

我国废弃煤矿地下空间应用现状与展望

李澳中, 赵志根

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年12月29日; 录用日期: 2026年2月20日; 发布日期: 2026年3月18日

摘要

在我国经济飞速发展的同时, 对煤炭资源的需求也与日俱增, 大规模长时间开采煤炭资源、产能不足、开采难度大等一系列问题, 产生了大规模的地下空间资源。本文聚焦于我国废弃煤矿地下空间的二次利用研究, 将其划分为能源储存、资源储存和基础设施建设三大应用模式。在能源储存方面, 探讨了抽水蓄能、压缩空气储能、重力储能和地热开发利用等多种形式。在资源储存方面, 分析了地下水库、地下储油库、地下储气库及二氧化碳封存等技术。在基础设施建设方面, 研究了深地医院、农业基地和矿山公园等潜在应用。当前我国在废弃煤矿地下空间利用方面仍处于初步探索阶段, 面临诸多技术难题和挑战。

关键词

地下空间, 能源储存, 资源储存, 基础设施

Current Status and Prospects of Underground Space Utilization in Abandoned Coal Mines in China

Aozhong Li, Zhigen Zhao

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: December 29, 2025; accepted: February 20, 2026; published: March 18, 2026

Abstract

While China's economy is developing rapidly, the demand for coal resources is also increasing day by day. A series of problems, such as large-scale and long-term coal mining, insufficient production capacity, and high mining difficulty, have led to the emergence of a large amount of underground space resources. This article focuses on the secondary utilization of underground space in abandoned coal mines in China, dividing it into three application models: energy storage, resource storage, and

infrastructure construction. In terms of energy storage, it explores various forms such as pumped storage, compressed air energy storage, gravitational energy storage, and geothermal development and utilization. In terms of resource storage, it analyzes technologies such as underground reservoirs, underground oil storage, underground gas storage, and carbon dioxide sequestration. In terms of infrastructure construction, it studies potential applications such as deep underground hospitals, agricultural bases, and mine parks. Currently, China is still in the initial exploration stage of utilizing underground space in abandoned coal mines and faces many technical difficulties and challenges.

Keywords

Underground Space, Energy Storage, Resource Storage, Infrastructure

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

经济增长量与资源消耗量是呈线性正相关的, 在过去的一段时间内, 大规模长时间开采煤炭资源, 产生了大规模的地下空间资源。同时随着人口的增长与需求增加, 意味着更多的煤炭资源消耗, 与之伴随着更多的废弃物和空间资源产生。在煤炭去产能与双碳的背景下, 许多煤矿因产能不足、环境污染及开采难度大等因素关闭。尽管煤炭能源结构的调整和优化, 但煤炭资源的消耗量在总能源消耗总量中的占比超过 50% [1]。由于我国煤炭企业的关闭废弃矿井再利用意识淡薄, 多数矿井直接关闭或废弃。这不仅造成资源的巨大浪费, 还有可能诱发后续的安全、环境及社会等问题[1]。

据调查, 国家发改委、能源局发布的《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》中明确提出了废弃矿区开展新能源项目, 从传统的单线经济变成循环经济, 将废弃物当作再次利用资源成为新能源的一部分, 包括地下空间资源[2]。

2. 我国废弃煤矿地下空间应用模式

我国废弃煤矿井下空间资源的二次利用研究较晚, 本篇文章通过借鉴学者和专家的地下空间功能导向划分三种: 能源储存、资源储存和基础设施建设(图 1) [3] [4]。

废弃煤矿地下空间相较于地上空间有其独特的优越性, 直接利用现成地下巷道, 会节省地下工程的建设成本。间接利用矿井的高度差, 可直接减少蓄能发电站的成本。深处的地下工程具有恒温、隔音特点, 可以建设地下农业基地, 发展旅游业, 为资源枯竭型城市提供转型路径, 创造就业, 促进社会稳定与发展。废弃矿井资源的二次利用, 实现废弃地下空间资源经济的循环, 减少资源消耗, 符合国家的发展战略要求。

