煤炭零碳开发关键基础理论与技术路径探析

吴　刚[1,2],张富凯[1,2],张　磊[1,2],吴恩国[1,2],梁敏富[1,2]
(1. 中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州　221116;2. 中国矿业大学 智能化开采研究中心,江苏 徐州　221116)

摘要:“双碳”战略背景下,探索煤炭零碳开发路径对保障能源安全与绿色低碳转型具有重要意义.本研究以能源系统协同优化、瓦斯资源化抽采、CO_2封存与生态碳汇为核心,构建了“减碳-替代-封存-循环”四位一体的技术体系.基于多学科理论融合与晋陕蒙矿区实证,系统解析了该技术体系的实施路径、协同机制与适配边界,明确了煤炭零碳开发从理论验证向规模化推广的潜在路径.研究表明:能源系统协同优化通过多能互补与智能调度,显著提升可再生能源消纳能力与系统弹性;瓦斯抽采结合碳市场机制,实现从灾害治理向“资源回收-碳减排”双目标转型;CO_2封存采用采空区功能性充填与化学矿化协同方案,为井下空间资源化利用开辟新途径;生态碳汇通过地貌重塑与耐逆植被配置,形成采动区碳汇功能提升的可行方案.该体系为煤炭开发近零排放提供了系统解决路径,未来需重点突破复杂地质封存安全评估、技术经济性优化与标准体系构建等关键瓶颈,为煤炭行业融入新型能源体系提供系统性参考.

关键词:煤炭零碳开发;协同优化;碳封存;生态碳汇;技术体系
中图分类号:TD 82;X 701　**文献标志码:**A　**文章编号:**1000-1964(2026)01-0014-14

Key fundamental theories and integrated technical pathways toward zero-carbon coal mining

WU Gang[1,2], ZHANG Fukai[1,2], ZHANG Lei[1,2], WU Enguo[1,2], LIANG Minfu[1,2]
(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Intelligent Mine Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Under the “dual carbon” strategy, exploring the path of zero-carbon coal development is of great significance for ensuring energy security and promoting a green, low-carbon transition. This study focuses on the collaborative synergistic energy optimization, coal mine methane (CMM) drainage and utilization, CO_2 sequestration and ecological carbon sequestration, establishing a comprehensive technological system integrating “emission reduction, energy substitution, CO_2 geological storage and carbon recycling”. Drawing on multi-disciplinary theory and field data from the Jin-Shaan-Mongolia mining cluster, the implementation roadmap, synergy mechanisms and applicability limits were systematically analyzed, and a scalable route from laboratory validation to commercial deployment was identified. The results show that coordinated optimization of hybrid energy systems significantly increases renewable energy accommodation and system flexibility. CMM

收稿日期:2025-07-25　**修回日期:**2025-11-22　**DOI:**10.13247/j.cnki.jcumt.20250272
基金项目:地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项项目(2024ZD1004104);国家自然科学基金面上项目(52574207,52474156);江苏省基础研究计划项目(BK20240108)
第一作者:吴　刚(1990—),男,山东省济宁市人,副教授,博士生导师.
通信作者:张　磊(1986—),男,山西省平遥市人,教授,博士生导师.E-mail:leizhangcumt@163.com
引用格式:吴　刚,张富凯,张　磊,等.煤炭零碳开发关键基础理论与技术路径探析[J].中国矿业大学学报,2026,55(1):14-27.
WU Gang, ZHANG Fukai, ZHANG Lei, et al. Key fundamental theories and integrated technical pathways toward zero-carbon coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(1): 14-27.

drainage, coupled with a carbon market mechanism, shifts from a safety-only measure to a dual-purpose operation delivering both resource recovery and verified emission reductions. CO_2 storage based on backfill in goaf combined with in-situ mineralization opens a new avenue for utilizing mined-out space. The ecological carbon sequestration, via landform reshaping and stress-resilient vegetation, establishes a viable pathway for transforming post-mining landscapes into active carbon sinks. The proposed system offers a comprehensive solution for zero carbon coal mining, and the robust safety assessment of complex geological storage, techno-economic optimization and standardized protocols are recommended for future work, providing a technical benchmark for integrating the coal sector into the evolving energy system.

Key words: zero carbon coal mining; synergistic optimization; CO_2 geological storage; ecological carbon sequestration; technology system

在全球能源变革的浪潮下，我国提出的“双碳”目标，正深刻重塑着煤炭这一传统产业的发展路径[1]. 煤炭作为我国能源结构中不可忽视的能源，煤炭行业的绿色低碳转型对于我国达成“双碳”目标尤为重要[2]. 煤炭行业需要适应其在我国能源体系中地位的变化，积极探索清洁高效利用和低碳转型路径，通过技术创新、管理优化与制度引导协同推进碳减排进程[3]. 由此，煤炭零碳开发逐渐成为煤炭领域的重要研究方向. 通过一系列技术创新，实现煤炭开发全过程的碳排放抵消与能效提升，推动煤炭行业向绿色、安全、低碳的现代能源体系转型.

近年来，煤炭行业在绿色低碳转型方面取得了显著进展[4]. 一方面，能源系统协同优化、瓦斯抽采与利用、CO_2封存等技术的突破为煤炭零碳开发提供了技术支撑. 多能互补与低碳协同已成为综合能源系统研究的核心取向. 通过构建电-气-热耦合模型并嵌入分解-聚合算法，运行成本、污染排放和碳捕集被同步优化[5-6]；针对西部矿井，热电联供架构被提出，以设备配置优化显著提升能效与供能可靠性[7]. 模型预测控制与粒子群优化等智能算法的引入，有效解决了区域间调度的非线性与不确定性问题[8-9]. 相关综述系统梳理了协同调度策略的演进脉络，为多时间尺度和多主体协同提供了方法论支撑[10]. 当前研究视角已从单一系统最优扩展到跨区域、多目标、数据驱动的协同优化新阶段.

“安全-高效-智能”主线贯穿瓦斯抽采研究全过程. 历史回顾表明，我国已跨越粗放排水降压阶段，步入大数据与人工智能驱动的精细管控时代[11-12]. 深部及煤系气勘探聚焦于CO_2-ECBM（CO_2增强煤层气采收率）等协同增采机制，资源-工程一体化认识持续深化[13]. 政策与技术的双视角分析进一步明确了法规、财税与关键技术耦合路径，为规模化利用提供了制度保障[14]. 物理模拟揭示了厚煤层卸压瓦斯运移-耗散时变规律，支撑裂隙场分区与靶向抽采[15]. 关键工艺、标准规范、利用路径及未来趋势的系统研究，共同推动瓦斯由灾害治理向资源高效与智能化开发转型[16-19].

CCUS（碳捕集、利用与封存）研究聚焦集群化部署、示范工程与产业融合. 全球进展评述为我国构建区域封存枢纽提供了布局参照[20]；示范工程跟踪显示，项目规模持续扩大，技术链从单一捕集延伸至“利用-封存”一体化[21]. 陕煤集团等案例验证了深部咸水层封存与化工低浓度CO_2捕集的工程经济可行性，形成了可复制的流程模板[22]. 地质封存资源评价指出，鄂尔多斯、渤海湾等盆地具备大规模封存潜力，封存安全与容量评估方法日臻完善[23-24]. 区域产业路线研究提出了宁夏“捕集-驱油-化工”耦合方案，显著提升了碳源附加值[25]；CCUS-EOR（碳捕集、利用与封存-提高石油采收率）技术集成实现了封存与增产双赢，推动CCUS由单点示范走向多产业协同与商业化运营[26].

另一方面，生态系统碳汇增汇技术的探索与实施，为煤炭产业安全绿色高效开采开辟新路径. 林草碳汇开发框架覆盖了资源调查—项目设计—资产交易全链条，鄂尔多斯试点已实现碳资产市场化流转[27]；尾矿库碳汇评估表明，复垦-植被耦合可形成持续20 a以上的稳定碳库，兼顾土地复用与社区收益[28]. 生物增汇与减排脱污协同机制揭示了湿地植物-微生物联合系统同步提升CH_4氧化与土壤固碳效率的潜力[29]；农田碳汇演变研究指出，优化轮作与秸秆炭化可逆转耕层碳亏损，实

现粮食安全与碳汇双赢[30]. 滨海湿地修复通过水文-植被精准调控提升蓝碳密度,为沿海矿区提供了高碳汇-高生态价值空间[31]. 由此,生态碳汇正由单点试验走向“资源调查—潜力评估—标准制定—资产转化”全链条管理,成为煤炭产区绿色低碳转型的重要补充路径.

但就煤炭零碳开发而言,还存在诸如能源投入和碳排放强度、地质赋存条件、技术攻关、新能源耦合及多能互补、经济成本与投资回报的不确定以及政策支持和监管机制不健全等方面的问题. 这些有待于从技术和政策引导、市场机制监管以及国际合作等多个角度推动煤炭行业的健康发展.

