

矿山立体空间能源化、低碳化利用研究

康红普¹, 王运敏², 张亚宁^{3*}, 任世华³, 王保强¹, 陈佩佩¹, 王洪磊³, 仪海豹²,
王星², 焦小淼³, 任仰辉³, 郑德志³, 蒋招梧¹

(1. 中国煤炭科工集团有限公司, 北京 100013; 2. 中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司, 安徽马鞍山 243000;
3. 煤炭科学研究总院有限公司, 北京 100013)

摘要: 我国矿产资源在长期大规模开发过程中形成了大体量的地上和地下立体空间, 加快矿山立体空间的能源化、低碳化利用, 有利于支撑矿业绿色低碳转型和构建新型能源体系, 对实现“双碳”目标和保障国家能源安全具有重要的战略意义。本文界定了矿山立体空间的概念, 阐述了能源化、低碳化利用的内涵, 科学测算了我国各类空间的当前规模及未来规模潜力, 进一步测算了风光发电、碳汇、碳封存等能源化与低碳化利用潜力; 结合矿山立体空间主要特征总结了能源开发、储能蓄能、资源储备、扩绿降碳及“科教文卫旅”五大典型利用模式, 分析了利用现状及存在的问题。在此基础上, 提出了我国矿山立体空间能源化、低碳化利用构想, 涵盖总体思路和阶段目标, 构建了推进战略资源储备利用、能源资源直接利用、发电储能转化利用、减碳零碳负碳利用、一体化协同利用“五个利用”路径框架, 建立了涵盖空间勘查评估、修复治理、能源化利用、低碳化利用、安全保障等方向的能源化与低碳化利用技术体系。研究建议, 深化矿山立体空间资源摸底调查、明确空间权属、健全规划体系、加强科技创新支持、建设重点示范项目, 多措并举推进我国矿山立体空间的能源化、低碳化利用。

关键词: 矿山; 立体空间; 能源化利用; 低碳化利用; 负碳充填开采技术

中图分类号: R-1 文献标识码: A

Energy-Oriented and Low-Carbon Utilization of Three-Dimensional Space of Mines

Kang Hongpu¹, Wang Yunmin², Zhang Yaning^{3*}, Ren Shihua³, Wang Baoqiang¹,
Chen Peipei¹, Wang Honglei³, Yi Haibao², Wang Xing², Jiao Xiaomiao³,
Ren Yanghui³, Zheng Dezhi³, Jiang Zhaowu¹

(1. China Coal Technology and Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. Sinosteel Maanshan General Institute of Mining Research Co., Ltd., Maanshan 243000, Anhui, China; 3. Chinese Institute of Coal Science Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: During the long-term large-scale development of China's mineral resources, a vast three-dimensional space both above and under the ground has been formed. Accelerating the energy-oriented and low-carbon utilization of the three-dimensional space of mines is conducive to supporting the green and low-carbon transformation of the mining industry and building a new energy system. This is also crucial for achieving the carbon peaking and carbon neutralization goals as well as ensuring national energy security. This study defines the concept of a three-dimensional space in mines and expounds on the implications of energy-oriented and low-carbon

收稿日期: 2026-01-30; 修回日期: 2026-03-13

通讯作者: *张亚宁, 煤炭科学研究总院有限公司副研究员, 研究方向为能源(煤炭)战略研究; E-mail: zynmining@163.com

资助项目: 煤炭重大专项(2025ZD1701300); 中国工程院咨询项目“煤炭工业科技创新与产业创新深度融合发展战略研究”(2025-XZ-48), “矿山立体空间能源化低碳化利用战略研究”(2024-XZ-30)

本刊网址: ssc.ae.engineering.org.cn

utilization. The current scales and future potentials of various spaces in China's mines are calculated, and the potentials for energy-oriented and low-carbon utilization approaches such as wind and solar power generation, carbon sequestration, and carbon storage are further calculated. Based on the major characteristics of the three-dimensional spaces of mines, the study summarizes five typical utilization modes, namely energy development, energy storage, resource reserve, green expansion and carbon reduction, as well as "science, education, culture, health, and tourism" development. It also analyzes the current utilization status and problems, and proposes a strategic concept with an overall approach and stage objectives. Moreover, the study establishes a strategic framework consisting of "five utilization" paths, including storage and utilization of strategic resources, direct utilization of energy resources, conversion and utilization of power generation and energy storage, carbon reduction-zero carbon-negative carbon utilization, as well as integrated and collaborative utilization. An energy-oriented and low-carbon utilization technology system covering spatial exploration and assessment, restoration and management, energy-oriented utilization, low-carbon utilization, and safety assurance is established. Finally, policy recommendations are proposed, including deepening the preliminary survey of three-dimensional space resources in mines, clarifying spatial ownership, improving the planning system, strengthening support for scientific and technological innovation, and constructing key demonstration projects.

Keywords: mine; three-dimensional space; energy-oriented utilization; low-carbon utilization; carbon-negative backfill mining technology

一、前言

我国高度重视能源安全和低碳转型工作，将其纳入经济社会发展全局与生态文明建设整体布局，作出了一系列重大战略决策与部署。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》明确了“碳达峰目标如期实现，清洁低碳安全高效的新型能源体系初步建成”的战略目标。2026年全国能源工作会议强调，确保如期实现碳达峰和2035年国家自主贡献目标，必须以更大力度推动能源绿色低碳转型。

我国是全球最大的矿产资源生产国，有13种矿产的产量占全球总产量的50%以上，截至2024年年底，全国共有采矿权约 3×10^4 个，登记采矿面积超 $3.5 \times 10^5 \text{ km}^{2[1,2]}$ 。矿产资源在长期大规模开发过程中形成了巨量空间。广义的矿山立体空间指煤矿与非煤矿山在开发过程中产生的地上、地下各类空间，以及空间内各类资源。地上空间包括工业场地、沉陷区、排土场、尾矿库等，地下空间包括露天矿坑、巷道、井筒、硐室、采空区、盐穴等，空间内资源涵盖风、光、水、热、遗煤等。本研究初步测算结果显示，2024年，我国矿山地上空间总面积达 $2.33 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，地下空间体积约为 $1.262 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。在未来较长时期内，我国能源资源消费量仍将处于高位，尤其是煤炭在一定时期内仍将作为重要能源发挥兜底保障作用^[3-6]。矿山仍需持续大规模开发以保障能源资源供应，矿山立体空间规模增长潜力巨大。

矿山立体空间具有调节能源平衡、碳汇、储碳的良好基础和潜力。矿山立体空间能源化、低

碳化利用具体指科学挖掘矿山立体空间和空间内资源利用潜力，因地制宜打造能源化、低碳化利用新模式，推动矿山立体空间以风光发电、抽水蓄能、储气、储氢等供能/储能方式实现能源化利用，以生态碳汇、碳封存等碳汇与储碳方式实现低碳化利用，最终打造为多元能源供储中心和碳中和基地。目前，受制于底数不清、权属模糊、关键技术不成熟等原因，矿山立体空间全方位利用格局仍未形成。近年来，随着技术进步，矿山立体空间的利用方向逐步拓展，可逆式重力轮机、重物输送系统等重力储能技术加快突破，为矿井储能提供了新方式^[7-10]；储氢库井筒完整性管控、灾变孕育与防控等技术快速发展，为矿山地下空间大规模储氢提供了新机遇^[11-15]；负碳高效充填开采理论、煤基固废矿化封存 CO_2 等矿山地下碳封存理论与技术取得一定突破，为规模化碳封存提供了新路径^[16-20]。

整体来看，当前我国矿山立体空间能源化、低碳化利用仍处于起步探索阶段。除沉陷区风光发电、盐穴储气等已有实际应用案例外，矿井储能、采空区碳封存等深层次的大规模利用方式尚在研究与示范阶段^[21-26]，在政策机制、基础理论、工程技术、经济可靠等方面仍存在诸多问题和挑战，迫切需要加快构建矿山立体空间利用有效技术途径，突破地下空间勘查、安全评价、储能储碳等关键技术，在政策机制、技术标准、工程示范等方面多措并举，因地制宜打造能源化、低碳化利用新模式，支撑新型能源体系构建和“双碳”目标实现。

