DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.05.010

煤矿区综合能源微网架构及低碳运行优化研究

穆云飞[1,2,3*]，吴志军[1,2,3]，郭浩辰[1,2,3]，贾宏杰[1,2,3]，王成山[1,2,3]

（1. 智能电网教育部重点实验室（天津大学），天津 300072；2. 天津市智慧能源与信息技术重点实验室（天津大学），天津 300072；3. 天津大学电气自动化与信息工程学院，天津 300072）

摘要：在推行煤炭清洁开采、构建绿色低碳循环能源新发展格局的背景下，当前煤矿区能源的孤立开发方式和以煤炭发电、电网供电为主的供能模式已不再适应新形势，需要构建综合能源微网以增强煤矿区能源综合利用水平并控制碳排放量。本文讨论了煤矿区综合能源微网应用的基本需求及天然优势，提出了一种煤矿区综合能源微网架构并分析了蕴含的新能源发电、储能、伴生能源利用、多能耦合转换、能量优化调度等发展要素；建立了煤矿区的物质流–能量流–碳流枢纽模型，实现了针对典型煤矿区的综合能源微网碳能协同低碳运行优化。结果表明，将综合能源微网应用于煤矿区，能够发挥风、光、瓦斯、空气热、涌水热等资源优势并进行高效整合利用，储能装置则进一步提高供能与负荷需求的匹配度，充分降低煤矿区的电网购电量与用电碳排放量；煤矿区碳能协同低碳运行优化过程考虑了各类设备的碳能耦合关系，支持制定低碳经济的运行策略。煤矿区综合能源微网架构及碳能协同低碳运行优化，可为煤矿区经济社会高质量发展提供新的理念与技术支撑。

关键词：煤矿区；综合能源微网；物质流–能量流–碳流枢纽模型；碳能协同；低碳运行优化

中图分类号：R-1　　**文献标识码：**A

Integrated Energy Microgrids and Low-Carbon Operation Optimization of Coal Mining Areas

Mu Yunfei[1,2,3*], Wu Zhijun[1,2,3], Guo Haochen[1,2,3], Jia Hongjie[1,2,3], Wang Chengshan[1,2,3]

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education on Smart Power Grids (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Smart Energy and Information Technology of Tianjin Municipality (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Currently, the isolated development of energy in the coal mining areas and the energy supply mode based on coal power generation and grid power supply can no longer satisfy the requirements for implementing clean coal-mining and building a new energy development pattern that is green, low-carbon, and recyclable. Therefore, it is necessary to build integrated energy microgrids in the coal mining areas to enhance the comprehensive utilization of energy and control carbon emissions in these areas. This study explores the demand for and natural advantages of integrated energy microgrids application in the coal mining areas, proposes an integrated energy microgrid framework, and analyzes the development elements of the framework: new energy generation, energy storage, associated energy utilization, multi-energy coupling, and optimal scheduling of energy. A material–energy–carbon hub model is established in the coal mining areas, realizing low-carbon operation optimization based on carbon–energy synergy of integrated energy microgrids in typical coal mining areas. The results indicate that the application of integrated energy microgrids in coal mining areas can fully exploit and efficiently integrate the advantages of resources such as wind, solar energy, gas, air heat, and gushing water

收稿日期：2023-09-22；**修回日期：**2023-10-18

通讯作者：*穆云飞，天津大学电气自动化与信息工程学院教授，研究方向为综合能源系统运行与规划；E-mail: yunfeimu@tju.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“我国煤炭行业碳中和发展科学体系及战略路径研究”(2022-XBZD-09)；国家自然科学基金项目(52222704)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

heat, and energy storage devices can further improve the match degree between energy supply and load demand, thereby reducing the amount of power purchased from the power grid and the carbon emissions from electricity consumption in the coal mining areas. The low-carbon operation optimization process takes into account the carbon–energy coupling of various types of equipment and supports the formulation of low-carbon and economical operation strategies. This study is expected to provide new concepts and technical support for the high-quality economic and social development of coal mining areas.

Keywords: coal mining areas; integrated energy microgrids; material–energy–carbon hub model; carbon-energy synergy; low-carbon operation optimization

一、前言

为了抑制全球气温升高、应对全球气候变化，世界各国在控制和减少温室气体排放方面采取积极行动，我国也正式提出了碳达峰、碳中和（“双碳”）战略目标。然而，受制于以煤为主体的能源结构，我国碳减排压力极大[1,2]。富煤、贫油、少气是现实国情，在未来较长时期内以煤为主的能源结构较难改变，煤炭在能源安全中仍然发挥着兜底保障作用[3]。受“双碳”战略目标驱动，未来煤炭行业的发展将由“扩能保供、满足居民用煤”逐步转向“高质量地开发利用煤炭、满足居民美好生活需求”，有序降低煤炭能源消耗、加快煤炭开发利用的低碳化进程成为重要趋势。

在煤炭的开采、运输、转换、利用的全生命周期内，开采是产生碳排放的重要环节。尽管煤炭开采过程的碳排放仅占煤炭全生命周期碳排放的10%[4]，但作为工业过程所消耗的能源是相当可观的。2020年我国煤炭开采过程用能碳排放量为2.57×10^8 t，自2010年起吨煤电耗碳排放不断增长[5]。为此，需要高度重视煤炭开采过程的低碳化。《煤炭工业发展“十三五”规划》（2016年）[6]提出，因地制宜推广充填开采、保水开采、煤与瓦斯共采、矸石不升井等绿色开采技术。《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》（2022年）[7]要求，建立煤矿绿色发展长效机制，开展煤矿资源综合利用及矿区生态治理与修复，支持煤矿充填开采技术推广应用。整体上，煤矿区绿色低碳发展成为极具现实意义的技术与应用课题。

行业机构、专家学者就煤矿区绿色低碳发展开展了前瞻研究，如构建煤矿“减碳”有机体系、提出煤矿低碳运行动态优化模式[8]，支持煤炭与其他能源深度耦合发展、形成煤炭清洁利用新模式[9]，明确煤及共伴生资源精准协同开发、煤炭清洁高效利用、碳中和科学发展等创新方向[10]。虽然已有研究关注到煤矿区多能源共采、多能耦合发展的低碳潜力，但理论支撑不显充分、具体方案有待深化，制约了煤矿区新能源和伴生能源整合利用的推进程度。综合能源微网作为一种智慧型能源综合利用的区域网络，能够支持实现一定区域内电、冷、热、气等能源的高效集成，可为解决上述问题提供新的解决方案。

本文结合煤炭行业发展背景、煤矿区绿色低碳发展需求，将综合能源微网技术拓展应用到煤矿区，提出煤矿区综合能源微网架构并分析发展要素，建立煤矿区的物质流–能量流–碳流枢纽（MECH）模型，开展煤矿区综合能源微网碳能协同低碳运行优化，形成综合能源微网视角下煤矿区低碳化转型发展建议。

