

矿山环境保护

我国煤矿固、液、气“三废”地质封存研究现状与生态环境协同发展的关系

赵康¹, 伍俊², 马超¹, 朱开成³, 聂磊¹, 胡华龙¹

(1. 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心, 北京 100029; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 3. 中煤地地控股有限公司, 北京 100089)

摘要:我国是世界上受煤矿“三废”(固、液、气)环境污染非常严重的国家,在“三废”利用处理上开展了大量深入的研究和实践,但依然存在标准规范不完善、处理规模小和技术不健全等诸多问题。为了解决我国煤矿大规模“三废”低成本地质封存与生态环境协同发展问题,在国外关于地质封存定义的基础上,对我国地质封存的内涵进行了扩展;分析了“三废”地质封存研究进展和现状;梳理了国内外“三废”地质封存相关文献和专利发表情况;提出了我国开展“三废”地质封存面临的问题和进一步发展的建议;指出了我国“三废”地质封存面临的主要问题是环境领域的标准规范不健全,尤其是废液深井灌注方面的标准广泛缺失。通过系统研究表明:国内研究机构对“三废”地质封存领域的研究日益重视,研究成果在国际上占比较高;我国煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展意识和体系正在形成,但针对大规模“三废”地质封存、煤矿开采全周期“三废”地质封存循环系统、CO₂捕集利用封存(CCUS)技术与生态环境之间的协同发展关系方面的研究成果支撑不足,严重制约地质封存的理念、技术和工程的大规模实施应用。我国应尽快加强煤矿“三废”地质封存技术与生态环境协同发展方面的科技研发,通过建立完善标准规范、加大技术研发和加强环境监管等措施,推动我国煤矿绿色和可持续发展,助力我国“双碳”目标尽早实现。

关键词:煤矿;三废(固、液、气);地质封存;生态环境;协同发展;绿色矿山

中图分类号:X7 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2024)06-2785-14

Relationship between the current status of research on geological storage of solid, liquid and gas wastes in coal mines and the coordinated development of the ecological environment in China

ZHAO Kang¹, WU Jun², MA Chao¹, ZHU Kaicheng³, NIE Jinglei¹, HU Hualong¹

(1. Solids Waste and Chemicals Management Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China; 2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. China Coal National Land Holding Co., Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract: China is a country in the world with the serious environmental pollution of coal mine “three wastes” (solid, liquid, gas). A lot of in-depth research and practice has been carried out on the utilization and treatment of “three wastes”. However, there are still many problems such as imperfect standards and norms, small scale of treatment and unsound tech-

收稿日期: 2024-02-27 修回日期: 2024-04-26 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0195

基金项目: 中国科学技术协会 2022 年十大工程技术难题资助项目; 国家自然科学基金资助项目 (52374138); 黄河流域生态保护和高质量发展联合研究 (第 1 期) 资助项目 (2022-YRUC-01-0306)

作者简介: 赵康 (1980—), 男, 河南周口人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: zhaok_666666@163.com

引用格式: 赵康, 伍俊, 马超, 等. 我国煤矿固、液、气“三废”地质封存研究现状与生态环境协同发展的关系[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2785–2798.

ZHAO Kang, WU Jun, MA Chao, et al. Relationship between the current status of research on geological storage of solid, liquid and gas wastes in coal mines and the coordinated development of the ecological environment in China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2785–2798.



移动阅读

nology. In order to solve the problem of synergistic development of low-cost geological storage of large-scale “three wastes” and ecological environment in China’s coal mines, on the basis of the definition of geological storage in other countries, the connotation of geological storage in China has been expanded. The progress and current status of research on the geological storage of “three wastes” are analyzed. Literature and patents related to the geological storage of “three wastes” at home and abroad are reviewed. The problems faced by China in carrying out the geological storage of “three wastes” and the suggestions for further development are put forward. It is pointed out that the main problem faced by the geological storage of “three wastes” in China is the inadequacy of the standards and regulations in the field of environment, especially the extensive lack of standards for the deep-well injection of waste liquids. The systematic research has shown that the research institutions in China are paying increasing attention to research in the field of the geological storage of the “three wastes”, and that the results of the research account for a high percentage of research in the world. China’s coal mine “three wastes” geological storage and ecological environment synergistic development awareness and system is being formed. However, there is insufficient support for research on the large-scale geological storage of “three wastes”, the cyclic system of geological storage of “three wastes” in the whole cycle of coal mining, and the synergistic relationship between CO₂ capture, utilization and storage (CCUS) technology and the ecological environment. This seriously restricts the large-scale implementation and application of the concepts, technologies and projects of geological storage. China should expeditiously strengthen the scientific and technological research and development of coal mine “three wastes” geological storage technology and ecological environment synergistic development. Through the establishment of improved standards and norms, increased technological research and development, and strengthened environmental supervision and other measures, the green and sustainable development in China’s coal mines is promoted, helping the China’s “dual-carbon” goal to be realized.