本文在界定矿山立体空间概念及内涵的基础上，科学测算矿山各类空间规模及其能源化、低碳

化利用的潜力，调研分析我国矿山立体空间的典型利用模式和资源化、低碳化利用面临的挑战，提出我国矿山立体空间资源化、低碳化利用构想，涵盖总体思路、利用路径、技术体系和利用建议等，以期为我国矿山立体空间资源化、低碳化利用提供借鉴和参考。

二、矿山立体空间规模测算与利用潜力分析

(一) 矿山立体空间规模及潜力测算

1. 测算范围

按照煤矿、黑色金属矿、有色金属矿、贵重金属矿、非金属矿5类主要矿山的11个主要矿种（煤矿、铁矿、锰矿、铝土矿、铜矿、铅锌矿、镍矿、金矿、砂石矿、磷矿、井盐矿）对我国矿山立体空间现有及未来规模进行测算。其中，地上空间分为压占土地（如排土场、废石场、矸石场、尾矿库（含赤泥堆）、矿山建筑等）和塌陷土地（如塌陷坑、地裂缝）2类，地下空间分为露天矿坑、采空区、井巷3类^[27]。

2. 测算方法

依据中国地质调查局、国家能源局等官方统计信息，结合我国矿产资源生产现状及趋势，测算煤矿与主要非煤矿山各类空间现有规模及未来规模潜力，在此基础上，进一步测算分析资源化、低碳化利用潜力。具体来看，本研究以中国地质调查局自然资源航空物探遥感中心发布的2019年矿山环境遥感监测数据为基础，结合年增采矿损毁面积，测算当前及未来我国矿山地上空间规模。截至2018年年底，全国压占土地（排土场、废石

场、矸石场、尾矿库（含赤泥堆）、矿山建筑等）面积为 $1.3067 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，塌陷土地（塌陷坑、地裂缝）面积为 $8.445 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，全国每年新增采矿损毁土地面积超 $5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。按照保守计算，将年采矿损毁面积视为 $5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，结合各类空间占比，对我国矿山立体空间当前及未来规模进行测算。

对于矿山地下空间，以国务院安全生产委员会办公室、国家统计局等官方统计数据为基础，结合矿产产量、露天开采占比、剥采比、充填率等数据测算矿山各类地下空间体积，进而根据矿产资源开发趋势测算未来规模潜力。1949—2024年，我国累计生产原煤约 $1.076 \times 10^{11} \text{ t}^{[28]}$ ，露天开采占比、露天矿坑平均回填率分别按照8%、30%测算。由于2000年前非煤矿山的相关统计资料缺失，统计测算我国铁矿、铜矿、砂石矿等主要非煤矿种1949—1999年产量约为2000—2024年产量的11%~16%，因此，1949—1999年间非煤矿石的产量可以按照2000—2024年总产量的11%进行保守测算。同时，金属、非金属主要矿种露天矿山的凹陷开采占比可以按照60%、30%测算（保守计算）。未来矿山地下空间规模的具体测算方法如表1所示。

3. 测算结果与分析

我国矿山地上和地下空间规模现状及潜力，如表2所示。2024年，我国矿山地上空间总面积达 $2.33 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是北京市土地面积的近1.5倍；地下空间体积约为 $1.262 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，是三峡水库总库容的3倍多。随着矿产资源不断开发，预计2030年、2050年、2060年，我国矿山地上空间面积将达 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $3.11 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $3.41 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；地下空间体积将达 $1.844 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 、 $3.519 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 、 $4.157 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。

表1 矿山地下空间规模测算方法

空间类型	测算方法
露天矿坑体积	$V_{\text{露}} = V \cdot (1 + N_p)$ 式中， V 为露天开采方式采出矿石体积， N_p 为剥采比
采空区体积	煤矿 $V_1 = V_{\text{煤}} \cdot (1 - \eta) / (1 + k)$ 式中， $V_{\text{煤}}$ 为井工采出煤炭体积； η 为地表下沉系数，取值为0.7； k 为岩石膨胀系数，取值为0.1 ^[29] 非煤矿山 $V_2 = V_{\text{非煤}} \cdot j_1 \cdot (1 - D)$ 式中， $V_{\text{非煤}}$ 为采出非煤矿石体积， j_1 为井工开采比例， D 为充填比例；可以结合表1中所列各主要非煤矿石的产量、井工开采比例、充填率等数据进行测算
井巷体积	煤矿 以2016年年底我国煤矿井巷可利用体积 $6.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 为基础 ^[29] ，结合岩石工程量等测算 非煤矿山 按照金属矿山、非金属矿山井巷工程与采矿量综合平均比分别为13%、30%测算

表2 矿山立体空间规模潜力

时间/年	地上空间规模/ $\times 10^4 \text{ km}^2$	地下空间规模/ $\times 10^8 \text{ m}^3$
2030	2.50	1843.91
2040	2.80	2754.12
2050	3.11	3519.27
2060	3.41	4157.24

(二) 矿山立体空间能源化、低碳化利用的潜力分析

1. 风能潜力

结合矿山空间规模数据，参照《风电场工程规划报告编制办法》等，考虑各地区地形情况、稳定性条件等因素，按照矿山地上空间可利用率为20%、风能平均装机密度为5 MW/ km^2 ，测算得出我国矿山立体空间发展风能潜力如表3所示。2024年，矿山地上空间可开发风能资源总潜力为 $2.3 \times 10^7 \text{ kW}$ ，预计2030年矿山地上空间风能潜力为 $2.5 \times 10^7 \text{ kW}$ ，到2060年预计可达 $3.4 \times 10^7 \text{ kW}$ 。

2. 太阳能潜力

参照《光伏发电站工程项目用地控制指标》等，考虑各地地质条件、生态保护等限制，按照矿山地上空间可利用率为30%、光伏平均装机密度为50 MW/ km^2 进行测算，我国矿山立体空间发展太阳能潜力如表3所示。2024年，矿山地上空间可开发太阳能资源总潜力为 $3.5 \times 10^8 \text{ kW}$ ，开发前景良好。预计2030年，我国矿山地上空间的太阳能潜力为 $3.75 \times 10^8 \text{ kW}$ ，到2060年可达 $5.12 \times 10^8 \text{ kW}$ 。

3. 碳汇潜力

结合我国已公示的2023年林业自愿减排审定项

目平均单位面积减排数据，按照矿山地上空间可利用率为40%、碳汇能力为 $11 \text{ tCO}_2/\text{hm}^2/\text{a}$ ，测算我国矿山立体空间的碳汇潜力如表4所示。2024年，我国矿山地上空间碳汇潜力达 $1 \times 10^7 \text{ tCO}_2/\text{a}$ 。预计2030年的碳汇潜力为 $1.1 \times 10^7 \text{ tCO}_2/\text{a}$ ，2060年达 $1.5 \times 10^7 \text{ tCO}_2/\text{a}$ 。考虑未来太空芦竹等高碳汇植物的逐步改良和推广应用，预计2030年的碳汇潜力可提升至 $2 \times 10^8 \text{ tCO}_2/\text{a}$ ，到2060年可达 $2.73 \times 10^8 \text{ tCO}_2/\text{a}$ 。

4. 碳封存潜力

考虑避开地质条件复杂区域，按照矿山地下空间可利用率为30%、矿化稳定封存方法综合单位体积碳封存量为 $80 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ ，测算我国矿山立体空间碳封存潜力如表5所示。2024年，我国矿山地下空间现有碳封存总量潜力为 $8.11 \times 10^8 \text{ tCO}_2$ 。在常规情景下，预计2030年碳封存潜力为 $9.87 \times 10^8 \text{ tCO}_2$ ，到2060年可达 $1.612 \times 10^9 \text{ tCO}_2$ 。考虑高孔隙碳封存材料等的加快突破和应用，在技术进步情景下，预计2030年的碳封存潜力为 $5.676 \times 10^9 \text{ tCO}_2$ ，2060年可达 $9.269 \times 10^9 \text{ tCO}_2$ 。