二、煤矿区综合能源微网的发展背景

（一）煤矿区综合能源微网应用的基本需求

当前，煤矿区绿色低碳发展尚处起步阶段，相关研究和应用存在一些问题。一是各类能源孤立地进行开发利用。我国煤矿单位产值能耗偏高，而矿井瓦斯、矿井余热等伴生能源未能得到充分利用，如煤矿瓦斯的综合利用率仅为38.2%，大量的瓦斯直接被排空[11]。实际上，煤矿区可获取的能源种类多样，如风、光等新能源，煤层气，矿井涌水等；但因矿区各单位的隶属关系及性质不同，难以从系统角度统筹多种能源的开发与利用[12]，致使能源多为孤立开发利用，带来了能源综合利用率低、用能碳排放强度高的情况。二是物质流、能量流、碳流的耦合关系复杂。随着煤矿区内综合能源微网的组成结构趋于复杂和多元，电、冷、热等能量流与瓦斯、矿井涌水等物质流高度耦合，加之不同能量流、物质流的碳排放特性差异明显，产生了极为复杂的物质流、能量流、碳流耦合关系。煤矿区内多能源综合利用与碳减排的协同互济，成为未来煤矿

区实现低碳运行的瓶颈环节。

综合能源微网明显改变传统配电网单一电力潮流的拓扑结构，集成连接在配电网下的分布式新能源、储能与负荷，进而开展整体设计与协同运行，将显著增强配电网与用户的能量互动性，最大化地促进新能源就地消纳。《“十四五”现代能源体系规划》（2022 年）提出，发展以消纳新能源为主的智能微网，实现与大电网的兼容互补[13]。过去 20 年，在“973 计划”“863 计划”“国家重点研发计划”等项目的支持下，微网技术研究与工程应用取得重大突破[14]。然而，我国煤矿区的的微网技术应用水平不高，煤矿能源的供给仍然依赖外部电网的电力和煤炭的燃烧发电，导致煤矿区大量的风、光、热、气等综合能源未能得到有效利用。

（二）煤矿区综合能源微网应用的基础条件

发挥煤矿区所具有的天然资源优势，由综合能源微网集成连接风、光、水、热、气等能源资源，将促进多种能源高效利用并为多类型负荷可靠供能，从而充分发挥煤矿区综合能源的节能减碳潜力，带来显著的经济社会和环保效益。

1. 风、光等新能源

我国太阳能和风能资源丰富，具有明显的地区差异性。太阳能具有西部地区多于中东部地区，高原、少雨干燥地区多，平原、多雨高湿地区少的分布特点[15]。风能在东北地区东部、内蒙古自治区中东部、新疆维吾尔自治区北部和东部、甘肃省西部和北部、青藏高原等区域最为密集。基于 2022 年我国太阳能、风能分布以及煤矿分布情况分析，我国大部分煤矿聚集区都具有较丰富的太阳能和风能资源[16]。这就为构建煤矿区综合能源微网，实现煤矿区清洁用能确定了能源基础。

2. 煤矿区伴生能源

一是煤矿瓦斯。在煤炭开采过程中，常产生大量的煤矿瓦斯。我国深埋在 2000 m 及以上的瓦斯气体资源约为 8×10^{12} m^3，几乎与陆地上常规天然气的资源总量相当[17]。对煤矿瓦斯加以利用，为煤矿区供电和供热，具有充足的资源条件。瓦斯中的主要成分 CH_4 是强温室气体，具有较 CO_2 更为显著的增温效益。我国煤炭开采过程中的 CH_4 排放量约占全国总排放量的 40%[18]，开展 CH_4 清洁利用可发挥显著的减排潜力。

二是矿井涌水。在煤矿生产过程中，大量的矿井涌水从矿井底部水仓涌至地面，携带着丰富的热能。在深度为 1 km 的矿井中，矿井涌水的温度通常为 45~65 ℃，部分地区的涌水温度超过 70 ℃ [19]。相比来自自然含水层的取水，矿井采矿产生的岩石和地下水之间具有更大的热交换面积，加之矿井的渗透性良好，利于大量产生带热能的地下水。

三是空气热。为了确保矿井生产安全，必须对矿井进行通风，通风量基本保持恒定。受地热作用后，矿井回风中蕴藏着大量的空气热。通常，煤矿深度每增加 30 m，回风温度就会升高 1 ℃ [20]；矿井回风的热资源具有温度恒定的优点，是较为稳定的余热资源，可满足煤矿区用热需求，具有很高的开发价值。

三、煤矿区综合能源微网架构及其要素

（一）煤矿区综合能源微网架构

本研究从煤矿区新能源和伴生能源综合利用角度出发，提出了煤矿区综合能源微网架构（见图 1），这一架构涵盖了能源供应、转换、存储、需求等环节。其中，电能供应包括电网、风电、光伏发电，热能供应包括瓦斯、空气热、矿井涌水，能源转换设备包括光伏机组（PV）、风电机组（WT）、瓦斯蓄热氧化装置（VOD）、空气源热泵（ASHP）、水源热泵（WSHP）、电制冷（EC）、吸收式制冷（AC），能源存储设备包括电储能（ES）、热储能（TS），能源需求包括电、冷、热等类型的负荷。

煤矿区综合能源微网相比传统的供能模式具有三方面的新特征。① 集成高效。集成了风、光等新能源以及瓦斯、地下水热、空气热等伴生能源，可实现多种形式能源之间的互补协同，在满足多元化用能需求的同时提高能源综合利用率。② 灵活可调。多能互补特性和储电、储热等储能装置赋予了其灵活可调能力，构成了稳定、清洁、高效的供能系统，可满足电、冷、热等多种用能需求。从电网的角度看，等效于电网中的发电机或负荷，又是功率可调、具有模块化特征的整体单元。③ 低碳环保。在煤矿区生产和生活负荷得到满足的前提下，优先利用环保性更高的新能源和伴生能源，切实降低对煤炭发电和电网供电的依赖，从而减少煤矿区的用能碳排放量。

