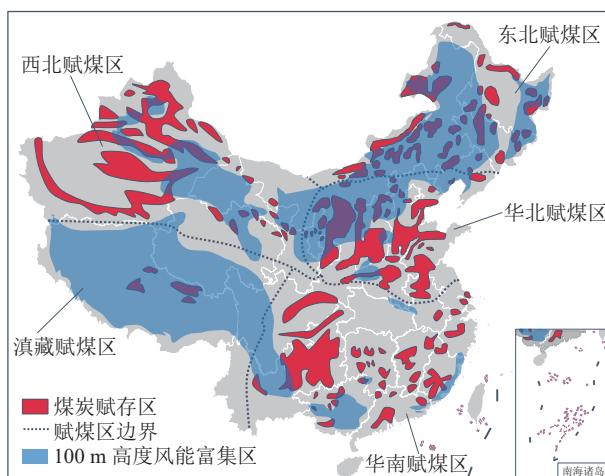


图 8 我国风能与煤矿资源富集区重叠关系

Fig.8 The overlap of rich area of wind energy and coal mine resources

准煤 248.8 亿 t/a, 可减少 CO₂ 排放量达 668.9 亿 t/a。赋煤区风能理论储量排在前 10 位的省份分别为内蒙古、新疆、山西、贵州、甘肃、陕西、河南、山东、云南、宁夏, 与煤炭资源储量排在前 10 位的省份具有较大的重叠性。其中, 内蒙古赋煤区风能资源储量最高, 每年理论开发潜力可达 31.75×10^{16} kJ, 约占全国赋煤区风能资源开发潜力的 43.5%, 折合标煤约 108 亿 t/a, 可减少 CO₂ 排放 291 亿 t/a。这 10 个省份的煤炭和风能资源理论总储量分别达到全国总储量的 94.5% 和 88.3%。因此, 赋煤区风能开发对于现阶段满足赋煤区能源需求, 以及在未来逐渐替代

矿产资源能源社会经济作用, 具有巨大潜力; 同时对实现 CO₂ 减排目标, 也将起到重要作用。

2.3.3 赋煤区风能利用方式

赋煤区风能利用主要分为风力发电, 风力提水, 以及风力致热 3 类, 可用与满足赋煤区供电、供水、供热, 及并网发电等需求, 如图 9 所示。

1) 赋煤区风力发电。风力发电是风能利用的主要形式, 目前, 风力发电系统在国外运行矿井与废弃矿井中的应用情况见表 4^[54-61]。在赋煤区利用风力发电技术, 可以实现对地面赋煤区安全监控系统、矿井通风系统、提升系统、煤炭输送系统、无线信号传

表 3 我国赋煤区风能资源潜力估算

Table 3 Estimation of wind energy resources in coal-endowed areas in China

地区	风功率密度 ^[20] / (W·m ⁻²)	年有效小时数 ^[52] / h	赋煤区面积占比 ^[19] / %	赋煤区面积/万km ²	理论装机潜力/ GW	理论开发潜力/ (10 ¹⁶ kJ·a ⁻¹)	理论折合标煤/ (亿t·a ⁻¹)	理论减排 CO ₂ / (亿t·a ⁻¹)	预估装机潜力 ^[53] / 万kW	预估开发潜力/ (10 ¹² kJ·a ⁻¹)	预估折合标煤/ (万t·a ⁻¹)	预估减排 CO ₂ / (万t·a ⁻¹)
北京	169.79	1816	8.54	0.14	237.8	0.16	0.53	1.43	39	0.22	0.74	2.00
天津	207.96	1965	3.33	0.04	83.1	0.06	0.20	0.54	239	0.56	1.92	5.16
河北	228.03	2 144	3.76	0.71	1 618.8	1.25	4.26	11.46	24 832	72.07	245.91	661.13
山西	198.06	1918	21.31	3.32	6 584.2	4.55	15.51	41.71	16 630	244.70	834.97	2 244.84
内蒙古	364.24	2 305	8.88	10.51	38 263.6	31.75	108.34	291.28	161 016	1 186.40	4 048.54	10 884.64
辽宁	293.01	2 300	2.23	0.33	967.1	0.80	2.73	7.35	8 347	15.41	52.59	141.39
吉林	317.36	2 216	2.45	0.46	1 457.1	1.16	3.97	10.66	10 669	20.85	71.16	191.30
黑龙江	290.82	2 323	0.97	0.46	1 334.3	1.12	3.81	10.24	18 771	15.23	51.96	139.69
江苏	200.23	1 973	1.21	0.13	259.7	0.18	0.63	1.69	7 484	6.43	21.95	59.01
浙江	140.33	2 090	0.02	0.00	2.9	0.00	0.01	0.02	5 349	0.08	0.27	0.74
安徽	167.24	1 809	4.21	0.59	986.4	0.64	2.19	5.89	7 020	19.25	65.68	176.57
福建	130.35	2 639	1.07	0.13	169.3	0.16	0.55	1.48	6 304	6.41	21.87	58.79
江西	145.73	2 028	2.94	0.49	715.1	0.52	1.78	4.79	3 661	7.86	26.81	72.09
山东	225.39	1 863	6.08	0.96	2 163.8	1.45	4.95	13.31	22 033	89.84	306.57	824.24
河南	175.73	1 480	9.04	1.51	2 653.0	1.41	4.82	12.97	9 116	43.91	149.82	402.81
湖北	124.88	1 960	0.11	0.02	25.5	0.02	0.06	0.17	3 798	0.29	1.01	2.70
湖南	142.48	1 960	1.27	0.27	383.3	0.27	0.92	2.48	3 558	3.19	10.88	29.25
广东	160.15	1 612	0.78	0.14	224.5	0.13	0.44	1.20	13 115	5.94	20.26	54.46
广西	191.99	2 385	0.55	0.13	250.9	0.22	0.74	1.98	13 040	6.16	21.01	56.49
四川	150.02	2 553	2.35	1.14	1 713.4	1.57	5.37	14.45	14 325	30.94	105.57	283.84
贵州	159.33	1 861	18.10	3.19	5 081.4	3.40	11.62	31.23	6 247	75.75	258.49	694.96
云南	147.59	2 808	3.50	1.38	2 035.8	2.06	7.02	18.88	14 168	50.13	171.05	459.87
西藏	255.63	2 173	0.04	0.05	125.6	0.10	0.34	0.90	47 609	1.49	5.08	13.67
陕西	149.07	1 931	11.38	2.34	3 487.8	2.42	8.27	22.24	10 340	81.80	279.12	750.42
甘肃	229.64	1 787	3.94	1.68	3 853.5	2.48	8.46	22.74	17 626	44.68	152.45	409.86
青海	227.06	1 743	0.14	0.10	234.3	0.15	0.50	1.35	14 227	1.28	4.35	11.70
宁夏	235.09	1 811	11.45	0.76	1 787.3	1.17	3.98	10.69	3 900	29.11	99.34	267.09
新疆	233.70	2 147	4.56	7.59	17 742.4	13.71	46.79	125.81	38 960	137.32	468.56	1 259.73

注: 理论装机潜力=赋煤区面积×风功率密度, 理论开发潜力=理论装机潜力×年有效小时数; 预估可开发潜力=预估装机潜力×赋煤区面积占比×年有效小时数。

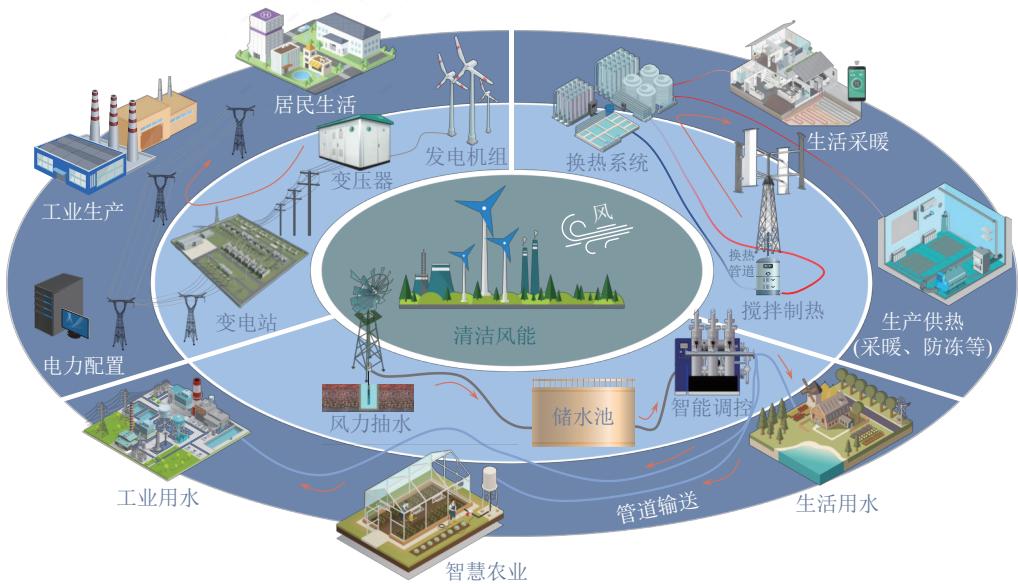


图9 赋煤区风能综合利用示意

Fig.9 Schematic of the comprehensive utilization system of wind energy in coal-endowed areas