Key words: coal mine; three wastes (solid, liquid, gas); geological sequestration; ecological environment; coordinated development; green mine

我国是世界上煤炭产量最多的国家,仅 2020 年的煤炭产量就居全世界总量的 50% 以上^[1],产量大导致产生的固体废物逐渐增多,随之而来的煤矿“三废”处理问题备受关注。煤矿“三废”指的是煤矿开采、运输、利用过程中产生的固体、液体和气体废物,主要包括煤矸石、粉煤灰、高矿化废水、CO₂ 等。其中煤矸石是煤炭开采和洗选过程产生的固体废物,产量可占煤炭产量的 10%~25%,2021 年年产煤矸石量约为 7.43 亿 t^[2-3]。这些煤矿“三废”的产生和堆积,不仅会对周围生态环境造成影响,也会加速地球温室效应和全球气候变化,极大阻碍我国“双碳”目标的实现^[4]。

为了解决煤矿“三废”的堆存、泄漏和逸散等问题,积极推进绿色矿山政策的落实,自 21 世纪初以来,党中央、国务院陆续出台一系列举措,组织开展实地考察,颁布和实施《矿山地质环境保护规定》、《矿山地质环境保护与治理规划》等相关法规,推进专项治理,开展矿山复绿行动,累计治理矿山地质环境面积超过 80 万公顷。2008 年,《全国矿产资源规划(2008—2015 年)》将绿色矿山建设作为重点任务,部署启动了试点建设。党的十八大以来,发展绿色矿业,建设绿色矿山工作陆续纳入党中央国务院《关于加快推进生态文明建设的意见》和国家“十三五”“十四五”规划纲要^[5]。

经过多年的努力,绿色矿山建设从倡议探索到试点示范,已成为各地推进矿业领域生态文明建设的重要平台和抓手,一批资源枯竭型城市的矿山地质环境得到及时有效修复。但整体来看,我国矿山地质环境修复和综合治理仍不适应新形势的要求,地表塌陷^[6-7]、耕地污染、植被和自然景观破坏等一系列关键性问题依然突出。

现有文献对地质封存 (Geologic sequestration) 技术定义为将物质充填或注入地下具有合适封闭条件的地层中长期安全隔离起来的处置技术^[8-9],而笔者认为地质封存技术包括了将物质充填或注入地下岩层空区或土壤层,或者是将物质回填地表采坑、沟壑后进行表层覆盖的贮存或处置技术。地质封存技术主要包括:固废的井下充填和地表回填技术以及废液、废气的地下灌注技术。国外发达国家在煤矿固体废物的处理上大多采用地质封存技术^[10],该技术具有开辟新的环境容量、减少污染物处置成本等优点,进而受到如美国、俄罗斯和英国等发达国家的追捧^[11-14]。我国地质封存技术尚未正式全面推广应用,其主要原因包括环境方面相关标准规范不健全、技术方法不明确等。其次,在利用地质封存处置“三废”方面,生态环境、处置规模和经济成本是未来解决该问题的

核心。

笔者以中国科学技术协会 2022 年十大工程技术难题项目“如何实现我国煤矿超大量三废(固、液、气)低成本地质封存及生态环境协同发展”为依托,通过大量煤矿企业现场调研、相关文献资料查阅,重点对该领域研究现状、发展趋势与生态环境协同关系进行深入分析,目的是掌握现阶段该领域国内外的研究现状和发展趋势,并提出我国在煤矿“三废”(固、液、气)地质封存及生态环境协同发展的建议,以期能够为我国煤矿绿色和高质量发展提供参考。