5. 储能等潜力

较大规模的盐穴、露天矿坑、永久井巷硐室等矿山立体空间为压缩空气储能、抽水蓄能、重力储能、储氢储气等提供了良好的地质储库，利用潜力极大。在盐穴储能储气方面，我国现有盐穴超2000个，仅规划、建设的十几处盐穴压缩空气储能项目的总装机量已达5.38 GW，如金坛盐穴储气库已形成工作气量超 $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。在矿山抽水蓄能方面，仅安徽省关闭煤矿抽水蓄能电站装机潜力就可达421.61 MW。

表3 矿山立体空间能源化利用潜力测算

潜力类型	参数类型	2030年	2040年	2050年	2060年
风能潜力	可利用面积/ $\times 10^4 \text{ km}^2$	0.50	0.56	0.62	0.68
	发电潜力/ $\times 10^8 \text{ kW}$	0.25	0.28	0.31	0.34
太阳能潜力	可利用面积/ $\times 10^4 \text{ km}^2$	0.75	0.84	0.93	1.02
	发电潜力/ $\times 10^8 \text{ kW}$	3.75	4.20	4.67	5.12

表4 矿山立体空间低碳化利用潜力测算

潜力类型	情景类型	2030年	2040年	2050年	2060年
碳汇潜力	常规情景/ $(\times 10^8 \text{ tCO}_2 \cdot \text{a}^{-1})$	0.11	0.12	0.14	0.15
	技术进步情景/ $(\times 10^8 \text{ tCO}_2 \cdot \text{a}^{-1})$	2.00	2.24	2.49	2.73
碳封存潜力	常规情景/ $(\times 10^8 \text{ tCO}_2 \cdot \text{a}^{-1})$	9.87	12.55	14.60	16.12
	技术进步情景/ $(\times 10^8 \text{ tCO}_2 \cdot \text{a}^{-1})$	56.76	72.14	83.96	92.69

在矿山地热开发方面,煤矿千米以深资源占比超 70%,矿山开发及接续深度与地热资源深度极为契合,地热开发拓展潜力巨大。

总体来看,2024 年,我国矿山立体空间现有风光发电潜力 (3.73×10^8 kW) 约为可再生能源总装机 (1.889×10^9 kW) 的近 20%,具备 1×10^7 tCO₂/a、 8.11×10^8 tCO₂ 的碳汇和碳封存总量潜力。此外,矿山立体空间储能、储气、地热开发等其他利用潜力巨大。随着新能源发电、储能、储碳等相关技术的不断突破,能源化、低碳化利用规模和方向将不断增长及拓展。预计 2060 年,矿山立体空间能源化、低碳化利用潜力规模可增长至现有潜力的 2 倍左右。考虑未来矿山负碳高效充填开采等技术实现重大突破,结合矿区高效碳汇,有望实现每年 $1.444 \times 10^9 \sim 1.928 \times 10^9$ t 的固碳量,可有力支撑我国能源领域碳中和目标的实现。

三、矿山立体空间特征与典型利用模式分析

结合矿山立体空间的主要特征,通过文献检索与实地勘察,本文分析了矿山立体空间利用的国内外典型案例(见图 1),总结提出了矿产立体空间与能源开发、储能蓄能、资源储备、扩绿降碳、“科教文卫旅”等五大现有利用模式,并在此基础上分析利用现状与存在的问题。

(一) 矿山立体空间的主要特征

1. 规模性

我国矿山种类繁多,生产及关闭矿山数量庞大,在开发过程中形成了巨量立体空间,且规模仍在不断增长。据统计,我国已发现矿产种类约 173 种,现有煤矿近 4300 座,非煤矿山超 3×10^4 座。每年每个千万吨级煤矿可形成的采空区约为 1.2×10^6 m³[30],每年新增盐穴空间达千万立方米级别。

2. 高差性

我国矿山井下开采深度一般在 400~1000 m,部分甚至超过 1500 m,不同开发矿层、不同开采水平间的势差可达几十至几百米,蕴藏着巨大的势差潜能。目前,我国煤矿平均开采深度已近 500 m,开采深度以年均 8~12 m 的速度持续增加,特别是在中东部地区,开采深度年均增加 10~25 m^[31]。目前,我国开采深度超千米的煤矿达 47 座,其中新汶矿业集团

有限责任公司孙村煤矿的开采深度已达 1510 m^[32],吉林夹皮沟金矿的开采深度达 1600 m。

3. 稳定密闭性

我国大部分金属矿山围岩致密坚硬、稳定性较好,且防护性、抗灾性极优,适于建设对围岩稳定性要求较高的项目。盐岩具有非常低的渗透率与良好的蠕变特性,纯盐岩的渗透率可低至 10^{-11} D,具有自修复功能,密闭性良好;盐穴储气泄漏量仅为总储气量的 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ [33],是储存高压空气的理想场所。

4. 资源性

矿山地上空间的风、光等资源丰富,地下空间富含矿井水、地热、残余煤炭等能源资源。煤炭资源富集区与太阳能资源富集区具有很大重叠性,我国东北部、内蒙古中东部、新疆北部、甘肃西部等地区风能富集区与赋煤区有一定重合^[34]。例如,内蒙古白云鄂博矿区的风能、太阳能资源丰富,常年多风,是国内主要大风区之一,年日照率约为 74%,非常适宜发展风力发电、太阳能发电等清洁能源产业。我国煤矿废弃矿井中的赋存煤炭资源量约有 4.2×10^{10} t,非常规天然气近 5×10^{11} m³[35]。

(二) 矿山立体空间的典型利用模式

1. 立体空间+能源开发

“立体空间+能源开发”指利用沉陷区、排土场、井巷等矿山空间和空间内资源,进行风、光、地热等新能源开发的矿山立体空间利用模式,适用于具备较大空间规模且空间内风、光、热等资源丰富的矿山立体空间。

风光发电较为成熟,在鄂尔多斯、大同、白银等地的矿区,已利用沉陷区、废石场等建成多个矿山地上空间风光发电利用项目。国家能源集团国电电力蒙西蓝海 3×10^6 kW 光伏电站项目是我国单体最大的采煤沉陷区光伏基地,全容量并网投产后的年发电量可达 5.7×10^9 kW·h,每年可节约标煤约 1.71×10^6 tce、碳减排量约 4.7×10^6 t^[36]。中核集团甘肃省白银深部铜矿废石场尾矿治理光伏项目采用“光伏+废石场”模式,额定装机容量为 1×10^5 kW,可减少燃煤约 4.7×10^4 tce、减少碳排放量约 1.2×10^5 t^[37]。国家电投内蒙古公司北露天煤矿 4 MW 分散式风电示范项目是全球首个在露天矿排土场建设的分散式风电示范项目,该项目每年可贡献超过 1.166×10^7 kW·h