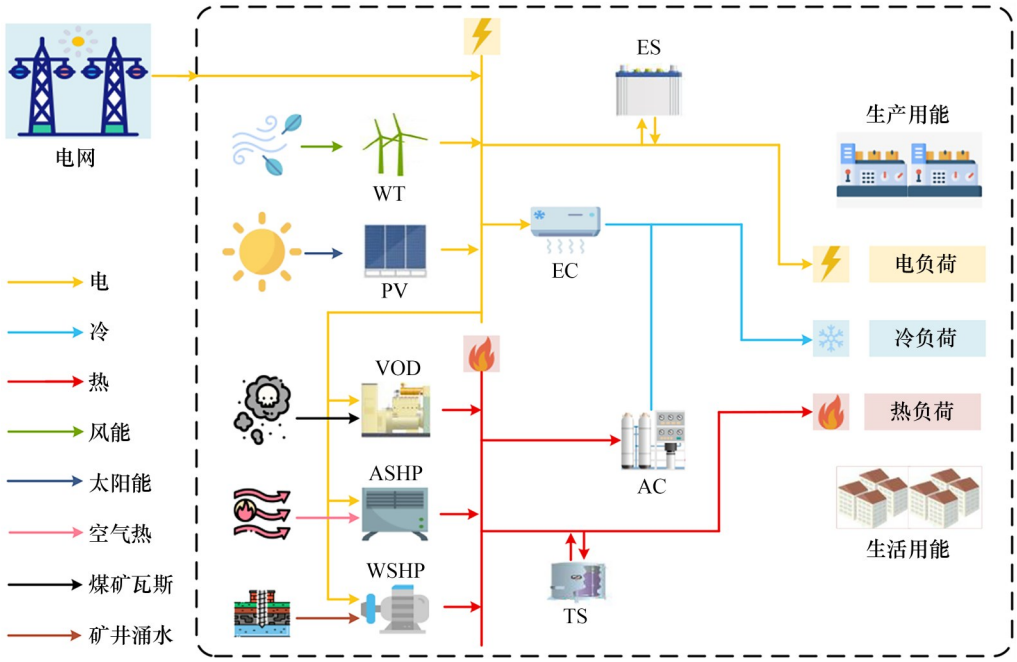


图1　煤矿区综合能源微网架构

（二）煤矿区综合能源微网要素分析

煤矿区综合能源微网集成了新能源发电、储能、能量优化调度等方面的技术要素，用于协调特性各异的多种能源，实现多能源协同互补，进而提高煤矿区能源综合利用水平。

1. 新能源发电

煤矿区的煤炭开采不可避免地造成区域性土地塌陷。我国23个省份的151个县市，采煤沉陷区的总面积超过3×10^7亩（1亩≈666.7 m^2）[21]。在采煤沉陷区发展风电、光伏发电，可有效利用被破坏的闲置土地，改善煤矿区能源结构以降低碳排放量。部分地区结合当地采煤沉陷区现状、系统调节消纳能力等情况，推动在采煤沉陷区发展光伏发电[22]，已有多处“风电光伏+采煤沉陷区治理”项目开始运行（见表1）。

2. 储能

与传统微网相比，煤矿区综合能源微网在面临风、光等新能源出力波动的不确定性以外，还面临因矿井环境及地质条件复杂、生产设备检修等因素干扰而带来的能源和生产用能不确定性。在煤矿区综合能源微网中，需要提高生产用能负荷与新能源、伴生能源的匹配度，降低煤矿区多重不确定性对系统安全稳定运行的不利影响。也要注意到，煤矿区对井筒保温、井下制冷、矿井供电等类型的能源有着独特而刚性的需求，安全性要求最高，可调节的柔性负荷较少。为此，在不改变用能需求的前

表1　“风电光伏+采煤沉陷区治理”项目

地点	名称	概况
福建大田	大田矿区“特色光伏小镇”[23]	2016年启动，在废弃矿山上建设光伏发电项目，重新利用的煤矿区舍弃土地约150亩
安徽淮南	潘阳漂浮式光伏[24]	对于煤矿区地面下沉形成的沉陷水域，上层安装漂浮式光伏发电组件，下层开展水产养殖，运营期内可节省4.1×10^5 tce，减少排放1.222×10^6 t CO_2
广东平远	东石镇废弃铁矿区光伏电站[25]	在原尖山矿区租赁1645.5亩土地，建设50 MW光伏发电项目，总投资约4.5亿元
安徽阜阳	新能源大型“风光储”基地[26]	利用闲置煤矿塌陷区建设新能源大型“风光储”基地，包括550 MW风电场、650 MW光伏电站、300 MW·h/600 MW·h储能电站

提下，利用储能技术平移负荷，可促进新能源和伴生能源的利用与消纳，维持系统能源供需平衡，保障供能质量，降低对电网供电的依赖。

现有的煤矿区储能技术，除铅酸电池、锂离子电池、钠硫电池等电化学储能[27]，显热、潜热、热化学储热等储热 / 储冷形式[28]之外，还包括结合煤矿区地质特征发展起来的矿井储能，如煤矿区抽水蓄能、压缩空气储能。抽水蓄能是煤矿区常用的物理储能方式，具有使用寿命长、效率高、成本低等优点。煤矿区抽水蓄能技术发展条件相对明确，涌现出了煤矿地下水库、矿井水循环利用与抽水蓄能发电一体化等技术构想[29]。压缩空气储能主要采用煤矿区可再生能源或电网负荷低谷时的剩余电力，对采空区空气进行压缩，随后在用电高峰时释放高压空气发电，为废弃煤矿地下空间的进一步开发利用创造了需求。废弃煤矿地下储能库建设、地下储能库密封性及稳定性特征、废弃煤矿地下空间压缩空气储能实施挑战等获得了深入研究[30]。

3. 伴生能源利用

近年来，煤矿区的瓦斯、地下涌水、空气热等伴生能源利用课题受到较多关注。受不同瓦斯开发方式及开发阶段的影响，煤矿瓦斯浓度分布范围较广，需要针对性开展利用[31]。我国初步形成了瓦斯全浓度利用技术体系，如浓度>30% 的瓦斯用于深冷液化提纯，浓度为 8%~30% 的瓦斯用于发电，浓度<8% 的瓦斯用于蓄热氧化[32]。瓦斯深冷液化提纯基于瓦斯气体成分在不同气压条件下的沸点差异性，在低温低压条件下分离出 CH_4 与其他氮氧化物[33]。瓦斯发电指将浓度为 8%~30% 的瓦斯经稳浓脱水处理后送入发电机进行燃烧发电[34]。瓦斯蓄热氧化指将浓度<8% 的瓦斯经混配稳浓处理后送入蓄热氧化装置产生热能[35]，逐渐成为处理极低浓度瓦斯的主流技术形式。

在煤矿区空气热和涌水热利用方面，主要采用热泵将矿井回风、井下涌水中的低热源转换为可利用的高位热能，以此实现其余热再利用。对于矿井回风空气热，可采用空气源热泵提取乏风中的空气热；根据回风是否直接引入热泵，将空气源热泵取热分为直蒸式、间蒸式 2 种[36]。对于矿井涌水热，可采用水源热泵消耗电能，将水中的低位热能吸收并转化为高位热能，相应处理是目前煤矿区低温余热利用的最有效形式[37]。

4. 多能耦合转换

煤矿区综合能源微网中，源端不同能源资源之间具有时空分布的显著差异性。通过多能耦合转换技术，实现风、光、电、热、气等资源的协同，由此增强煤矿区综合能源微网的灵活调节能力。

以煤矿区综合能源微网架构为例，风电、光伏发电、电网购电等，既可为电负荷提供电能，也可通过 EC 转化为冷能供冷负荷使用；瓦斯蓄热氧化产生的热能以及涌水热、空气热，既可为热负荷供热，也可通过 AC 转化为冷能供冷负荷使用。多能耦合转换技术实现煤矿区综合能源微网中多种异质能源之间的协调互补，更好满足多元化用能需求，提高能源综合利用效率。