1 煤矿“三废”地质封存与环境协同发展研究现状

20 世纪以来,随着我国工业化体制改革的加速和深化,大型、特大型重工业工厂的数量快速增加,煤炭作为推动重工业工厂运作的重要能源之一,其需求量与产量也随之大幅提升。然而,煤矿产煤量的显著增多也引发了许多问题,如:煤矸石是煤矿生产过程中出现的固体废物,在地表大量堆积,不仅占用土地,而且因为淋溶和扬散影响周围居民健康和对环境造成危害;高矿化废水、酸性废水、碱性矿井水等煤矿废液的随意排放,不仅会造成水资源的大量浪费,而且也会给矿区生态环境带来不利影响,其中尤以高矿化度矿井水危害最为显著; CO_2 、矿井瓦斯等煤矿气体的自然逸散,也容易造成矿区井下发生特重大事故,威胁煤矿的安全生产。从上述煤矿“三废”(固、液、气)的危害可知,解决这类问题成为了环境部门和矿山企业重点关注的方向。

1.1 煤矿“三废”处理的发展与现状

我国从 20 世纪 60 年代开始,首先针对煤矿废液处理方法开展研究,起初将煤矿废液用以灌溉农田^[15],但随着深入研究发现煤矿废液不仅对农作物有危害,对周围土壤环境、居民健康等都有较大程度的负面影响^[16-19]。到 20 世纪 90 年代初,利用助凝剂去除煤矿废液中的悬浮物成为消除其污染性的主要方式^[20-22]。在 21 世纪初,研究人员又进一步开展了机械设备和添加剂结合的方法^[23]、中和沉淀法^[24]、气浮法^[25]、微生物技术^[26]等多种方法来去除煤矿废液污染性的研究。之后为探寻更经济、高效的煤矿废液处理方法,有专家提出利用塌陷盆地^[27]等自然凹陷处理煤矿废液,这样的做法不仅成本低且安全性高,易于操作。

目前,煤矿废液的地下灌注技术与控制技术也愈发受到关注,该技术并非将废液简单地排入地下,而是将废液封存在一定深度的地下岩石中,利用深地岩石所处的封闭环境使废液不影响周围土壤物质循

环^[28-29]。此技术在国外如美国、加拿大、欧洲和俄罗斯等国家已经发展为一种成熟、安全和经济的废液、废气处理技术。据统计,美国每年使用地下灌注技术处理的废物约占总废物的 49%。我国从 20 世纪 90 年代才开始关注该项废物处理技术,较之发达国家起步晚,目前也尚未正式全面推广应用,地下灌注技术的相关标准规范^[30]、技术方法等尚待进一步研究与制定,尤其是与生态环境相关的标准规范及污染防控技术等方面严重缺失。我国国土辽阔,地质条件适用于地下灌注的区域及储层较多,广泛开展地下灌注技术的应用不仅能扩展环境承载能力,同时还能降低环境约束,提高环境质量,为有效地推动矿业与环境保护协同发展具有重要意义。

在煤矿固废处理方面,起初是将煤矸石、粉煤灰等煤基固废用以制备建筑行业砖、砌块等,以及作为生产水泥、混凝土的添加材料使用(图 1)。后来煤矸石也被用来发电^[31-33]、吸附矿井水的悬浮物和杂质^[34-36]以及制成充填材料充填矿山地下采空区^[37]。郭玉霞等^[38]研究了不同尺寸的煤矸石、粉煤灰混合充填体在单轴压缩作用下的声发射、损伤演化特征和微观结构,结果表明该充填体的单轴抗压强度、破坏形式、声发射特征和电阻率均与试样的尺寸大小有关。吴疆宇等^[39]研究了矸石充填体骨料粒径分布的分形维数大小与应变变化的关系,揭示了矸石充填体骨料形态对裂纹扩展的影响机制。笔者^[40]深入研究了矿山固废胶结充填体的力学特性、声发射演化与裂纹扩展机制,分析了充填体裂纹演化多尺度特征。张鹏飞等^[41]研究了煤矸石充填采空区时顶板裂隙的演化特征,揭示了采空区顶板下沉的主要原因。冯国瑞等^[42]对养护早期的煤矸石胶结充填体进行加载,研究了早期加载对试样破坏形式、损伤演化和声发射特征的影响