2.1. 利用地下空间能源储存

利用地下空间进行能源储存应用模式划分四种, 图 2 所示分别是抽水蓄能、压缩空气储能、重力储能以及地热开发利用。

2.1.1. 抽水蓄能

抽水蓄能作为一种成熟的储能技术, 通过高海拔水库与低海拔水库之间的水流循环, 利用重力势能

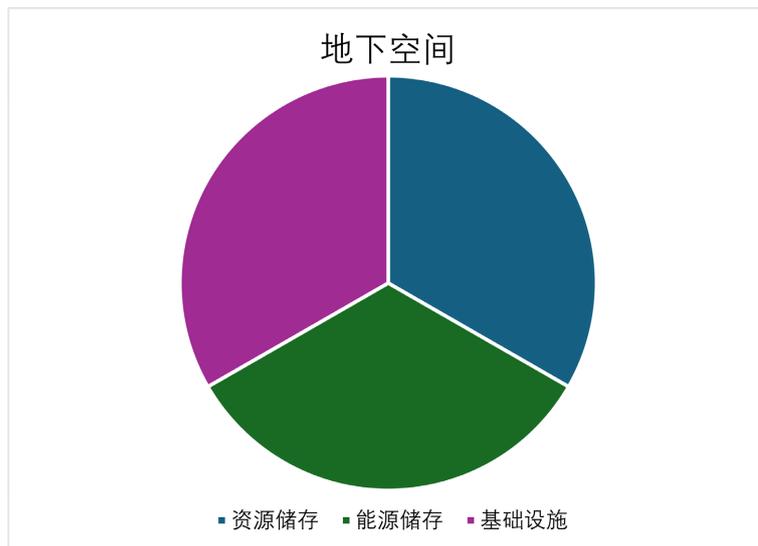


Figure 1. Functional classification of underground space resources

图 1. 地下空间资源功能划分

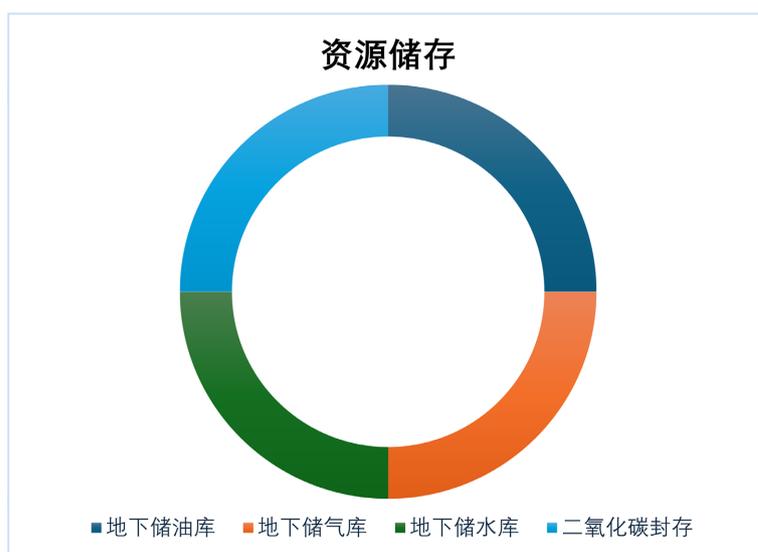


Figure 2. Classification of energy storage types

图 2. 能源储存划分

实现电能的储存与释放, 是保障电网稳定运行的重要手段, 其原理示意图见图 3。在双碳目标与绿色能源转型背景下, 抽水蓄能电站需与风能、太阳能等可再生能源实现多能互补, 缓解电网的调峰需求[5]。废弃矿井因其独特的地下空间落差结构, 为抽水蓄能电站建设提供了新方向, 近年来逐渐成为研究热点。

我国废弃矿井抽水蓄能研究起步较晚, 目前停留在理论阶段, 学者们已通过典型案例验证了其经济效益。例如, 以邯郸陶二矿和江苏权台煤矿为研究对象, 计算其年收益分别达到 9117.90 万元和 3362 万元, 从经济性角度表明, 废弃矿井建设抽水蓄能电站具备可行性[6][7]。尽管效益显著, 废弃矿井抽水蓄能仍面临诸多技术难题, 主要包括库容计算误差大、选址复杂、地下空间适应性改造困难、运行期突水风险高等[8]。针对选址问题, 学者们提出了多种评价方法: 王兵等构建了涵盖自然、社会、经济、环境、安全五维度的评价指标体系, 通过模糊多准则决策模型量化选址适宜性[9]。王小龙等采用层次分

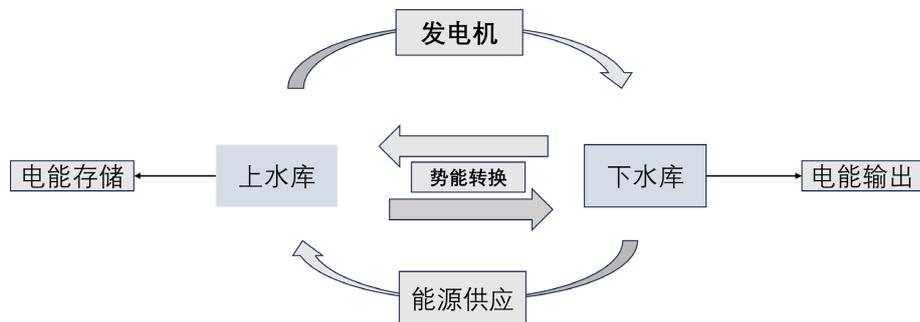


Figure 3. Schematic diagram of pumped-storage hydroelectricity principle
图 3. 抽水蓄能原理示意图