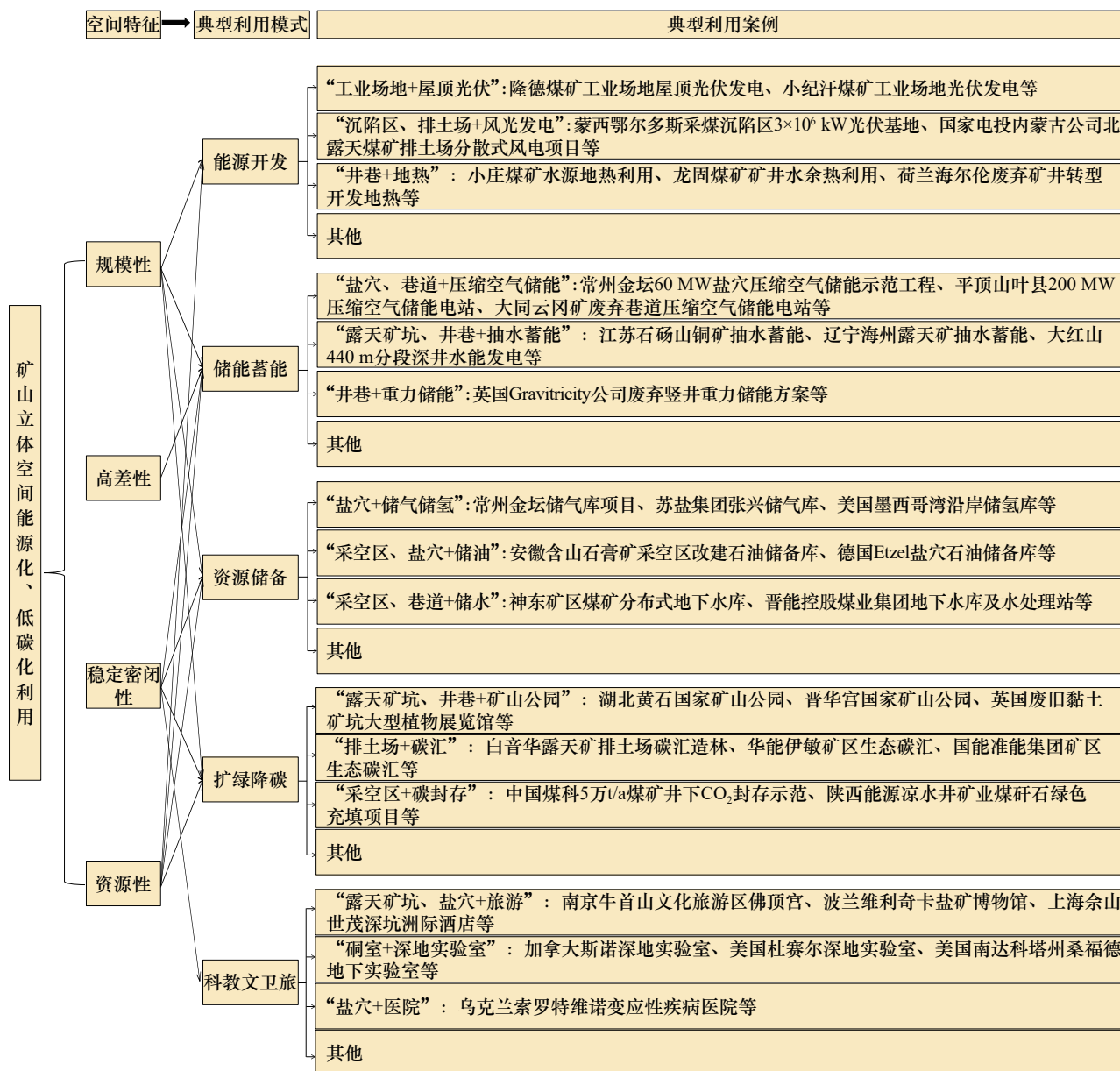


图1 矿山立体空间典型利用模式与案例

的清洁电能，配合灵活调节的电化学储能系统，可为新能源矿卡充电提供有力保障。目前，地热利用方式简单、场景单一，主要集中于供暖、井筒保温、热水供应等，地热发电潜力未充分挖掘^[38-41]。陕西彬长小庄矿业有限公司、枣庄矿业（集团）有限责任公司田陈煤矿、山东新巨龙能源有限责任公司等利用矿井水、矿井乏风余热，建设矿井余热资源综合利用项目，满足了矿区冬季井筒保温防冻、职工浴室洗澡用热、冬季建筑物供暖及夏季建筑物供冷等需求，实现了可再生新能源代煤供热的目标。荷兰海尔伦市利用海尔伦废弃煤矿地热资源建成一座新

型地热发电站，该发电站通过废弃矿井通道从地下800 m深处泵出热水以生产电能^[42]。

2. 立体空间+储能蓄能

“立体空间+储能蓄能”指利用盐穴、露天矿坑、井巷、硐室等矿山空间和空间内资源，开展压缩空气储能、抽水蓄能、重力储能等的矿山立体空间利用模式，适用于具备稳定性、密闭性、高势差储能条件以及具有水资源等储能介质的矿山立体空间。

目前，矿山压缩空气储能处于示范阶段，常州金坛、大同云冈等地已建设数座盐穴、巷道压缩空

气储能示范电站。金坛 60 MW 盐穴压缩空气储能国家示范工程是世界首个非补燃压缩空气储能电站^[43]，利用盐矿开采后的废弃矿洞，吸纳电网低谷时的“弃能”，将空气压缩到盐穴中转化为空气分子的内势能，在用电高峰时释放分子势能做功发电。矿山抽水蓄能处于起步阶段，在辽宁阜新、江苏徐州等地已有多处已建和在建项目。江苏石碭山铜矿抽水蓄能电站计划将采石宕口和地下矿坑改建为上下水库，实现废弃矿坑再利用^[44]，拟定装机容量为 1.2×10^6 kW。江苏铜山抽水蓄能电站项目计划协同利用西马山露天废弃矿坑和镇北铁矿地下空间建设上下水库，设计装机容量为 1.4×10^6 kW，为解决平原地区建设抽水蓄能项目开辟了新路径。矿山重力储能仍在探索阶段，仅有部分国外方案报道，缺少示范工程实证。英国 Gravitricity 公司提出了基于废弃竖井和多卷扬提升机提升重物的重力储能方案，可在用电低谷时将重物拉升至废弃矿井顶部，在用电高峰时落下来释放存储的能量^[45]。

3. 立体空间+资源储备

“立体空间+资源储备”指利用盐穴、采空区等地下空间和相关资源建设地质储库，储备油气、氢气、地下水等的矿山立体空间利用模式，适用于具备一定储存规模、围岩渗透率低、稳定性高的矿山立体空间。

盐穴储气已实现规模推广。在江苏、湖北等地已建成投产数座盐穴天然气储库，一批盐穴储气库正在规划建设。常州金坛储气库是我国首座大规模地下盐穴储气项目及商业储气项目，已于 2024 年全部建成达产，总储气量达 5.4×10^8 m³，最大供气能力为 5×10^6 m³/d。国外在矿山地下空间储油利用方面走在前列，美国、德国等国家已利用地下盐穴建成石油战略储备库，国内虽已开始论证建设盐穴储油库，但目前尚未着手建设^[46]。需要指出的是，国家能源储备中心正推进金坛和淮安盐穴储油库建设。安徽含山石膏矿计划利用废弃采空区建设国家石油储备库项目，初步建设 5×10^6 m³ 石油储备库，可比建设同等规模的地面石油库节约 3×10^9 元。采空区地下水库建设较为成熟，神东煤炭集团的 15 个矿井已建成 35 座地下水库，总储水量达 2.5×10^7 m³，为后续抽水蓄能利用奠定了重要基础^[47]。矿山储氢尚处于探索阶段，目前，美国、英国、德国等国家共建成 5 座盐穴储氢库，其中，美国已建成 Moss

Bluff、Clemen Dome、Spindletop 三座盐穴储氢库，储氢量分别为 6020 t、6210 t 和 13 100 t^[48]；我国已开展部分矿洞、盐穴储氢的理论研究和工程试验。

4. 立体空间+扩绿降碳

“立体空间+扩绿降碳”指利用沉陷区、尾矿库、采空区等矿山空间和空间内资源，进行生态修复、建设矿山公园、发展碳汇与碳封存等的矿山立体空间利用模式，适用于损毁空间易修复、碳汇植物适宜生长的矿山立体空间。