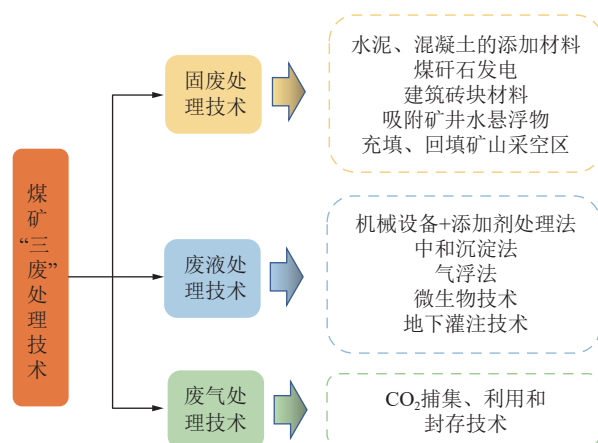


图 1 煤矿“三废”处理技术分类

Fig.1 Treatment technology classification of coal mine “three wastes”

响。张吉雄等^[43]对煤矿井下煤矸石的分类、运输和充填方法进行研究,提出了“采选充+留”的协同开采模式。然而,即使近年来国内研究人员对煤矿固废井下充填开展了大量相关研究,但充填规模和充填效率仍不理想。

煤炭燃烧时会排放出大量 CO₂ 等温室气体。据统计显示,我国每年有 121 亿 t CO₂ 排放量^[44],其中煤炭燃烧排放量约占 80%。严格控制 CO₂ 的排放量和排放途径,逐渐成为推进煤炭行业绿色低碳生产的重点工作,也是推动我国生态文明建设和实现“碳达峰、碳中和”目标的必由之路。

CO₂ 的地质封存被视为 CO₂ 捕集、利用和封存技术 (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 的核心^[45]。虽然 CO₂ 地质封存技术环节简单、成本较低且封存量逐年提升速率明显,但依旧存在与其他技术竞争优势不显著、可应用的相关商业模式不完善、集群化、规模化不充分等问题。桑树勋等^[46]讨论了我国 CO₂ 地质封存潜力与 CCUS 技术发展和应用之间的关系,认为 CO₂ 地质封存潜力与可再生能源、生物质等多种资源的协同关系制约了 CCUS 技术的规模化和集群化发展,提出了将新能源技术引入 CCUS 技术中以形成脱碳新路径。朱世良等^[47]研究了 CO₂ 地质封存对顶板裂缝渗透率的影响机制,发现注入 CO₂ 时的压力会促进裂缝产生,但 CO₂ 封存地下后会与顶板裂缝反应,降低裂缝的渗透率,同时降低 CO₂ 从裂缝泄露的概率。张遵国等^[48]研究了气煤、1/3 焦煤和贫煤 3 类不同煤体吸附和解吸 CO₂ 时的变形特征,目的是揭示 CO₂ 封存对 3 类煤体变形特征的影响,并以此讨论 3 类煤体在 CO₂ 地质封存技术上的优劣性。肖畅等^[49]研究了超临界 CO₂ 对干/湿无烟煤微观结构和力学性能的影响,获得了超临界 CO₂ 和水作用下煤样声发射参数的应变响应特征,揭示了煤、超临界 CO₂ 和水 3 者间的影响机制。谢和平等^[50-51]总结了我国煤炭开发利用现状,提出了煤矿 CO₂ 开采的新要求,阐述了“双碳”目标下深入探索 CO₂ 能源化资源化的必要性。

综上所述,众多研究人员针对煤矿“三废”(固、液、气)地质封存与生态环境协同发展,从室内试验、数值模拟、现场应用和理论建立等方面开展了大量研究,揭示了煤基固废、废液和废气处理领域的相关机理,提出了煤矿“三废”地质封存全生命周期的封闭循环系统,获得了 CO₂、煤矸石、粉煤灰、高矿化废水等与煤矿的多相耦合模型,分析了 CO₂ 和煤矸石地质封存对煤矿采空区顶板变形和裂缝扩展的影响机理,取得了丰富的成果。然而,目前仍然缺乏对煤矿“三废”地

质封存与生态环境协同发展体系的深入研究,尤其是针对大规模“三废”地质封存、深部采空区地质封存技术、煤矿开采全周期“三废”地质封存循环系统、煤矿 CO₂ 捕集利用封存 (CCUS) 技术等方面的研究依旧较少^[52],特别是生态环境领域的相关法律法规的不健全,严重制约了该技术的大规模推广和应用,未来在该方向开展研究有助于推动煤矿“三废”地质封存与生态环境协同发展体系的完善。

