



关废矿山(地)热能开发与储用

褚召祥^{1,2,3*}, 田家丰¹, 李晓昭^{1,2*}

1. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 徐州 221116

2. 深地科学与工程云龙湖实验室, 徐州 221116

3. 自然资源部矿山生态效应与系统修复重点实验室, 北京 100081

* 联系人, E-mail: chulongxiang@cumt.edu.cn; lixz@cumt.edu.cn

2023年5月和8月, *Science*连续发表面向关废矿山的资源和能源开发利用文章^[1,2], 尝试回答部分学者在*Nature*提出的“能源危机: 2023年需要回答的5个问题”之“*How will the industrial landscape shift?*”^[3], 引起了该领域国内外学者的广泛关注。

据统计, 全世界各类关废矿山超过100万个^[4]。以煤矿为例, 中国工程院重大咨询研究项目“中国煤矿安全及废弃矿井资源开发利用战略研究”研究成果表明: “十二五”期间中国共关闭煤矿约7100处, “十三五”期间约5500处, 预计2030年中国关废煤矿数量将达15000个^[5]。世界范围内, 在去煤化的欧洲, 如法国、英国和德国分别在2004、2015和2018年关闭了各自国家最后一个井工开采煤矿^[6]。关废矿山的产生及其数量的增加是历史的必然, 而如何对其开发再利用已成为当今世界资源、能源与环境领域的重要议题。

简单关废矿山问题突出, 不仅会造成资源的巨大浪费, 还有可能诱发后续的安全、环境及社会问题。因此, 应充分考虑矿产资源开采后导致的“*Post-Mining*”后采矿效应^[7], 及时开展关废矿山资源化再生利用研究。比如, 德国波鸿工程应用技术大学成立后采矿研究院、开设岩土工程与后采矿硕士专业, 均聚焦该领域的研究工作^[8]。然而, 相对于国外采矿业发达国家, 中国对关废矿山资源化再生利用的研究起步较晚, 基础理论和关键技术薄弱, 面向关废矿山、基于科技创新发展新质生产力的探索性、前瞻性关键科学技术预研工作迫在眉睫, 对于推动地质能源类学科和资源枯竭型城市转型发展均具有重要的政治、经济和社会战略价值。基于此, 本文聚焦关废矿山(地)热能开发与储用, 在开发侧以地热能为主、储用侧则拓宽至以热能为最终表现形式的多种能源, 从时空视角分析其资源化再生利用特征、存在问题及解决思路, 可为相关研究提供参考。



褚召祥 中国矿业大学力学与土木工程学院/深部岩土力学与地下工程国家重点实验室副教授、深地科学与工程云龙湖实验室客座研究员, 主要从事矿山热管理方面的教学和研究工作。



李晓昭 中国矿业大学教授、深部岩土力学与地下工程国家重点实验室主任、深地科学与工程云龙湖实验室主任, 长期从事工程地质、地热资源开发、地下空间与地质环境效应方面的研究工作。

1 矿山全生命周期-地球关键带内(地)热能开发与储用

1.1 矿山(地)热能开发历时特征

中国矿山地热资源开发利用这一方向源于煤矿开采过程中的矿井热害防治暨矿井降温技术领域^[9,10]。但是, 由于热害相较于其他矿山灾害如顶板、瓦斯、水、火与生产的直接关联度不够, 仅以热害防治思维即与矿山地热相对抗的被动治理形式开展该方向的研究工作困难重重, 如降温效果不

引用格式: 褚召祥, 田家丰, 李晓昭. 关废矿山(地)热能开发与储用. 科学通报, 2025, 70: 8–16

Chu Z, Tian J, Li X. Legacy mines: geothermal energy exploitation and storage (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 8–16, doi: [10.1360/TB-2024-0767](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0767)

理想、成本高昂且受矿产行业经济形式制约。随着人们认识水平的提高,目前矿山地热已被视为一种资源,矿山尤其是煤田地热资源化利用逐渐走向煤-瓦斯-水-热-地下空间多源协同开发之路。如何满潮和徐敏^[11]提出基于HEMS系统的矿山地热防控与资源化利用技术;亢方超和唐春安^[12]提出基于矿山开挖的增强型地热开发新模式;刘浪等人^[13]、张吉雄等人^[14]提出通过功能性充填采矿协同开发煤与地热资源;基于中国工程院重点战略咨询项目“深部矿产与地热资源共采战略研究”,蔡美峰^[15]2022年在《工程科学学报》组织深部矿产与地热资源共采专刊,系统总结分析了“双碳”目标下该方向的研究现状与未来发展趋势。但是,上述研究多聚焦生产矿井,缺乏对矿山全生命周期内历时最长、影响最远关闭/废弃矿井后采矿阶段地热资源开发问题的关注。

矿山通常因资源枯竭或其他原因无法正常经济开发而关废。在关废矿山资源化再生利用诸多模式中,利用其自身固有属性与可再生能源开发和储用相结合的研究与应用已成为矿业领域实现脱碳、转型发展行之有效的解决方案。目前,该类研究与实践的形式主要有4种^[16]:地面废弃矿场光伏和风能发电、关废矿山中低焓地热能开发、井上下抽水蓄能和井下压缩空气储能。上述不同模式因关废矿山地质和开采情况各异,具有不同的适用条件。其中,基于热泵^[17]、重力热管^[18]等技术的关废矿山地热资源开发成本低、适用性强,相对更为成熟,有助于延长矿区寿命,降低对经济 and 环境的负面影响。

矿山除采矿生产、关废后采矿阶段外,还存在容易被忽视的勘探建设阶段,如图1(a)所示(矿山全生命周期四阶段划分为:矿山勘探、矿山建设、矿山生产和矿山闭坑^[19])。勘探建设阶段相对生产和关废时期虽历时最短,但仍将持续数年甚至更长时间,且同样存在大量的能源尤其是热能需求。但是,由于矿山所处地理位置一般较偏僻,基础设施不完善,勘探建设阶段的热能等能源需求往往成本高昂。所以,矿山勘探建设阶段对低成本、高效率的地热能原位开发需求更为迫切。但遗憾的是,目前鲜有聚焦矿山勘探建设阶段地热开发问题的研究与实践^[20]。因此,应从矿山全生命周期视角重新审视面向矿山的地热资源开发与储用问题^[21]。理想状态下,可集成地源、水源热泵技术、超长重力热管技术等建设矿山地热开发利用系统,在矿山勘探建设、生产和关废全生命周期内的多个阶段均可正常运行,实现系统全生命周期内效益最大化。