表4 风力发电系统在国外采矿行业中的应用

Table 4 Application of wind power system in mining industry abroad

矿井类型	矿井	国家	发电量/MW	系统特点
运行矿井	Veladero ^[55]	阿根廷	2	离网/混动系统
	Diavik ^[56]	加拿大	2.3	离网/混动系统
	Raglan ^[57]	加拿大	3	离网/混动系统
	Los Pelambres ^[58]	智利	115	并网发电系统
废弃矿井	Dave Johnston ^[59]	美国	237	并网发电系统
	Somerset ^[60]	美国	34.5	并网发电系统
	Buffalo Mountain ^[61]	美国	29	并网发电系统

输系统及赋煤区照明系统等的长时间、稳定、高效自供电。赋煤区风能自供电具有不受电力安装位置影响、不需开挖路面做布线埋管施工、现场施工和安装方便、经济效益良好等优点。

赋煤区风力发电技术的应用首先需要考虑因风力发电场与赋煤区重叠、大量矿产资源被压覆而产生的系列问题。风力发电机组主要由塔架、轮毂、叶片、基础4部分组成,矿产资源开采引起的地表下沉、倾斜变形、曲率变形、水平移动和水平变形等参数是影响风力发电机组的主要因素。机组重心偏移导致叶轮难以正常运行,在附加应力作用下塔架甚至可能出现折断、倾覆。以采煤为例,运用煤层开采沉降相关理论和概率积分法对采空区残余沉降进行预计,利用有限元模型模拟计算极端工况下风机所受偏心载荷影响深度和覆岩破坏高度,对塔架地基稳定性进行整体评价,由此掌握采动影响下的风电系统变

形控制策略。根据发电机组与首采区的位置关系,以矿产开采率和风机安全运行效率为目标,需要对工作面进行合理布置和优化设计以控制地表沉陷,并采取合适的纠偏措施保障风电机组安全运行,实现风能和矿产资源的协同优化开采。

2)赋煤区风力提水。风力提水是将风能直接转化为机械能进行利用的方式,提水机组结构简单,成本低廉,对使用地区年平均风速和风能有效时数要求较低^[62]。因此,风力提水适宜为矿井排水、水资源循环利用、水环境治理,以及赋煤区生活用水、农林灌溉等提供动力。赋煤区风力提水涉及采矿学、空气动力学、结构力学和材料科学等综合性学科交叉问题。风力提水的核心技术包括风力机技术和水泵技术,目前发展日趋成熟,赋煤区风力提水的关键在于根据赋煤区不同用户需求特征对风力机与水泵进行匹配。

3)赋煤区风力致热。风力致热是一种高效的风能利用方式,由于赋煤区工业场地准备车间、输送带走廊采暖、井筒防冻,生产辅助建筑、行政福利建筑生活用热以及赋煤区生活热水供应等都需要矿井供热,风力致热技术可以很好地解决赋煤区的上述用热问题。其具体实施是风力带动搅拌器转动,再转化为某工质热能。这种风能搅拌液体制热系统的结构设计参数(如搅拌转子层数及分布位置、定子壁厚及材料、搅拌速度、液位高度、气隙长度等)对致热效率具有显著影响。与风力发电相比,风力致热和风力提水对随机性风能的容忍度大、适应性强、能量转换效率高^[63]。

3 赋煤区采空区储能路径与关键问题

矿井储能始于20世纪60年代,最早由美国在房柱式采空区中存储天然气。Leyden煤矿属于其中的代表,该煤矿采用房柱法采煤,采空区结构稳定,同时采空区上覆平均厚度28.7 m的完整泥岩层,采空区储气压力高达1.7 MPa^[64]。后续,比利时等国也开展了采空区储气实践^[65]。邱华富等^[66]提出采用充填的方式在井下构筑储库,用于存储天然气、石油等能源。彭振华等^[67]提出在废弃石膏矿储存原油。前期的矿井储能多为化石能源的存储,以备突发事件下的油气能源安全。近年来,在“双碳”目标的推动下,研究人员开始关注矿井空间新能源储能问题,以期实现煤炭能源和新能源的耦合式发展。针对矿井储能,目前关注度最高的是矿井抽水蓄能。谢和平等^[68]综述了煤矿井下抽水蓄能发电技术的原理、现状及展望,提出了煤矿地下水库-矿井水循环利用-抽水蓄能一体化技术构想。葛帅帅等^[69]、卞正富等^[70]开展了空间抽水蓄能相关研究。MENÉNDEZ J等^[71]提出利用地表塌陷区作为上水库,将井下采空区改造为储水100万m³的下水库,与风能、电能等再生能源组合,构建抽水蓄能系统。在调研国内外矿井储能研究进展及代表性储能实践的基础上,重点从采空区充填改造的角度论述了矿井长期稳定储能的技术路径及关键问题。

3.1 矿井采空区储能基本路径

风、光、热等新能源普遍具有波动性、周期性等特征,这使得新能源开发利用需要配备较大容量的储能系统,以提高电力系统对高比例新能源接网和消纳的适应性。煤矿采空区空间大,井下基础设施完善,同时赋煤区一般富含风、光、热等新能源资源,这是矿井储能的优势所在。但目前普遍采用垮落法管理顶板,同时煤系地层一般富含各类地质构造(断层、陷落柱等),这些因素使得采空区利用困难,这是目前矿井储能的难点所在。对此,在借鉴神东矿区“规划先行、边回采、边治理、边利用”的地下水库建设经验的基础上^[72],提出“储能库超前规划→功能性储能库构筑→储释能运行管控”的矿井储能技术路径,具体如图10所示。

3.2 储能超前规划

现有采空区难以用于矿井储能的一个重要原因是采空区地质条件复杂,二次治理利用难度大、费用高。对此,研究认为在资源回采之初,应超前规划矿井储能,具体包括以下关键问题:①储能区地质选址。

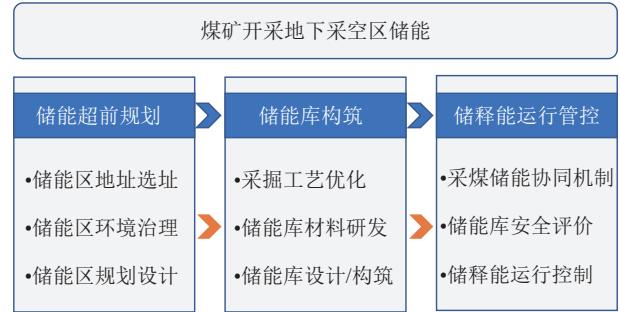


图10 矿井储能基本技术路径

Fig.10 Basic technological path of energy storage in coal mine

矿井储能系统作为重要基础设施,设计服务年限长、投资力度大,然而我国主要矿区地质条件普遍较复杂,广泛发育有断层、陷落柱等地质构造。为保障矿井储能系统的长期、安全、低成本运行,储能区选址应当避开地质灾害频发的矿井,如大水矿井、冲击地压矿井等,同时应远离矿井的中大型构造影响区、碎软围岩带、老旧采空区等;②储能区地质环境治理。矿井回采活动容易诱发各类地质灾害,包括矿井突水、冲击地压、采空区贯通、矿震等。对此,应采用注浆和充填等方法,超前治理储能区的各种不良地质体,隔离储能区和矿井其他区域,以避免后期储能阶段的地质安全问题及高昂的维护成本;③储能规划设计。在矿井设计或回采阶段,综合矿区地质条件、开采方法、新能源类型、储能规模和能源利用方式等多方面因素,确定矿井储能方式,包括压缩空气储能、抽水蓄能、储热储能、化学含能物质存储等。矿井储能方式应依据新能源类型、储能规模和能源利用方式等因素综合确定,同时储能应遵循能量转换次数最少的原则,以最大程度提高能量转换效率^[73]。能源利用方式对储能也有重要影响,如热能无法长距离运输,储热适合短距离用能。