本文通过对煤炭零碳开发的关键基础理论与技术路径进行系统探讨,涵盖能源系统协同优化、瓦斯资源化利用、CO_2封存及生态碳汇提升等方面,明确了“减碳-替代-封存-循环”技术体系的适配逻辑与推广路径,指出了复杂地质封存安全性评估、技术经济性优化及标准化体系构建等关键瓶颈的突破方向. 旨在为煤炭行业在绿色低碳转型过程中的技术选择与应用提供理论参考和技术可行性分析,助力煤炭行业实现“双碳”目标.

1 煤炭零碳开发的内涵

煤炭零碳开发的核心内涵是通过系统性技术革新与生态管理,在煤炭开采的全过程中实现CO_2的“净零排放”. 具体而言,它并非追求绝对零碳,而是以清洁能源替代、能效提升、碳捕集封存及生态碳汇等综合手段,抵消煤炭开发过程中的碳排放,推动煤炭行业实现绿色低碳转型.

从其核心特征来看,煤炭零碳开发首先体现为目标的系统性. 它将煤矿视为一个复杂的能源-环境系统,其“净零”目标是一个动态平衡的过程. 该目标承认在当前技术经济条件下,开采过程中的部分工艺能耗与甲烷逸散等碳排放难以完全消除,但通过构建覆盖“减碳-替代-封存-循环”的综合性技术体系,能够形成一个完整的碳管理闭环,从而抵消残余碳排放,达成系统性的碳中和.

煤炭零碳开发生成路径是集成性开发,不是单一技术的应用,而是多技术路径的交叉融合与协同优化. 例如,将能源系统协同优化理论应用于矿区,构建“源-网-荷-储”一体化的智慧能源系统,有效平抑风、光等可再生能源的波动性,是实现能源侧深度脱碳的基石;将瓦斯抽采与利用从传统的灾害防治,提升至“资源回收-减排增效”的双重目标,实现了伴生资源的增值利用;创新性地利用开采形成的井下空间进行CO_2地质封存,将煤炭开采的“负外部性”空间转化为封存碳的“正资产”;通过生态系统碳汇提升技术,将采矿扰动区重建为具有固碳功能的生态系统,形成长期的效益.

煤炭零碳开发是对传统煤炭开发模式的一场革命,是对煤炭“高碳锁定”的彻底打破,它推动煤炭企业由单纯的能源生产者向“能源-资源-环境”系统综合问题解决方案提供商转型升级. 这一转型不仅是对国家“双碳”战略的积极响应,更是煤炭产业在能源体系变革中抢占科技高地、重塑产业新优势、实现可持续发展的必然战略选择.

综上所述,煤炭零碳开发的内涵是以全生命周期碳平衡为根本目标,以多技术路径协同集成为核心手段,以推进产业绿色低碳转型为价值导向的煤炭开发新模式. 它代表着煤炭开发活动从以资源环境为代价的粗放模式,转向追求能源安全、经济可靠、生态环境和谐统一的可持续发展新阶段,为煤炭工业生态文明建设新时代指明方向.

2 煤炭零碳开发的理论体系和关键基础理论

2.1 煤炭零碳开发的理论体系

煤炭零碳开发理论体系是一个内容丰富、综合性强的复杂系统,以科技创新为支撑,以能源节约和生态修复为手段,实现煤矿行业绿色低碳转型发展. 该体系综合了能源系统的协同优化、碳捕集与封存、资源高效利用及生态修复等关键理论,力求在煤矿全生命周期内减少碳排放,提升能源利用效率,并通过生态碳汇等措施实现碳的净零排放,旨在通过协同作用跳出资源消耗高碳模式,实现能源系统的可持续发展,为煤矿行业在应对“双碳”目标中的转型提供理论依据和技术支撑.

在这个理论体系中,各个子理论相互支撑、相辅相成,共同形成了一个完整的系统,涵盖从煤矿开采、资源利用到生态恢复的全过程. 理论体系不仅注重从源头减排,还强调过程中的碳排放控制与资源回收利用,以及矿区的生态修复和碳汇功能的提升. 在这一理论体系的引领下,煤矿行业能够在全生命周期内实现碳排放的动态管控,推动煤炭产业向低碳、负碳的方向发展,并为实现国家“双碳”目标贡献力量.

2.2　能源系统协同优化理论

能源系统协同优化理论不是一个单一的理论，而是一个以最优化理论、控制系统理论和复杂系统理论为基石，深度融合了电气工程、热能工程、经济学、计算机科学和管理学等多个学科知识的综合性理论框架．它是实现煤炭零碳开发的重要理论支撑，其核心在于通过多能互补、系统集成与动态优化，提升能源利用效率并降低碳排放[32]，如图 1 所示．

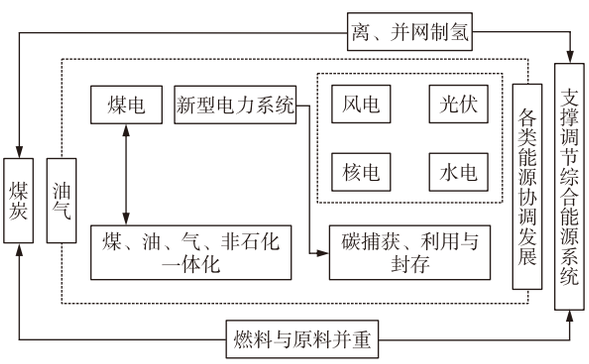

图 1　煤基综合能源系统

Fig. 1　Coal-based integrated energy system

在煤炭开发的复杂场景下，该理论强调打破传统能源系统相对独立运行的壁垒，把煤炭摆进多能互补的“方阵”，使化石能源与新能源充分融合起来，将传输路径压缩到极致，协同发挥碳排放与能源效率的双重优化作用．

从理论基础上来看，能源系统协同优化理论是多学科交叉融合的结果．借鉴热力第二定律的熵增和能量质降规律，指导煤田开采能源梯级利用优化匹配，例如煤矿采掘煤田高质好煤用于发电或煤化工合成，低质发热余热用于煤田供暖及通风，优化利用．借鉴系统工程学的复杂系统分析，将煤田开采能源生产、转换、储存、输配、使用等过程作为有机整体，构建多层次、多子系统耦合系统模型，运用系统动力学等方法，模拟系统行为，探讨系统演化规律，指导系统协同策略的制定．

在煤炭零碳开发过程中，能源系统协同优化理论具有它的优越性和创新性．一方面，充分结合能源系统协同优化的多能互补时空特征，时间上利用其间歇性强的特点，在太阳能发电间歇性强时，利用煤电平抑，削峰填谷，如太阳能发电间歇谷时利用煤电稳定矿井供应．空间上结合煤炭产区的资源情况，因地制宜规划可再生能源发电商场，如在晋陕蒙等煤炭大省区空地规划大片风电、光伏发电场，形成分布式和集中式相结合的能源供应模式，高效率输送可再生能源的绿电到矿井，替代煤电自备电厂，减少煤炭开采时的碳排放量．

另一方面，该理论的提出为智能化调控奠定基础．通过运用前沿的物联网、大数据、人工智能等技术对煤田系统内部所有设备和能流进行实时感知和动态调节．智能化矿山通过传感器采集煤矿生产设备、瓦斯浓度、井下环境指标、可再生发电装置所产生的能量等信息，通过采用深度学习模型对数据进行挖掘分析，预测供需变化情况，进而形成最佳的能源调配策略．例如，根据煤炭开采的不同工序及设备运行情况调节供电系统功率、优化通风系统流量，按需供应，避免浪费，提升系统运行效率．

此外，能源系统优化协同理论也关注全过程的碳排放控制，从煤矿采选项目规划出发，以及矿区能源结构、开采工艺、装置选型、生态环境修复等影响未来碳排放全过程的角度进行全寿命周期碳排放模型构建，设置碳约束条件，采用多目标优化算法，将碳减排目标贯穿至煤炭能源系统各个环节，实现能源和碳排放控制，为煤炭零碳开发提供全过程的理论依据与方案指导．

2.3　瓦斯抽采与利用理论

瓦斯抽采利用理论是基于瓦斯理化性质和瓦斯双重作用的原理，在煤炭开采过程中利用瓦斯生产洁净能源或制成化工产品的一种系统性理论，如图 2 所示．

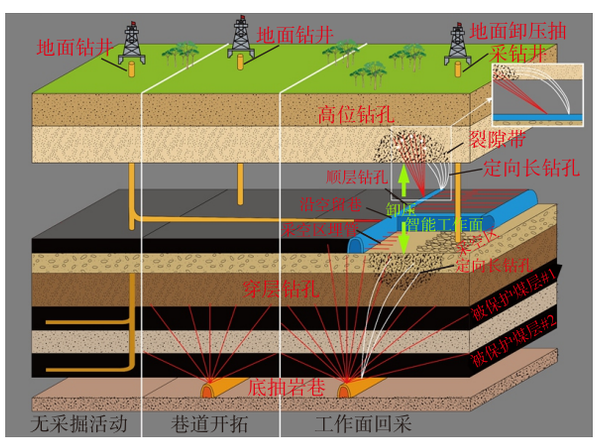

图 2　煤矿瓦斯立体抽采技术体系

Fig. 2　Technological system for three-dimensional gas drainage in coal mines

该理论是运用瓦斯抽采措施，将瓦斯抽采出来后，进行资源化利用或者生产化工原料，以实现煤炭生产过程中减损的目的．它是研究瓦斯在煤层中的赋存状态、瓦斯运移规律、瓦斯抽采驱动力

等的科学性理论，为瓦斯高效抽采和综合利用提供理论支撑.