1.2 矿山(地)热能开发与储用空间展布

与矿山地热单向开发对应的是矿山(地)热能双向储用,属于深地储能^[22]领域,包括但不限于废弃矿山地下储气、储氢、储油等能源物质,以及前述井上下抽水蓄能和井下压缩空气储能。储热作为储能的一种,以关废矿山地下空间、地质体和遗留设施等为基础,以水作为主要热载体,开展工业

余热热、风光可再生能源、电网波谷电等能源的大规模、长时热能形式存储,实现矿山地热储能^[23,24]。以矿山介质为载体,如选用采空区,则可等效为大体积深部含水层储热^[25],如欧盟HEATSTORE-德国HT-MTES子项目——关废煤矿高温储热系统^[26];如选用井巷,则可类比为地下水箱/洞穴储热^[27],如波兰和英国关废煤矿井筒储热研究^[28,29]。借鉴汪集暘^[30]提出的地球充电/热宝新理念,矿山(地)热能储用可概化为矿山充电/热宝,将矿山地热开发、存储与其他风光等可再生能源互补实施多场景综合利用,实现矿山地热+多能互补储用,提高大规模长时间能源使用效率,有望解决阻碍中国可再生能源渗透比例提升的关键问题——时空间歇性和不平衡性^[31]。

不论是矿山地热开发还是矿山(地)热能存储,在空间展布方面由于矿山自身固有的拓扑结构属性均涉及多种固液气介质:固体-土/岩石、液体-水、气体-水蒸气/矿井乏风/压缩空气,如图1(b)所示。在空间垂向上,矿山(地)热能开发往往涉及地表尾矿等固体采矿废弃物、表层恒温土壤和深部高温基岩;矿山(地)热能开发和存储利用最多的则是不同深度矿井水地热流体;在生产矿山(地)热能开发和关废矿山储能方面则需要利用矿井乏风、压缩空气和矿井水。上述多种固液气介质在矿山(地)热能开发和储用过程中同时伴随多种形式的能量转化:风能-太阳能-电能-热能-重力势能等。例如,在矿山(地)热能开发过程中存在核素衰变辐射能-太阳辐射能-地热能-机械能间的转化;矿山(地)热能储用过程中则伴随风能-太阳辐射能-电能-热能-重力势能间的转化。这一物质与能量的交汇过程涵盖了与人类活动密切相关的地球表层系统水圈、大气圈、生物圈、土壤圈和岩石圈多个圈层及其相互作用的边界区域,面临资源、能源与环境多学科领域共性关键科学问题的挑战:伴随能量转化的地球关键带内流体物质运移过程与机制^[32,33]。

基于上述矿山(地)热能开发和储用历时、空间展布特征分析,同时对全球44处矿山地热利用示范工程开展文献调研^[21],在此基础上提出了矿山全生命周期-地球关键带内(地)热能开发与储用新概念^[21,32],如图1所示。在上述理念中,地球关键带内各圈层、各要素是载体,该载体受矿山全生命周期内的勘探建设、开采和闭坑活动影响后的状态为核心,矿山(地)热能开发与储用是目的,其物质运移与能量转化的交汇过程代表了一个新兴的、潜力无限的、多学科交叉的新领域。需要说明的是,与其他任何新的、尚未经验证的概念、观点、理论或学说类似,矿山全生命周期-地球关键带内(地)热能开发与储用新概念在其科学内涵、理论框架与支撑技术方面还很欠缺,对其完善仍将面临很多困难和不确定性,但希望以此为契机尝试提出新观点(思想)、产生新知识(体系)。