3.3 功能性储能库构筑

储能库是新能源存储的载体,是储能最为重要的设施,不同的储能方式需求不同功能的储能库,同时储能库必须具备可维护性和长期稳定性,现有采空区不具备上述条件,难以直接用于矿井长期安全高效储能。对此,提出采用功能性充填技术构筑储能库的技术路径(图11),具体涉及3个方面的关键问题:①采掘工艺优化。统筹采煤工艺、地质条件、储能需求等多方面因素,创新采掘工艺,优化采掘顺序,形成储能库及运维巷道的基础空间^[6]。②功能性充填材料开发。矿井压缩空气储能、化学含能物质(H₂、CH₄、CO等)要求储气库密封性极好、抗流体周期性强荷载能力强,同时压缩空气储能还需配套

储热库；矿井抽水蓄能要求储水库渗透性低、坝体稳定性好、抗流体周期性荷载能力强；矿井储热要求储热库具备高导热性能和蓄热潜力，抗热应力强。传统充填材料不具备上述性能，需要在胶凝材料、煤基固废及特种功能性材料的基础上开发具备高强度、抗蠕变、抗流体周期性强荷载等共有性质的复合充填材料^[7]。同时结合矿井抽水蓄能、压缩空气储能/化学含能物质存储、蓄热储能等专有需求，分别开发具有防渗、高密封性、高导热性—蓄热性—抗热应力等专有特性的充填材料。③储能库设计及构筑。结合储能方式、规模，确定充填材料功能特性需求，优化储库内部空间结构，采用功能性充填材料构筑矿井储能库，并进行高强度支护，确保温度—渗流—应力—化学多场耦合条件下储能库在设计寿命期内保持稳定可靠。

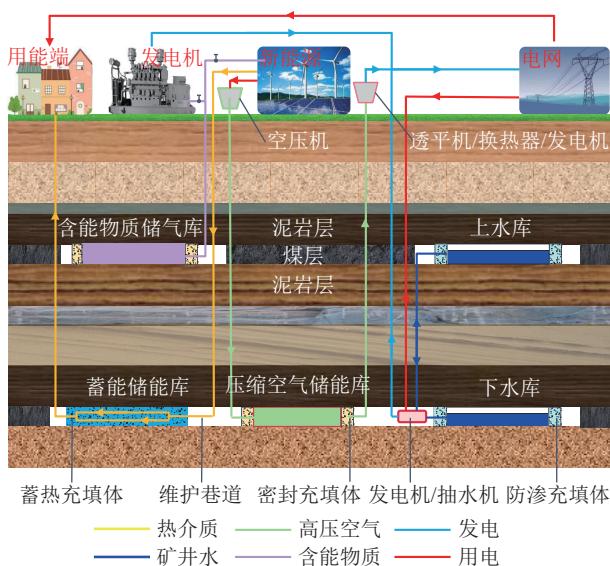


图 11 矿井储能库充填构筑

Fig.11 Construction of coal mine energy storage using functional backfill

3.4 储释能运行管控

为最大程度提高新能源储能开发力度和回采—储能综合经济效益，提出井下回采—储能协同的技术路径，即在矿井回采过程中，同步构筑井下储能库，建立完整储能子系统，进行井下储能。回采—储能协同的关键问题包括 3 个方面：①采煤—储能协同机制。为保证采空区可长期安全储能，就必须在采煤过程中同步构筑功能性充填储能库，这决定了采煤—储能协同。因此，需要从人员及基础设施共用、采煤与储库构筑、生产管理等多方面建立采煤—储能协同机制。回采—储能协同的优势在于：井下资源回采和储能系统建立可以共享设计、施工等资料，进而提高效率、

降低成本；煤炭开采的高利润可用于矿井新能源储能投资，以避免后期矿井储能的资金难题；实现煤炭能源与新能源的强耦合，提高我国能源安全水平和新能源开发利用水平；矿井回采过程中，可培养新能源储能领域专业技术人员，矿井资源临近枯竭时，煤矿企业可快速向新能源企业的转型升级。②储能库性能长期演化规律及安全监测评价。针对不同的储能方式，构建储能安全监测系统，重点监测储能库在温度、渗流、应力、化学多场耦合条件下的稳定性及地质环境变化。一旦出现储能库损伤破坏前兆，及时进行停运检修维护，避免出现井下储能险情。③储释能运行智能控制。矿井储能的基本功能是对用能系统（主要是电力）削峰填谷，约束因素主要包括新能源消纳、电网安全稳定经济运行和储能应用的经济性，因此矿井储能运行控制是一个多目标、多约束、非线性问题，需要重点研究。

4 赋煤区多能源互补与调控

综合能源系统（Integrated Energy Systems, IES）作为未来人类社会能源的主要承载形式^[7,4]，鼓励清洁低碳和可再生能源消费，可有效促进我国能源结构优化升级，加速推进能源转型进程，降低我国石油、天然气的对外依存度，保障国家能源安全。研究表明，我国赋煤区具有丰富的太阳能、风能、地热能等可再生能源，构建以太阳能、风能和地热能为主体的可再生能源系统，发挥以煤、天然气为主体的传统能源兜底作用，形成赋煤区多能互补综合能源系统（Multi-energy Complementary Integrated Energy System, MCIES），是实现矿山绿色低碳开发与可持续发展的重要发展方向，并在矿业领域达成共识。例如袁亮等^[1]提出利用废弃矿洞群协同储能，构建多区域水、光、风、气、传统能源、热互补的分布式智慧能源系统，形成以矿井为主体的气水光互补低碳生态圈。

与其他综合能源系统相比，MCIES 的核心是利用赋煤区丰富的物理空间，实现规模化储能，通过多能源协同互补，整合赋煤区可再生能源与传统化石能源，实现多能源梯级利用，提升综合能源利用效率和可再生能源消纳率，降低碳排放。MCIES 的优势和特征具备如下：①利用赋煤区丰富的地上地下空间，构建大规模储能系统，通过存储电能、热能和机械能等形式能源有效克服可再生能源的波动大、能量密度低等致命缺陷；②利用矿井已有地质勘探资料、井巷工程以及电力、排水和升降系统等设施，节省了大量地下储能系统的建造投资；③利用多能

源的协同互补,在稳定且可靠供给用户所需能源的同时,可充分发掘赋煤区丰富的可再生能源潜力,降低传统化石燃料的消耗;④实现赋煤区从矿产资源基地向新能源基地的自然转变,有效推动传统赋煤区的升级转型,延续矿山生命周期。

不同能源特征和消费需求会导致IES内部耦合元件在不同管理模式、运行场景和控制策略下呈现的特性千变万化,对IES将产生强烈的非线性和不确定性影响^[75]。因此,要实现赋煤区多能源互补与调控需要解决不同赋煤区MCIES统一建模、能源管理与优化以及运营模式等关键问题。

4.1 赋煤区异质能量流耦合模型

每个赋煤区自身特有的能源禀赋和消费群体以及不同类型能源在转换、传输、存储和分配方式与比例千变万化,导致赋煤区MCIES表现复杂多变。但是,赋煤区MCIES本质上属于不同品质能量流耦合转换系统,均遵循能量流能级平衡理论。瑞士联邦理工学院的G. ANDERSSON提出能源集线器(Energy Hub, EH)模型作为不同类型和品质能量的转换单元,为不同能源基础设施和负载之间提供能源输入输出接口,实现如电力、供暖、制冷和压缩空气等多能源协同服务^[76-77]。基于EH模型构建了赋煤区典型能源集线器模型,其中燃气包括天然气、瓦斯、煤气、液化石油气等可燃气体,热能包括赋煤区余热、锅炉生产热能等,如图12所示。