析-模糊综合评价法,实现了多因素耦合下的科学选址[10]。王婷婷等则系统分析了选址原则、动能估算方法及工程布置方案,从技术层面论证了矿洞改造的可行性[11]。

综合现有研究,废弃矿井建设抽水蓄能面临许多问题:1) 围岩稳定性,由于抽水蓄能电站处于长期应力变化阶段,在应力场渗流场共同作用下围岩的变形量会增加。2) 底板突水概率,采空区岩体的渗透系数不是均匀分布的,存在各相异性,在理论分析假设是均质,与实际情况不符导致底板突水概率增加。3) 空间矛盾,蓄能电站建设的高度通常会大于煤层开采高度,会对采空区巷道开挖扩大空间体积,不稳定性升高,安全性降低。

2.1.2. 压缩空气储能

压缩空气储能(CAES)原理是低峰值空气压缩实现储能,高压空气释放实现大规模放电技术,原理示意图见图 4。压缩空气储能电站的工作介质是空气,故具有安全性高、成本低、绿色环保、规模大、成本低等优点,与抽水蓄能和重力蓄能相比,维修成本高[12]。

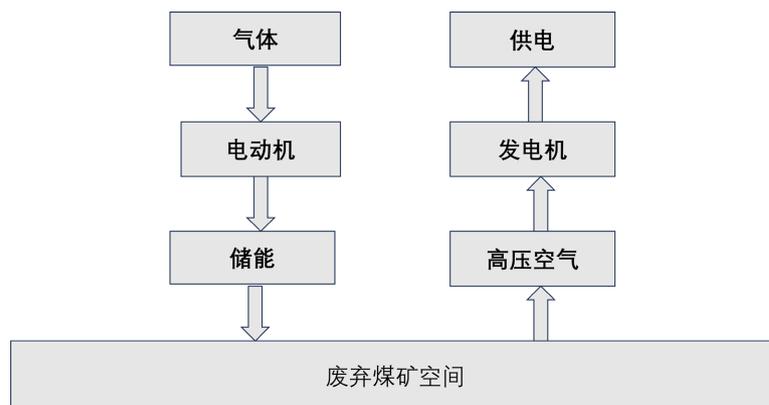


Figure 4. Schematic diagram of compressed air energy storage (CAES) principle
图 4. 压缩空气储能原理示意图

压缩空气储存空间主要有盐穴、人造硐室、废弃矿井,其中盐穴储气因为其成本低及气密性较好等优点,所以盐穴成为国际主流选址。具有代表的德国、美国分别在埋深 600 m 和 300 m 盐穴建立压缩空气储能电站,于 1978 年和 1991 年建成。近年来我国发展迅速,我国金坛盐穴压缩空气储能电站于 2022 年成功运行,功率可达 60 MW [4]。人造硐室适用于无盐穴资源的地区,我国在废弃煤矿改造储能方面起步较晚,废弃煤矿建立储能电站成功的案例少且发电功率较低。

目前,我国学者从效益和可再生能源多能互补方面进行研究。学者何秋德以徐州权台煤矿为案例,

研究表明利用废弃巷道建立压缩空气储能电站, 单机功率可达 380 MW, 投资回收期 8.5 年, 不仅可以缓解调峰压力, 还能带来可观收益, 从经济方面验证了废弃矿井建设压缩空气电站的可行性[13]。学者杜俊生提出太阳能及风能联合作用, 构建混合压缩空气储能系统, 资源利用率提高了 45% [14] [15]。废弃矿井压缩空气储能电站具有较大潜力。学者王帅等从安全的角度进行研究, 针对压缩空气储能地质安全方面, 提出空间选取和压力基本准则, 为稳定性分析提供了研究基础和理论依据[16]。

综合以上研究发现, 废弃矿井建设压缩空气储能电站大多处于理论研究阶段。在建设压缩空气储能电站时应需注意以下关键点: 1) 围岩强度, 与抽水蓄能相比较, 其对围岩要求更高, 要对围岩进行加固支护, 其承载力升高, 但是成本增加 50%以上。2) 密封性挑战, 当储气气压过高时, 巷道涂层和储气气囊的渗透率和渗透量增加, 气体溢出。

2.1.3. 重力储能

重力储能将重力势能转换成电能, 在电力过剩时, 通过将矿井深部的重物提升到地表储存电能, 在用电高峰时候, 重物下落电能释放。重力势能电站建立前提存在地势落差, 因此废弃煤矿是很好的储能场所。与重力储能相比, 物理储能对选址要求不高, 具有系统操作简单、对环境污染小、使用周期长等优点[17]。