2 关废矿山水热型(地)热能开发与储用

关废矿山水热型(地)热能开发与储用多以开采矿井水地

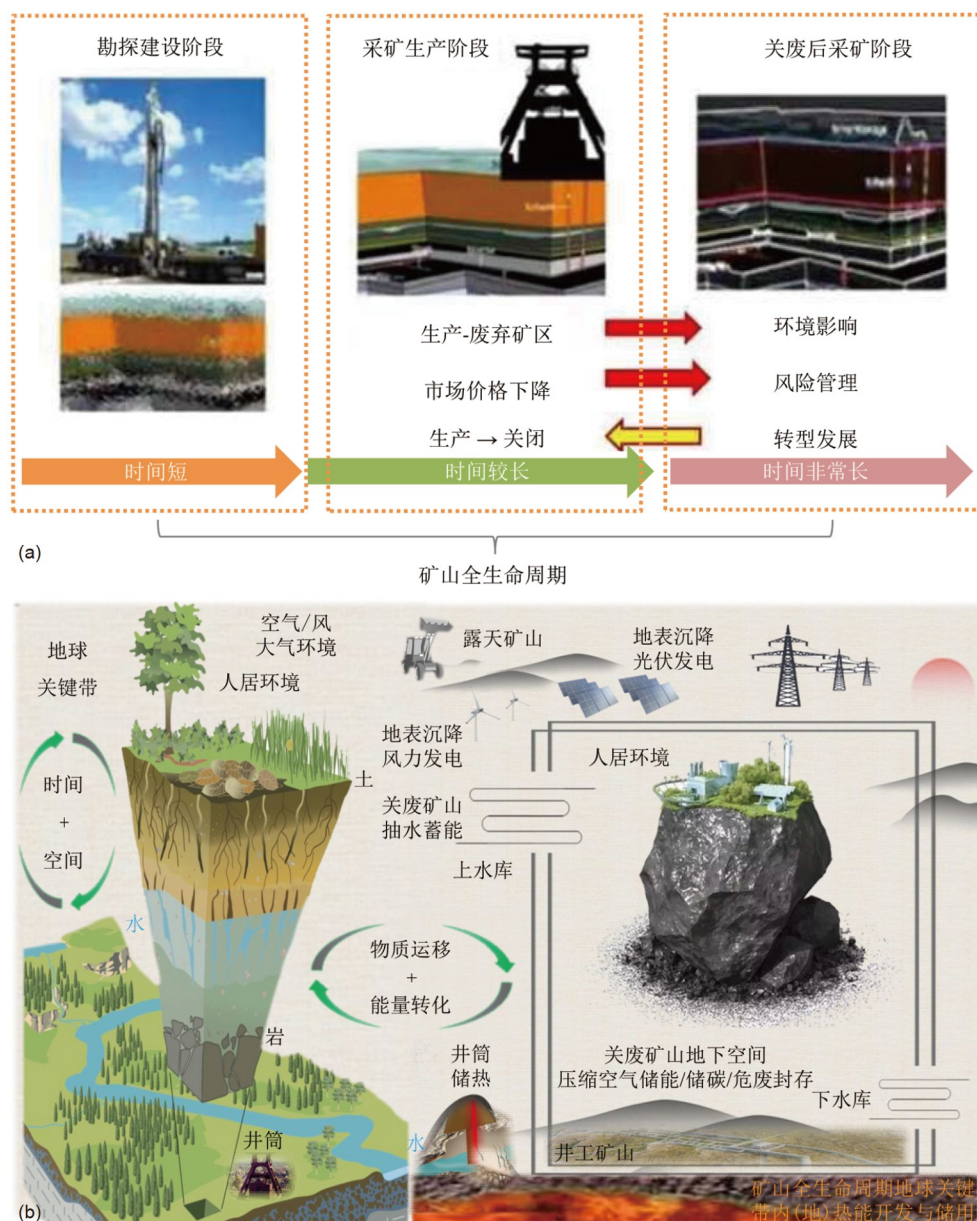


图 1 矿山全生命周期-地球关键带内(地)热能开发与储用概念示意图. (a) 矿山全生命周期历时特征. (b) 矿山-地球关键带多圈层物质运移与能量转化空间展布

Figure 1 Conceptual sketch of mine life cycle geothermal energy exploitation and heat storage within the Earth Critical Zone. (a) Diachronic characteristic of the full life cycle of a mine. (b) Spatial distribution of substance migration and energy conversion within the Earth Critical Zone

热流体和矿井水储热为主。煤矿等井工开采矿山关废后会遗留下大量地下空间^[34]，该废弃空间在排水停止后即被地下水“回弹”淹没，地表-降雨入渗携带的太阳辐射能和地球深部核素衰变产生的热量使其易形成大体积量的中低焓水热型热储层^[35]。相对于传统钻井式深部增强型地热开发模式(D-EGS)，关废矿山的前期采掘活动及相应配套井巷设施提供了一种开掘式浅中层地热开发新模式(E-EGS)，一方面降低了钻井及维护成本^[36]，另一方面改善了热储层的渗透特性^[37]，

提高了关废山水热型地热资源开发的技术和经济可行性。上述思路自20世纪80年代在加拿大被首先提出并在Springhill关废煤矿建设首例示范工程后^[38]，已在世界范围内建成并运行该类系统数十处，如欧盟MineWater、LoCAL项目在荷兰、德国、英国、波兰和西班牙建设的多个示范工程^[21]。虽然关废山水热型(地)热能开发与储用具有其独特优势，但其建设和发展远未达到预期的大规模、商业化成熟度^[20,21]。要想技术上可靠、经济上可行、环境上友好地实现关废矿

山水热型(地)热能开发与储用依然任重道远, 面临诸多技术、经济和环境等社会挑战, 需理性看待其优势和不足^[20]。因此, 基于关废矿山的矿井水热型(地)热能开发与储用仍需进一步深入开展相关研究工作。

2.1 关废矿山水热型(地)热能开发科学认识

制约关废矿山水热型(地)热能规模化开发利用的关键问题首先是对该类热储性质和定位(义)、开发潜能及可行性认识不足。目前, 中国矿山开采深度多为1000 m以浅, 最大1500~2000 m, 矿产资源开发深度及以此为基础的接续深度与浅层(<200 m)、中深层(200~3000 m)地热资源开发深度极为契合^[39]。矿山地热从深度上虽涵盖浅层和中深层地热资源范畴, 但在温度品质上均属于低温、低焓地热能(<90℃)。中国《地热资源评价方法(DZ40-85)》规定40℃为中低温热水下限温度(对应热储起算顶界埋深)。以此为标准, 如果考虑15℃左右的恒温带温度和平均3℃/100 m的地温梯度, 800 m以浅矿山地热资源均不足以作为可利用热储开展地热资源评价。王贵玲等人^[40]针对中国地热资源形成理论认识不统一问题, 提出了水热型与干热型地热资源“同源共生-壳幔生热-构造控热”的成因机制, 将水热型地热系统分为7类, 但未涉及矿区、矿山水热型地热系统。因此, 矿山水热型地热不同于常规的浅层地热和中深层水热, 有其自身的特征^[41]。关废矿山是否存在可利用性低温水热型热储, 其地热系统如何定位(义), 又如何采用传统地热地质学理论分析“源通储盖”特征、评估其热储潜能等问题尚缺乏统一性认识。

在特定的热源成因机制下, 关废矿山水热型(地)热开发潜能很大程度上取决于矿井水热流体体积^[38], 即采掘作业导致的井-巷-采场尤其是采空区空隙填充的矿井水量。在煤炭行业领域, 这与顾大钊等提出的创新性煤矿地下水库理念中的库容、储水系数确定等问题类似^[42], 但仍存在生产与关废矿井间的差异。针对关废煤矿山, 传统方法均通过已开采原煤量考虑地面沉降等效估算储水容积^[38,43], 相对精细化研究则集中于采场空隙特征分析与计算模拟^[44,45]。近年来, 中国部分学者以“横三区”“竖三带”采场上覆岩层采动裂隙分布理论为基础, 聚焦煤岩碎胀特性和开采时空参数量化分析关废煤矿井下空隙储水特征^[46-48]。但是, 由于关废矿山井下空隙特征演化机制复杂、影响深远, 闭坑后采空区地层各阶段稳定状态和时效性仍不明晰, 如何采用地热地质学理论与方法结合矿山开采-闭坑实际计算矿井水热流体体积、评估其开发潜能仍需进一步深入研究。