1.2 研究成果基本情况

1.2.1 研究趋势分析

图 2 为关于煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展相关国内外论文的发表情况。由图 2 可知,1960 年以前,针对该领域发表在国外期刊的研究成果数量极少,但从 20 世纪 60 年代后期开始逐渐增多^[53];2000—2009 年,该领域发文量逐年上升,并呈快速增长趋势;2010—2019 年该领域的发文量达到了往期同时段的最大值 25 273 篇,并且 2019 年的发文量达到了年发文历史最高值 4 633 篇。由于检索时间的原因,2020—2022 年这 2 a 的发文量数据无法代表未来几年的发文量,但 2 a 的发文量也已大于 2000—2009 年这 10 a 内的总发文量。

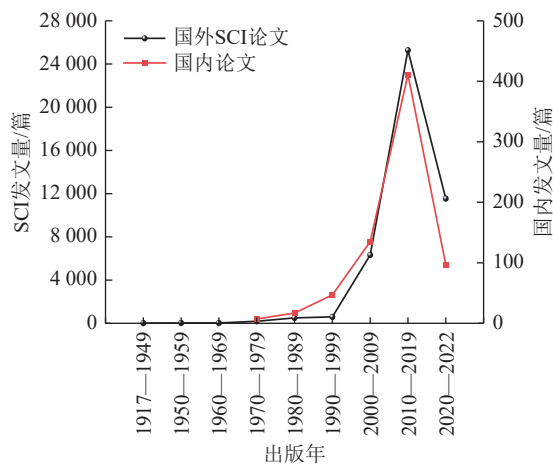


图2 煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展领域 SCI 和国内论文年代分布

Fig.2 Chronological distribution of SCI and domestic papers in the field of geological storage of “three wastes” from coal mines and eco-environmental synergistic development

由图 2 可知,2000 年以前,国内针对该领域的研究成果极少;2000—2009 年,该领域的发文量缓慢上升,原因是 2001 年以来,我国相继颁布了《矿山地质环境保护规定》,实施了《矿山地质环境保护与治理规划》,党中央和国务院积极推进专项治理,开展矿山复绿行动,建设国家矿山公园,构建矿山开发补偿经济制度等^[54-55];2010—2019 年,该领域的发文量大幅增

多,达到了最大值 411 篇,这表明国内逐渐重视该领域的研究,其原因主要是党的十八大以来,发展绿色矿业、建设绿色矿山工作陆续纳入党中央国务院《关于加快推进生态文明建设的意见》和国家“十三五”“十四五”规划纲要^[56];2020—2022 年,该时段的发文量为 97 篇,由于时间原因,该数据仅代表前 2 a 的发文量。此外,国内对煤矿“三废”地质封存及生态环境保护的研究较之国外晚,但 2000 年之后的国内外发文量均快速上涨,表明国内外针对该领域的研究均同步快速实施中。

图 3 显示了国外学者和机构 SCI 发文量随时间的变化趋势,可以看出,国外学者和机构发表煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展领域相关 SCI 论文的起始年份要早于国内,年份约在 20 世纪初,同时相关发文量也要明显多于国内发表的 SCI 论文量。出现这一现象的原因,可能是第 1 次工业革命蒸汽机、蒸汽火车和蒸汽轮船等新型工具的出现,推动了煤炭行业的发展,煤炭及其固废产量同步陡增,为了解决煤基固废的排放处置问题,相关学者陆续开展煤基固废处置理论和技术研究,而我国在该方面的发展较晚,起步较慢,研究也就相对有所滞后。

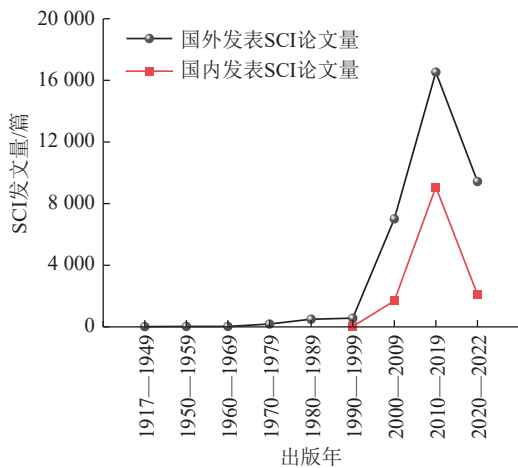


图 3 煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展领域国内外学者 SCI 发文量年代分布

Fig.3 Chronological distribution of SCI publications by domestic and international scholars in the field of geological storage of “three wastes” from coal mines and eco-environmental synergistic development