瓦斯抽采利用理论已从单一的灾害防治，发展为涵盖“资源-安全-环境”的联合治理宏观理论. 瓦斯抽采利用理论注重瓦斯产生-运动-人为控制的耦合关系，在多尺度、多场耦合模型的基础上，实现瓦斯抽采和碳排放效益的联合控制. 该理论认为瓦斯在井巷的运动过程为“裂隙渗透-孔隙扩散”模式，瓦斯运动的驱动力主要为地应力场、渗流场、化学场三场耦合，地应力影响渗透率，且渗透率由地应力控制. 吸附质解吸速率和温度变化符合指数函数关系，突破了经典的达西定律适用范围，为进一步精确预测瓦斯抽采量提供了理论基础.

瓦斯抽采方式从“被动治理”逐步向“主动资源”转变. 早期关注瓦斯灾害防治的重点在工程层面，目前理论层面形成了“区域超前治理＋多源协同抽采＋全浓度梯级利用”三维理论. 区域超前治理理论以保护层开采与地面预抽为核心，在晋城“四区联动”示范区实现井上下联合抽采，使煤层透气性系数提高 1～2 个数量级，瓦斯抽放量增加 0.50～0.87 倍[11].

2.4 CO_2封存理论

CO_2封存原理突破传统单一地质封存概念，提出CO_2地质封存的三位一体(“地质-工程-环境”)封存原理，科学原理包括物理、化学与吸附 3 种，如图 3 所示.

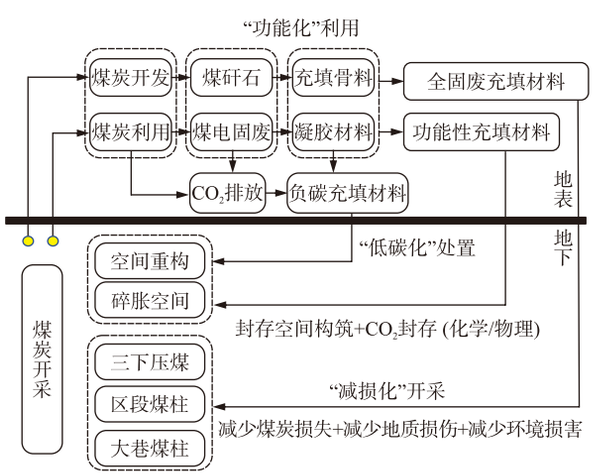

图 3 “煤”-“废”-“碳”协同发展实施路径

Fig. 3 Implementation pathway for synergistic development of coal-waste-carbon systems

CO_2封存原理解决采空区、煤气池空隙、热解半焦等扰动空间CO_2赋存状态、运移规律与封存持久机制等基础科学问题，主要针对封存介质、多相多场耦合与系统边界等. 如煤炭采空区裂隙岩体封存原理是用功能性充填体建立封闭空间，将垮落岩体和渗透性差的盖层与CO_2物理封闭关联，有效性取决于“盖层＋充填体密封＋岩体渗透性”.

早期研究大多对埋深 1 000 m 以上深层超临界状态下地层的相态行为进行研究，认为CO_2在超临界状态下密度大，流体更容易流动，适合封存规模更大的封存空间[33]. 随着研究的深入，封存研究手段已经深入到了中浅层扰动空间封存论证研究中，文献[34]提出“采-封协同”假说，认为在中浅部煤层(埋深≤1 000 m)利用开采扰动形成的碎裂岩体、气化灰渣及半焦层等多孔载体，可在非超临界条件下实现CO_2物理-化学联合封存. 该假说突破了传统深部超临界封存限制，强调通过功能性充填构筑密闭单元，结合低压充注即可完成有效封固，为浅部煤层CO_2封存提供新的技术思路. 此外，煤炭地下气化空腔封存理论表明，气化灰渣中富含的 CaO、MgO 等碱土金属氧化物可与CO_2发生碳酸化反应，生成稳定的碳酸盐沉淀，从而实现CO_2的化学固存与长期封存. 封存理论涉及了地质力学、环境化学和系统科学等. 复杂系统科学的应用体现在多场耦合模型的构建，例如CO_2-水-岩 THMC(热-水-力-化学多场耦合)模型可计算封存过程中孔隙结构的变化对封存效率的影响.

2.5 生态系统碳汇提升理论

生态系统碳汇提升理论突破生态修复一维理论体系，构建“自然-社会-技术”三位一体的生态系统碳汇提升系统理论，其理论体系如图 4 所示.

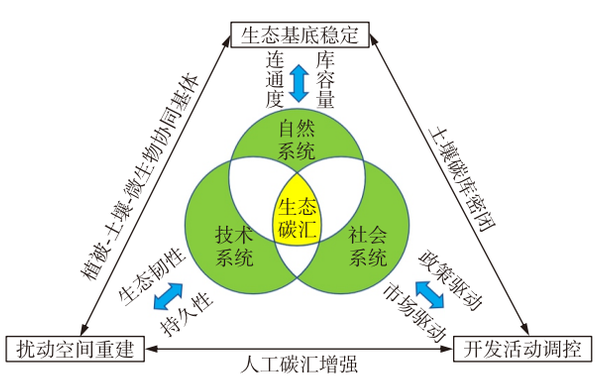

图 4 生态碳汇提升系统

Fig. 4 Ecological carbon sink enhancement system

其理论重点在于理清煤炭开发扰动下，生态碳汇与自然生态系统的耦合关系，从不同尺度、多个过程进行生态系统循环碳过程的控制，最终实

现生态系统碳汇平衡和功能提升．煤开采扰动下的采空区、矸石场等区域，既是碳排放场，又是生态修复后的碳汇场，碳汇提升路径取决于“生态基体-植被驱动-土壤碳库提升”耦合．例如，煤矸石场生态修复理论，即构建矸石基质上“根际-矿物”耦合的固碳界面，通过培育功能型植被与微生物种群对煤矸石场进行固碳阻控．

以往研究多集中于单一生态系统的碳汇测算，而当前模型已发展至以“山水林田湖草沙”生命共同体为视角，进行系统性的碳汇优化．煤矿区碳汇优化应突破传统生态修复的时空界限，创建“扰动-修复-演替”全周期碳代谢过程模型．如：采空区生态修复碳汇动态是曲线“U”型过程，在碳汇修复初期，因植被恢复，土壤呼吸作用加强，造成短暂的碳汇，但随植物演替、土壤有机质增加，5～8 a后碳汇增强趋势趋于稳定，改变传统直线认识，模型中应加入时间效应反馈非线性的影响．再如：煤矿区与周边生态环境系统碳汇协同理论，需要建立景观连通度强化碳汇韧性的机制，如构建矸石山-林地-湿地碳汇廊道，强化碳汇溢出能力．

综上所述，煤炭零碳开发的4大关键基础理论，即能源系统协同优化理论、瓦斯抽采与利用理论、CO_2封存理论及生态系统碳汇提升理论，分别从系统能耗、伴生资源、末端排放和生态修复4个环节构建全生命周期的煤炭碳中和理论体系，揭示了“减碳-替代-封存-循环”的基本原理，为下一代零碳技术的创新与集成指明了方向．下文将以此为理论框架，论述相应的技术路线和关键技术，展现科学原理向工程应用的转化思路．

3　煤炭零碳开发的技术路径和关键技术

前述关键基础理论为技术创新提供了“为什么做”和“做什么”的科学依据，本章所述的技术路径则解决了“怎么做”的工程问题．如图5所示的“减-替-封-循”技术体系，正是对第二章理论体系的具象化与集成化．