目前我国利用废弃矿井建设重力储能电站没有应用的案例, 相关研究处于探索阶段。目前存在以下问题, 选址的适配性问题、电机设备、重力储能与其他绿色能源实现互补、地下空间在工作中的变化、重物运输和能量管理系统等方面缺乏理论基础[18] [19]。

结合现有研究, 废弃矿井建设重力储能电站处于理论阶段, 目前国内外没有示范性工程。注意关键点如下: 1) 多物理场作用, 与抽水蓄能相比较建设要求不高, 但是由于温度和湿度热胀冷缩, 作业空气中带有细小颗粒, 钢索磨损概率变大, 需要维修周期缩短。2) 动态挑战, 巷道岩层变形由于放大效应, 导致钢索震动底部幅度小顶部幅度大, 对电机设备构成威胁, 储能系统效率降低。

2.1.4. 地热开发利用

废弃煤矿的深度往往会达到上千米, 温度较为恒定, 具有空间大、热量恒定、稳定性好的特点, 是地热开发的良好载体。地热能的利用多种多样, 如矿井水、污染源、热蒸汽能够吸收地球深部向上溢出的热量作为能源储存的介质, 通过利用热泵、储能系统等实现能量提取与转化, 在制热制冷和发电具有巨大潜力[20], 其原理示意图见图 5。供暖与制冷是地热最常见利用, 利用热泵进行能量转移, 其核心原理是将矿井水作为稳定源实现居民区的供暖和制冷。地热发电利用中高温矿井水和热岩, 通过热力循环驱动发电机, 实现电力生产[21]。

地热是一种可再生的清洁能源, 其中国外对地热能利用研究较早, 例如荷兰海尔伦市废弃煤矿地热能利用供热制冷面积达到 $8 \times 10^5 \text{ m}^2$ [22]。我国对于废弃煤矿地下空间地热利用处于探索阶段, 学者浦海等提出了废弃矿井地热资源再利用循环系统模型, 进行清洁能源的生产[23]。改造废弃煤矿实现地热开发利用, 要做到取热不取水, 防止水资源枯竭造成灾害。流动有的矿井水对普通设备腐蚀加大, 注意仪器设备的维护与工作人员的保护。

结合上述研究, 地热使用辐射范围较小, 地热开发利用要注意以下关键点: 1) 矿井水腐蚀, 废弃矿井深部矿井水中含有腐蚀性物质, 温度作用下加快与设备发生反应速率, 损害设备。2) 水质挑战, 矿井水循环利用导致矿物离子含量增多, 水质污染, 热能利用效率降低。

2.2. 利用地下空间资源储存

利用地下空间进行资源储存应用模式划分四种, 如图 6 所示分别是地下储水库、地下储气库、地下

储油库、二氧化碳封存。

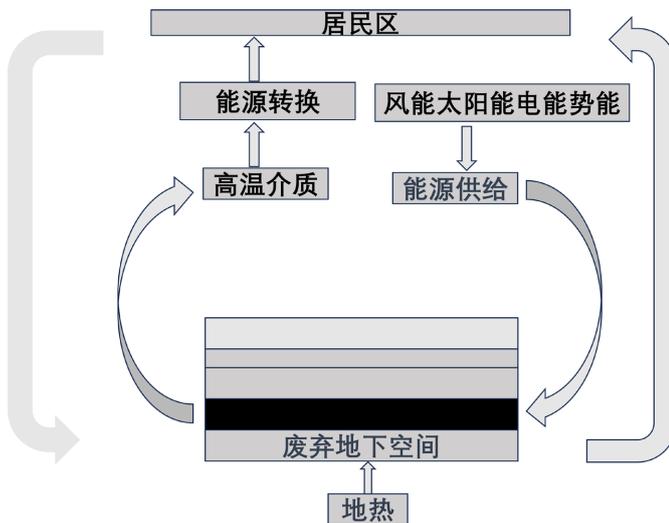


Figure 5. Schematic diagram of geothermal energy development and utilization in abandoned coal mines
图 5. 废弃煤矿地热开发利用原理示意图