2.2 关废矿山矿井水储热可利用性研究

关废矿山水热型(地)热能开发对应矿井水储热利用, 而矿井水储热可利用性是制约其资源化再生利用的另外一个关键问题。矿山闭坑后, 采场垮落、巷道坍塌, 井筒作为混凝土结构其支护强度高、服役寿命长、纵向空间大, 更适合开

展矿井水地下储热^[49]。

然而, 与关废矿山水热型(地)热能开发所需要的地层高渗透性不同, 传统观点认为地下水体储热需要满足特定的地层水文地质条件以保证一定的储热效率, 如较低的水流速、渗透率及合适的厚度^[25]。笔者及团队初步研究结果表明, 一定的地下水流速-水压、地层渗透率似乎更有利于井筒矿井水储热效率提升, 即关废矿山井筒矿井水储热可能存在“类水封”效应, 而如何验证就需要确定关废矿山井筒及周围地层的水文地质参数。中国暨有标准规范中的常规方法均为在井筒周围采用钻孔抽水试验确定地层水文地质参数, 是否可采用关废矿山井筒直接开展大直径-大流量抽水试验?该试验可能会出现无降深、降深不明显等有违传统地下水井流理论问题, 应将关废矿山井筒及周围地层统一考虑(如井壁破裂和井筒变形等)开展水文地质勘察, 为井筒矿井水储热利用服务。此外, 受地面降雨入渗影响, 关废矿山井筒沟通第四系潜水层与承压含水层的特征易使井筒内水位产生一定的回弹波动, 该现象对井筒矿井水储热的影响同样需要开展针对性研究。

2.3 关废矿山矿井水温盐分层问题分析

无论是开发还是储热, 关废矿山水体需面对同时影响矿井水温度和理化特性的温盐分层问题^[50]。温盐分层是大型水体在竖向上由于温度和盐度梯度产生的台阶式结构分层现象^[21], 相邻层间界面处出现显著的温度和盐度变化-限制层间热质输运, 而每层的层内传热传质充分, 温度和盐度几乎相同, 变化不大。该现象最早在19世纪50~60年代发现^[51], 早期较多用于海洋物理学“盐指”研究, 后逐渐在露天矿坑形成湖泊、矿井水体中得到实测验证, 如加拿大Springhill^[38]、德国Wolf^[52]和美国Hancock^[53]关废矿井水体中均观测到明显的温盐分层现象。Bao等人^[54]、Mugova和Wolkersdorfer^[55]针对关废矿井水体产生的温盐分层从测试方法、影响参数、判别标准、传热传质-形成和消融机理以及未来研究方向进行了综述分析, 均认为温盐分层产生的理论基础源自基于双扩散对流(double diffusive convection, DDC)的传热传质和流体力学交叉领域-自然对流换热, 聚焦温盐分层形成与消融转换点临界热力学参数确定, 如温度梯度、浮重力比和 Ra 数。

上述温盐分层形成-消融转换与自然对流换热的流动形态稳定性密切相关^[56]。采用什么准则(判据)来反映自然对流换热时的流动形态转变问题值得讨论^[57]。长期以来, 由能量微分方程无量纲化得到的 Ra 准则 $Nu=f(Gr\cdot Pr)=f(Ra)$, 即 Ra 数被用来判断自然对流传热规律的转变, 其效果并不理想。式中, Nu 为努塞尔无量纲准则数, 反映对流传热过程的强度; Gr 为格拉晓夫无量纲准则数, 表征浮升力与黏滞力的相对大小, 显示自然对流流态对传热的影响; Pr 为普朗特无量纲准则数, 表征流体动量传递与热量传递能力的相对大小, 反映流体物性对对流传热过程的影响; Ra 为瑞利无量纲准则数,

$Ra=Gr\cdot Pr$, 用于浮力驱动的自然对流层流和紊流判断, 以及自然对流传热过程中主要形式是热传导还是热对流的判断. 从理论角度分析, 反应流体流动形态转变的准则应由动量微分方程的无量纲化导出, 而不能从能量微分方程导出. 由动量微分方程导出的 Gr 准则即 Gr 数才是正确的选择, 正如强迫对流中判别流态及影响对流传热的本征特征数为 Re 数 $Nu=f(Re\cdot Pr)=f(Pe)$ 而不是 Pe 数, 影响自然对流传热规律的本征特征数应为 Gr 数. 式中, Re 为雷诺无量纲准则数, 表征惯性力与黏滞力的相对大小, 显示受迫对流流态对传热的影响; Pe 为佩克莱无量纲准则数, $Pe=Re\cdot Pr$, 其物理意义为对流速率与扩散速率之比, 用于分析受迫对流传热过程中主要形式是热传导还是热对流. 目前尽管已有部分针对关废矿井水体温盐分层的研究, 但受制于成本及现场条件的制约, 多为数值模拟和理论研究, 采用 Gr 准则作为判定关废矿井水体温盐分层对流传热规律转变的理论探索尚有待开展, 也缺乏对该问题实验类研究的关注.

2.4 解决问题的思路

关废矿山水热型(地)热能开发与储用具有其独特优势, 但其资源化再生利用尚未大规模展开. 在基础研究和工程应用层面, 对关废矿山水热型地热资源认识不清, 针对其开发和储用技术不够、支撑不强. 鉴于上述问题, 应开展关废矿

山矿井水储热潜能评估、分析研判矿井水储热可利用性、揭示矿井水体温盐分层形成与消融演化过程转换机制等探索性预研工作, 主要思路可分为以下两点(图2).

(1) 在基础 research 对关废矿山水热型热储认知方面, 大胆假设, 借鉴水热-干热地热资源“同源共生-壳幔生热-构造控热”的成因机制, 探索分析其与传统地热资源“壳幔共生-同源异量-采掘控热”热量来源、成因模式与补径排条件的同源性. 在科学认知的基础上具象化, 立足矿山行业矿井建设、生产和关废实际, 基于传统地热地质学理论和方法评估关废矿山水热型热储开发潜能, 形成方法标准, 提高科学认识.