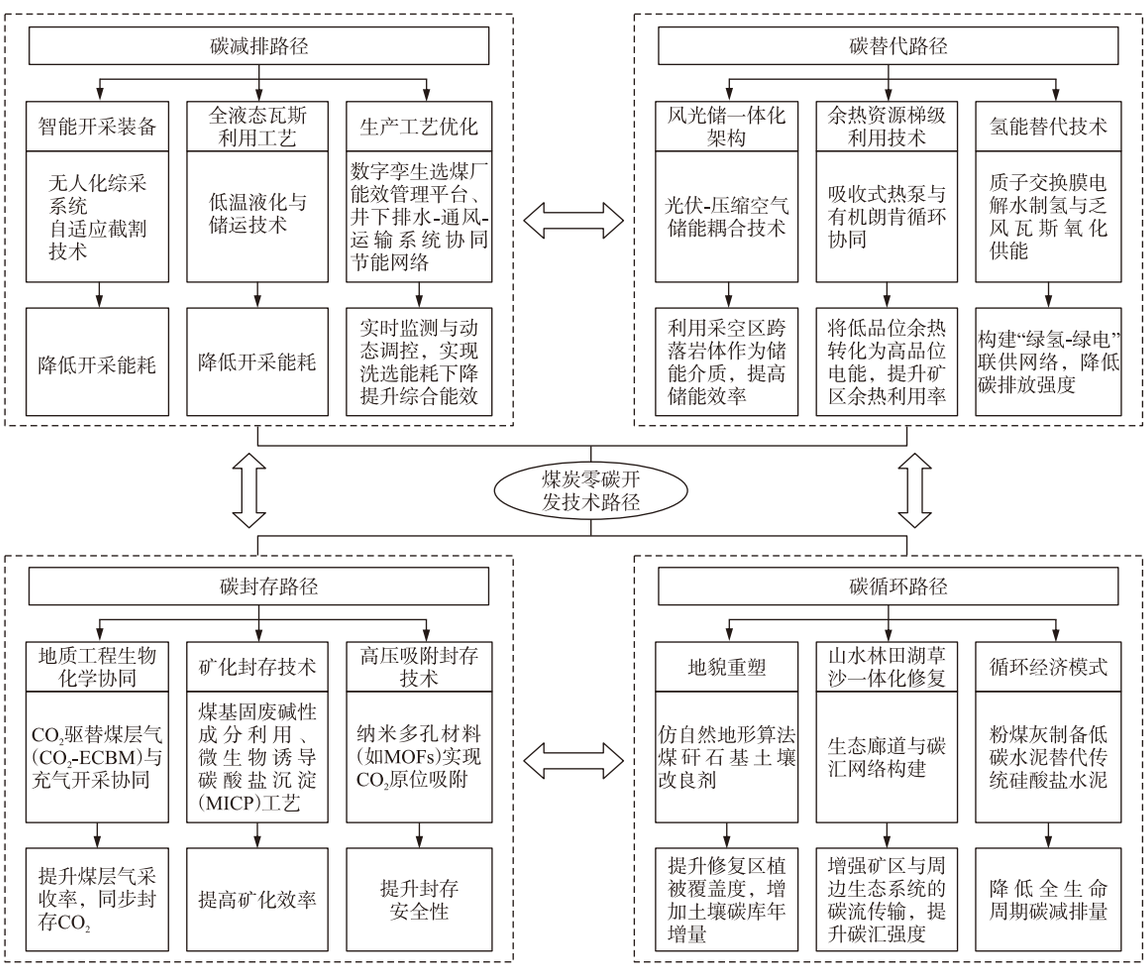

图5　煤炭零碳开发技术路径

Fig. 5　Technology roadmap for zero-carbon coal mining

具体而言，能源系统协同优化理论是构建矿区智慧能源网络、实现多能互补与智能调度的顶层设计，直接指导能源系统协同优化技术的开发；瓦斯抽采与利用理论的创新，推动了瓦斯抽采与利用技术从“被动防灾”向“主动利用”的跨越；CO_2封存理论的深化，促进了CO_2封存技术从单一地质封存向“地质-工程-生态”协同封存的发展；生态系统碳汇提升理论则为生态系统碳汇提升技术提出从单源生态修复到系统强化碳汇提供了理论内核．由此，理论突破与技术革新构成了相辅相成的统一整体．

3.1 煤炭零碳开发的技术路径

煤炭零碳开发的技术路径以“减-替-封-循”为核心框架，通过系统性整合碳减排、碳替代、碳封存与碳循环四大维度，构建覆盖全产业链的低碳转型路径，如图5所示．其核心在于突破传统“高碳锁定”模式，形成从源头控碳到末端负碳的闭环技术体系，实现煤炭开发从能源生产向“能源-环境-生态”综合价值创造的跃迁．

减碳路径以源头减量和过程改造为主．降低开采过程能耗，推广智能化开采（无人综采、自适应截割），减少甲烷逸散，采用低温液化、储运等技术，降低吨煤开采过程的碳排放．优化生产工艺，应用数字化孪生选煤厂能耗管理系统，在线监测、在线改造降低洗选能耗，构建井下排水、通风、运输节能系统，提高能效水平．

替代路径以新能源多级替代为主要路径．矿区能源系统替代绿电以“风光储一体化”为主，通过光伏和压缩空气储能（CAES）耦合技术，将采空区垮落岩体作为储能材料，提高储能效率．梯级替代余热利用的吸收式热泵和有机朗基肯循环（ORC）耦合技术，提高矿区余热利用水平，将低品位的余热转换为高品位的电能．氢能替代技术通过质子交换膜电解水制氢和瓦斯氧化乏风发电，构建“绿氢-绿电”联供系统，降低碳排放量．

封存路径依托地质工程与生物化学协同．地下空间封存中，CO_2驱煤层气技术（CO_2-ECBM）与充气开采提高采出率，并封存CO_2；矿化封存为煤基固废（粉末煤灰、煤矸石）中的含碱性物质通过微生物诱导碳酸盐沉淀（MICP）技术提高矿化率；高压吸附封存为将CO_2通过纳米多孔性物质（如金属有机骨架材料MOFs）原位吸附封存，封存深部不可采煤层．

循环路径加强生态修复及再生．地貌重塑技术，以“类似自然地形”算法助力土地复垦，以煤基土壤改良剂修复矿区土壤，提升修复区植被覆盖率，增加年碳库增量．“山水林田湖草沙”一体化修复，构建生态廊道和碳汇网络，增加矿区周边生态系统的碳流输入，提升碳汇能力．此外，循环经济模式助力煤基固废高值利用，以粉煤灰生产低碳水泥替代硅酸盐水泥，实现全生命周期的碳减排量．

“地域＋行业＋措施”是系统集成技术路径，以“风光火储氢”多能互补基地建设为依托，特高压通道绿电外送、异地碳封存联动等技术为措施，增加可再生能源消纳；退出矿区发展“光伏＋生态农业”，盘活土地资源，增加碳排放量，从政策层面形成对碳交易市场、碳配额质押、碳中和债券等绿色金融工具的经济刺激，引导碳排放企业积极采用负碳技术．

整体而言，煤炭零碳开发依赖于“减碳-替代-封存-循环”4个过程的系统性优化与集成．该路径通过多种高新技术的协同与融合，为煤炭全行业的绿色低碳转型提供支撑，服务于煤炭行业向低碳及零碳模式的转型．

3.2 能源系统协同优化技术

能源系统联动优化通过多能联动、智慧调度和数字集成，形成煤炭利用全生命周期的低碳化技术应用体系，如图6所示．

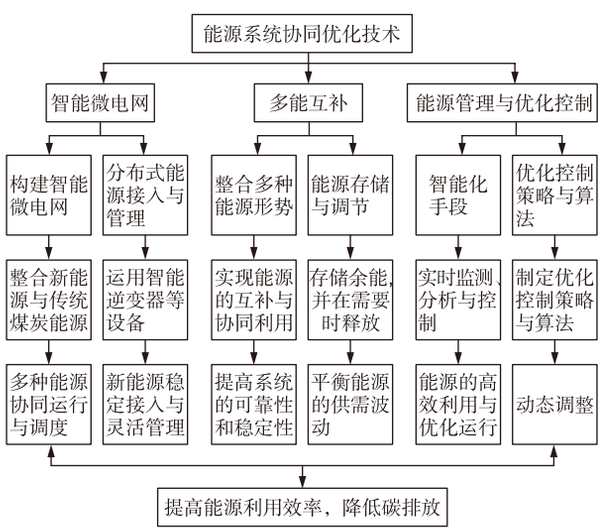

图6 能源系统协同优化技术体系

Fig. 6 Technological system for synergistic optimization of energy systems

能源系统协同优化技术通过结合多元能源互补、智能调度与数字化管理，为煤矿开发提供了一

种低碳、高效的解决路径．在煤炭开发的初期阶段，核心技术目标是通过整合矿区的能源资源，优化能源流动和消纳能力．通过建立集成化能源网络，将煤矿内的煤炭、可再生能源（如太阳能、风能）以及废弃能源（如瓦斯、乏风、煤矸石）进行有机结合与协同调配，最大化地降低煤矿开采中的能源损耗．在此过程中，虚拟电厂技术的引入使得矿区能源供需在多维度上得以优化，尤其是在能源的动态调度与系统平衡方面发挥了关键作用．