矿山公园建设已非常成熟，我国已累计审批通过河北唐山开滦煤矿、山西大同晋华宫矿、湖北黄石国家矿山公园等 88 处国家矿山公园，其中建成并开园 39 处，此外还有大量省级矿山公园。矿山碳汇项目快速发展，内蒙古、山东等地矿区对排土场、沉陷区进行生态修复，种植碳汇林草植被。内蒙古白音华露天矿排土场碳汇造林项目是我国首个露天煤矿排土场碳汇造林项目，在 30 年计入期内，预计将产生碳减排量约 2.2×10^4 tCO₂e，年均减排量约为 750 tCO₂e。采空区碳封存尚处于探索阶段，开展了部分理论、技术研究和示范工程建设^[49-51]。中国煤炭科工集团有限公司攻关研发了 CO₂ 深度高效矿化、粉煤灰长距离管道输送、采空区粉煤灰浆高效充填等技术和装备，在三道沟煤矿开展了 5×10^4 t/a 的煤矿井下 CO₂ 封存示范。

5. 立体空间+科教文卫旅

“立体空间+科教文卫旅”指利用硐室、井巷、露天矿坑等矿山空间和空间内资源，开展实验室、医院、教育基地、文化旅游等的矿山立体空间利用模式，适用于地质结构稳定、环境安全、区位交通便利，且空间形态与“科教文卫旅”功能适配的矿山立体空间。

矿山酒店、旅游等的发展已较为成熟，在南京、上海等地已建成多处矿坑酒店、矿山游乐园、旅游区等。上海佘山世茂深坑洲际酒店依附深坑崖壁而建，是世界首个建造在废石坑内的五星级自然生态酒店，被美国国家地理誉为“世界建筑奇迹”。南京牛首山文化旅游区佛顶宫利用直径超 200 m、深度超 60 m 的废弃矿坑建设，主体建筑共 9 层，其中利用地下矿坑建设 6 层。矿山实验室、医院等处于起步探索阶段，美国、加拿大、乌克兰等国家开展了探索性建设，应用于特殊科研和医疗用途。加拿大利用废弃地下矿井建设斯诺（SNO）深地实验

室，实验室的垂直岩石覆盖厚度达2000 m，容积约为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，开展了多项粒子物理实验研究，其中最著名的实验是验证了中微子振荡的存在。乌克兰将地下300 m深处的索罗特维诺盐矿9号井筒装修为变应性疾病医院，用于治疗呼吸系统疾病患者。赣南医科大学龙南校区采取“生态修复+高等教育”融合模式，在废弃采石场上建成一所大学，探索出一条生态治理与教育振兴协同发展的新路径。

（三）矿山立体空间能源化、低碳化利用面临的问题

矿山立体空间具有调节能源平衡、储碳的良好基础和巨大潜力，能源化、低碳化利用尚处于探索起步阶段，在政策机制、基础理论、工程技术等方面存在诸多需要解决的问题。

1. 利用规模和利用方式不充分

我国矿山立体空间整体利用规模较小，亟待挖掘调节能源平衡、储碳等深层次、大规模利用方式的潜力。例如，我国盐穴空间资源丰富，目前已利用的盐穴仅占已探明符合使用条件总量的2%左右^[52,53]，绝大多数处于闲置状态。我国已利用煤矿建设国家级矿山公园22处，但地下空间抽水蓄能等深层次、高附加值利用仍处于研究示范阶段。

2. 地上地下一体化利用不协调

矿山地上空间利用以风光发电、绿化、碳汇等为主，利用模式及技术等相对成熟；矿山地下空间利用仅涉及初级地热利用、盐穴储气等，储能、碳封存等仍在研究示范或起步建设阶段。此外，在矿山开发初期，未对地上地下空间进行系统规划，未形成统一协同的一体化利用方式，矿区地上风、光伏发电与井下抽水蓄能、压缩空气储能等还未深度融合。

3. 不同类型矿山空间利用不平衡

我国矿山数量庞大、种类众多，不同矿种矿山、同种矿山不同地质条件和不同开发方式等均会对立体空间利用造成影响。非煤矿山数量庞大、矿种复杂、条件各异，开发产生的立体空间整体利用情况不及煤矿。单就煤矿而言，各地区煤矿赋存深度、煤层厚度、围岩性质等各不相同，立体空间利用方式和难度也有较大差别。

4. 基础理论和关键技术不成熟

我国矿山立体空间利用研究起步较晚，空间地

质建模、空间稳定性、综合评估、灾变演化等基础理论研究薄弱，无法精确模拟和预测矿山立体空间三维形态、内部结构等，限制了资源测算和利用环境分析。多能互补、碳汇、碳封存等能源化、低碳化利用关键技术还不成熟，新型装备有待研发，限制了矿山立体空间的大规模开发利用。

5. 政策机制和利用需求不适应

矿山立体空间权属界定不明确，管理部门间的协同监管机制有待完善^[54]。例如，淮安市洪泽盐盆历经30余年开采，已形成100多个有效库容达 $1.067 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的盐穴地下空间，但现有14个采矿权分属不同矿山企业，严重影响了盐穴地下空间的统筹利用。此外，我国尚未形成一套全面、系统、完整的矿山立体空间利用规范标准体系，再加上政府财税支持力度不足，制约了矿山立体空间开发利用需求的增长。

四、矿山立体空间能源化、低碳化利用构想

（一）总体思路

突破矿区空间储能、固碳、减碳等矿山立体空间能源化、低碳化利用关键技术，按照因时制宜、因地制宜的科学规划理念，推动矿山立体空间能源化开发、低碳化利用、一体化发展，实现供能多元化、储能规模化、用能清洁化，打造安全协同、灵活稳定、清洁低碳、智慧开放的多元能源供储中心和碳中和基地。具体来看，安全协同要求通过技术融合与管理联动，消除矿山立体空间利用风险，实现地上地下各类空间的一体化利用；灵活稳定要求矿山立体空间利用要适应空间条件和资源禀赋，实现相对稳定的供能、储能及储碳；清洁低碳要求通过推进矿山新能源、碳封存等项目建设，实现清洁能源替代和规模化固碳；智慧开放要求矿山立体空间利用要具备数据驱动与价值共享能力，实现内部生产运营数字化管控和外部共享生态系统化构建。

近中期内，建立全国矿山立体空间资源数据信息平台，初步形成全国矿山立体空间资源“一张图”；建设矿山立体空间利用领域的国家和省部级科研平台，初步构建矿山立体空间能源化、低碳化利用技术体系，突破关键技术和装备系统瓶颈。矿山立体空间能源储供和碳汇储碳初具规模，风光发电潜力利用率达到10%~20%，形成可复制、可推

广的多类型矿山储能先导示范工程，碳汇储碳能力可解决矿区自身碳排放量。到中远期，矿山立体空间能源储供、碳汇储碳能力大幅提升，建成矿山立体空间开发利用上下游产业链，形成成熟的矿山立体空间能源化、低碳化利用模式和技术体系，实现矿山立体空间能源储供和碳汇储碳的规模化利用，最终建成安全协同、灵活稳定、清洁低碳、智慧开放的多元能源供储中心和碳中和基地，有力支撑我国新型能源体系建成和“双碳”目标实现。矿山立体空间能源化、低碳化利用路径如图2所示。

(二) 利用路径

1. 战略资源储备利用路径

依托矿山采空区、井巷、硐室及盐穴等地下空间，充分发挥其密闭性、稳定性及规模性等天然优势，加快突破储层密封性强化、压力调控、安全监测等关键技术瓶颈，系统性开展地下储油库、储气库及其他类型战略资源地下储备设施的规划设计与工程建设，打造矿山立体空间战略资源储备基地，形成石油、天然气等核心战略资源多元化、规模化、集约化储备新路径，有效提升国家战略资源应

急保障能力。

2. 能源资源直接利用路径

充分挖掘矿山工业场地、排土场、采煤沉陷区等空间和空间内资源利用潜力，依托地上空间的风能、太阳能等资源禀赋，构建分布式与集中式相结合的新能源发电体系，推动风能、太阳能等可再生能源的规模化开发与并网消纳。针对矿山地下矿井水资源、地热资源、遗留煤炭及天然气等资源，加快突破煤水共采、煤热共采、遗留资源高效开发等技术，实现井下各类资源规模化利用。