图13模型可视为一个多能量流的输入、转换和输出网络系统,其耦合模型如图14所示。忽略能量

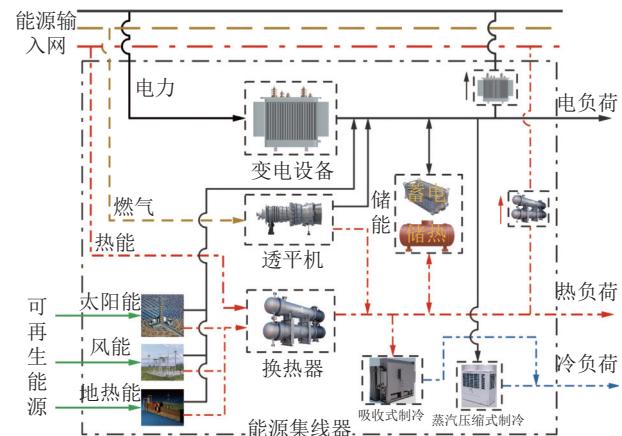


图12 赋煤区典型能源集线器模型

Fig.12 Typical energy hub model in coal-endowed areas

流输送网的损失,输入能源变量矩阵为 \mathbf{P} ,输出负荷变量矩阵为 \mathbf{L} ,能源与负荷耦合转换矩阵为 \mathbf{C} 。当可再生能源转化的能量超过负荷时将产生冗余能量流反馈进入能量输入网,此时将冗余能量流视为冗余负荷 $L_{e,r}$ 和 $L_{h,r}$,则耦合模型的统一数学表达式^[78]为

$$\mathbf{L} = \mathbf{CP} \quad (1)$$

能量转换耦合矩阵中的元素 $C_{i,j}$ 表达式^[6]为

$$C_{i,j} = \sum_{n=1}^N \left[v_{i,n}(t) \prod_{m=1}^M \eta_{n,m}^j(\Theta, t) \right] \quad (2)$$

其中, $C_{i,j}$ 为*i*能源和*j*负荷之间能量转换系数,由能量转换设备特性和分配系数*v*决定;*v_{i,n}*为*i*能源在*n*设备的分配系数; $\eta_{n,m}^j$ 为*n*设备在*m*环节生产*j*负荷的转换效率,与*n*设备的运行参数 Θ 和运行时

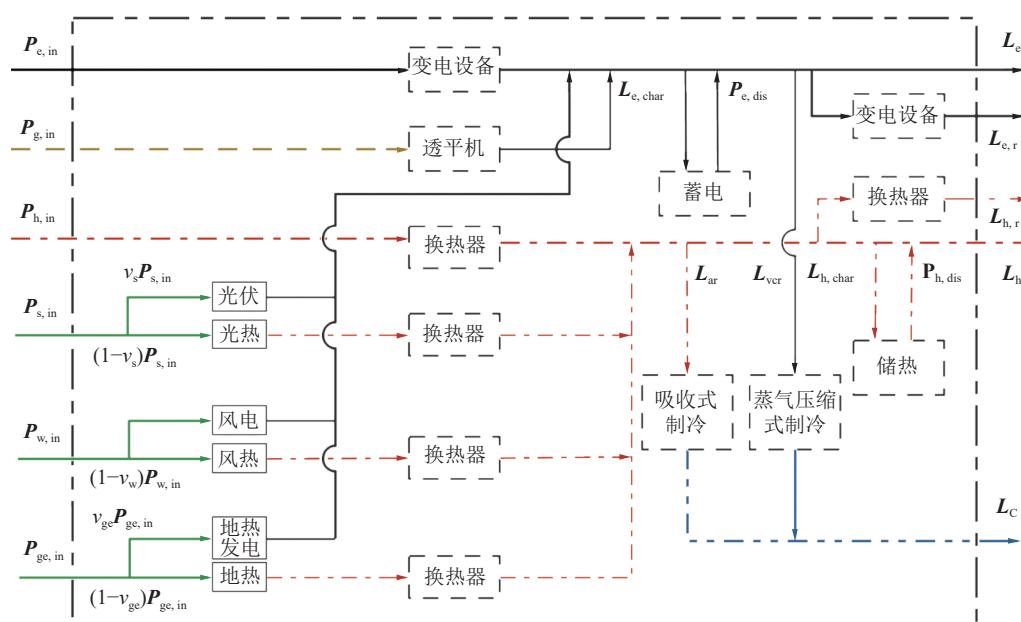


图13 赋煤区典型能源的能量流耦合模型

Fig.13 Energy flow coupling model of typical energy in coal-endowed areas

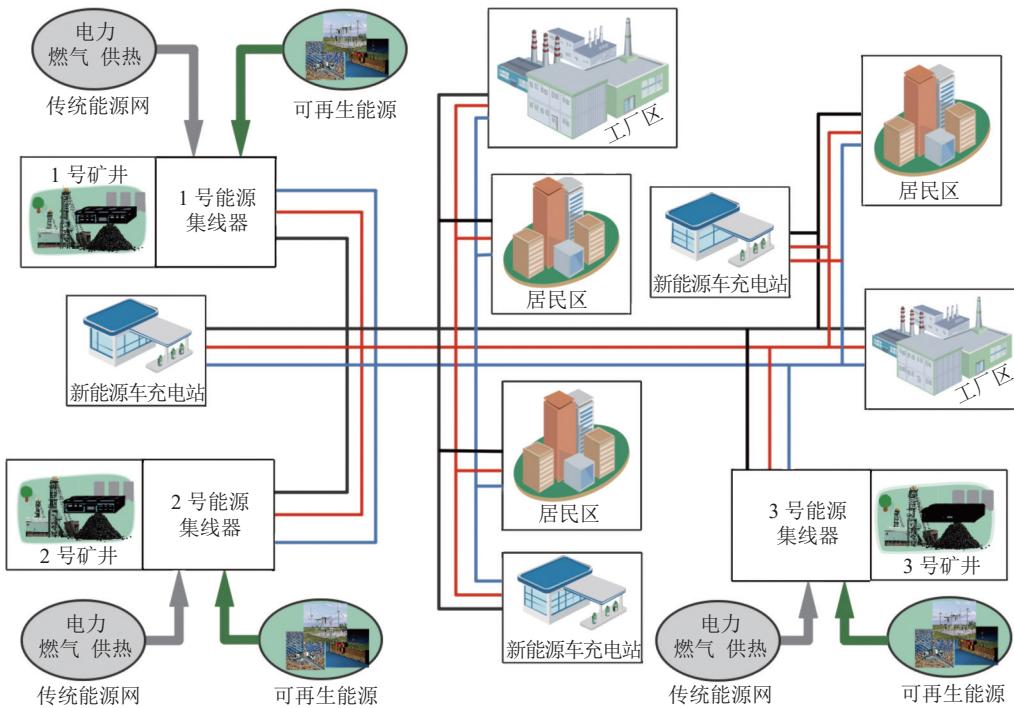


图 14 基于 EH 模型的赋煤区 MCIES
Fig.14 MCIES of mining area based on EH model

间 t 相关, 其中储能设备的流入和流出能量功率通过电储能和蓄冷储热模型^[78]计算得出, 并参考传热学中热源/热汇的处理方式, 将储能设备的能量流作为源项处理。

基于 EH 模型围绕矿井构建出赋煤区 MCIES 如图 14 所示。从综合能源互联网络角度出发^[7], 一个矿井或者多个较为集中的矿井构成一个能源生产、供给能源集线器。能源集线器既是能源转换和分配枢纽, 完成本集线器内不同品质能源的生产、转换、储存和分配功能, 也是能源信息数据交换枢纽, 实现本集线器和赋煤区其它能源集线器、消费群体的供能、用能等信息交互。每个能源集线器生产和转换的能源满足自身需求后, 剩余的电力、热力和冷量等能源输入赋煤区输送网络。