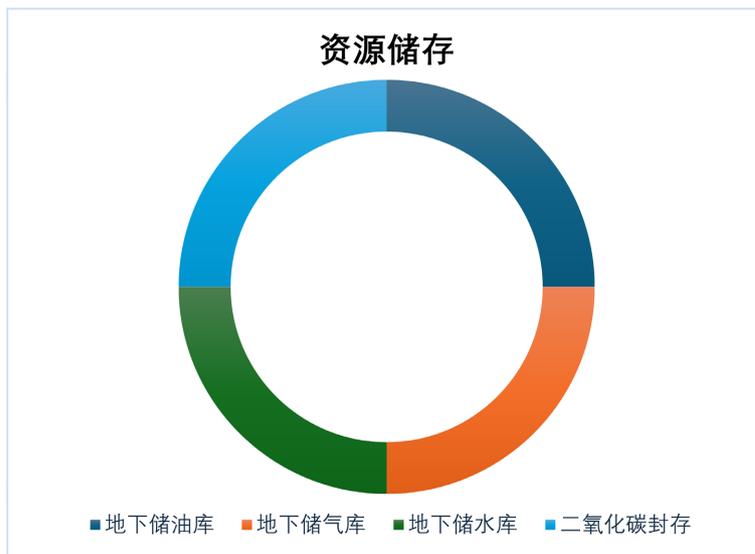


Figure 6. Classification schematic diagram of underground space resource storage
图 6. 地下空间资源储存划示意图

2.2.1. 地下储水库

煤炭地下水库是由煤炭采空区和安全生产煤柱与人工坝组成, 储水空间如图 7 所示, 其目的是解决西部干旱和水资源流失问题。煤炭地下水库这一概念, 其核心目标是利用煤层开采产生的采空区和裂隙实现水资源的净化与储存, 达到水资源保护、水源调峰、生态修复等目的[24]。

学者顾大钊将水害变成水利, 提出了“导储用”理念, 为地下水库建设提供了技术框架和基础[25]。神东矿区已经成功建设了示范工程, 也是唯一投入运行的废弃煤矿地下水库, 目前已经累计建成 32 座煤矿地下水库, 为矿区提供了 95%以上用水, 且实现了长期低成本安全稳定运行[26]。针对煤矿地下水库坝体研究, 研究学者樊帆等、智国军等分别从稳定性、坝体参数方面, 提出位移 - 储水高度和掏槽参数模型

[27] [28]。

利用废弃煤矿建设地下储水库已有示范性工程,但是由于我国地质构造的复杂性要注意以下关键点: 1) 复杂地质条件, 废弃矿井深部发育有断层、裂隙, 储水高度增加会导致入渗量加大呈函数关系, 安全性和稳定性降低。2) 稳定性挑战, 长时间受静水压力与渗流场作用, 煤柱和人工坝体会产生裂隙, 稳定性降低。

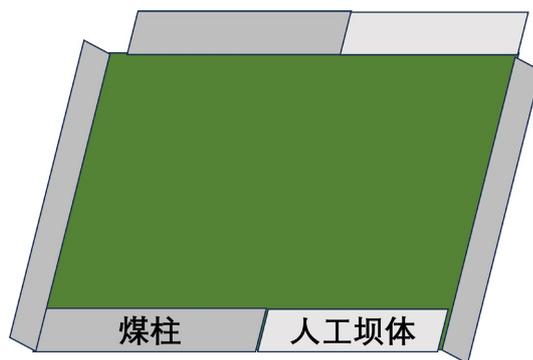


Figure 7. Schematic diagram of underground reservoir in coal mine
图 7. 煤炭地下储水库示意图

2.2.2. 地下储油库

地下储油是利用现有的地下岩洞作为存储空间, 地下岩洞包括枯竭的油气藏、废弃矿山、地下盐穴等, 是国际通用的存储方式[29]。相较于地上储油, 地下储油具有成本低、安全性好、工作寿命长、节约土地等优势, 随着国家推动双碳, 利用地下空间储油成为行业趋势。

国外对地下储油研究较早, 美国、德国、法国等建立盐穴储油库, 典型的是美国在墨西哥湾建立盐穴储油库量高达 1.03×10^8 t [30]。我国针对废弃矿井研究滞后, 目前尚没有示范性工程, 例如学者韩桂武对煤矿巷道改建储油进行研究, 指出围岩抗拉强度、渗透率、完整性等系数验证技术层面上的可行性[31]。学者包兴芮采用层次分析法和模糊综合评价法, 对白家庄煤矿废弃矿洞储油的可行性进行综合评价[32]。目前处于理论研究阶段, 为废弃煤矿改造地下储油库可行性提供了理论基础, 在建设示范性工程方面有待研究。

结合已有研究建设地下储油库, 可以参考地下储水库要注意渗漏防止污染地下空间资源。

2.2.3. 地下储气库

随着“西气东输”天然气管道建成及“双碳”政策的提出, 我国天然气在清洁能源结构占比持续增加, 对天然气季节供应和调峰提出更高要求。为解决用气调峰和季节需求稳定供应问题, 利用废弃矿井建设地下储气库既有潜力的解决方案[33]。当下, 地下储气库主流技术, 是利用地下盐穴和枯竭的油气藏建立储气库, 用来存储二氧化碳、天然气、氢气等。目前我国盐穴地下储气库共有 4 座, 其中三座位于江苏省常州市, 分别是国家管网金坛储气库、中石化金坛储气库和港华金坛储气库, 中石化江汉储气库则位于湖北省潜江市, 其中国家管网金坛储气库已初具规模, 库容量达到 10 亿 m^3 [34] [35]。