3. 发电储能转化利用路径

充分利用矿山露天矿坑、采空区、井巷、盐穴等空间，发挥高差特性、密闭稳定特性等优势，系统性开发矿山抽水蓄能、压缩空气储能、重力储能等多元化储能项目，构建兼具削峰填谷、备用应急功能的绿色低碳调节电源体系，为高比例可再生能源并网消纳提供重要支撑，保障区域电力系统安全稳定运行与社会电力供需动态平衡，助力国家新型能源体系构建。

4. 减碳零碳负碳利用路径

针对矿山排土场、采煤沉陷区等地表受损空



图2 矿山立体空间能源化、低碳化利用路径

间，利用植被重建、土壤改良等技术手段，开展系统性生态修复工程，在此基础上构建集绿色矿山公园、生态保育、农林牧渔于一体的多功能生态综合体，实现碳汇能力规模化提升与可持续发展。依托采空区、废弃井巷、人工硐室等地下空间，构建规模化地质碳封存路径，通过地下空间地质条件适应性评估、密封性强化改造并结合负碳高效充填开采等先进技术，实现地下规模化碳封存，为国家“双碳”目标实现提供重要支撑。

5. 一体化协同利用路径

综合考虑矿山地质环境条件、空间形态特征、资源禀赋差异，系统衔接区域国土空间规划，以资源统筹配置为核心，整合矿产资源、土地资源、生态资源及地质空间资源等多元要素，打破空间利用的平面化局限与资源利用的单一化瓶颈，构建三维空间协同联动、多开发方案动态耦合、多资源效益叠加释放的矿山立体空间一体化开发利用新范式，为矿山行业可持续发展与资源高效利用提供系统性解决方案。

（三）技术体系

1. 空间勘查评估技术体系

开展矿山立体空间地质与资源综合勘查技术、“天空地井巷”多维度协同探测技术、地下空间感知探测一体化机器人、透明矿井三维地质建模理论、空间动态数据库等矿山立体空间综合勘查技术攻关，摸清矿山空间地质条件、残余资源等状况。加快矿山立体空间规模评价、空间利用环境承载力评价、空间利用安全风险研判、沉陷区风光资源评价、空间利用方向适宜性评价等技术攻关，科学系统评估矿山立体空间利用的适用性、可行性与安全性。

2. 空间修复技术体系

开展矿山地上空间生态修复与景观构建技术、矿山排土场土壤重构及植被恢复新技术、沉陷区水生态环境修复技术、裂隙地层修复和改性等矿山地上空间修复技术研究，推进采空区围岩稳定性控制技术、采空区精准高效充填治理技术、空间恢复区生态精准监测等地下空间修复技术研究，实现可利用矿山立体空间的修复与治理，为能源化、低碳化利用奠定基础。

3. 空间能源化利用技术体系

开展露天空间高效光伏发电技术、沉陷区高效风力发电技术、矿山深井接续干热岩型地热资源开发技术、盐穴液流电池技术、关闭/废弃矿井遗留煤炭资源再开发利用等供能技术研究，加快盐穴压缩空气储能关键技术、露天/地下空间抽水蓄能发电技术、分布式抽水蓄能电站技术、井巷重力储能关键技术、地下储库（储水、储油、储气等）建设等储能储库技术攻关，推进矿山立体空间供能、储能等能源化利用。

4. 空间低碳化利用技术体系

开展矿区土壤和植被碳汇功能提升技术、水体碳汇功能提升技术、矿区生态碳汇防损技术、矿山地上空间立体碳汇技术、矿区碳汇调查监测技术、矿区碳汇计量评估等矿山立体空间碳汇技术研究，加快废弃矿井采空区CO₂封存原理、井下CO₂封存充填材料制备技术、矿山咸水层CO₂封存技术、煤层CO₂安全封存关键技术、负碳高效充填开采等矿山立体空间碳封存技术攻关，推进矿山立体空间碳汇、碳封存等低碳化利用。

5. 空间安全保障技术体系

开展露天空间利用风险识别与综合评价技术、露天边坡精准监测预警与稳定性控制技术、露天采坑转尾矿库地质处理与防渗技术、矿山地下空间灾害数字监测预警与控制技术、矿山空间关键设备健康状态评估与预警技术和平台等预警及治理技术研究，推进矿山立体空间数字孪生虚拟灾变现场关键技术、基于精密感知原理与执行机制的智能应急救援平台、矿山立体空间利用智慧应急救援技术与装备等应急救援技术研究，保障矿山立体空间的安全利用。

五、矿山立体空间能源化、低碳化利用建议

（一）深化矿山立体空间资源摸底调查

组织地质勘探单位和矿山企业，创新运用卫星高光谱遥感、人工智能地质建模、井下机器人等先进技术装备，对全国矿山立体空间展开全方位、精细化勘查，查明矿山空间分布、规模及状态等。整合现有矿山地质环境监测系统、采矿权登记库等，建立矿山立体空间数据库，涵盖空间权属、坐标、规模、灾害风险、生态指标等信息，并实行动态更

新管理。对矿山立体空间资源进行分类评估, 筛选适合能源化、低碳化利用的优质资源。

(二) 明确矿山立体空间权属

制定明确且具有法律效力的界定标准, 明确规定矿山立体空间所有权归国家所有; 矿山立体空间使用权依据在开采过程中的投入、对资源利用的规划合理性以及对地方经济和生态环境的综合贡献等因素, 通过科学合理的评估机制进行配置, 优先向矿山企业倾斜。建立跨部门权责清单, 明确自然资源、矿山安全、林业草原等相关部门在审批监管、执法监督等环节的权责边界, 形成管理合力。推行“一空间一档案”联审机制。同时, 制定空间权属争议解决、交易转让、信息登记等其他方面的规章制度。

(三) 健全矿山立体空间利用规划体系

组织能源、矿山、地质、生态等领域的权威专家, 编制矿山立体空间能源化、低碳化利用的国家级战略规划, 对体制机制、发展方式、科技创新、国际合作等进行顶层设计, 明确不同区域、不同类型、不同阶段矿山立体空间的发展定位和目标。充分考虑能源需求、碳减排目标、地质条件等因素, 协调好储能、碳封存等能源化、低碳化利用项目与其他产业的关系, 确保规划的科学性和可操作性。配套制定全面、系统、完整的矿山立体空间利用规范标准体系, 编制矿山立体空间开发利用指南。

(四) 加强矿山立体空间利用科技创新支持

加大国家和地方对矿山立体空间能源化、低碳化利用的科技创新支持。建设矿山立体空间能源化、低碳化利用重点实验室、工程中心等国家级研发平台。将矿山立体空间能源化、低碳化利用纳入国家科技重大专项、国家重点研发计划等, 加强对矿山空间地质勘查、矿山新能源发电、矿山储能、井下碳封存等基础理论和关键技术的科研攻关。鼓励与引导高校、科研院所与企业联合开展“产学研”合作项目, 加快矿山立体空间能源化、低碳化利用技术落地应用。

(五) 建设矿山立体空间利用重点示范项目

在全国范围内, 严格筛选一批条件较好的代表

性矿山, 如采空区分布合理的煤矿、地质条件良好的盐穴等, 开展矿山立体空间能源化、低碳化利用重点示范项目建设。建议在国家和地方层面给予资金、土地、政策等方面的重点支持, 引导社会资本参与项目建设, 探索不同类型矿山立体空间能源化、低碳化利用的有效模式和技术路径, 形成可复制、可推广的项目建设和运营管理模式。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 30, 2026; **Revised date:** March 13, 2026

Corresponding author: Zhang Yaning is an associate research fellow from Chinese Institute of Coal Science Co., Ltd. His major research field is energy and coal strategies. E-mail: zynmining@163.com

Funding project: Coal Major Project (2025ZD1701300); Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of Deep Integration of Technological Innovation and Industrial Innovation in the Coal Industry” (2025-XZ-48), “Research on the Strategy of Energy Utilization and Low-carbon Utilization of Three-dimensional Space in Mines” (2024-XZ-30)