4.2 赋煤区 MCIES 能源管理与优化

与传统能源系统的单一能源相互独立运行模式相比, 赋煤区 MCIES 融合了多种类型的能源资源, 这些能源从供给侧到需求侧有着各自的运行特性。例如太阳能和风能转换的电力和热能具有明显的波动性。电能传输速度接近光速, 可以忽略响应时间, 而热能因较大的热惯性和载热介质较慢的流速, 响应时间在分钟级甚至小时级^[79]。因此需要从系统集成角度考虑能源的生产、转换、传输以及存储环等环节, 建立综合管理机制和优化策略, 以满足能源生产服务提供者和能源消费者需求, 符合国家的能源

与经济发展要求。

图 15 给出赋煤区 MCIES 能源调配与优化。科学考虑热、电、冷等能源负荷的时空分布、传输特性以及消费者的需求差异, 组合评价赋煤区内每个能源集线器为能源需求提供的服务。依据评价结果将赋煤区能源市场的能源需求在能源集线器之间的能源调配进行多目标优化, 以使赋煤区 MCIES 的整体评价结果最优。单个能源集线器在获取能源生产配额后, 同样由组合评价模型评价其内部的能源生产分配, 确定综合评价结果最高的分配策略并进行能源生产。详细记录实际生产情况并再次评价承担能源生产任务的能源集线器, 更新其能源生产信息, 以提升赋煤区能源调配依据的可靠性。

4.3 赋煤区 MCIES 运营模式

科学合理的运营模式是赋煤区 MCIES 持续健康发展的关键内驱力, 需要满足国家、能源服务者和能源消费者等各个层面的利益与需求。从国家层面考虑, 首先要符合国家能源战略、经济发展和生态环境保护的需求, 建立有效的反馈、评估和调控机制, 提升综合能源利用效率, 可再生能源消纳率和渗透率, 确保国家能源安全。从能源服务者层面考虑, 要符合公司企业的利益诉求, 建立透明公平的竞争机制、合理的定价机制和良好的投资环境和盈利模式。从能源消费者层面考虑, 要符合消费者利益和权益需求, 建立能源品质监控机制, 确保消费者用能经济、

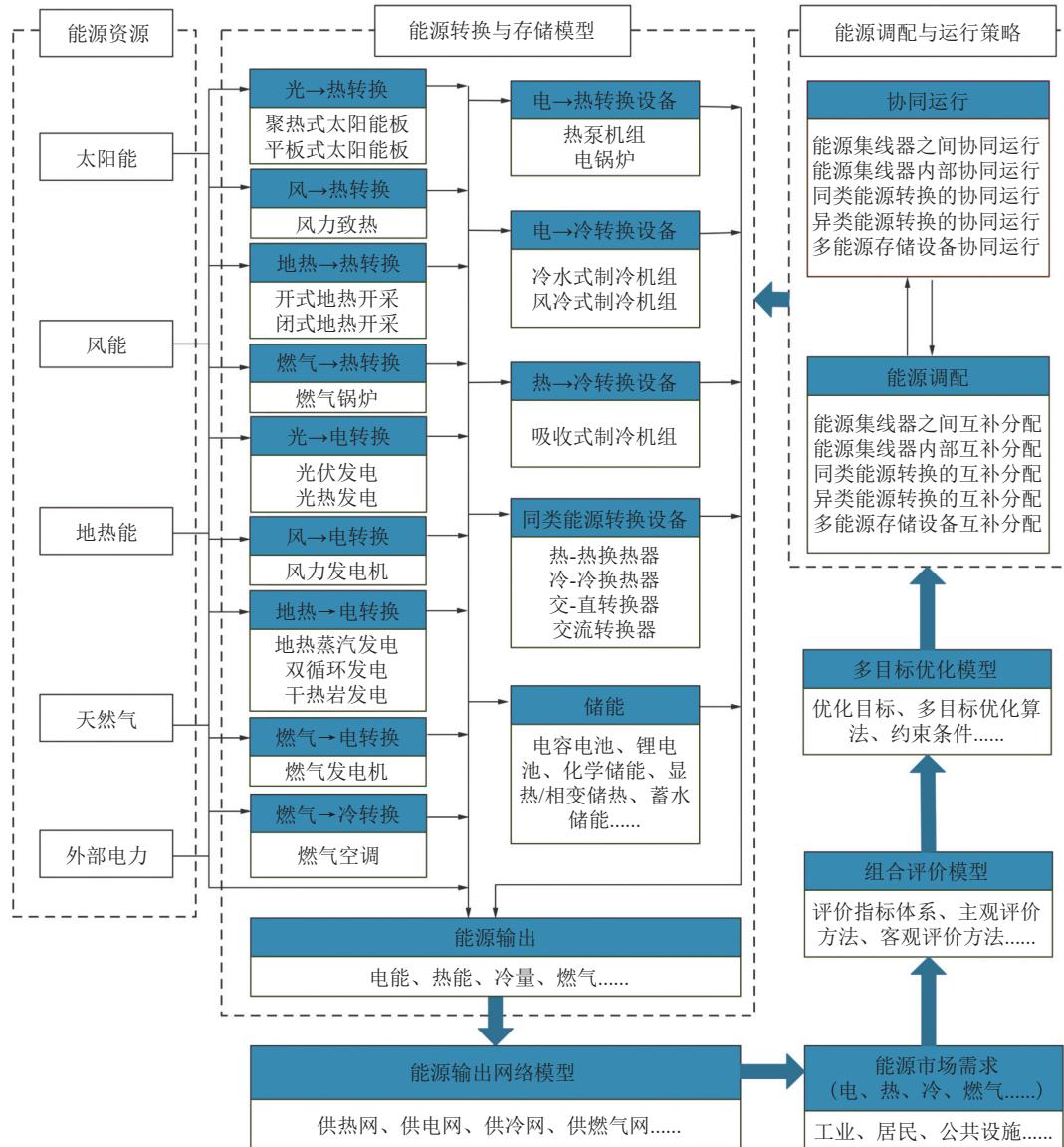


图 15 赋煤区 MCIES 能源调配优化

Fig.15 Optimization of MCIES energy allocation in coal-endowed areas

方便、安全和稳定可靠。

结合“去中心化思想”，采用能源产品价格竞争的市场化策略建立赋煤区 MCIES 的运营模式，形成优良的市场环境，高效整合赋煤区能源资源。如图 16 所示，赋煤区 MCIES 的运营模式主要包括能源消费、能源监管、能源服务和能源调控 4 个部分，各部分的主体通过能源输送网、能源信息网和监测网连接。

能源消费指赋煤区的矿企、工业、商业、居民以及公共设施的电、热、冷和气等形式的能源消费。能源服务是指以能源集线器为单元，利用赋煤区赋资源(可再生能源、燃气以及地下地上空间等)进行电、热、冷、气等能源的生产与输送。能源监管指国家和地方政府相关部门对能源服务者提供的能源在

品质、安全、可靠性等方面进行监督，并对未达到能源交易合同约定指标的服务者进行相应处罚并补偿消费者由此带来的损失。能源调控指国家和地方政府相关部门基于市场反馈的能源、经济和环境等方面的数据，结合综合能源经济模型推演市场变化，采用经济手段引导赋煤区 MCIES 的发展符合国家能源安全、经济发展和环境保护等国家战略政策。

能源输送网连接能源服务者和消费者，以电、热、冷等形式完成能源输送。能源信息网连接能源服务者、消费者和赋煤区能源监管与交易中心，完成能源需求和供给信息以及能源交易信息的交互。能源需求和供给信息包含能源形式、品质、功率、可靠性等，能源交易信息则包含了能源服务者和消费者的交易合同约定的相关能源价格、品质等条款。为了促进