由于中国的天然气消耗量逐年增加, 地下储气库不足, 不能满足天然气调峰的需求, 利用废弃矿井建立储气库备受关注[36]。国外针对地下废弃煤矿改造储气库研究较早, 目前全球利用废弃矿井建立的储气库共有 3 座, 比利时两座储气库因为效益问题, 已经停止运营, 美国的 Leyden 储气库仍在运行, 验证了废弃矿井建设地下储气库的可行性。与之相比, 我国则处于可行性研究阶段。

目前我国建设地下储气库已有示范性工程, 但是利用废弃煤矿建设地下储气库处于理论阶段, 建设

地下储气库可以参考压缩空气储能。

2.2.4. 二氧化碳封存

二氧化碳封存是 CCUS 技术的关键步骤, 将工业生产和能源使用等相关资源产生的二氧化碳捕捉, 永久封存于多孔岩层中, 从而推动实现温室气体减少的排放, 成为实现碳达峰和碳中和的关键路径。方法是利用地质构造形成的封闭地下溶洞, 通过物理、化学方法实现二氧化碳长期封存。枯竭的油气藏、深部咸水层及废弃煤炭矿井是二氧化碳封存的有利场所[37]。国外二氧化碳封存场所为深部咸水层和枯竭油气藏, 其中美国数量最多, 且有许多成功的案例, 其中我国的封存场所为枯竭的油气藏[38]。

废弃煤矿封存领域, 我国研究处于初步探索阶段。学者黄定国通过地质力学分析, 提出废弃矿井采空区和裂隙空间作为二氧化碳的封存场所[39]。学者钱静以三河尖废弃煤矿为研究对象, 计算出 7 煤和 9 煤二氧化碳封存吸附量, 为废弃矿井二氧化碳封存潜力研究提供基础依据[40]。与储油储气相比, 二氧化碳的存储对存储空间要求更高, 地层埋深超过 800 m, 地质盖层完整, 围岩不发育裂隙。

2.3. 利用地下空间建设基础设施

利用废弃煤矿地下空间建设基础设施分为以下三种(见图 8), 分别是深地医院、农业基地、矿山公园。

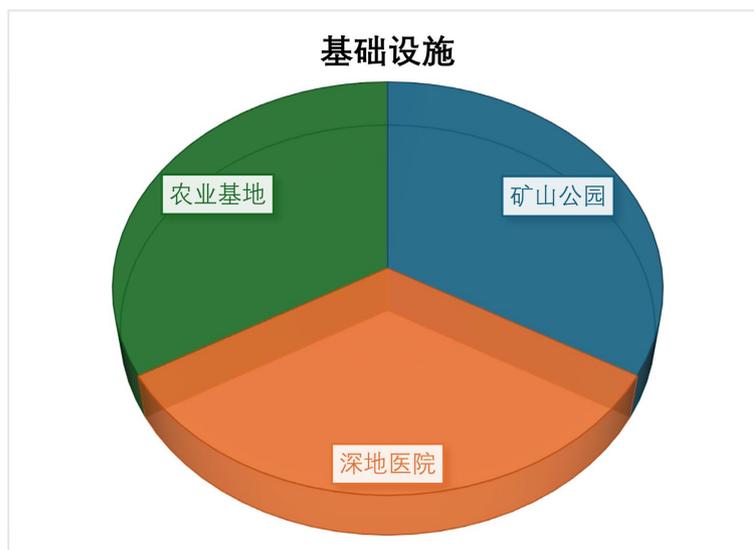


Figure 8. Infrastructure partition diagram

图 8. 基础设施划分图

2.3.1. 深地医院

相较于传统地面医院利用地下空间具有其独特的物理性质恒温、低噪音、过滤性、不外界干扰, 为患者恢复提供有利的恢复环境。尤其在治疗呼吸疾病领域, 地下岩层具有过滤性且远离过敏源, 地下洞穴治疗具有独特优势, 其中德国、美国已经实践与应用。我国学者谢和平在 2015 年提出深地医学研究的构想, 于 2017 年在四川建成首个覆盖层 1470 m 深地医学实验室[41]。学者研究发现, 矿井底部低辐射对正常细胞与癌细胞生长具有抑制作用, 对癌细胞生长速度抑制更明显, 深地医学研究具有重大意义, 但利用废弃矿井建造实验室目前处于空白阶段, 需要学者探索[42]。