随着能源利用系统的进一步发展，智能调度和多能协同成为当前能源系统优化的一个热点．通过物联网技术、大数据分析和人工智能的深度融合，矿区的能源管理能够实时调整，以应对能源需求波动．特别是可再生能源的集成应用，使得矿区逐步摆脱对传统煤电的过度依赖，转而向低碳和绿色电力供应转型．矿区不仅能在开采过程中有效利用废弃能源，还能在各个能源生产环节减少碳排放、提高能源综合利用效率．

当矿区开发逐步深入时，能源系统协同优化的目标不仅限于满足基础能源需求，还应关注资源再利用与能源的高效循环．这一技术体系的长远发展方向推动矿区实现全生命周期内的绿色低碳生产模式，为煤炭行业的可持续发展与“双碳”目标的实现提供技术支持．

3.3　瓦斯抽采与利用技术

瓦斯抽采与利用技术通过对瓦斯高效抽采、高效利用、系统集成，构建从煤层气勘探期至利用期的低碳煤层气开采系统技术平台．当前瓦斯抽采与利用技术已经跨过了原始被动治理阶段，并建立了“超前区治理-多源联动抽采-梯级高效利用”的技术思路，智能化装备辅以多能耦合大幅提升瓦斯综合利用水平，实现碳排放的大幅降低．

精准抽采是提高抽采效率的重要途径．通过瓦斯含量精准勘察原位、瓦斯涌出量精准预测、抽采区域精准定位、抽采精准设计、抽采精准增透、抽采精准调节等技术，显著提高抽采效率，减少抽采难度，如图 7 所示．如大数据分析，通过整合历史开采数据，结合实时数据，更好预测瓦斯涌出趋势，及时调整瓦斯抽采．通过利用先进的模拟软件来优化钻井间距、抽采参数、钻井深度、钻井方向等，保证抽采系统的最优组合，以最少的投入来产生最大的抽采收益．

智能化技术应用广泛，实现无人化精细化瓦斯的抽采．智能瓦斯抽采系统，借助物联网技术、物联网的传感器、物联网的大数据、智能的分析决策，形成闭环智能控制．通过在井下部署多种传感器，实时监测瓦斯的浓度、压力等关键参数．这些数据被实时传输至中央数据处理系统，该系统基于大数据分析技术，不仅实时预测瓦斯动态，还能前瞻性地研判瓦斯涌出趋势．基于此，系统可智能决策，自动调节瓦斯抽采强度与时长，并优化钻孔布置方案，从而显著提升抽采效率．

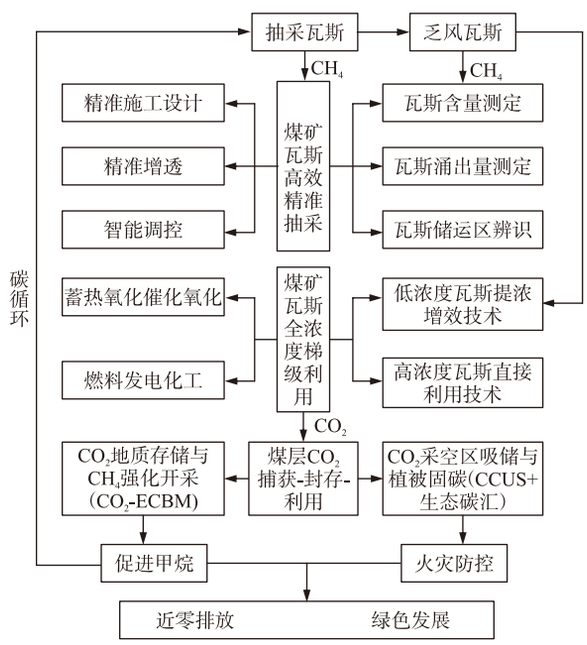

图 7　瓦斯抽采关键技术体系

Fig. 7　Key technological system for gas drainage

瓦斯梯度利用技术，主要是利用高能瓦斯梯度发电，采用内燃机-余热锅炉联合循环技术，综合热效率较高；采用中浓度瓦斯通过催化剂氧化生产合成气进行化工原料生产或者制取氢能源；较低浓度瓦斯通过逆流蓄热氧化，热效率较高，同时产生蒸汽供热．当前碳约束瓦斯利用技术和碳封存技术受到重视，采用 CO_2 驱除煤层气技术，利用 CO_2-ECBM 的竞争吸附作用，达到增气和 CO_2 的封存双重效应．

跨区域多能互补系统通过特高压输电、区块链智能合约对瓦斯发电与风光发电进行协同调度，提高了可再生能源的消纳率，减少了备用容量．矿区氢能联供系统通过将质子交换膜电解水制氢技术、乏风瓦斯催化氧化技术结合，形成了“电-氢-热”多能流系统，氢能综合效率高、碳排放低．

由此可见，瓦斯抽采利用技术的发展不仅直接提升了瓦斯利用率并减少了排放，更是煤炭行

业实现低碳转型与“双碳”目标的关键技术．随着持续的技术进步与创新，它必将在煤矿企业零碳开发中扮演愈发重要的角色．

3.4 CO_2封存技术

CO_2封库技术是通过不同应用背景和不同方向的组合，构建起CO_2封存、工程干预和生态协同三位一体的技术体系．CO_2封库的核心是采用地质封存、物理或化学等方式，实现CO_2的“三库”封存，降低CO_2排放，如图8所示．

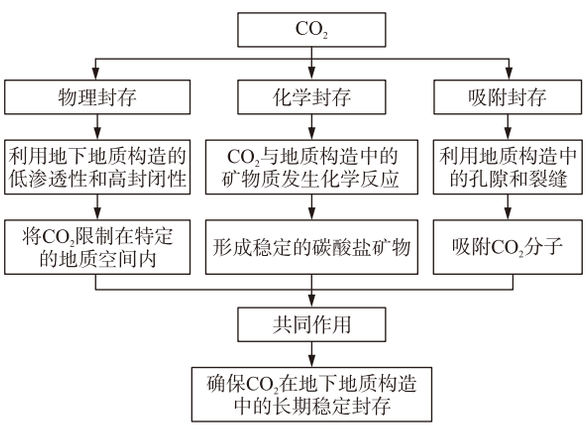

图8 碳封存技术体系

Fig. 8 Carbon sequestration technological system

在煤炭开发早期，CO_2封存技术研究主要集中在封存载体研究，煤层开采扰动空间如采空区、地下气化空腔、原位热解半焦等是潜在的储-盖组合型封存载体，例如煤层采空区碎裂岩体封存技术通过功能性充填而形成封闭空间，覆岩垮落与致密低渗盖层进行物理封存；地下气化空腔封存技术利用气化残渣化学固碳而形成碳酸盐矿物封存CO_2．

在煤炭开发中期，封存的关键是多场耦合封存效果封存、控制封存监测，即利用煤层上覆盖的地质封闭层、充填体等，建立强封闭、承压式封存场，进行中低压CO_2封存．智能监测技术即对封存场地地质构造、CO_2浓度实施实时监测，优化封存模式，提高封存效率，降低封存泄漏风险．

在煤炭开发后期，封存技术向生态融合化及资源化方向发展，将封存与矿区地质条件相结合，如利用废弃矿井空间建立抽水蓄能电站或压缩空气蓄能电站、CO_2封存与生态碳汇耦合；矿化封存技术通过煤基固废（如粉煤灰、煤矸石）引入碱性介质，采用微生物诱导碳酸盐沉淀（MICP）技术，优化矿化效率，实现长期CO_2封存，如图9所示．

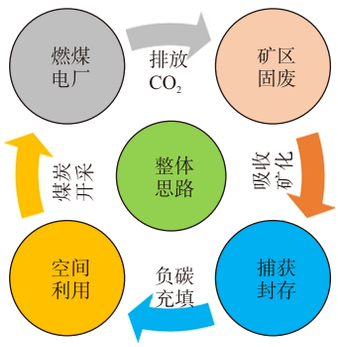

图9 CO_2封存理论框架

Fig. 9 Theoretical framework for carbon dioxide sequestration

CO_2封存技术应用于“地球工程生态”多维度协同模式．例如西部地区煤田富集区域采用特高压电网进行“西碳东封”，区块链技术中的智能合约进行CO_2数量与封存数量关联，以及目前全球先进的“海岸碳”技术，通过沉积封存与生物修复为高碳排放岸线周边企业实现跨越式发展提供服务．

3.5 生态系统碳汇提升技术

生态系统碳汇提升技术以矿区扰动下的空间生态系统恢复重建为对象，通过不同层次、不同方向的生态功能提升技术构建“自然恢复-人工恢复-生态系统技术”的生态系统碳汇提升技术集成，如图10所示．技术核心就是打破传统的单一种植，构建以矿区生态地质和生态本底为背景的生态系统碳汇提升技术集成，主要包括矿区采空区生态修复技术、煤基材料生态技术、困难地形植被恢复技术等．