参考文献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2024 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2025-02-28)[2025-08-30]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202502/t20250228_1958817.html. National Bureau of Statistic. Statistical communiqué of the People's Republic of China on the 2024 national economic and social development [EB/OL]. (2025-02-28)[2025-08-30]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202502/t20250228_1958817.html.
- [2] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告(2025) [M]. 北京: 地质出版社, 2025. Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. China mineral resources 2025 [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2025.
- [3] 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.
- [4] 康红普, 谢和平, 任世华, 等. 全球产业链与能源供应链重构背景下我国煤炭行业发展策略研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 26-37. Kang H P, Xie H P, Ren S H, et al. Development strategy of China's coal industry under the reconstruction of global industrial chain and energy supply chain [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 26-37.
- [5] 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 H P, Ren S H, Xie Y C, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality [J]. Journal

- of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197–2211.
- [6] 康红普, 任世华, 王保强, 等. 煤炭工业数字化发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(6): 170–178.
Kang H P, Ren S H, Wang B Q, et al. Digital development strategy of coal industry [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(6): 170–178.
- [7] 邹才能, 李士祥, 刘辰光, 等. 新质生产力赋能新型储能技术及其商业模式 [J]. 石油学报, 2024, 45(10): 1443–1461.
Zou C N, Li S X, Liu C G, et al. New energy storage technologies and their business models empowered by new quality productivity forces [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(10): 1443–1461.
- [8] 邱清泉, 肖立业, 罗晓悦, 等. 重力储能技术的研究进展 [J]. 电工电能新技术, 2025, 44(10): 50–61.
Qiu Q Q, Xiao L Y, Luo X Y, et al. Research progress of gravity energy storage technology [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2025, 44(10): 50–61.
- [9] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2024 年中国储能技术研究进展 [J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2149–2192.
Chen H S, Li H, Xu Y J, et al. Research progress on China's energy storage technology in 2024 [J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(6): 2149–2192.
- [10] 喻恒凝, 姚良忠, 程帆, 等. 重力储能在新型电力系统中应用: 前景及挑战 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(18): 7177–7192.
Yu H N, Yao L Z, Cheng F, et al. Prospects and challenges of gravity energy storage applications in new type power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(18): 7177–7192.
- [11] 张胜杰. 地质储氢是大规模储氢优先发展路径 [N]. 中国能源报, 2025-11-24(05).
Zhang S J. Geological hydrogen storage is the preferred development path for large-scale hydrogen storage [N]. China Energy News, 2025-11-24(05).
- [12] 雷华阳, 张昕宇, 许英刚. 盐穴储氢库稳定性评价生成式模型及应用框架 [J]. 岩土工程学报, 2025, 47(S2): 13–18.
Lei H Y, Zhang X Y, Xu Y G. Generative model and application framework for stability evaluation of salt cavern hydrogen storage facilities [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(S2): 13–18.
- [13] 施锡林, 黄涯帅, 杨春和, 等. 盐穴大规模储氢技术的经济性分析 [J]. 煤炭学报, 2025, 50(9): 4151–4165.
Shi X L, Huang Y S, Yang C H, et al. Economic analysis of large-scale salt cavern hydrogen storage [J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(9): 4151–4165.
- [14] 梅生伟, 李耀强, 徐能雄, 等. 基于地质条件的大规模储氢科学问题与研究框架 [J]. 中国科学: 技术科学, 2025, 55(9): 1540–1552.
Mei S W, Li Y Q, Xu N X, et al. Scientific issues and research framework for large-scale underground hydrogen storage [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2025, 55(9): 1540–1552.
- [15] 杨春和, 王贵宾, 施锡林, 等. 中国大规模盐穴储氢需求与挑战 [J]. 岩土力学, 2024, 45(1): 1–19.
Yang C H, Wang G B, Shi X L, et al. Demands and challenges of large-scale salt cavern hydrogen storage in China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(1): 1–19.
- [16] 谢和平, 张吉雄, 高峰, 等. 煤矿负碳高效充填开采理论与技术构想 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 36–46.
Xie H P, Zhang J X, Gao F, et al. Theory and technical conception of carbon-negative and high-efficient backfill mining in coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 36–46.
- [17] Huang J Y, Li H Z, Tang C, et al. Carbon sequestration in coal mine goafs: Innovations in high-water material solidification with supercritical carbon dioxide for global carbon neutrality initiatives [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2025, 27(11): 6587–6601.
- [18] 康红普, 谢和平, 王双明, 等. 煤炭与共生伴生矿产资源一体化绿色开发战略研究 [J]. 中国工程科学, 2025, 27(2): 172–183.
Kang H P, Xie H P, Wang S M, et al. Research on the integrated green development strategy of coal and co-existed and associated resources [J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(2): 172–183.
- [19] 朱梦博, 刘浪, 王双明, 等. 煤矿采空区间隔条带充填 CO₂ 矿化封存及其关键技术 [J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(6): 143–155.
Zhu M B, Liu L, Wang S M, et al. Backfill-strip mining and CO₂ mineralization sequestration in coal mine goaves: A synergetic method and its key technologies [J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(6): 143–155.
- [20] 王双明, 刘浪, 朱梦博, 等. 面间煤柱与顺槽“掘–充–留”一体化科学问题与技术 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(8): 3291–3315.
Wang S M, Liu L, Zhu M B, et al. Scientific problems and technology of the integration of “excavation–backfill–retention” of section coal pillar and mining roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8): 3291–3315.
- [21] 刘士奇, 王环玲, 周勇, 等. 废弃矿井压气储能地下空间利用可行性分析 [J]. 金属矿山, 2025 (8): 193–200.
Liu S Q, Wang H L, Zhou Y, et al. Feasibility analysis of underground space utilization for compressed air energy storage in abandoned mine [J]. Metal Mine, 2025 (8): 193–200.
- [22] Menéndez J, Loredo J, Galdo M, et al. Energy storage in underground coal mines in NW Spain: Assessment of an underground lower water reservoir and preliminary energy balance [J]. Renewable Energy, 2019, 134: 1381–1391.
- [23] 卞正富, 朱超斌, 周跃进, 等. 关闭煤矿地下空间抽水储能利用产业化瓶颈与对策 [J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(4): 1–14.
Bian Z F, Zhu C B, Zhou Y J, et al. Industrialization bottlenecks and countermeasures for pumped storage utilization in underground spaces of closed coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(4): 1–14.
- [24] 张亚宁, 任世华, 郑德志, 等. 煤炭行业向地热能资源开发拓展转型的路径分析 [J]. 煤炭经济研究, 2022, 42(1): 39–46.
Zhang Y N, Ren S H, Zheng D Z, et al. Path analysis of the transformation and expansion of the coal industry to the development and expansion of geothermal energy resources [J]. Coal Economic Research, 2022, 42(1): 39–46.
- [25] 杨科, 魏家乐, 付强, 等. 安徽省关闭 / 废弃矿井地下空间储能潜力及减碳效益 [J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(4): 45–55.
Yang K, Wei J L, Fu Q, et al. Potential of underground space energy storage and carbon reduction benefits of closed/abandoned mines in Anhui Province [J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(4): 45–55.
- [26] 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.
- [27] 杨金中, 许文佳, 姚维岭, 等. 全国采矿损毁土地分布与治理状况及存在问题 [J]. *地学前缘*, 2021, 28(4): 83–89.
- Yang J Z, Xu W J, Yao W L, et al. Land destroyed by mining in China: Damage distribution, rehabilitation status and existing problems. *Earth Science Frontiers* [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(4): 83–89.
- [28] 国家统计局. 中国统计年鉴 2025 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2025.
- National Bureau of Statistics. *China statistical yearbook 2025* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2025.
- [29] 谢和平, 高明忠, 刘见中, 等. 煤矿地下空间容量估算及开发利用研究 [J]. *煤炭学报*, 2018, 43(6): 1487–1503.
- Xie H P, Gao M Z, Liu J Z, et al. Research on exploitation and volume estimation of underground space in coal mines [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1487–1503.
- [30] 谢和平, 刘见中, 高明忠, 等. 特殊地下空间的开发利用 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- Xie H P, Liu J Z, Gao M Z, et al. *Development and utilization of special underground space* [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [31] 袁亮, 张通, 王玥晗, 等. 深部煤炭资源安全高效开采科学问题及关键技术 [J]. *煤炭学报*, 2025, 50(1): 1–12.
- Yuan L, Zhang T, Wang Y H, et al. Scientific problems and key technologies for safe and efficient mining of deep coal resources [J]. *Journal of China Coal Society*, 2025, 50(1): 1–12.
- [32] 杨沐岩. 煤炭开采加速向深部进军 [N]. *中国能源报*, 2025-02-24(07).
- Yang M Y. Coal mining is accelerating its foray into deeper strata [N]. *China Energy News*, 2025-02-24(07).
- [33] Liu W, Zhang X, Wan J F, et al. Large-scale carbon dioxide storage in salt caverns: Evaluation of operation, safety, and potential in China [J]. *Engineering*, 2024, 40: 226–246.
- [34] 王龙飞, 王帅, 李庆, 等. “双碳”目标下西部地区煤矿多能互补供能研究 [J]. *中国煤炭*, 2023, 49(10): 36–42.
- Wang L F, Wang S, Li Q, et al. Research on multi-energy complementary energy supply in coal mines in western China under the goals of carbon peak and carbon neutrality [J]. *China Coal*, 2023, 49(10): 36–42.
- [35] 陶冉. 煤炭是压舱石、原料库、新宝藏 [N]. *中国煤炭报*, 2023-03-09(04).
- Tao R. Coal is a ballast, a raw material depot, and a new treasure [N]. *China Coal News*, 2023-03-09(04).
- [36] 廖睿灵. 采煤区“长”出光伏地 [N]. *人民日报海外版*, 2024-11-13(12).
- Liao R L. Photovoltaic fields “grow” in coal mining areas [N]. *People’s Daily Overseas Edition*, 2024-11-13(12).
- [37] 蒋文艳. “尾矿+光伏”再变一个聚宝盆 [N]. *甘肃经济日报*, 2023-07-20(04).
- Jiang W Y. “Tailings + Photovoltaics” becomes another cornucopia [N]. *Gansu Economic Daily*, 2023-07-20(04).
- [38] Wang M, Guo P Y, Jin X, et al. Evaluation of development potential of pumped hydroelectric storage and geothermal utilization system in abandoned coal mine [J]. *Journal of Central South University*, 2024, 31(8): 2872–2890.
- [39] 张源, 王志军, 胡淞博, 等. 矿井岩溶热储三维地质建模及地热资源潜力评价 [J]. *煤炭学报*, 2024, 49(8): 3571–3579.
- Zhang Y, Wan Z J, Hu S B, et al. 3D geological modeling of mine karst geothermal reservoir and geothermal resources evaluation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(8): 3571–3579.
- [40] 蔡美峰, 马明辉, 潘继良, 等. 矿产与地热资源共采模式研究现状及展望 [J]. *工程科学学报*, 2022, 44(10): 1669–1681.
- Cai M F, Ma M H, Pan J L, et al. Co-mining of mineral and geothermal resources: A state-of-the-art review and future perspectives [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(10): 1669–1681.
- [41] Zhao J L, Li Z J, Xu Y, et al. An integrated mine geothermal extraction and cooling system based on the holistic space utilization concept of mine [J]. *Energy*, 2025, 335: 137990.
- [42] 吴金焱. 荷兰海牙市废弃煤矿矿井水地热能开发利用工程实践 [J]. *中国煤炭*, 2020, 46(1): 94–98.
- Wu J Y. Practice on geothermal energy development and utilization from abandoned coal mine water in Heerlen of Netherlands [J]. *China Coal*, 2020, 46(1): 94–98.
- [43] 梅生伟, 张通, 张学林, 等. 非补燃压缩空气储能研究及工程实践——以金坛国家示范项目为例 [J]. *实验技术与管理*, 2022, 39(5): 1–8, 14.
- Mei S W, Zhang T, Zhang X L, et al. Research and engineering practice of non-supplementary combustion compressed air energy storage: Taking Jintan national demonstration project as an example [J]. *Experimental Technology and Management*, 2022, 39(5): 1–8, 14.
- [44] 刘轲琪, 刘凯. “双碳”目标下矿产资源集约节约与地下空间协同利用的低碳路径: 以江苏句容石硐山铜矿为例 [J]. *地质学刊*, 2025, 49(4): 457–462.
- Liu K Q, Liu K. Low-carbon path of coordinated utilization of mineral resources and mining underground space under dual carbon goals: A case study of Shidangshan copper deposit in Jurong, Jiangsu Province [J]. *Journal of Geology*, 2025, 49(4): 457–462.
- [45] 邱清泉, 罗晓悦, 林玉鑫, 等. 垂直式重力储能系统的研究进展和关键技术 [J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(3): 934–945.
- Qiu Q Q, Luo X Y, Lin Y X, et al. Research progress and key technologies in vertical gravity energy storage systems [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(3): 934–945.
- [46] 李银平, 马洪岭, 施锡林, 等. 我国盐穴地下储库建设的挑战与对策研究——从“金坛模式”到“XX模式” [J]. *岩土力学*, 2024, 45(10): 2859–2869.
- Li Y P, Ma H L, Shi X L, et al. Challenges and countermeasures in salt cavern underground storage in China—From “Jintan mode” to “XX mode” [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(10): 2859–2869.
- [47] 顾大钊, 曹志国, 李井峰, 等. 煤矿地下水库技术原创试验平台体系研制及应用 [J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 100–113.
- Gu D Z, Cao Z G, Li J F, et al. Original experimental platform system and application of underground coal mine reservoirs [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 100–113.
- [48] Armijo J, Bennett S, Bienassis T, et al. *Global hydrogen review 2022* [R]. Paris: International Energy Agency, 2022.