1.2.2 国家/地区分布

图 4 为煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展领域发文量排名前 20 的国家分布情况。其中,中国发文量最多,约为 20 552 篇,其次是美国和印度,发文量约为中国的 28% 和 16%。发文量排名前 5 的国家分别为中国、美国、印度、西班牙、澳大利亚,总发

文量约为 33 526 篇,中国的发文量占排名前 5 国家总发文量的约 61%。由此可见,中国在煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展领域的研究规模最大,发文量在该领域的全球范围内占据领先地位。

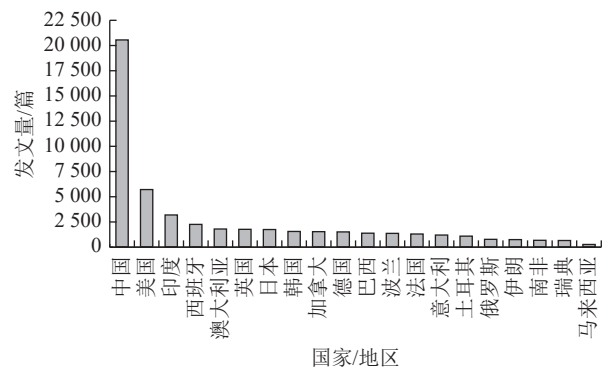


图 4 煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展研究论文国家/地区分布

Fig.4 Country/region distribution of research papers on geological storage of “three wastes” in coal mines and eco-environmental synergistic development

1.3 机构分布

1.3.1 全球机构分布情况

煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展研究领域发文量排名前 20 的研究机构见表 1,其中中国机构有 13 家,2 家印度机构,2 家美国机构,2 家西班牙机构,1 家波兰机构。中国机构的数量在排名前 20 机构中占据了 65%,具有明显的优势。排名前 5 的机构全部来自中国,并且其发文量也显著高于其他机构。

1.3.2 中国机构分布情况

在表 2 所示的煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展研究领域中国发文量前 10 的研究机构中,中国矿业大学以 2 331 篇位居第 1,其次为中国科学院 1 602 篇,第 3 为华中科技大学 746 篇。中国矿业大学和中国科学院在该领域的发文量显著多于其他国内机构。在排名前 10 的机构中,高校有 8 家,科研院所所有 2 家,表明在该领域的研究中,高校的理论研究成果远远高于科研院所。

1.4 期刊分布

在煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展研究领域涉及的期刊超过 180 种,主要集中在地质、燃料、废物管理、环境等方面,见表 3。从期刊所属国家来看,煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展领域的发文量前 20 的机构中美国有 6 本出版发行的刊物,英国和荷兰各有 5 本出版发行的刊物,瑞士出版的刊物有 3 本,德国出版的刊物有 1 本。由此可见,国外发达国家在该领域的影响力非常显著。

表 1 全球发文量前 20 研究机构分布情况
Table 1 Distribution of the top 20 research institutions worldwide in terms of number of articles published

排序	笔者机构	论文数量/篇	国家/地区
1	中国矿业大学	2 331	中国
2	中国科学院	1 602	中国
3	华中科技大学	746	中国
4	浙江大学	646	中国
5	清华大学	578	中国
6	印度理工大学	464	印度
7	印度科学工业研究理事会	454	印度
8	中国科学院大学	348	中国
9	最高科研理事会	313	西班牙
10	西安交通大学	252	中国
11	东南大学	246	中国
12	美国能源部	243	美国
13	哈尔滨工业大学	235	中国
14	肯塔基大学	222	美国
15	中国科学院煤化学研究所	217	中国
16	华北电力大学	207	中国
17	克拉科夫矿冶大学	206	波兰
18	中国地质大学	198	中国
19	西班牙国家研究理事会	198	西班牙
20	北京科技大学	189	中国

表 2 中国发文量前 10 研究机构分布情况
Table 2 Distribution of the top 10 research institutions in China in terms of number of articles published

排序	笔者机构	论文数量/篇
1	中国矿业大学	2 331
2	中国科学院	1 602
3	华中科技大学	746
4	浙江大学	646
5	清华大学	578
6	中国科学院大学	348
7	西安交通大学	252
8	东南大学	246
9	哈尔滨工业大学	235
10	中国科学院煤化学研究所	217

该领域发文量排名第 1 的为英国出版的 FUEL 期刊,该期刊的最新影响因子为 8.035,发文量为 1 506 篇;发文量排名第 2 的为美国出版的 ENERGY & FUELS 期刊,该期刊的最新影响因子为 4.654,发文量为 944 篇;发文量排名第 3 的为荷兰出版的 JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS 期刊,该期刊的最新影响因子高达 14.224,发文量为 536 篇。发文量