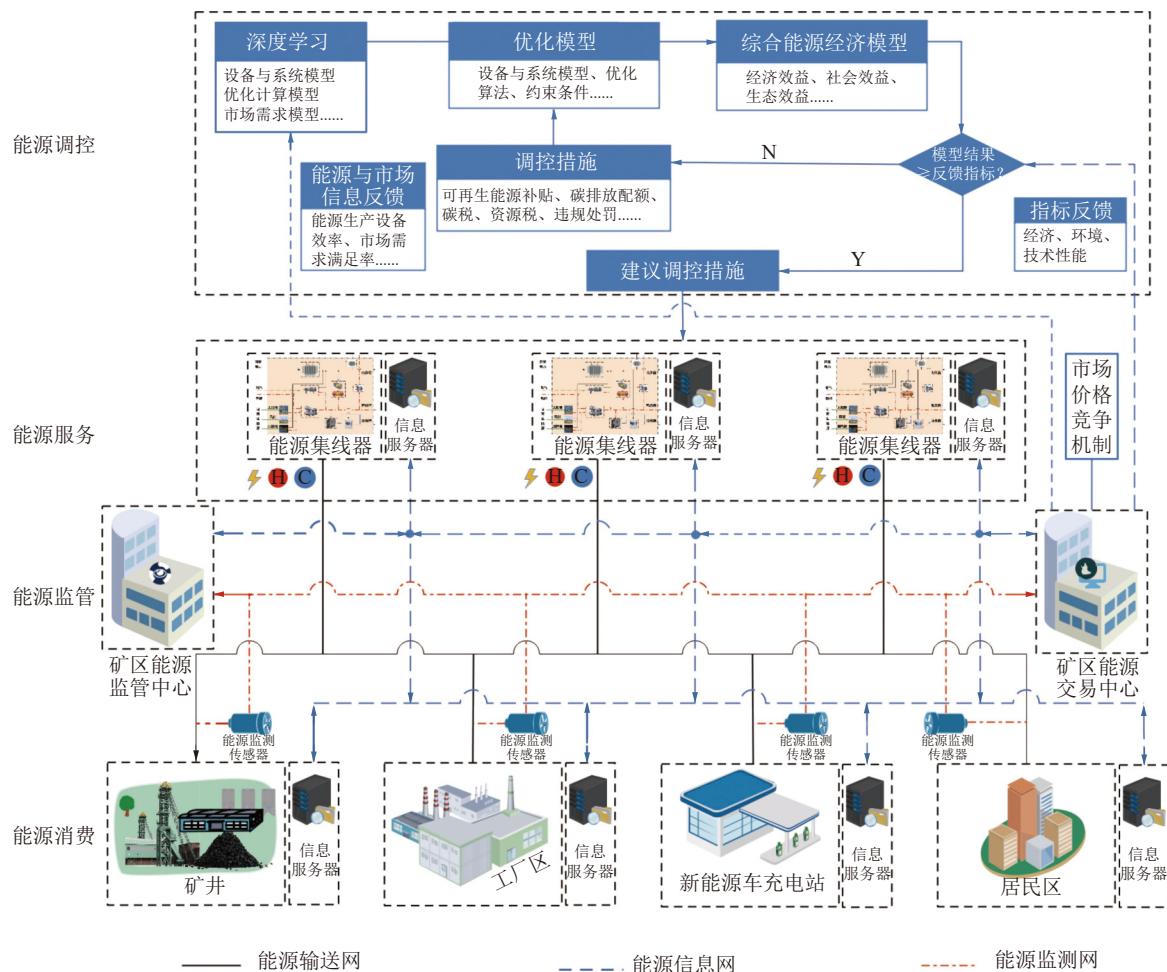


Fig.16 Operation mode of MCIES in coal-endowed areas

能源就近消费，提升综合能源利用效率，能源的价格、品质和可靠性等均以消费者获取的到户能源为准，因此能源服务者需要考虑能源传输损耗等情况。能源监测网对到户能源进行监测，为能源监管提供数据。赋煤区能源交易中心提供能源交易平台，采用以价格为基准的市场化竞争机制，消费者和服务者均可在交易平台发布能源需求和供给信息，进行能源交易。赋煤区能源监管中心对能源品质、交易和合同履行进行监管。

5 结 论

1) 提出了赋煤区全生周期能源开发理念，优化了赋煤区煤炭与新能源的组合模式，将赋煤区能源发展历程划分为煤炭、煤炭与新能源优化组合和新能源 3 个阶段，建立了赋煤区新能源开发总体架。

2) 我国赋煤区太阳能资源储量丰富，初步估算理论储量可达 2053.67×10^{15} kJ/a，折合标准煤 703.95 亿 t/a，可减少 CO₂ 排放量 1 892.56 亿 t/a，开发潜力巨大。通过在赋煤区建设光伏发电系统、光

热系统和太阳能化学转化系统的太阳能综合利用系统，可实现煤炭资源与太阳能资源协同开采，同时实现煤炭资源向太阳能资源的逐渐过渡，为矿井升级转型开启新方向。

3) 我国赋煤区地热资源储量丰富，初步估算理论储量可达 778.88×10^{15} kJ，折合标准煤 2.66 亿 t/a，可减少 CO₂ 排放量达 7.15 亿 t/a。通过在赋煤区建设基于矿井热水型、岩温型、混合型多元地热开发系统，形成矿井地热能分级开采与热用户梯级利用的综合应用方案，可实现深部矿产资源与地热资源协同开发，同时实现矿井地热化“害”为“利”的战略转移。

4) 我国赋煤区风能资源丰富，赋煤区范围内每年可开发的风能资源折合标煤约 0.75 亿 t/a，减排 CO₂ 约 2 亿 t/a。为高效利用赋煤区风能资源，构建出以赋煤区井上井下设施电力供应、水循环动力、供暖自足，及并网发电为一体的风能资源利用框架。

5) 矿井采空区储能可行性，有望为新能源大规模开发利用提供关键技术支撑。为破解现阶段煤

矿采空区储能利用难题,提出“储能库超前规划→储能库构筑→采煤-储能协同”的矿井储能技术路径,重点突破储能区地质选址与超前治理、功能性储能库充填构筑、矿井储能库优化及控制、储能库群长期稳定性监测等关键问题。

6)赋煤区多能互补综合能源系统(MCIES)为传统能源与新能源融合互补,促进赋煤区升级转型提供了关键技术支撑。针对赋煤区MCIES复杂多变特征,从能量流的本质特征出发,建立了赋煤区能源生产、供给单元(能源集线器)的异质能量流耦合模型,统一了MCIES内部不同能源集线器的数学表达式,提出赋煤区MCIES能源管理与优化逻辑方法以及运营模式,为发展赋煤区新能源,延续赋煤区生命周期提供了新思路。

参考文献(References):

- [1] 袁亮,张通,张庆贺,等.双碳目标下废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设思考[J].煤炭学报,2022,47(6):2131-2139.
YUAN Liang, ZHANG Tong, ZHANG Qinghe, et al. Construction of green, low-carbon and multi-energy complementary system for abandoned mines under global carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2131-2139.
- [2] 桑树勋,袁亮,刘世奇,等.碳中和地质技术及其煤炭低碳化应用前瞻[J].煤炭学报,2022,47(4):1430-1451.
SANG Shuxun, YUAN Liang, LIU Shiqi, et al. Geological technology for carbon neutrality and its application prospect for low carbon coal exploitation and utilization[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1430-1451.
- [3] 项目综合报告编写组.《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J].中国人口·资源与环境,2020,30(11):1-25.
Project comprehensive report preparation team. A comprehensive report on China's long-term low-carbon development strategy and transition path[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(11): 1-25.
- [4] 吴林荣,杜莉丽,王娟敏,等.陕北榆林地区太阳能资源空间分布特征及资源潜力评估[J].水土保持通报,2013,33(1):238-242.
WU Linrong, DU Lili, WANG Juanmin, et al. Distribution characteristic sand evaluation of potential solar energy resources in Yulin region of northern Shaanxi province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(1): 238-242.
- [5] 王云,戴喜红.榆林市长城沿线风能资源分析[J].陕西气象,2010(2):38-40.
WANG Yun, DAI Xihong. Analysis of wind energy resources along the Great Wall of Yulin City[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2010(2): 38-40.
- [6] 朱梦博,刘浪,王双明,等.短-长壁工作面充填无煤柱开采方法研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(6):173-181.
ZHU Mengbo, LIU Lang, WANG Shuangming, et al. Short-and long-walls backfilling pillarless coal mining method[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(6): 173-181.
- [7] 刘浪,王双明,朱梦博,等.基于功能性充填的CO₂储库构筑与封存方法探索[J].煤炭学报,2022,47(3):1072-1086.
LIU Lang, WANG Shuangming, ZHU Mengbo, et al. CO₂ storage-cavern construction and storage method based on functional backfill[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1072-1086.
- [8] 吴晓华,郑厚发,李岩彬.煤炭企业绿色矿山建设标准体系研究[J].中国煤炭,2022,48(6):50-55.
WU Xiaohua, ZHENG Houfa, LI Yanbin. Study on the standard system of green mine construction in coal enterprises[J]. China Coal, 2022, 48(6): 50-55.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 刘峰,郭林峰,赵路正.双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J].煤炭学报,2022,47(1):1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1-15.
- [12] 国家能源局.我国太阳能资源是如何分布的? [EB/OL].(2014-08-03.) [2022-12-06]. http://www.nea.gov.cn/2014-08/03/c_133617073.htm.
- [13] 宋洪柱.中国煤炭资源分布特征与勘查开发前景研究[D].北京:中国地质大学(北京),2013.
SONG Hongzhu. Study on the distribution characteristics and the exploration and development prospect of coal resource of china[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- [14] 朱瑞兆.中国分省太阳能资源图集[R].北京:中国科学院电工研究所,2006:1-29.
ZHU Ruizhao. Atlas of solar energy resources by province in China[R]. Beijing: Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences, 2006: 1-29.
- [15] 吴林荣,杜莉丽,王娟敏,等.陕北榆林地区太阳能资源空间分布特征及资源潜力评估[J].水土保持通报,2013,33 (1): 238-242.
WU Linrong, DU Lili, WANG Juanmin, et al. Distribution characteristics and evaluation of potential solar energy resources in Yulin region of northern Shaanxi province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation. 2013, 33 (1): 238-242.
- [16] 姚玉璧,郑绍忠,杨扬,等.中国太阳能资源评估及其利用效率研究进展与展望[J].太阳能学报,2022,43(10):524-535.
YAO Yubi, ZHENG Shaozhong, YANG Yang, et al. Progress and prospects on solar energy resource evaluation and utilization efficiency in China[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022,