5. 能量优化调度

能量优化调度指根据分布式电源出力预测、微网用能需求等数据，按照特定的优化目标和约束条件来制定微网运行的调度策略；通过对分布式电源、储能设备、负荷的灵活调度，实现综合能源微网在特定目标下的优化运行。综合能源微网的能量优化调度旨在充分挖掘不同能源之间的互补替代性，以多种能源互补协同来提高能源综合利用效率，这与传统能源系统中各类能源相互独立运行存在显著区别。拓展微网能量优化调度技术应用，通过灵活调度风、光、地下涌水、空气热、瓦斯等能源，增强煤矿区的能源供需平衡能力。

针对煤矿区能量优化调度的研究已有开展。根据煤矿资源禀赋及地质特征，将电转气与瓦斯存储利用相结合，构建了含电转气 – 瓦斯掺混的煤矿多资源循环利用架构；面向以煤炭伴生资源为主的不确定性波动，提出了基于信息间隙决策理论的系统鲁棒调度策略，用于电转气煤矿多能互补研究[38]。构建了基于光 – 储 – 气 – 废弃矿井抽蓄的多能耦合矿山多能互补系统，发展了考虑总运行成本、弃光量最小化的多目标优化调度技术[39]。然而，厘清煤矿区多能源与碳排放的耦合机理、发挥碳能协同潜力等研究仍待深化。

四、煤矿区综合能源微网碳能协同低碳运行优化

本研究面向煤矿区综合能源微网碳能协同状态下低碳运行优化的应用需求，考虑克服已有研究中

的薄弱环节，在能源枢纽（EH）模型[40]的基础上，统一建模煤矿区的物质流、能量流、碳流，构建了煤矿区综合能源微网MECH模型，以更深刻描述物质流、能量流、碳流的复杂耦合关系。

（一）煤矿区综合能源微网MECH模型

对于煤矿区综合能源微网架构（见图1），MECH模型涵盖物质流、能量流、碳流，其中物质流包括瓦斯、空气热、矿井涌水，能量流包括电能、热能，碳流包括风电和光伏发电机组碳排放、各耦合设备碳排放、源自电网购电的碳排放。MECH模型表示如下：

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}C_1\\C_2\\\vdots\\C_m\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}D_1\\D_2\\\vdots\\D_m\end{bmatrix}\circ\begin{bmatrix}R_1\\R_2\\\vdots\\R_m\end{bmatrix}=\boldsymbol{D}\circ\boldsymbol{R} \tag{1}$$

式（1）中，D_k为耦合设备k的能流输出，k=1，2，…，m分别代表VOD、ASHP、WSHP、EC、AC；R_k为耦合设备k的全生命周期碳排放系数；C_k为D_k对应的碳排放量；“∘”为Hadamard乘子，表示两个相同维度的向量对应元素相乘。各个耦合设备数学模型，详见文献[41]。

由耦合设备数学模型、EH模型，可得耦合设备能流输出$\boldsymbol{D}$与系统能量流及物质流输入的关系：

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}s_{11}&\cdots&s_{1a}&s_{1(a+1)}&\cdots&s_{1(a+b)}\\s_{21}&\cdots&s_{2a}&s_{1(a+1)}&\cdots&s_{2(a+b)}\\\vdots&\ddots&\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\s_{m1}&\cdots&s_{ma}&s_{m(a+1)}&\cdots&s_{m(a+b)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}E_1\\\vdots\\E_a\\M_{a+1}\\\vdots\\M_{a+b}\end{bmatrix}=\boldsymbol{S}\cdot\boldsymbol{G} \tag{2}$$

式（2）中，$\boldsymbol{G}$为物质流及能流输入向量；$\boldsymbol{S}$为各设备能流输出与系统物质流及能流输入关系的耦合矩阵；E_i表示输入系统的能量流，i=1，2，…，a；M_i表示输入系统的物质流，i=a+1，…，a+b；S_{ki}表示耦合设备k输出与第i个物质流或能流输入的耦合系数。

（二）基于MECH的煤矿区综合能源微网碳能协同运行优化模型

利用MECH模型可得煤矿区综合能源微网物质流或能流变化引起的碳流变化规律，据此构建节能降碳协同的煤矿区综合能源微网运行优化模型：

$$\begin{cases}\min f=f_{\mathrm{p}}+f_{\mathrm{m}}+f_{\mathrm{b}}+f_{\mathrm{c}}\\f_{\mathrm{p}}=\sum\limits_{t=1}^{T}c_{\mathrm{e},t}P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{grid}}\Delta t\\f_{\mathrm{m}}=\sum\limits_{t=1}^{T}\Delta t(\sum\limits_{k=1}^{m}\mu_k D_{k,t}+\mu_{\mathrm{PV}}P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{PV}}+\mu_{\mathrm{WT}}P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{WT}}+\\\quad\mu_{\mathrm{ES}}P_t^{\mathrm{ES}}+\mu_{\mathrm{TS}}P_t^{\mathrm{TS}})\\f_{\mathrm{b}}=\sum\limits_{t=1}^{T}\Delta t(\sum\limits_{k=1}^{m}\omega_k D_{k,t}+\omega_{\mathrm{PV}}P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{PV}}+\omega_{\mathrm{WT}}P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{WT}}+\\\quad\omega_{\mathrm{ES}}P_t^{\mathrm{ES}}+\omega_{\mathrm{TS}}P_t^{\mathrm{TS}})\\f_{\mathrm{c}}=\lambda_{\mathrm{c}}C_{\mathrm{CO_2}}\end{cases} \tag{3}$$

$$C_{\mathrm{CO_2}}=\sum_{t=1}^{T}\Delta t(R_{\mathrm{e}}P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{grid}}+R_{\mathrm{PV}}P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{PV}}+R_{\mathrm{WT}}P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{WT}}+\sum_{k=1}^{m}C_{k,t}+R_{\mathrm{ES}}P_t^{\mathrm{ES}}+R_{\mathrm{HS}}P_t^{\mathrm{TS}}) \tag{4}$$

式（3）中，f_{p}、f_{m}、f_{b}、f_{c}分别为购电成本、设备维护成本、设备折旧成本、碳排放成本；T为总时段数，Δt为间隔时间；$c_{\mathrm{e},t}$为t时刻的电价；$P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{grid}}$为$t$时刻的购电功率；$\mu_k$、$\mu_{\mathrm{PV}}$、$\mu_{\mathrm{WT}}$、$\mu_{\mathrm{ES}}$、$\mu_{\mathrm{TS}}$分别为设备$k$、PV、WT、ES、TS的单位功率维护成本；$D_{k,t}$、$P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{PV}}$、$P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{WT}}$、$P_t^{\mathrm{ES}}$、$P_t^{\mathrm{TS}}$分别为$t$时刻设备$k$、PV、WT、ES、TS的实际出力；$\omega_k$、$\omega_{\mathrm{PV}}$、$\omega_{\mathrm{WT}}$、$\omega_{\mathrm{ES}}$、$\omega_{\mathrm{TS}}$分别为设备$k$、PV、WT、ES、TS的折旧成本系数；$\lambda_{\mathrm{c}}$为碳排放成本系数；$C_{\mathrm{CO_2}}$为系统碳排放总量。式（4）中，$R_{\mathrm{e}}$、$R_{\mathrm{PV}}$、$R_{\mathrm{WT}}$、$R_{\mathrm{ES}}$、$R_{\mathrm{HS}}$分别为电网购电、PV、WT、ES、TS的全生命周期碳排放系数；$C_{k,t}$为t时刻耦合设备k的碳排放量。