(2) 在工程应用层面, 聚焦关废矿山遗留井-巷-采场设施, 评估矿井水体储热可利用性, 小心求证是否能够开展有悖传统地下水井流理论的关废矿山井筒大直径-大流量抽水试验, 以及关废矿山井筒矿井水储热是否存在“类水封”效应. 进一步针对矿井水体温盐分层现象, 开展理论分析与模型实验, 揭示温盐分层形成和消融演化过程转换机制, 支撑关废矿山水热型地热资源开发和储用工程设计与优化(如矿井水抽灌和储热优势层位确定、设备管路腐蚀、结垢堵塞等矿井水化学安全问题).

综上所述, 关废被淹矿山易形成钻井成本低、地层渗透性好的中低焓水热型“热储”, 对其开发与利用具有独特优势, 但尚未大规模展开. 面向关废矿山水热型地热资源开发和储

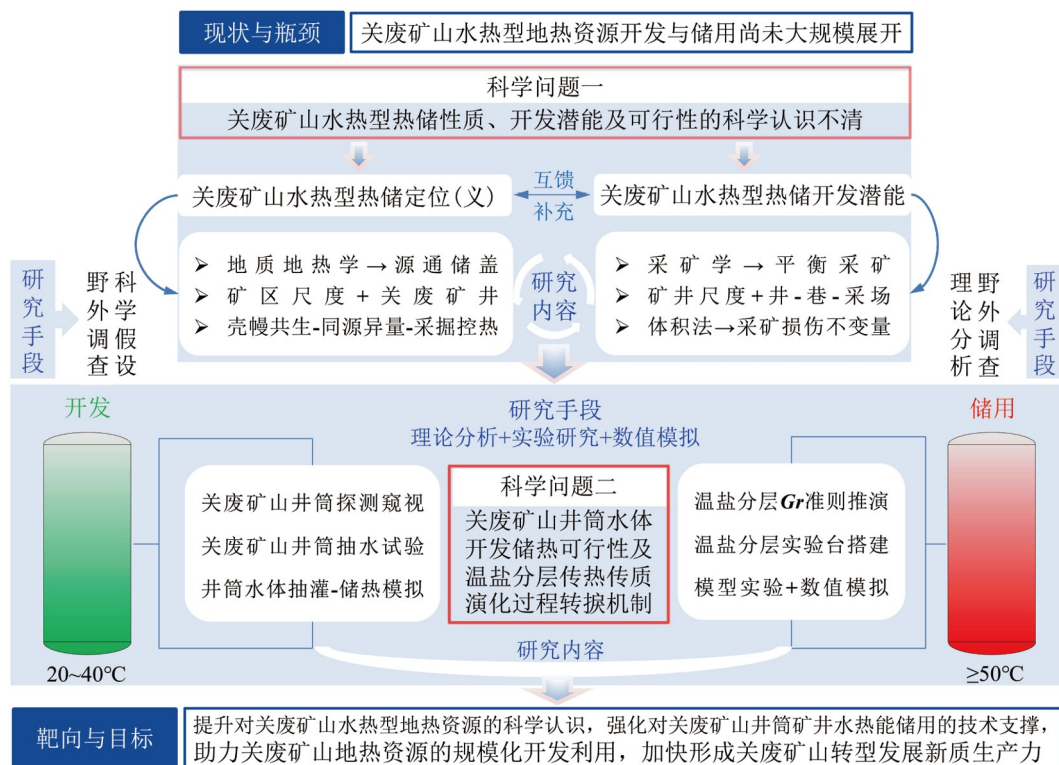


图2 关废矿山水热型(地)热能开发与储用研究示意图

Figure 2 Research route for hydrothermal geo-energy exploitation and storage in legacy mines

用核心靶向, 聚焦基础研究层面的科学认识与工程应用层面的技术支撑两个关键科学问题, 采用现场勘察、理论分析、室内实验和数值模拟等多种研究手段, 首先分析该类热储热源成因机制和模式, 评估开发潜能并研究可行性方案, 进一步对后续影响工程设计与优化的温盐分层现象开展理论分析、模型实验和数值模拟研究。上述解决问题的研究思路, 以科学认识关废矿山矿井水蕴含的水热型地热资源为出发点和落脚点, 尝试分析其“壳幔共生-同源异量-采掘控热”成因机制和开发潜能; 在研究内容上, 围绕关废矿山尤其是井筒咽喉设施, 基于井筒矿井水储热提出并研究解决一些新问题, 如井筒矿井水储热“类水封”效应及井筒非常规抽水试验; 在研究方法上, 通过现场勘察、理论推演、模型实验和数值模拟建立关废矿山水体温盐分层形成和消融传热传质演化过程转换机制的 Gr 准则判据, 并开展对比研究。探讨并尝试解决以上问题, 是对关废矿山已有认识的进一步深化, 其研究成果将具有明显的创新性、重要的科学意义和应用价值。

3 经济、社会与环境因素

除上述技术问题外, 经济、社会与环境因素也是制约关废矿山(地)热能开发与储用的关键。关废矿山(地)热能开发与储用系统建设应考虑与时间相关的潜在效益及总成本间的平衡性。一般而言, 该类系统建设成本高, 运营成本相对较低, 可抵消投资回收期内的部分冗余资本支出, 在矿山及系统全生命周期内提高经济可行性。此外, 关废矿山(地)热能开发与储用受政策波动影响明显。比如, 中国“双碳”目标的提出

势必影响矿业、可再生能源领域的顶层规划、政策倾斜与资金投入, 提高关废矿山资源化再生利用的可行性。再如, 波兰自加入欧盟后, 受限于欧盟的要求其自身能源结构的转变同样加速了波兰国内煤矿的大量关闭及后采矿阶段的资源化再生利用研究^[58]。尤其需要注意关废矿山可再生能源开发与储用对环境的影响, 如矿井水热能利用过程中的尾水排放对水环境的影响^[20]、矿山可再生能源开发对生物多样性的危害^[59]。否则, 关废矿山(地)热能等可再生能源开发带来的“利”将超过对环境带来的“害”, 舍本逐末、得不偿失。