2.3.2. 农业基地

利用废弃矿井改建成温室农业基地, 是实现土地资源再生和粮食发展的新模式。废弃煤矿温度范围

波动不大, 土地污染性小, 加之合适光照, 可大大缩短植物生长周期。利用废弃矿井建立温室农业基地, 一方面可以作为耕地面积的补充, 另一方面产生巨大经济效益, 从而实现废弃矿井的二次利用。农业研究所 1980 年在地下巷道种植黄瓜和番茄, 使用水银灯代替太阳, 最终产量超过地上产量十倍[43]。学者宋明伟等以草莓为例, 从光照、水源、二氧化碳、温度四个方面经济效益分析, 验证了利用废弃矿井建立温室农业基地的可行性[44]。利用废弃矿井改建成温室基地需要考虑矿井水金属离子过高, 注意农产品安全。

2.3.3. 矿山公园

随着绿水青山就是金山银山的政策提出, 我国高度重视矿山的治理与修复。把废弃矿井建设成矿山公园旅游开发, 是枯竭资源城市转型的一种方式, 对生态保护及可持续发展具有重大意义[45]。其中德国的卡尔亚历山大废弃煤矿, 通过再造与恢复成为绿色矿山公园, 是生态治理与遗迹保护的见证者[46]。目前我国矿山公园典型示范工程有湖北黄石国家矿山公园、广西合山国家矿山公园、唐山开滦煤矿国家矿山公园、四川嘉阳国家矿山公园、辽宁阜新海州露天矿国家矿山公园、吉林辽源矿山公园。

3. 结论与展望

本文综述了我国废弃地下空间资源二次利用研究现状, 指出能源储存、资源储存及其他功能利用的巨大潜力。当前我国在废弃矿井地下空间利用的研究处于初步探索阶段, 需要更深一步的探索, 做到多能互补、因地制宜、具有地域特色, 提出以下建议与展望:

1) 单一的抽水、重力、压缩储能建立发电站发电的效率不高, 要与太阳能、风能等清洁能源共同作用, 构建多种能源混合系统。例如新疆风力资源丰富, 则压缩空气为主同时配合光力发电互补。能源混合系统不可单一复制, 应结合地域位置。

2) 在资源储存方面对存储空间严格要求, 实时检测围岩压力位移变化, 与 AL 相结合, 建立预警系统, 保障人身安全。对水资源离子浓度、pH 值等数值检测, 防止水体污染。

3) 地下空间建设基础设施要从多方面考虑, 做到因地制宜、具有地域特色, 推动枯竭性资源城市的转型, 推动经济发展。例如在山地矿区发展抽水蓄能和光伏发电、平原矿区发展温室农田与储气库。

参考文献

- [1] 袁亮, 姜耀东, 王凯, 等. 我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 14-20.
- [2] 刘汉斌. 煤基废弃资源开发利用评价及战略路径研究[D]: [博士学位论文]. 太原: 山西大学, 2023.
- [3] 霍超, 王蕾, 谢志清, 等. 新时期我国煤矿地下空间综合利用现状及展望[J]. 地质论评, 2024, 70(4): 1455-1468.
- [4] 元增刚, 王磊, 藺国华, 等. 废弃煤矿地下空间资源应用研究现状与展望[J]. 矿产保护与利用, 2025, 45(5): 124-138.
- [5] 刘钦节, 杨卿干, 杨科, 等. 废弃矿井抽水蓄能电站多能互补利用模式及案例分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(3): 578-586.
- [6] 张胜利. 邯鄹陶二矿矿井建设抽水蓄能电站可行性分析[J]. 煤炭与化工, 2023, 46(11): 111-113.
- [7] 卞正富, 周跃进, 曾春林, 等. 废弃矿井抽水蓄能地下水库构建的基础问题探索[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3308-3318.
- [8] 文志杰, 姜鹏飞, 宋振骥, 等. 废弃矿井抽水蓄能面临的关键问题与对策思考[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(1): 28-37.
- [9] 王兵, 刘朋帅, 邓凯磊. 基于模糊多准则决策模型的废弃矿井抽水蓄能电站选址[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(6): 667-677.
- [10] 王小龙, 夏雄志, 王菁莪. 煤矿矿井改造抽水蓄能电站适宜性评价方法研究[J]. 水力发电, 2025, 51(12): 9-16.
- [11] 王婷婷, 曹飞, 唐修波, 等. 利用矿洞建设抽水蓄能电站的技术可行性分析[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(1): 195-