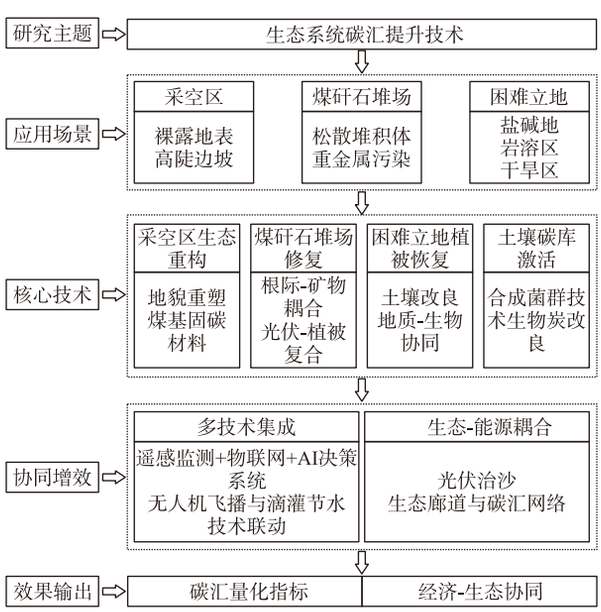

图10 生物系统碳汇提升技术体系

Fig. 10 Technological system for carbon sink enhancement in biological systems

在煤炭开发前期，生态系统的碳汇增强应以全面的生态本底评估与规划为核心．首先，需通过科学的土地利用与植被覆盖规划，提升矿区的初始碳汇潜力．具体而言，应依据本底评估结果，合理设计植被群落，优先选用高固碳效率的物种，以奠定生态修复的基础．同时，通过土壤改良与微生物群落构建等策略，有效激活土壤碳库，增强其碳吸收能力，从而系统性提升前期的碳汇水平．

至煤炭开发中期阶段，生态系统碳汇的提升方向则应集中于实时生态修复与碳汇功能提升，煤炭开采对地表、地下生态系统的破坏不可避免，需最大程度减少破坏，边开边治，建设生态廊道和碳汇系统有助于矿区与外围自然生态系统之间碳流的交换，提升碳汇功能的持续发挥．通过功能型植物选择与微生物控制，建立矸石基质上的“植物根-矿物固碳”耦合界面，将植物的光合固碳作用与矿物的碳酸化固氮反应相结合，实现碳汇与污染治理的双重作用．

进入煤炭资源开发后期，重点做好采空区、矸石山等空间扰动生态修复．采空区生态修复技术通过地形恢复和功能修复，使采空区转变为土壤-植物碳库．煤矸石场生态修复技术通过多层级空间固碳技术，将矸石中碱性物质与CO_2进行碳酸化反应，形成碳汇，成倍固碳．无人机播种技术将保水剂微胶囊包裹种子，短期内实现植被修复，增加土壤有机碳含量．

土壤碳库释放是生态系统碳汇的组成部分，通过微生物的控制和生物量的增加可以提升土壤碳汇量，如利用微生物合成菌群构建光合固碳、腐殖质合成的生物链技术，或生物炭改良土壤结构、减缓土壤有机质降解，提升土壤碳库潜力．基于生物炭的土壤改良法将热解煤矸石制作成多孔生物炭（孔隙率75%以上），吸收土壤呼吸排放的CO_2并减缓土壤有机质降解速率，提升土壤碳汇潜力．

生态系统碳库强化技术通过与各阶段煤炭行业紧密结合，已经逐步形成生态基座优化-扰动空间重建的一整套技术支撑体系，为煤炭行业实现零碳开发奠定了生态基础．生态系统碳库强化技术在未来要注重多学科交叉研究，寻找更高效更稳定的碳库强化路径，支撑煤炭行业绿色低碳开发．

4　煤炭零碳开发的案例分析

为了进一步论证前文所提出的“理论-技术”系统有效且可靠，本章选取国内典型矿区案例，这些案例是能源系统协同优化、瓦斯抽采利用、CO_2封存及生态碳汇提升等关键技术集成与应用的典型案例，也是相关基础理论的验证与丰富．通过分析神东矿区和塔山矿区的零碳案例，可以验证上述“理论指导技术实践-技术应用验证理论”的完整闭环逻辑，为煤炭零碳开发的规模化推广提供坚实的实证支撑．

4.1　神东矿区“零碳矿山”路径实践

神东矿区作为我国煤炭绿色转型的先行示范区，积极响应国家“双碳”战略，以能源系统协同优化、瓦斯资源化利用、CO_2封存与生态碳汇提升等关键理论为指导，构建了系统化的零碳矿山建设路径[35]．矿区以能源系统协同优化理论为指导，打造“多能互补＋智能调度”的能源系统架构，通过整合光伏、风电、地热等清洁能源与既有能源系统，形成“源-网-荷-储”协同运行的智慧能源网络．从时间维度出发，根据气象、光照等波动规律，结合矿区负荷，从空间维度出发，以矿区采煤下沉区为中心，建设一定数量的分布式电站，显著提升了绿电自给率，推动矿区低碳化发展．

实践路径方面，神东矿区系统推行“减-替-封-循”技术体系集成应用，如图11所示．减碳路径通过智能化开采装备、顺煤流启动、高效供热改造等措施，实现吨煤开采能耗下降20%以上；同时建立全覆盖的碳排放监测平台，实时监测瓦斯逸散与能耗数据，2022年实测瓦斯排放量较核算值下降95%，为精准控碳提供数据支撑．替代路径重点实施“光伏＋储能”一体化项目，在布尔台等矿井建成130万kW光伏容量，年替代外购电20亿kW·h，实现降碳150万t；同步推进运输车辆电动化与氢能化，替代燃油车456台，实现年碳减排0.5万t．封存路径开展采空区CO_2封存示范工程，利用垮落岩体孔隙特性实现CO_2吸附封存，并推进煤基固废矿化封存，通过MICP技术提升碳酸盐转化率．循环路径构建“三期三圈”生态修复模式，累计治理水土流失与沉陷区496 km^2，植被覆盖率从3%～11%提升至64%；建设碳汇林13 km^2，预计年固碳39万t，推动生态碳汇纳入CCER交易体系．

为确保零碳路径的可量化与可验证，神东矿区建立了覆盖全生命周期的碳核算体系，以《温室气体排放核算与报告要求》为遵循开展碳盘查和第三方核查．以布尔台煤矿为例，2020年碳排放量

为84.98万t,通过系统实施电能替代、乏风余热利用、生态碳汇等工程,预计实现近零碳排放.其中,光伏项目年均减排48.5万t CO_2,乏风余热利用年节约1 500 t标煤,碳汇林年固碳3.9万t,形成清晰的减排成效轨迹.充分验证了高碳行业通过系统优化与技术创新实现低碳转型的可行性,为晋陕蒙等核心产区提供了可复制、可推广的系统解决方案,也为全世界资源型区域低碳发展提供发展思路和借鉴.神东矿区的经验表明,零碳矿山建设需要以多学科理论为根基,以全生命周期碳管控为主线,以智能碳管理为技术手段,以市场机制为外部驱动,最终形成"技术-标准-交易"的良性循环发展模式.

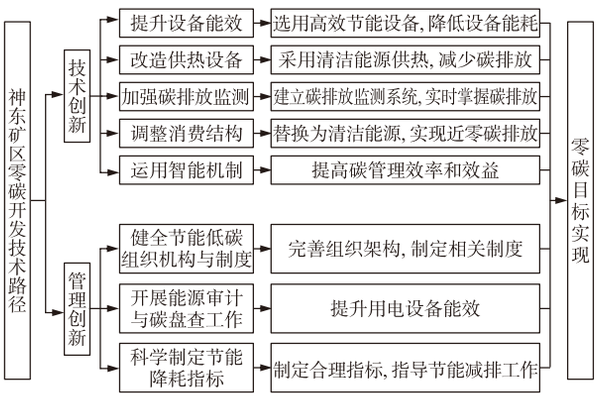

图11 神东矿区零碳开发技术路径

Fig. 11 Technical pathway for zero-carbon coal mining in the shendong mining area

4.2 晋能控股塔山矿零碳示范区建设

塔山矿作为晋陕蒙核心产区的千万吨级典型矿井,深入贯彻"双碳"战略,率先入选山西省首批零碳(近零碳)产业示范区试点,其系统性实践充分体现了"减-替-封-循"技术路径的落地逻辑,为同类矿区提供了技术集成与体系化应用的典范[36],如图12所示.