4 结语

基于时空视角分析了矿山地热开发与矿山(地)热能存储过程中的物质运移与能量转化特征, 提出矿山全生命周期-地球关键带内(地)热能开发与储用新概念。聚焦关废矿山水热型(地)热资源开发与热能储用, 剖析了目前存在的对其认识不清、开发和储用技术不够、支撑不强等问题, 提出应首先探讨并揭示其与传统地热资源“壳幔共生-同源异量-采掘控热”热量来源、成因模式与开发潜能的同异性; 围绕关废矿山水体储热研究如井筒矿井水储热“类水封”效应、井筒非常规抽水试验和水体温盐分层形成-消融传热传质演化过程转换机制的 Gr 准则判据等新问题。探讨并尝试解决以上问题, 有助于提升对关废矿山地热资源的科学认识, 强化对关废矿山(地)热能储用的技术支撑, 助力关废矿山(地)热能规模化开发和储用, 因地制宜加快形成关废矿山转型发展新质生产力。

致谢 感谢徐州市科技计划(KC23383)、国家自然科学基金(42107156, 42230704)、国家重点研发计划(2022YFC3003300)、高等学校学科创新引智计划(B23003)、江苏省重大科技基础设施预研项目(SBH2022050014)和自然资源部矿山生态效应与系统修复重点实验室开放基金(MEER-2023-09)资助。

推荐阅读文献

- 1 Lin G, Zhao Y, Fu J, et al. Renewable energy in China's abandoned mines. *Science*, 2023, 380: 699–700
- 2 Bao Z, Ptacek C J, Blowes D W. Extracting resources from abandoned mines. *Science*, 2023, 381: 731–732
- 3 Goldthau A, Tagliapietra S. Energy crisis: Five questions that must be answered in 2023. *Nature*, 2022, 612: 627–630
- 4 McLean S H, Chenier J, Muinonen S, et al. Recovery and repurposing of thermal resources in the mining and mineral processing industry. *J Sustain Min*, 2020, 19: 115–125
- 5 Yuan L, Ling W, Wu Q, et al. Research on the strategy of coal mine safety and abandoned mine resources development and utilization in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 2020 [袁亮, 凌文, 武强, 等. 中国煤矿安全及废弃矿井资源开发利用战略研究. 北京: 科学出版社, 2020]
- 6 Chu Z X. Volume method based potential evaluation on mine water-based geothermal reservoir in abandoned coal mine (in Chinese). *J Eng Geol*, 2023, 31: 1696–1710 [褚召祥. 基于体积法的废弃煤矿水热型热储潜能评估. 工程地质学报, 2023, 31: 1696–1710]
- 7 Kretschmann J. Post-Mining—a Holistic Approach. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2020, 37: 1401–1409
- 8 Kretschmann J, Melchers C. Done for good—Challenges of Post-Mining (in Chinese). Wang J C, Li Y, trans. Beijing: Science Press, 2020 [Kretschmann J, Melchers C. 做得好——德国应对后采矿的挑战. 王家臣, 李杨, 译. 北京: 科学出版社, 2020]
- 9 Yu H C, Deng X, Chen B W. Mine geothermal and heat hazard control (in Chinese). Beijing: Coal Industry Press, 1991 [余恒昌, 邓孝, 陈碧琬. 矿山地热与热害治理. 北京: 煤炭工业出版社, 1991]