- [49] 尹希文, 于秋鸽, 甘志超, 等. 高钙粉煤灰固碳降碱反应特性及煤矿井下规模化利用新途径 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2717–2727.
Yin X W, Yu Q G, Gan Z C, et al. Reaction characteristics of carbon fixation and alkali reduction in high calcium fly ash and new way of large-scale utilization in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2717–2727.
- [50] Zhang J X, Li B Y, Xie Y C, et al. Carbon negative backfill mining in coal mines for carbon neutralization: Chemical carbon fixation performances with mineralized gangue [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2025, 186: 106016.
- [51] 于秋鸽, 尹希文, 樊振丽, 等. 基于矿化反应过程三阶段划分的粉煤灰高效矿化方法研究 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 253–260.
Yu Q G, Yin X W, Fan Z L, et al. Study on efficient mineralization method of fly ash based on three-stage division in reaction process [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 253–260.
- [52] 俞宵轩. 盐穴综合利用发展现状及对策建议 [J]. 工程经济, 2024, 34(4): 74–80.
Yu X X. Analysis of the comprehensive utilization and development of salt Caverns [J]. Engineering Economy, 2024, 34(4): 74–80.
- [53] 施锡林, 尉欣星, 杨春和, 等. 中国盐穴型战略石油储备库建设的问题及对策 [J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 99–111.
Shi X L, Wei X X, Yang C H, et al. Problems and countermeasures for construction of China's salt cavern type strategic oil storage [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 99–111.
- [54] 刘炎, 姜武汉, 张国庆, 等. 新型地下空间 (盐穴) 产权管理与政策建议 [J]. 中国土地, 2025 (11): 28–31.
Liu Y, Jiang W H, Zhang G Q, et al. Property right management and policy suggestions of new underground space (salt cave) [J]. China Land, 2025 (11): 28–31.