- 200.
- [12] 修雅馨, 刘钦节, 付强, 等. 废弃矿井地下空间物理储能方式对比与优选[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(2): 6-13.
- [13] 何秋德, 陈宁, 罗萍嘉. 基于压缩空气蓄能技术的煤矿废弃巷道再利用研究[J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(4): 37-39+65.
- [14] 杜俊生, 陈结, 姜德义, 等. 中国废弃煤矿压气蓄能潜力与初步可行性研究[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(1): 253-264.
- [15] 胡李华, 岳群超, 吴云, 等. 关退煤矿软岩地下空间压缩空气储能模型试验系统研制及其应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(4): 853-866.
- [16] 王帅, 蒲宝基, 蹇军强, 等. 废弃煤矿压缩空气储能地质安全稳定性分析[J]. 煤炭工程, 2020, 52(8): 133-137.
- [17] 张品, 姚丽英, 陈吉顺, 等. 废弃矿井重力储能现状分析及构想[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(3): 9-11.
- [18] 闫文举, 王洋, 孙芯竹, 等. 基于直线电机的废弃矿井重力储能系统研究进展与技术[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(1): 255-268.
- [19] 张占东, 陈吉顺, 李珂, 等. 液压式废弃矿井重力储能系统工作节拍调度策略分析[J]. 机床与液压, 2025, 53(8): 217-223.
- [20] 谢友泉, 高辉, 苏志国, 等. 废弃矿井地热资源的开发利用[J]. 太阳能, 2020(10): 13.
- [21] 薛祯祯, 孙沙沙, 徐汉文, 等. 矿井及交通隧道地热能开发利用现状研究[J]. 科技创新与应用, 2020(31): 58-59.
- [22] 吴金焱. 荷兰海尔蒙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.
- [23] 浦海, 卞正富, 张吉雄, 等. 一种废弃矿井地热资源再利用系统研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 677-687.
- [24] 顾大钊, 张勇, 曹志国. 我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 1-7.
- [25] 顾大钊. 煤矿地下水理论框架和技术体系[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 239-246.
- [26] 李文. 互联网+废弃煤矿隐蔽灾害防治技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 86-91.
- [27] 樊帆, 刘臣毅, 徐建生. 煤矿地下水人工坝体稳定性分析[J]. 煤炭工程, 2020, 52(11): 120-125.
- [28] 智国军, 刘润, 杨瑞刚, 等. 煤矿地下水人工坝体嵌入煤柱/体的构筑参数优化研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(2): 18-22.
- [29] 韩秀丽. 地下油库的经济性分析[J]. 化工管理, 2014(29): 12-13.
- [30] 袁光杰, 夏焱, 金根泰, 等. 国内外地下储库现状及工程技术发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(4): 8-14.
- [31] 韩桂武, 郭书太, 周锐. 煤矿巷道储油关键技术分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(1): 54-63.
- [32] 包兴芮, 刘钦节, 杨卿干, 等. 基于模糊综合评价法的废弃矿洞储油可行性研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(11): 54-61.
- [33] 周学深. 有效的天然气调峰储气技术——地下储气库[J]. 天然气工业, 2013, 33(10): 15-99.
- [34] 李龙, 刘浩生, 秦垦, 等. 中国盐穴地下储气库技术现状及发展趋势[J]. 盐科学与化工, 2025, 54(4): 1-5.
- [35] 武志德, 郑得文, 李东旭, 等. 我国利用废弃矿井建设地下储气库可行性研究及建议[J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(5): 15-19.
- [36] 胡庆明. 中国天然气发展最大瓶颈: 地下储气库不足[J]. 石油石化节能, 2017, 7(4): 34.
- [37] 吴宏杰. CCUS 碳减排方法学开发经历、难点及意义[J]. 中国国情国力, 2021(11): 16-19.
- [38] 贺陆胜, 万建华, 张建强, 等. CO₂地质封存研究与中国 CO₂地质封存潜力评述[J]. 甘肃地质, 2024, 33(1): 59-71.
- [39] 黄定国, 侯兴武, 吴玉敏. 煤矿废弃矿井采空区封存 CO₂的机理分析和能力评[J]. 环境工程, 2014, 32(S1): 1076-1080.
- [40] 钱静, 易高峰, 周琦忠, 等. 三河尖关闭煤矿煤层 CO₂封存潜力研究[J]. 煤炭科学, 2024, 52(3): 258-268.
- [41] 谢和平, 刘吉峰, 高明忠, 等. 深地医学研究进展及构想[J]. 四川大学学报(医学版), 2018, 49(2): 163-168.
- [42] 谢和平, 刘吉峰, 高明忠, 等. 深地医学研究新进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2140-2149.
- [43] 陈华湘. 地下农业水面农业空中农业[J]. 吉林农业, 1994(9): 19.
- [44] 宋明伟, 石海峰, 王兴治, 等. 利用废弃矿井地下空间建设农业温室基地的可行性研究[J]. 煤炭经济研究, 2022, 42(10): 58-64.
- [45] 马斌, 杜雨晴. 中国矿山公园文献综述[J]. 鞍山师范学院学报, 2020, 22(2): 83-88.
- [46] 沈洁, 李利. 从工业废弃地到绿色公园: 卡尔·亚历山大矿山公园景观改造[J]. 风景园林, 2014(1): 136-141.