- 10 Wang J Y, Kong Y L, Duan Z F, et al. Geothermal energy exploitation and storage in coal field under the dual carbon goal (in Chinese). *Coal Geo & Exp*, 2023, 51: 1–11 [汪集暘, 孔彦龙, 段忠丰, 等. “双碳”目标下煤田区地热资源开发利用与储能技术. *煤田地质与勘探*, 2023, 51: 1–11]
- 11 He M C, Xu M. Research and development of HEMS cooling system and heat-harm control in deep mine (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2008, 27: 1353–1361 [何满潮, 徐敏. HEMS 深井降温系统研发及热害控制对策. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27: 1353–1361]
- 12 Kang F C, Tang C A. Overview of enhanced geothermal system (EGS) based on excavation in China (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2020, 27: 189–197 [亢方超, 唐春安. 基于开挖的增强型地热系统概述. *地学前缘*, 2020, 27: 189–197]
- 13 Liu L, Xin J, Zhang B, et al. Basic theories and applied exploration of functional backfill in mines (in Chinese). *J China Coal Soc*, 2018, 43: 1811–1820 [刘浪, 辛杰, 张波, 等. 矿山功能性充填基础理论与应用探索. *煤炭学报*, 2018, 43: 1811–1820]
- 14 Zhang J X, Wang J Y, Zhou N, et al. Collaborative mining system of geothermal energy and coal resources in deep mines (in Chinese). *Chin J Eng*, 2022, 44: 1682–1693 [张吉雄, 汪集暘, 周楠, 等. 深部矿山地热与煤炭资源协同开发技术体系研究. *工程科学学报*, 2022, 44: 1682–1693]
- 15 Cai M F. Preface to special issue of co-mining of deep mineral and geothermal resources (in Chinese). *Chin J Eng*, 2022, 44: 1621–1622 [蔡美峰. 深部矿产与地热资源共采专刊序言. *工程科学学报*, 2022, 44: 1621–1622]
- 16 Menéndez J, Ordóñez A, Álvarez R, et al. Energy from closed mines: Underground energy storage and geothermal applications. *Renew Sustain Energy Rev*, 2019, 108: 498–512
- 17 Watzlaf G R, Ackman T E. Underground mine water for heating and cooling using geothermal heat pump systems. *Mine Water Environ*, 2006, 25: 1–14
- 18 Anand R S, Li A, Huang W, et al. Super-long gravity heat pipe for geothermal energy exploitation—A comprehensive review. *Renew Sustain Energy Rev*, 2024, 193: 114286
- 19 Gorman M R, Dzombak D A. A review of sustainable mining and resource management: Transitioning from the life cycle of the mine to the life cycle of the mineral. *Resour Conservation Recycling*, 2018, 137: 281–291
- 20 Preene M, Younger P L. Can you take the heat? – Geothermal energy in mining. *Min Tech*, 2014, 123: 107–118
- 21 Chu Z, Dong K, Gao P, et al. Mine-oriented low-enthalpy geothermal exploitation: A review from spatio-temporal perspective. *Energy Convers Manage*, 2021, 237: 114123
- 22 Yang C, Wang T. Opportunities, challenges, and development suggestions for deep underground energy storage in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 4887–4894 [杨春和, 王同涛. 中国深地储能机遇、挑战与发展建议. *科学通报*, 2023, 68: 4887–4894]
- 23 Wu F, Liu Y, Gao R. Challenges and opportunities of energy storage technology in abandoned coal mines: A systematic review. *J Energy Storage*, 2024, 83: 110613
- 24 Rui Z H, Liu Y L, Zhang Z, et al. Research progress and prospect of geothermal energy storage technology (in Chinese). *Petroleum Sci Bull*, 2024, 9: 260–281 [芮振华, 刘月亮, 张政, 等. 地热储能技术研究进展及未来展望. *石油科学通报*, 2024, 9: 260–281]
- 25 Huang Y H, Pang Z H, Cheng Y Z, et al. The development and outlook of the deep aquifer thermal energy storage (deep-ATES) (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2020, 27: 17–24 [黄永辉, 庞忠和, 程远志, 等. 深层含水层地下储热技术的发展现状与展望. *地学前缘*, 2020, 27: 17–24]
- 26 Hahn F, Klein S, Güldenhaupt J, et al. The high temperature mine thermal energy storage project in Bochum, Germany. In: *The 57th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium Atlanta, Georgia, USA*. 2023, ARMA-23-0443
- 27 Li B, Zhang J, Cheng J, et al. An analytical solution to periodical heat transfer problems of multilayer rocks for thermal energy storage in underground mines. *J Energy Storage*, 2022, 50: 104320
- 28 Waniczek S, Ochmann J, Bartela L, et al. Design and construction challenges for a hybrid air and thermal energy storage system built in the post-mining shaft. *J Therm Sci*, 2022, 31: 1302–1317
- 29 Perez Silva J, McDermott C, Fraser-Harris A. The value of a hole in coal: Assessment of seasonal thermal energy storage and recovery in flooded coal mines. *Earth Sci Syst Soc*, 2022, 2: 10044
- 30 Wang J Y. ‘Earth charging/thermal bank’—A new way of geothermal development and utilization. *Sci Technol Rev*, 2018, 36: 1 [汪集暘. “地球充电/热宝”——一种地热开发利用的新途径. *科技导报*, 2018, 36: 1]
- 31 Yang Y, Xia S. China must balance renewable energy sites. *Science*, 2022, 378: 609
- 32 Chu Z, Wang Y, Ji Y, et al. China: Legacy collieries versus renewable energy. *Geosci Lett*, 2024, 11: 7
- 33 Hu L, Wang J, Karrech A, et al. Exploring the frontiers of deep underground sciences and engineering—China Yunlong Lake Laboratory is striving to be the best. *Deep Underground Sci Eng*, 2022, 1: 131–137
- 34 Xie H, Zhao J W, Zhou H W, et al. Secondary utilizations and perspectives of mined underground space. *Tunnelling Underground Space Tech*, 2020, 96: 103129
- 35 Pu H, Xu J C, Bian Z F, et al. Research status and progress of geothermal energy development and utilization from closed/abandoned coal mines (in Chinese). *J China Coal Soc*, 2022, 47: 2243–2269 [浦海, 许军策, 卞正富, 等. 关闭/废弃矿井地热能开发利用研究现状与进展. *煤炭学报*, 2022, 47: 2243–2269]
- 36 Hall A, Scott J A, Shang H. Geothermal energy recovery from underground mines. *Renew Sustain Energy Rev*, 2011, 15: 916–924