- 43(10): 524–535.
- [17] 沈义. 我国太阳能的空间分布及地区开发利用综合潜力评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
SHEN Yi. The spatial distribution of solar energy and the comprehensive potential evaluation of regional exploitation and utilization in China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
- [18] 郑舒虹. 中国可再生电力“供-输-需”协同度测算与优化研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2022.
ZHENG Shuhong. Research on “supply-transmission-demand” synergy evaluation and optimization for China's renewable power[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2022.
- [19] 李华. 煤炭资源预测之全国煤炭资源预测的结果[EB/OL]. (2017-10-14) [2022-12-06]. <https://www.mining120.com/tech/show-htm-itemid-48463.html>.
- [20] 中国气象局风能太阳能中心. 2021年中国风能太阳能资源年景公报[R]. 北京: 中国气象局风能太阳能中心, 2022.
- [21] 中华人民共和国中央人民政府. 截至10月底全国发电装机容量约25亿千瓦[EB/OL]. (2022-11-23) [2022-12-06]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-11/23/content_5728363.htm.
- [22] 国家能源局. 我国光伏发电并网装机容量突破3亿千瓦 分布式发展成为新亮点[EB/OL]. (2022-01-20) [2022-12-06]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/20/c_1310432517.htm.
- [23] 神华之声. 向太阳要能量! 神华国华投资在宁夏建设首个光伏项目[EB/OL]. (2017-04-12) [2022-12-06]. https://www.sohu.com/a/133538790_663324.
- [24] 中新网新疆. 煤矿边上建光伏电站! 哈密首个煤矿分布式光伏项目并网发电[EB/OL]. (2022-03-15) [2022-12-06]. <http://www.xj.chinanews.com.cn/dizhou/2022-03-15/detail-ihawqrpf1210044.shtml>.
- [25] 中国电力网. 深入推进采煤沉陷区综合治理 聚焦“光伏+采煤沉陷区”融合发展[EB/OL]. (2022-02-04) [2022-12-06]. <http://www.chinapower.com.cn/tynfd/hyyw/20220224/135254.html>.
- [26] 谢友泉, 高辉, 苏志国, 等. 废弃矿井资源的可再生能源开发利用[J]. 可再生能源, 2020, 38(3): 423–426.
Xie Youquan, Gao Hui, Su Zhiguo, et al. Exploitation and utilization of renewable energy from waste mine resources[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(3): 423–426.
- [27] 中国煤炭报. 中国煤炭报独家调查: 那些废弃煤矿, 如何转型获得新生? [N/OL]. (2021-08-27) [2022-12-06]. <http://www.chinacaj.net/i,16,13940,0.html>.
- [28] 朱晓飞. 安徽祁南煤矿采煤沉陷区光伏发电场地稳定性评价[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
ZHU Xiaofei. Stability evaluation of photovoltaic power generation site in mining subsidence area of Qinan coal mine, Anhui province[D]. Huainan: AnHui University of Science and Technology, 2019.
- [29] 白淑娟, 陈华峰, 李林林. 采煤沉陷区建造光伏电站关键技术分析[J]. 低碳技术, 2022, 1: 49–51.
BAI Shujuan, CHEN Huafeng, LI Linlin. Analysis of key technologies for the construction of photovoltaic power plants in coal mining subsidence areas[J]. Low Carbon World, 2022, 1: 49–51.
- [30] 王君杰. 太阳能在煤矿供热系统中的利用探讨[J]. 企业技术开发, 2014, 33(14): 177–178.
WANG Junjie. Discussion on the utilization of solar energy in heating system of coal mine[J]. Technological Development of Enterprise, 2014, 33(14): 177–178.
- [31] 王峰, 周化岚, 张建国. 太阳能驱动二氧化碳转化[J]. 自然杂志, 2021, 43(1): 61–70.
WANG Feng, ZHOU Hualan, ZHANG Jianguo. Carbon dioxide conversion by solar energy[J]. Chinese Journal of Nature, 2021, 43(1): 61–70.
- [32] 陈靖, 董树杰, 周红军. 太阳能光效制氢研究进展[J]. 煤化工, 2022, 50(3): 79–85.
CHEN Jing, DONG Shujie, ZHOU Hongjun. Research progress on hydrogen production through solar photovoltaic effect[J]. Coal Chemical Industry, 2022, 50(3): 79–85.
- [33] 中华人民共和国中央人民政府. 工业和信息化部 住房和城乡建设部 交通运输部 农业农村部 国家能源局 关于印发《智能光伏产业创新发展行动计划(2021—2025年)》的通知[EB/OL]. (2021-12-31) [2022-12-06]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/05/content_5666484.htm.
- [34] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 1–9.
WANG Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1–9.
- [35] 地质云全国地热资源数据与信息服务系统. 地热潜力[EB/OL]. (2022-12-06) [2022-12-06]. <https://222.223.214.100:3068/?code=6004c690c4314cb486ee812839013d8b&state=helloWelcome#/zyql>.
- [36] 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.
- [37] 刘明, 李树志. 废弃煤矿资源再利用及生态修复现状问题及对策探讨[J]. 矿山测量, 2016, 44(3): 70–72, 127.
LIU Ming, LI Shuzhi. Study on problems and countermeasures of present situation of abandoned coal mine resource reuse and ecological restoration[J]. Mine Surveying, 2016, 44(3): 70–72, 127.
- [38] 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.
LIU Feng, LI Shuzhi. Discussion on the new development and utilization of underground space resources of transitional coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2205–2213.
- [39] 张波, 薛攀源, 刘浪, 等. 深部充填矿井的矿床-地热协同开采方法探索[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2824–2837.
ZHANG Bo, XUE Panyuan, LIU Lang, et al. Exploration on the method of ore deposit-geothermal energy synergetic mining in deep backfill mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2824–2837.
- [40] 赵玉娇, 刘浪, 文德, 等. 回收废料耦合地热换热系统的地下采场应用[J]. 能源与建筑, 2022, 256: 111703.