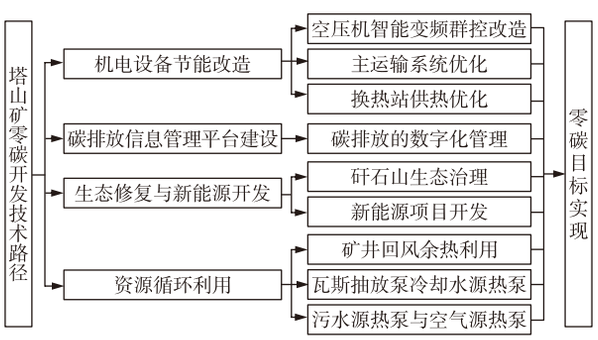

图12 塔山矿零碳开发技术路径

Fig. 12 Technical pathway for zero-carbon coal mining of the tashan coal mine

在减碳路径上,塔山矿以"源头控碳-过程降碳"为主线,为保证较高的减碳效率,在开采过程中,积极探究和应用矿井中厚煤层沿空留巷、液体承压爆破切顶等工艺无煤柱安全开采技术,每方径多采原煤10万t,从源头上减少吨煤碳排放强度;在能耗环节,矿井全面推进设备节能改造,其中空压机智能变频群控系统实现"一拖多"变频调节,年节电率达20%~40%,减少 CO_2 排放6 300多t;主运输系统应用顺煤流启动技术,年节电约71.6万kW·h,减排600余t;供热系统通过气候补偿与按需调控,年节约热力约20 TJ,减排2 200 t,形成了"开采-运输-供热"全链条节能体系.

在替代路径方面,塔山矿着力推动能源结构的清洁化转型.一方面,矿井在已完成生态修复的矸石山区域规划布局小规模风电项目,有效降低净外购电碳排放;另一方面,积极推动余热能源的梯级利用,创新采用矿井回风余热热泵与空压机余热回收技术,解决进风立井冬季防冻需求,并利用瓦斯抽放泵冷却水源热泵满足建筑采暖,实现低温废热资源对传统燃煤供热的规模化替代.此外,塔山矿持续推进矿用柴油车辆电动化改造,逐步构建以"绿电+余热+电动化"为核心的清洁能源供应体系.

在封存与循环路径上,塔山矿以"资源循环-生态增汇"为目标,构建了覆盖地上地下的碳汇与封存体系,矿井在地下空间积极探索采空区矸石充填与矿化封存技术,通过煤基固废的功能化处置,实现 CO_2 的吸附与矿化固定;在地表系统,矿区坚持"边开采、边修复"的原则,系统推进矸石山生态治理,通过水土流失防治、植被重建与挂网喷播等技术,实现了水土流失总治理度95%、林草覆盖率50%、植被恢复率100%的治理成效,显著增强了地表碳汇能力.在资源循环方面,矿井综合利用矿井水、洗浴废水等低品位热源,推广污水源热泵与空气源热泵技术,形成"处理-回用-减排"的闭环系统,全面提升水资源与热资源的循环利用率.

为保障零碳路径的实现,塔山矿搭建了"管理-数字"双平台支撑体系.在管理层面上,矿井成立零碳矿山创建领导小组,编制专项实施方案,明确了2025年阶段目标与2030年全面建成零碳矿山的行动路径.在技术层面上,塔山矿部署碳排放信息化管理平台,集成数据监控、采集、核算、碳资产管理等功能,对全生命周期的企业碳排放进行可视化管理和可视化控制,为碳足迹追踪、碳减排绩效考核提供支持与依据.

塔山矿的实践表明，零碳矿山建设应将技术创新与管理创新视为系统理念，把“减碳工艺-清洁替代-封存增汇-循环利用”协同推进作为系统工程，在“生产体系-能源体系-生态系统”有机耦合中推进. 其经验对于晋陕蒙高碳矿区具有普遍的借鉴意义，特别是在无煤柱开采、余热梯级利用、矸石山生态增汇与数字碳管理等方面具有重要推广价值.

5　结论与展望

1)多学科融合的煤炭零碳开发理论体系研究涵盖的能源系统协同优化、瓦斯资源化抽采、CO_2封存及生态碳汇提升四大理论维度，形成了覆盖“源头-过程-末端”全生命周期的碳管控理论框架. 其中，能源系统多流耦合模型解决了风光波动与煤矿刚性负荷的匹配难题；瓦斯抽采从灾害治理向“资源-减排”双目标转型的理论突破，为煤矿伴生资源增值利用提供了新路径；“地质-工程-生态”多尺度封存理论创新了井下空间资源化利用与地表碳汇协同增汇的技术范式.

2)形成了具有实践价值的技术路径体系. 研究提出的“减-替-封-循”技术路径在案例实践中展现出良好的应用效果，神东矿区通过智能化开采和工艺优化，实现了吨煤能耗的显著降低. 塔山矿通过设备节能改造，空压机系统节电率达20%～40%，年减排CO_2 6 300多t，验证了技术路径的可行性.

3)建立了理论-技术-案例的闭环验证机制. 以晋陕蒙重点煤矿区为案例对象开展案例研究，证明理论和技术具有普适性和区域性. 案例研究表明，神东矿区通过系统实施“减-替-封-循”技术路径，预计实现布尔台煤矿近零碳排放；塔山矿通过设备节能、余热利用与生态修复的协同推进，为同类矿井提供了先进适用技术.

4)未来，围绕煤炭零碳开发，应构建理论-技术-政策-金融四维协同框架. 理论层面需深化地质-工程-生态多场耦合机理，建立采动裂隙场与碳通量的动态响应模型；技术层面要突破量子传感监测、合成生物固碳等关键技术，推动先进技术与传统工艺深度融合；政策层面应建立统一的碳核算标准体系，完善“碳汇＋绿证”交易机制，出台差异化激励政策；金融层面需创新碳配额质押、碳中和债券等工具，引导社会资本参与低碳项目建设. 多方综合发力，形成“理论突破-技术创新-政策引导-金融支持”的良性格局，助力煤炭零碳开发利用由试点示范迈向规模化发展.

参考文献：

[1] 王双明，刘　浪，朱梦博，等.“双碳”目标下煤炭绿色低碳发展新思路[J]. 煤炭学报，2024，49(1)：152-171.
WANG Shuangming，LIU Lang，ZHU Mengbo，et al. New ideas of green and low-carbon development of coal under the “dual carbon” goal[J]. Journal of China Coal Society，2024，49(1)：152-171.

[2] 谢和平，任世华，谢亚辰，等.碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J].煤炭学报，2021，46(7)：2197-2211.
XIE Heping，REN Shihua，XIE Yachen，et al. Development opportunities of coal industry under carbon neutrality target[J]. Journal of China Coal Society，2021，46(7)：2197-2211.

[3] STEPHEN M. Helping to reduce mining industry carbon emissions：A step-by-step guide to sizing and selection of energy efficient high pressure grinding rolls circuits[J].Minerals Engineering，2022，179.

[4] 谢和平，任世华，吴立新. 煤炭碳中和战略与技术路径[M]. 北京：科学出版社，2022.
XIE Heping，REN Shihua，WU Lixin. Coal carbon neutrality strategy and technology pathway[M]. Beijing：Science Press，2022.

[5] 骆　钊，杨林燕，王　华，等. 含碳捕集电厂-电转气-液化天然气协同的综合能源系统优化调度[J]. 太阳能学报，2025，46(1)：438-448.
LUO Zhao，YANG Linyan，WANG Hua，et al. Optimization dispatch of integrated energy system with carbon capture power plant-power-to-gas-liquefied natural gas synergy[J]. Acta Energiae Solaris Sinica，2025，46(1)：438-448.

[6] 骆　钊，罗蒙顺，沈　鑫，等. 基于碳捕集-电转气的矿区综合能源系统协同优化调度[J]. 电力系统自动化，2024，48(3)：22-30.
LUO Zhao，LUO Mengshun，SHEN Xin，et al. Collaborative optimal scheduling of coal mine integrated energy system based on carbon capture and power to gas [J]. Automation of Electric Power Systems，2024，48(3)：22-30.

[7] 王龙飞，王　帅，李　庆，等. 西部地区矿井多能互补热电协同供能系统配置优化[J]. 煤炭学报，2025，50(5)：2739-2751.
WANG Longfei，WANG Shuai，LI Qing，et al. Optimization configuration of coal mine multi-energy complementary heat and power coordinated supply system in western China[J]. Journal of China Coal Society，2025，50(5)：2739-2751.

[8] 陈佳琪. 多区域综合能源系统协同优化研究[D]. 北京：北方工业大学，2024.

CHEN Jiaqi. Research on collaborative optimization of multi-regional integrated energy systems[D]. Beijing: Northern China University of Technology, 2024.

[9] 王晓鹏.多能互补综合能源系统协同优化方法研究[D].南昌:南昌大学,2024.
WANG Xiaopeng. Research on collaborative optimization method of multi-energy complementary integrated energy system[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.

[10] 赵佩尧,李正烁,高 晗,等.电-气-热综合能源系统协同调度优化研究综述[J].山东电力技术,2024,51(4):1-11.
ZHAO Peiyao, LI Zhengshuo, GAO Han, et al. Review on collaborative dispatch optimization of electricity-gas-heat integrated energy system[J]. Shandong Electric Power Technology, 2024, 51(4): 1-11.

[11] 李国富,李 超,张碧川,等.我国煤矿瓦斯抽采与利用发展历程、技术进展及展望[J].煤田地质与勘探,2025, 53(1): 77-91.
LI Guofu, LI Chao, ZHANG Bichuan, et al. Development history, technological progress and prospect of coal mine gas drainage and utilization in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(1): 77-91.