式（1）～（4）中，设备的碳排放系数均是根据其全生命周期碳排放折算的单位功率碳排放系数。将各个设备的生命周期划分为设备生产、运输、建设、运行、退役等环节，分别核算各环节的碳排放量，累加可得全生命周期的碳排放[42]，最终将各个设备的全生命周期碳排放总量与总发电量或耗电量的比值作为其单位功率碳排放系数。各个设备的全生命周期碳排放系数核算方式详见文献[43]。

优化约束条件包括MECH等式约束（即式（1）和（2））、电冷热平衡约束、设备功率约束、ES约束、TS约束等[44]。构建的煤矿区综合能源微网碳能协同运行优化模型属于线性优化问题，故可采用单纯形法进行求解[45]，相应算法流程图如图2所示。

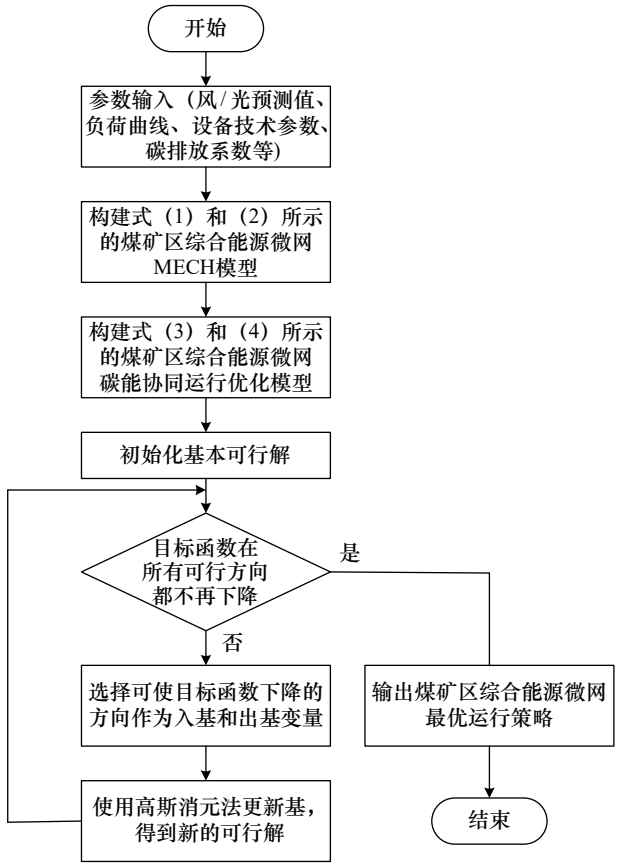
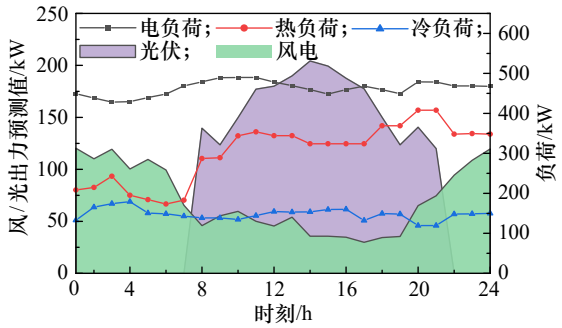


图2　煤矿区综合能源微网碳能协同低碳运行优化流程图

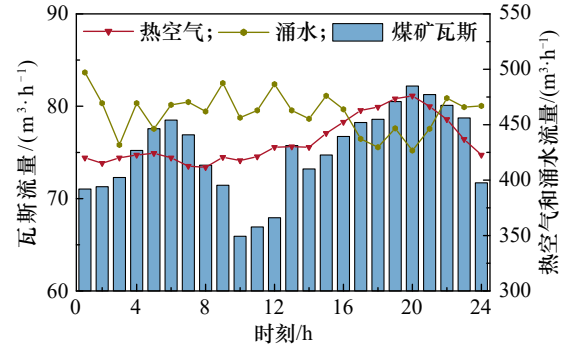
（三）煤矿区综合能源微网碳能协同运行优化模型应用结果分析

针对典型的煤矿区综合能源微网架构，完成了基于MECH的碳能协同运行优化分析。在系统设定中，电负荷需求包括采煤工作面、掘进工作面、办公及生活区等处的用电；热负荷主要有工业厂房采暖、行政建筑采暖、浴室等低品位热能需求。采用锂离子电池储能、显热存储等技术方案[46]。系统运行优化的周期为1 d，即总时段 T=24 h，间隔时间 Δt=1 h。在煤矿区的电冷热负荷、风电、光伏发电、伴生能源预测方面，对大量的历史数据进行场景缩减，得到典型日场景数据（见图3）[44]。各设备的技术参数、全生命周期碳排放系数，分时电价，其他参数等详见文献[43,44]。

为了验证可再生能源发电、储能装置在煤矿区综合能源微网运行优化中的作用，设置了多种场景（见表2）。不同场景下煤矿区综合能源微网的购电成本、维护成本、碳排放量如表3所示。对比场景1和场景2可见，安装PV降低了1730.62元的运行成



(a) 典型场景的负荷、风电和光伏出力预测值



(b) 煤矿区伴生能源预测值

图3　煤矿区电冷热负荷、风电、光伏、伴生能源预测值

表2　煤矿区综合能源微网运行的场景设置

场景	WT	PV	ES	HS	耦合设备（VOD、ASHP、WSHP、EC、AC）
1	√	√	√	√	√
2	√	×	√	√	√
3	×	√	√	√	√
4	×	×	√	√	√
5	√	√	×	√	√
6	√	√	√	×	√
7	√	√	×	×	√

注：√表示该场景下安装了该设备；×表示该场景下未安装该设备。

表3　各场景下煤矿区综合能源微网的运行成本和碳排放量

场景	总成本/元	购电成本/元	维护成本/元	折旧成本/元	碳排放量/kg
1	8236.88	7199.46	266.05	99.57	9115.12
2	9967.50	8826.53	193.64	76.94	11 987.09
3	9277.36	8147.32	215.25	80.95	11 458.52
4	11 042.94	9774.42	142.85	58.32	14 835.35
5	8417.61	7333.56	260.38	92.02	9980.67
6	8349.63	7287.64	262.21	94.56	9598.52
7	8488.69	7377.92	256.03	86.74	10 506.36