- [41] ZHAO Yujiao, LIU Lang, Wen De, et al. Experimental study of horizontal ground heat exchangers embedded in the backfilled mine stopes[J]. *Geothermics*, 2022, 100: 102344.
- [42] ZHANG Xiaoyan, XU Muyan, LIU Lang, et al. Experimental study on thermal and mechanical properties of cemented paste backfill with phase change material[J]. *Journal of Materials Research and Technology-JM&T*, 2020, 9(2): 2164–2175.
- [43] ZHANG Xiaoyan, ZHAO Min, LIU Lang, et al. Numerical simulation on heat storage performance of backfill body based on tube-in-tube heat exchanger[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 265: 120340.
- [44] ZHANG Xiaoyan, ZHAO Min, LIU Lang, et al. Phase-change heat storage backfill: Experimental study on rheological properties of backfill slurry with paraffin added[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 262: 120736.
- [45] ZHANG Xiaoyan, XU Muyan, LIU Lang, et al. Study on thermal performance of casing-type mine heat recovery device with phase change materials filling in annular space[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(12): 17577–17596.
- [46] ZHANG Xiaoyan, ZHAO Min, LIU Lang, et al. Numerical simulation on thermal accumulation of cemented tailings backfill[J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(7): 2221–2237.
- [47] 张小艳, 文德, 赵玉娇, 等. 矿山蓄热/储能充填体的热-力性能与传热过程[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 3158–3171.
- ZHANG Xiaoyan, WEN De, ZHAO Yujiao, et al. Thermal-mechanical properties and heat transfer process of heat storage/energy storage backfill body in mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(9): 3158–3171.
- [48] 亢方超, 唐春安. 基于开挖的增强型地热系统概述[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 185–193.
- KANG Wanchao, TANG Chun'an. Overviews of enhanced geothermal system (EGS) based on excavation in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(1): 185–193.
- [49] IRENA (2022), Renewable Energy Statistics 2022[R]. Abu Dhabi: The International Renewable Energy Agency, 2022.
- [50] 秦海岩. 十八大以来我国风电产业实现高质量发展[J]. 风能, 2022(9): 1.
- QIN Haiyan. Chinese wind power industry has achieved high-quality development since the 18th National Congress[J]. *Wind Energy*, 2022(9): 1.
- [51] 国家发展改革委. 国家能源局关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见(发改能源(2022)206号)[EB/OL]. [2022-12-7]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/11/content_5673015.htm.
- [52] 国际风力发电网. 全国各省2014-2020年风电利用小时数[EB/OL]. (2021-11-26). [2022-12-06]. <https://wind.in-en.com/html/wind-2412128.shtml>.
- [53] 郑舒虹. 中国可再生电力“供-输-需”协同度测算与优化研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2022.
- ZHENG Shuhong. Research on Calculation and Optimization of “supply-demand-demand” synergy degree of renewable power in China[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2022.
- [54] CHOI Yosoon, SONG Jinyoung. Review of photovoltaic and wind power systems utilized in the mining industry[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 75: 1386–1391.
- [55] Business News Americas. DeWind ships first turbine to Seawind for Veladero[EB/OL]. (2007-9-20) [2017-07-26]. http://www.bniamericas.com/news/mining/DeWind_ships_first_turbine_to_Seawind_for_Veladero.
- [56] BRADEN Bill. Great Gusto[J]. *Canadian Mining Journal*, 2012, 283:54–54.
- [57] ENERGATI. Canada Gets its First Large Wind and Energy Storage System. Energati [EB/OL]. (2014-9-12) [2022-12-06]. <http://www.energati.com/article/canada-gets-its-first-large-wind-and-energy-storage-system>.
- [58] Power Technology. El Arrayan Wind Farm. [EB/OL]. (2014-9-9) [2022-12-06]. <http://www.power-technology.com/projects/el-arrayan-wind-farm>.
- [59] United States Environmental Protection Agency. A Breath of Fresh Air for America's Abandoned Mine Lands[EB/OL]. (2012-3-20) [2022-12-06]. (<https://semspub.epa.gov/work/11/176038.pdf>).
- [60] Pennsylvania Wind Working Group. Wind Farms in Pennsylvania[EB/OL]. (2016-9-15) [2022-12-06]. <http://www.pawindenergynow.org/pa/farms.html>.
- [61] RAICHLE W. Brian, CARSON W. Richard. Wind resource assessment of the Southern Appalachian Ridges in the Southeastern United States[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13: 1104–1110.
- [62] 陈雷, 邢作霞, 陈明阳, 等. 基于运行曲线的机械式风力提水机组匹配性设计方法研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 465–470.
- CHEN Lei, XING Zuoxia, CHEN Mingyang, et al. Research on Matching design method of mechanical wind turbine based on running curve[J]. *Journal of Solar Energy*, 2022, 43(2): 465–470.
- [63] 苏亚欣, 毛玉如, 赵敬德. 新能源与可再生能源概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- SU Yaru, MAO Yuru, ZHAO Jingde. *Introduction to New and renewable energy*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [64] FRANKW Osterwald, JOHN B Sennetti. Preliminary investigation of seismic tremors in the general area of the Leyden coal mine gas-storage reservoir[R]. Colorado: Department of the Interior Geological Survey, 1973.
- [65] XIE H, ZHAO J, ZHOU H, et al. Secondary utilizations and perspectives of mined underground space[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2020, 96: 103129.
- [66] 邱华富, 刘浪, 王美, 等. 金属矿采矿-充填-建库协同系统及充填储库结构[J]. 石油学报, 2018, 39(11): 1308–1316.
- QIU Huafu, LIU Lang, WANG Mei, et al. Mining-backfill-storage building synergetic system in metal mine and its backfill storage structure[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(11): 1308–1316.
- [67] 彭振华, 李俊彦, 杨森, 等. 利用废弃石膏矿储存原油可行性分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(3): 470–475.
- PENG Zhenhua, LI Junyan, YANG Sen, et al. Feasibility Analysis of Utilization of Waste Gypsum Mine for Crude Oil

- Storage[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(3) : 470–475.
- [68] 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 coal mine: Principles, present situation and future[J]. Journal of China coal society, 2015, 40(5): 965–972.
- [69] 葛帅帅,冯国瑞,姚西龙,等.煤矿废弃井巷抽水储能理论与技术框架[J].煤炭工程,2021,53(7): 91–96.
GE Shuaishuai, FENG Guorui, YAO Xilong, et al. Theory and technical framework of pumped storage in abandoned wells and roadways[J]. Coal Engineering, 2021, 53(7): 91–96.
- [70] 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. A 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.
- [71] Menéndez J, Loredo J, Fernandez J M, et al. Underground pumped-storage hydropower plants with mine water in abandoned coal mines[C]//Proceedings of the IMWA 13th International Congress. 2017: 6–13.
- [72] 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 Shandong mining area. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016.
- [73] LUO Xing, WANG Jihong, DOONER Mark, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation[J]. Applied Energy, 2015, 137: 511–536.
- [74] PEJOVIC Stanislav, KARNEY Bryan, MARICIC Tihomir. Smart Grids better with integrated energy system[C]//2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC). Montreal, QC, Canada. 2009: 1–8.
- [75] 艾 芊,郝 然.多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J].电力系统自动化,2018,42(4): 2–10.
AI Qian, HAO Ran. Key Technologies and challenges of multi energy complementary, integrated and optimized energy systems[J]. Automation of Electric Power System, 2018, 42(4): 2–10.
- [76] GEIDL Martin, KOEPPEL Gaudenz, FAVRE-PERROD Patrick, et al. Energy Hubs for the future[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(1): 24–30.
- [77] GEIDL Martin, ANDERSSON, Göran. A modeling and optimization approach for multiple energy carrier power flow[C]//2005 IEEE Russia Power Tech, Saint Petersburg, Russia. 2005:1–7.
- [78] 熊 文,刘育权,苏万煌,等.考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J].电力自动化设备,2019,39(1): 118–126.
XIONG Wen, LIU Yuquan, SU Wanhuang et al. Optimal allocation of multiple energy storage in regional integrated energy system considering multiple energy complementarities[J]. Automation of Electric Power System, 2019, 39(1): 118–126.
- [79] 刁涵彬,李培强,王继飞,等.考虑电/热储能互补协调的综合能源系统优化调度[J].电工技术学报,2020,35(21): 4532–4543.
DIAO Hanbin, LI Peiqiang, WANG Jifei, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering complementary coordination of electric/thermal energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4532–4543.