[12] 张慧杰,霍中刚,舒龙勇,等.煤矿瓦斯抽采系统智能管控研究现状及展望[J/OL].煤炭科学技术,1-16[2025-11-12].https://link.cnki.net/urlid/11.2402.td.20241113.0910.002.
ZHANG Huijie, HUO Zhonggang, SHU Longyong, et al. Research status and prospect of intelligent management and control for coal mine gas drainage system [J/OL]. Coal Science and Technology, 1-16 [2025-11-12].https://link.cnki.net/urlid/11.2402.td.20241113.0910.002.

[13] 桑树勋,郑司建,刘世奇,等.煤系气及深部煤层气高效勘探开发若干研究进展[J].中国矿业大学学报,2025,54(1): 1-25.
SANG Shuxun, ZHENG Sijian, LIU Shiqi, et al. Research progress in efficient exploration and development of coal measure gas and deep coalbed methane[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(1): 1-25.

[14] 罗佐县.加快煤矿瓦斯高效抽采利用进程[J].中国石油石化, 2024(2): 33.
LUO Zuoxian. Accelerating efficient extraction and utilization process of coal mine gas[J]. China Petroleum and Petrochemical, 2024(2): 33.

[15] 赵鹏翔,常泽晨,李树刚,等.倾斜厚煤层开采卸压瓦斯运储区能量耗散结构时变机理研究[J].中国矿业大学学报,2025,54(1):202-214.
ZHAO Pengxiang, CHANG Zechen, LI Shugang, et al. Time-varying mechanism of energy dissipation structure in pressure-relief gas transport and accumulation area during inclined thick coal seam mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(1): 202-214.

[16] 刘海洋.煤矿瓦斯抽采与综合利用的技术措施研究[J].内蒙古煤炭经济, 2022(24): 43-45.
LIU Haiyang. Research on technical measures for coal mine gas extraction and comprehensive utilization[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2022(24): 43-45.

[17] 邢雪琴."双碳"目标下瓦斯治理与利用标准[J].中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(15): 98-100.
XING Xueqin. Standards for gas governance and utilization under "dual carbon" goals[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2022, 42(15): 98-100.

[18] 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 Yan'an, YANG Yang. Development direction of coal mine gas utilization technology in China under "dual carbon" goals [J]. Coal Technology, 2022, 41(8): 146-149.

[19] 唐韩英.煤矿瓦斯利用技术现状与展望[J].煤质技术, 2022, 37(1): 69-76.
TANG Hanying. Current status and prospects of coal mine gas utilization technology [J]. Coal Quality Technology, 2022, 37(1): 69-76.

[20] 王国锋,吕伟峰,崔 凯,等.全球二氧化碳捕集、利用与封存产业集群技术进展及应用展望[J].石油勘探与开发, 2025, 52(2): 478-487.
WANG Guofeng, LYU Weifeng, CUI Kai, et al. Technological progress and application prospect of global carbon capture, utilization and storage industrial clusters[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(2): 478-487.

[21] 向国育,申长俊,陆诗建,等.二氧化碳捕集、利用与封存示范工程进展[J].低碳化学与化工, 2025, 50(3): 113-122.
XIANG Guoyu, SHEN Changjun, LU Shijian, et al. Progress of carbon dioxide capture, utilization and storage demonstration projects[J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2025, 50(3): 113-122.

[22] 肖 江,宋世杰,刘兰兰,等.二氧化碳捕集及封存技术探索研究:以陕煤集团榆林化学公司为例[J].煤炭科学技术, 2024, 52(5): 316-323.

XIAO Jiang, SONG Shijie, LIU Lanlan, et al. Exploratory research on carbon dioxide capture and storage technology: A case study of Shaanxi Coal Yulin Chemical Company[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 316-323.

[23] 尹建华,梁　雄,谢小明,等.二氧化碳捕集、利用与封存技术应用研究[J].山西化工, 2024, 44(3): 261-262.
YIN Jianhua, LIANG Xiong, XIE Xiaoming, et al. Applied research on carbon dioxide capture, utilization and storage technology[J]. Shanxi Chemical Industry, 2024, 44(3): 261-262.

[24] 苏　伟.我国二氧化碳地质封存发展形势向好[N].中国电力报,2024-02-29(004).
SU Wei. Development situation of carbon dioxide geological storage in China is improving[N]. China Electric Power News, 2024-02-29(004).

[25] 刘　硕,张志璐,高志豪,等.二氧化碳利用产业发展技术路线:以宁夏为例[J].洁净煤技术, 2025, 31(5): 162-175.
LIU Shuo, ZHANG Zhilu, GAO Zhihao, et al. Technology roadmap of carbon dioxide utilization industry development: A case study of Ningxia[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(5): 162-175.

[26] 胡书勇,郭学强,张佳轶,等.双碳愿景下CCUS提高油气采收率技术[J].世界石油工业, 2024, 31(1):81-91.
HU Shuyong, GUO Xueqiang, ZHANG Jiayi, et al. CCUS enhanced oil recovery technology under the dual carbon vision[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(1): 81-91.

[27] 马志杰,贺振平,宋宪磊,等.鄂尔多斯市林草碳汇开发利用探索[J].内蒙古林业, 2025(3): 18-20.
MA Zhijie, HE Zhenping, SONG Xianlei, et al. Exploration on development and utilization of forest-grassland carbon sinks in Ordos City[J]. Inner Mongolia Forestry, 2025(3): 18-20.

[28] 陈　强,凌郡鸿,邱顺添.中国尾矿库碳汇潜力及经济效益评估[J].环境科学研究,2025, 38(4): 746-753.
CHEN Qiang, LING Junhong, QIU Shuntian. Assessment of carbon sink potential and economic benefits of tailings ponds in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2025, 38(4): 746-753.

[29] 欧阳少虎,陈敬安,周启星.碳中和生物固碳降污效应与应用策略[J].地球与环境,2025, 53(4):592-602.
OUYANG Shaohu, CHEN Jing′an, ZHOU Qixing. Carbon neutral biological carbon sequestration and pollution reduction effects and application strategies[J]. Earth and Environment, 2025, 53(4): 592-602.

[30] 齐宏运,周传芳,孙彦峰,等.基于碳足迹的黑龙江省黑河市农田生态系统碳源/汇时序变化及其对碳中和的贡献[J].地质通报,2025,44(7): 1254-1271.
QI Hongyun, ZHOU Chuanfang, SUN Yanfeng, et al. Temporal variation of carbon source/sink in farmland ecosystem in Heihe City, Heilongjiang Province based on carbon footprint and its contribution to carbon neutrality[J]. Geological Bulletin of China, 2025, 44(7): 1254-1271.

[31] 刘东阳,姚小萌,彭　薇,等.滨海湿地生态修复的固碳功能、实现路径及碳中和对策[J].河北师范大学学报(自然科学版), 2025, 49(5): 532-540.
LIU Dongyang, YAO Xiaomeng, PENG Wei, et al. Carbon sequestration function, implementation pathways and carbon neutrality countermeasures of coastal wetland ecological restoration[J]. Journal of Hebei Normal University (Natural Science Edition), 2025, 49(5): 532-540.

[32] 谢和平,王金华,姜鹏飞,等.煤炭科学开采新理念与技术变革研究[J].中国工程科学,2015,17(9):36-41.
XIE Heping, WANG Jinhua, JIANG Pengfei, et al. New concept and technological transformation of scientific coal mining[J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(9): 36-41.

[33] 章月华,刘　彦,吕庆田,等.二氧化碳地质封存地球物理监测技术研究进展与应用展望[J].中国地质,2025, 52(1): 159-179.
ZHANG Yuehua, LIU Yan, LYU Qingtian, et al. Research progress and application prospects of geophysical monitoring technologies for geological CO_2 storage[J]. Geology in China, 2025, 52(1): 159-179.

[34] 王双明,申艳军,孙　强,等."双碳"目标下煤炭开采扰动空间CO_2地下封存途径与技术难题探索[J].煤炭学报,2022, 47(1): 45-60.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SUN Qiang, et al. Pathways and technical challenges for underground CO_2 storage in coal mining-disturbed spaces under dual-carbon goals[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 45-60.

[35] 李新华.神东矿区创建"零碳矿山"路径研究与实践[J].中国煤炭, 2022, 48(11): 88-94.
LI Xinhua. Research and practice on creating "zero-carbon mine" in Shendong mining area[J]. China Coal, 2022, 48(11): 88-94.

[36] 刘　洋,彭孟莹.绿色低碳发展的塔山矿实践[J].支部建设,2024(20): 15-16.
LIU Yang, PENG Mengying. Practice of green low-carbon development in Tashan Mine[N]. Zhibu Jianshe, 2024(20): 15-16.

(责任编辑　宋　爽)