本、2871.97 kg的碳排放量。对比场景1和场景3可见，安装WT降低了1040.48元的运行成本、2343.4 kg的碳排放量。对比场景1和场景4可见，同时安装PV和WT，可降低2806.06元的运行成本、5720.23 kg的碳排放量；相应收益大于分别安装PV和WT，表明同时安装PV和WT具有协同增效作用。对比场景1和场景5~7可见，安装ES、HS也可降低运行成本和碳排放量，同时安装ES和HS也具有协同增效作用。

为进一步体现PV、WT、储能装置对煤矿区综合能源微网运行策略的影响，对比了场景1和场景4下系统的电能供需情况（见图4）。场景1中00:00—06:00、20:00—24:00时段，系统主要采用WT供能，在不足以满足负荷用电需求时辅以电网购电；在07:00—19:00时段，利用WT、PV互补可完全满足系统的用电需求，无需再向电网购电；电储能在PV的出力高峰期（08:00—13:00）充电，在新能源出力不足时段（19:00—24:00）放电，以提高光伏消纳能力。而场景4中，系统用电全部依赖于电网，仅靠电储能在电价低谷时段（00:00—07:00）充电，并在电价较高时段（12:00—14:00）放电，可一定程度上辅助降低购电成本。

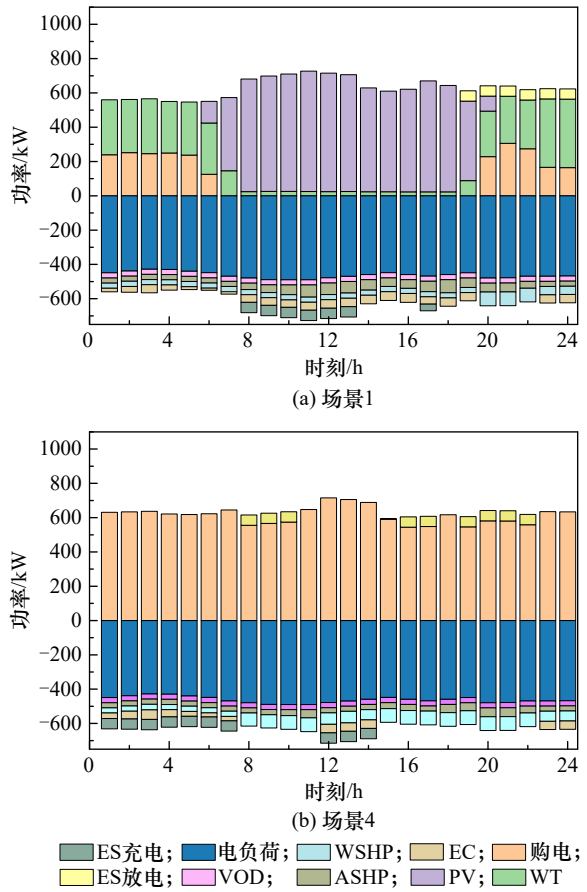


图4　场景1和场景4下系统电能供需情况对比

通过MECH模型得到场景1下各个设备的碳排放情况如图5所示，可见煤矿区综合能源微网的碳排放主要源自电网购电。当08:00电负荷开始增长时，购电碳排放量下降，这是因为PV出力增加，系统以低碳排放的光伏发电代替了高碳排放的电网供电，降低了系统的碳排放量。WSHP碳排放量自08:00开始增长，而VOD、ASHP的每小时碳排放量几乎保持不变。这是因为，当热负荷增加时，尽管VOD、WSHP、ASHP都可为负荷供热，但是系统优先选择碳排放较低的WSHP出力，以尽可能减少因负荷增长带来的碳排放。因此，优化煤矿区综合能源微网的运行过程，可充分考虑各个设备的碳能耦合关系，获得低碳经济的运行成效。

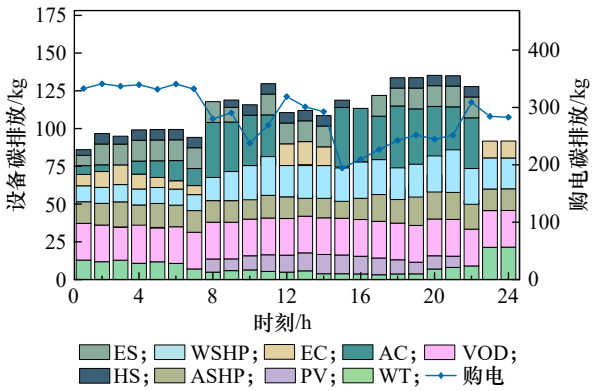


图5　由MECH模型得到的场景1下各设备碳排放量

五、结语

本文提出了煤矿区综合能源微网架构，构建了煤矿区MECH模型，发展了煤矿区综合能源微网碳能协同低碳运行优化技术并据此完成典型煤矿区应用分析。研究发现，将煤矿区的风、光、瓦斯、空气热、涌水热等资源进行整合利用，能够充分发挥各类能源形式的资源优势，通过多能互补协同来降低煤矿区的电网购电量与用电碳排放量；储能装置与风电、光伏发电相结合，进一步提高供能与负荷需求的匹配度，促进更高程度的新能源消纳。

煤矿区综合能源微网的MECH模型是对煤矿区物质流、能量流、碳流之间复杂耦合关系的良好表

征，得到的煤矿区综合能源微网物质流或能流变化引起的碳流变化，为煤矿区综合能源微网碳能协同运行优化提供了模型支撑。发展的煤矿区综合能源微网碳能协同低碳运行优化技术，是发挥煤矿区碳能协同作用的直接依托，兼顾各个设备的能效与碳排放特性以进行能源梯级利用，切实提升煤矿区用能的经济性和环保性。基于发展背景、架构与要素、低碳运行优化等方面的研究梳理，提出我国煤矿区综合能源微网的发展建议如下。

一是加强煤矿区新能源与伴生能源的整合利用，加快构建煤矿区综合能源微网。以电网供电为主的煤矿区传统供能模式与发展趋势不相适应，需要挖掘煤矿区综合能源资源禀赋，构建煤矿区综合能源微网。能源整合利用不是多种能源及用能过程的简单组合与叠加，而是重在能源替代、能源转化品位对口互补，引入蓄热氧化装置、多类型热泵、电制冷等耦合设备，在系统层面上进行不同品位能源的综合互补利用，促进矿区能源结构的优化革新。在保障用能需求的前提下，尽快实现新能源、伴生能源对常规能源的替代，最大限度地节约常规能源。

二是综合考虑煤矿区的物质流、能量流、碳流，规模化应用煤矿区综合能源微网碳能协同运行优化技术。在煤矿区综合能源微网运行的优化过程中，宜综合考虑电、冷、热等能量流，瓦斯、涌水、乏风等物质流，兼顾设备能效、碳排放特性来制定经济且低碳的微网运行调度策略，以技术能力升级推动碳能协同格局下煤矿区的低碳化转型。

三是发挥多类型储能在煤矿区综合能源微网运行优化中的关键作用。科学测算煤矿区的风、光能源和伴生能源规模，合理配备多类型的储能装置，支撑“风光气热储”互补联动；在提高新能源和伴生能源消纳能力的同时，直接减少电网购电的数量。探索应用矿井蓄热储能、矿井压缩空气储能等煤矿区新型储能方式，充分利用煤矿区丰富的物理空间，规模化构建储能能力，合理降低化学储能相关的投资规模。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: September 22, 2023; **Revised date:** October 18, 2023

Corresponding author: Mu Yunfei is a professor from the School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University. His major research fields include integrated energy system operation and planning. E-mail: yunfeimu@tju.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Scientific System and Strategic Path for Carbon Neutral Development of China’s Coal Industry” (2022-XBZD-09); National Natural Science Foundation of China project (52222704)

参考文献

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.