- 37 Loredó C, Roqueñí N, Ordóñez A. Modelling flow and heat transfer in flooded mines for geothermal energy use: A review. *Int J Coal Geol*, 2016, 164: 115–122
- 38 Jessop A M, MacDonald J K, Spence H. Clean energy from abandoned mines at Springhill, Nova Scotia. *Energy Sources*, 1995, 17: 93–106
- 39 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 (in Chinese). *Coal Econ Res*, 2022, 42: 39–46 [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. *煤炭经济研究*, 2022, 42: 39–46]
- 40 Wang G L, Lan W J, Liu F, et al. Theory and survey practice of deep heat accumulation in geothermal system and exploration practice (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2023, 97: 639–660 [王贵玲, 蔺文静, 刘峰, 等. 地热系统深部热能聚敛理论及勘查实践. *地质学报*, 2023, 97: 639–660]
- 41 Zhang F W, Zhao M, Li S T, et al. Research on the development and utilization of geothermal resources in abandoned coal mines (in Chinese). *Geol China*, 2024, 51: 1–14 [张发旺, 赵森, 李胜涛, 等. 废弃煤矿山地热资源开发利用研究. *中国地质*, 2024, 51: 1–14]
- 42 Gu D Z. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir (in Chinese). *J China Coal Soc*, 2015, 40: 239–246 [顾大钊. 煤矿地下水库理论框架和技术体系. *煤炭学报*, 2015, 40: 239–246]
- 43 Malolepszy Z. Modelling of geothermal resources within abandoned coal mines, Upper Silesia. Poland, Iceland: The United Nations University, 1998
- 44 Hamm V, Bazargan Sabet B. Modelling of fluid flow and heat transfer to assess the geothermal potential of a flooded coal mine in Lorraine, France. *Geothermics*, 2010, 39: 177–186
- 45 Jardón S, Ordóñez A, Álvarez R, et al. Mine water for energy and water supply in the central coal basin of Asturias (Spain). *Mine Water Environ*, 2013, 32: 139–151
- 46 Fan J, Xie H, Chen J, et al. Preliminary feasibility analysis of a hybrid pumped-hydro energy storage system using abandoned coal mine goafs. *Appl Energy*, 2020, 258: 114007
- 47 Jiang D Y, Chen S, Liu W, et al. Underground hydro-pumped energy storage using coal mine goafs: System performance analysis and a case study for China. *Front Earth Sci*, 2021, 9: 1–15
- 48 Guo P, Wang M, Dang G, et al. Evaluation method of underground water storage space and thermal reservoir model in abandoned mine. *Rock Mech Bull*, 2023, 2: 100044
- 49 Liu Z Q, Song C Y. Scientific exploration of development and reutilization of vertical shafts in closed mines (in Chinese). *Coal Sci and Tech*, 2019, 47: 18–24 [刘志强, 宋朝阳. 闭坑矿井竖井井筒开发再利用科学探索. *煤炭科学技术*, 2019, 47: 18–24]
- 50 Zhang H T, Xu G Q, Chen X Q, et al. Research progress and prospects on the water quality evolution of closed coal mine water in China (in Chinese). *J China Coal Soc*, 2024, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1386 [张海涛, 许光泉, 陈晓晴, 等. 我国闭坑煤矿矿井水水质演化研究进展与展望. *煤炭学报*, 2024, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1386]
- 51 Wolkersdorfer C. Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines. Berlin: Springer, 2008
- 52 Wieber G, Stemke M, Wonik T, et al. Stratification dynamics and geothermal potential of a deep shaft in the flooded wolf mine, Siegerland/Germany. *Mine Water Environ*, 2019, 38: 325–334
- 53 Bao T, Liu Z L. Geothermal energy from flooded mines: Modeling of transient energy recovery with thermohaline stratification. *Energy Convers Manage*, 2019, 199: 111956
- 54 Bao T, Cao H, Qin Y, et al. Critical insights into thermohaline stratification for geothermal energy recovery from flooded mines with mine water. *J Cleaner Product*, 2020, 273: 122989
- 55 Mugova E, Wolkersdorfer C. Density stratification and double-diffusive convection in mine pools of flooded underground mines – A review. *Water Res*, 2022, 214: 118033
- 56 Xiao Y, Li Y, Zhao M, et al. Finite-amplitude instability of the buoyancy boundary layer in a thermally stratified medium. *J Fluid Mech*, 2022, 947: A40
- 57 Tao W Q. Heat Transfer (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 5th ed, 2019 [陶文铨. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 第五版, 2019]
- 58 Woźniak J, Pactwa K. Possibilities for using mine waters in the context of the construction of heat energy clusters in Poland. *Energ Sustain Soc*, 2019, 9: 13
- 59 Sonter L J, Dade M C, Watson J E M, et al. Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nat Commun*, 2020, 11: 4174

Summary for “关废矿山(地)热能开发与储用”

Legacy mines: geothermal energy exploitation and storage

Zhaoxiang Chu^{1,2,3*}, Jiafeng Tian¹ & Xiaozhao Li^{1,2*}¹ School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China² Yun Long Lake Laboratory of Deep Underground Science and Engineering, Xuzhou 221116, China³ Key Laboratory of Mine Ecological Effects and Systematic Restoration, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China* Corresponding authors, E-mail: chulongxiang@cumt.edu.cn; lixz@cumt.edu.cn

Mining plays a crucial role in human society, encapsulated by the saying, “Everything we use is either grown or mined.” However, once resources are depleted, most mines are inevitably closed and abandoned, posing significant risks to both human health and the environment. Simple closure and improper management of these legacy mines result in significant resource wastage and create numerous safety, environmental, and social challenges. Unlike well-developed mining countries such as the USA, UK, Canada, and Germany, which have been repurposing legacy mines for decades, China recently began the regenerative utilization of closed and abandoned mines. This delay has resulted in a weaker foundation of basic theory and key technology in this field.

Among the various models for repurposing legacy mines, photovoltaic and wind power generation, pumped hydroelectric energy storage, compressed air energy storage, and geothermal energy exploitation and storage have garnered significant attention. Abandoned mines, especially those that become flooded, can easily form low-enthalpy mine water ‘hydrothermal reservoirs’ characterized by high permeability and cost-effective drilling. However, a lack of understanding of these shallow to medium-depth geothermal reservoirs—including their development potential and feasibility—hinders the widespread implementation of this approach, particularly in obsolete collieries.

This study analyzes the diachronic and spatial characteristics of mine-oriented geo-thermal energy exploitation and storage. It introduces a new concept: geothermal energy exploitation and storage throughout the entire life cycle of a mine within Earth Critical Zone. From a temporal perspective, projects should be implemented sequentially during the exploration, construction, production, and legacy phases of a mine. Spatially, the mine-oriented geothermal energy exploitation and storage process involves the migration of various substances (solid: soil/rock; liquid: water; gas: wind and compressed air) and energy conversion (wind, solar, heat, geopotential, and mechanical energy) within Earth Critical Zone (atmosphere, hydrosphere, biosphere, pedosphere, and lithosphere).

A key scientific challenge lies in understanding the migration of Earth’s fluids and energy conversion in near-earth-contact environments during mine-oriented geothermal energy exploitation and storage. To address this challenge, it is essential to analyze the similarities and differences between mine and traditional geothermal reservoirs in terms of heat source, genesis pattern, and compensation and drainage conditions. Specifically, large-diameter, high-flow, single-hole, and steady-state pumping tests are recommended to obtain basic hydrogeological parameters. These can be used to create a 3D geological model of the targeted mine strata, which can simulate and evaluate the quasi-water seal effect during the mine-water heat storage process in legacy shafts.

Theoretical analyses, numerical simulations, and model experiments are urgently needed to understand the formation and dissipation mechanisms of thermohaline stratification in large-scale mine water bodies, as well as its impact on heat and mass transfer. Solving these issues will enhance the scientific understanding of geothermal resources in legacy mines, strengthen the technical support for mine geothermal energy exploitation and storage, and accelerate the development of new high-quality productivity in the transformation of the local legacy mine industry in China.

legacy mines, life cycle, earth critical zone, mine geothermal energy storage, thermohaline stratificationdoi: [10.1360/TB-2024-0767](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0767)