[2] 谢克昌. 面向 2035 年我国能源发展的思考与建议 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 1–7.
Xie K C. China’s energy development for 2035: Strategic thinking and suggestions [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 1–7.

[3] 张博, 孙旭东, 刘颖, 等. 能源新技术新兴产业发展动态与 2035 战略对策 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 38–46.
Zhang B, Sun X D, Liu Y, et al. Development trends and strategic countermeasures of China’s emerging energy technology industry toward 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(2): 38–46.

[4] 李姗姗, 袁亮. 煤炭工业全生命周期碳排放核算与影响因素 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2925–2935.
Li S S, Yuan L. Carbon emission accounting and influencing factors for whole life cycle of coal industry [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2925–2935.

[5] 任世华, 谢亚辰, 焦小淼, 等. 煤炭开发过程碳排放特征及碳中和发展的技术途径 [J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 60–68.
Ren S H, Xie Y C, Jiao X M, et al. Characteristics of carbon emission from coal development process and technological approaches for carbon neutral development [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 60–68.

[6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于印发煤炭工业发展“十三五”规划的通知 [EB/OL]. (2016-12-22) [2023-08-26]. https://www. ndrc. gov. cn/xxgk/zcfb/ghwb/201612/t20161230_962216.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on the issuance of the 13th Five-Year Plan for the development of the coal industry [EB/OL]. (2016-12-22) [2023-08-26]. https://www. ndrc. gov. cn/xxgk/zcfb/ghwb/201612/t20161230_962216.html.

[7] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 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 [EB/OL]. (2022-01-30)[2023-08-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/11/content_5673015.htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Opinions on improving institutional mechanisms and policy measures for green and low-carbon energy transition [EB/OL]. (2022-01-30)[2023-08-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/11/content_5673015.htm.

[8] 高蕊. “双碳”目标下煤矿低碳运行模式研究与探讨 [J]. 中国煤炭 [J]. 2022, 48(12): 102–108.
Gao R. Research and discussion on low carbon operation mode of

coal mine under the goals of carbon peak and carbon neutrality [J]. China Coal, 2022, 48(12): 102–108.

[9] 康红普, 王国法, 王双明, 等. 煤炭行业高质量发展研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(5): 130–138.
Kang H P, Wang G F, Wang S M, et al. High-quality development of China's coal industry [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(5): 130–138.

[10] 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 L, Zhang T, Zhang Q H, 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.

[11] 李全生, 张凯. 我国能源绿色开发利用路径研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 101–111.
Li Q S, Zhang K. The path for green development and utilization of energy in China [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 101–111.

[12] 唐晓城, 张伟, 任一鑫, 等. 煤炭矿区能源集成利用体系研究 [J]. 矿冶工程, 2014, 34(1): 110–114.
Tang X C, Zhang W, Ren, Y X, et al. Research on integrated energy-utilization system in coal mine [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2014, 34(1): 110–114.

[13] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于印发《"十四五"现代能源体系规划》的通知 [EB/OL]. (2022-01-29)[2023-08-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm.
National Development and Reform Commission. Notice on the issuance of the Fourteenth Five-Year Plan for modern energy system [EB/OL]. (2022-01-29)[2023-08-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm.

[14] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1–18
Liu C, Zhuo J K, Zhao D M, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1–18.

[15] 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 [EB/OL]. (2022-04-28)[2023-08-26] https://www.cma.gov.cn/zxgkigkonrloxbg1202204120220429_4798342.html.
China Meteorological Administration Wind Energy Solar Energy Center. China's wind and solar energy resources annual outlook bulletin in 2021 [EB/OL]. (2022-04-28)[2023-08-26] https://www.cma.gov.cn/zxgkigkonrloxbg1202204120220429_4798342.html.

[16] 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 S M, Liu L, Zhao Y J, 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.

[17] 张志刚, 霍春秀. 煤矿区煤层气利用技术研究进展 [J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(4): 59–64.
Zhang Z G, Huo C X. Research progress of CBM utilization technology in mining areas [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(4): 59–64.

[18] 邱中建, 赵文智, 胡素云, 等. 我国天然气资源潜力及其在未来低碳经济发展中的重要地位 [J]. 中国工程科学, 2011, 13(6): 81–87.
Qiu Z J, Zhao W Z, Hu S Y, et al. The natural gas resource potential and its important status in the coming low-carbon economy [J]. Strategic Study of CAE, 2011, 13(6): 81–87.

[19] 沈金山, 王春信, 李美晨, 等. 低温矿井涌水用于煤矿井下集中降温的应用研究 [J]. 煤炭技术, 2022, 41(8): 123–125.
Shen J S, Wang C X, Li M C, et al. Application of low-temperature mine surge water for centralized cooling in underground coal mines [J]. Coal Technology, 2022, 41(8): 123–125.

[20] 郭念波. 矿井高温热害综合治理技术的探索和实践 [J]. 中国煤炭, 2015, 41(1): 117–122.
Guo N B. Exploration and practice of comprehensive treatment technology on coal mine high-temperature heat-harm [J]. China Coal, 2015, 41(1): 117–122.

[21] 胡炳南, 郭文砚. 采煤沉陷区损害防治对策与技术发展方向 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 21–29.
Hu B N, Guo W Y. Countermeasures for damage prevention and control in coal mining subsidence area and direction of technology development [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 21–29.

[22] 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 [EB/OL]. (2021-09-20)[2023-09-15]. https://www.163.com/dy/article/GKBH7P0P0511CVT1.html.
Letter requesting information on the development of photovoltaic power generation using damaged land in coal mining subsidence areas [EB/OL]. (2021-09-20)[2023-09-15]. https://www.163.com/dy/article/GKBH7P0P0511CVT1.html.

[23] 霍冉, 徐向阳, 姜耀东. 国外废弃矿井可再生能源开发利用现状及展望 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 267–273.
Huo R, Xu X Y, Jiang Y D. Status and prospect on development and utilization of renewable energy in abandoned mines abroad [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 267–273.

[24] 吕荣洁. 光伏+应用创新样本: 昔日的"采煤沉陷区"变成今天的"水上发电站" [J]. 新能源经贸观察, 2018 (9): 87–89.
Lyu R J. Innovative sample of PV+ application: The former "coal mining subsidence area" becomes today's "water power station" [J]. Energy Outlook, 2018 (9): 87–89.

[25] 朱双玲, 赖强, 吴易平. 平远废弃矿区变身光伏电站 [J]. 源流, 2017 (6): 19.
Zhu S L, Lai Q, Wu Y P. Pingyuan abandoned mining area transformed into photovoltaic power station [J]. Origins, 2017 (6): 19.

[26] 罗锦程, 邓毅, 侯贵光, 等. 清洁能源产业新兴固体废物环境管理的现状、国际经验与启示 [J]. 环境保护, 2023, 51(Z2): 41–45.
Luo J C, Deng Y, Hou G G, et al. Current situation, international experience and insights of environmental management of emerging solid waste in clean energy industry [J]. Environmental Protection, 2023, 51(Z2): 41–45.

[27] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2022年中国储能技术研究进展 [J]. 储能科学与技术, 2023, 12(5): 1516–1552.
Chen H S, Li H, Xu Y J, et al. Research progress of energy storage technology in China in 2021 [J]. Energy Storage Science and

Technology, 2023, 12(5): 1516–1552.

[28] 曾光, 纪阳, 符津铭, 等. 热储能技术研究现状、热点趋势与应用进展 [J/OL]. 中国电机工程学报, [2023-05-05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230504.1952.006.html.
Zeng G, Ji Y, Fu J M, et al. Research status, hot trends and application progress of thermal energy storage technology [J/OL]. Proceedings of the CSEE, [2023-05-05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230504.1952.006.html.

[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.
Xie H P, Hou Z M, Gao F, 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.

[30] 赵同彬, 刘淑敏, 马洪岭, 等. 废弃煤矿压缩空气储能研究现状与发展趋势 [J/OL]. 煤炭科学技术, [2023-08-10]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20230810.1402.001.html.
Zhao T B, Liu S M, Ma H L, et al. Research status and development trend of compressed air energy storage in abandoned coal mines [J]. Coal Science and Technology, [2023-08-10]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20230810.1402.001.html.

[31] 郭继圣, 张宝优. 我国煤层气(煤矿瓦斯)开发利用现状及展望 [J]. 煤炭工程, 2017, 49(3): 83–86.
Guo J S, Zhang B Y. Present situation and prospect of coalbed methane development and utilization in China [J]. Coal Engineering, 2017, 49(3): 83–86.

[32] 张志刚, 霍春秀. 煤矿区煤层气利用技术研究进展 [J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(4): 59–64.
Zhang Z G, Huo X C. Research progress of CBM utilization technology in mining areas [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(4): 59–64.

[33] 周言安, 杨洋. “双碳”目标下我国煤矿瓦斯利用技术发展方向 [J]. 煤炭技术, 2022, 41(8): 146–149.
Zhou Y A, Yang Y. Development direction of coal mine gas utilization technology to realize carbon peak and carbon neutrality in China [J]. Coal Technology, 2022, 41(8): 146–149.

[34] 岑可法, 倪明江, 高翔, 等. 煤炭清洁发电技术进展与前景 [J]. 中国工程科学, 2015, 17(9): 49–55.
Cen K F, Ni M J, Gao X, et al. Progress and prospects on clean coal technology for power generation [J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(9): 49–55.

[35] 熊云威, 肖正. 煤矿瓦斯氧化利用安全保障系统设计与应用 [J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(1): 43–46, 51.
Xiong Y W, Xiao Z. Design and application of safeguard system for coal mine gas oxidation [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2018, 45(1): 43–46, 51.

[36] 向艳蕾, 杨允, 闫文瑞, 等. 煤矿回风余热资源利用技术现状与展望 [J]. 煤质技术, 2021, 36(6): 77–83.
Xiang Y L, Yang Y, Yan W R, et al. Current status and prospect of waste heat utilization technologies of return air in coal mines [J]. Coal Quality Technology, 2021, 36(6): 77–83.

[37] 段泽敏, 马素霞, 郭千中. 矿井余热资源利用技术 [J]. 煤矿安全, 2014, 45(9): 68–71.
Duan Z M, Ma S X, Guo Q Z. Mine waste heat resources utilization technology [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(9): 68–71.

[38] 吕超贤, 孙文, 梁睿, 等. 基于信息间隙决策理论的含电转气煤矿综合能源系统鲁棒调度 [J/OL]. 高电压技术, [2023-06-09]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230358.
Lyu C X, Sun W, Liang R, et al. Information gap decision theory-based robust scheduling of coal mine integrated energy systems with power-to-gas [J/OL]. High Voltage Engineering, [2023-06-09]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230358.

[39] 梁喆, 李梅, 周孟然. 含P2G和混合电储能的矿山综合能源系统多目标优化调度 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 122–129.
Liang Z, Li M, Zhou M R. Multi-objective optimal dispatch of mining area integrated energy system with P2G and hybrid electric energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 122–129.

[40] 黄武靖, 张宁, 董瑞彪, 等. 多能源网络与能量枢纽联合规划方法 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5425–5437.
Huang W J, Zhang N, Dong R B, et al. Coordinated planning of multiple energy networks and energy hubs [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5425–5437.

[41] Huang H X, Liang R, Lyu C X, et al. Two-stage robust stochastic scheduling for energy recovery in coal mine integrated energy system [J]. Applied Energy, 2021, 290: 116759.

[42] 王泽森, 石岩, 唐艳梅, 等. 考虑LCA能源链与碳交易机制的综合能源系统低碳经济运行及能效分析 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1614–1626, 1858.
Wang Z S, Shi Y, Tang Y M, et al. Low carbon economy operation and energy efficiency analysis of integrated energy systems considering LCA energy chain and carbon trading mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1614–1626, 1858.

[43] 李昊泉, 袁乐, 徐懂理, 等. 基于生命周期理论的区域综合能源系统-配电网博弈优化调度 [J/OL]. 电力系统及其自动化学报, [2023-09-20]. https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001349.
Li H Q, Yuan L, Xu B L, et al. Game optimization scheduling of regional integrated energy system-distribution network based on life cycle theory [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, [2023-09-20]. https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001349.

[44] Hu H J, Sun X Y, Zeng B, et al. Enhanced evolutionary multi-objective optimization-based dispatch of coal mine integrated energy system with flexible load [J]. Applied Energy, 2021, 307: 118130.

[45] 刘昱良, 李姚旺, 周春雷, 等. 电力系统碳排放计量与分析方法综述 [J/OL]. 中国电机工程学报, [2023-06-27]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223452.
Liu Y L, Li Y W, Zhou C L, et al. Overview of carbon measurement and analysis methods in power systems [J/OL]. Proceedings of the CSEE, [2023-06-27]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223452.

[46] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158–169.
Xie X R, Ma N J, Liu W, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158–169.