表 3 煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展领域论文各出版物发文量分布情况
Table 3 Distribution of publications in the field of geological storage of coal mine “three wastes”and synergistic development of ecology and environment

排序	出版来源	发文数量/篇	出版物类别	国家/地区
1	FUEL	1 506	燃料	英国
2	ENERGY & FUELS	944	能源和燃料	美国
3	JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS	536	危险材料杂志	荷兰
4	WASTE MANAGEMENT	521	废物管理	美国
5	FUEL PROCESSING TECHNOLOGY	486	燃料加工技术	荷兰
6	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	403	建筑和建筑材料	英国
7	INTERNATIONAL JOURNAL OF COAL GEOLOGY	401	国际煤炭地质学杂志	荷兰
8	ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH	350	环境科学和污染研究	德国
9	INTERNATIONAL JOURNAL OF COAL PREPARATION AND UTILIZATION	336	国际煤炭制备和利用杂志	美国
10	CHEMOSPHERE	334	气候环境	英国
11	JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	333	清洁生产杂志	美国
12	ENERGY SOURCES PART A—RECOVERY UTILIZATION AND ENVIRONMENTAL EFFECTS	321	能源A部分—回收利用和环境影响	美国
13	ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY	267	环境科学与技术	美国
14	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	221	全面环境科学	荷兰
15	POWDER TECHNOLOGY	220	粉末技术	瑞士
16	ENERGY	210	能源	英国
17	MINERALS	189	矿物质	瑞士
18	MATERIALS	179	材料	瑞士
19	JOURNAL OF THE ENERGY INSTITUTE	147	能源研究所杂志	英国
20	BIORESOURCE TECHNOLOGY	136	生物资源技术	荷兰

较高的期刊影响因子均较高,这说明该领域的研究受到了较高的重视。

1.5 高被引论文

表 4 列举了在煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展研究领域的高被引论文中前 10 论文的国家分布等信息。在排名前 10 的论文中,中国有 5 篇论文^[57-61],英国有 2 篇论文^[62-63],爱尔兰、加拿大和德国各有 1 篇论文^[64-66]。其中,论文引用次数最高的为中国的 YAO 等^[54]于 2015 年在 Earth-Science Reviews 杂志上发表的论文,该论文讨论了粉煤灰对环境污染的影响,以及阐述了粉煤灰在各方面的用途,并在总结上述用途优缺点的基础上对未来的研究方向做出了

说明,至今已被引用 919 次^[54]。在排名前 10 的论文中,中国发表的论文数占 50%,中国论文的引用次数占总引用次数的 60%,中国在煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展研究领域已产出大量研究成果,且部分研究成果受到了国内外学者们的肯定,中国在该领域的高影响力也在不断增强。

1.6 研究主题分析

1.6.1 研究主题关键词分析

在煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展研究领域的高频词见表 5。该领域高频关键词中出现频次最高的是 Water pollutants chemical (水污染物的化学成分),其次是 Waste disposal fluid (废物处理液),排

表 4 引用次数排名前十的高被引论文情况

Table 4 Top 10 highly cited papers by citation count

排序	作者	标题	引用次数	发表时间	期刊	国家
1	YAO等	A comprehensive review on the applications of coal fly ash	919	2015	Earth-Science Reviews	中国
2	DAI等	Geochemistry of trace elements in Chinese coals: A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization	812	2012	International Journal of Coal Geology	中国
3	BLISSETT等	A review of the multi-component utilisation of coal fly ash	781	2012	Fuel	英国
4	NIU等	Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures	553	2016	Progress in Energy and Combustion Science	中国
5	IZQUIERDO 等	Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview	486	2012	International Journal of Coal Geology	英国
6	ZHUANG等	Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications	408	2016	Journal of Cleaner Production	中国
7	CORDOBA Patricia	Status of Flue Gas Desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs	307	2015	Fuel	爱尔兰
8	YAO等	A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China	286	2014	Fuel	中国
9	BUKHARI等	Conversion of coal fly ash to zeolite utilizing microwave and ultrasound energies: A review	200	2015	Fuel	加拿大
10	KLEINHANS 等	Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior	187	2018	Progress in Energy and Combustion Science	德国

表 5 煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展研究领域主题词频次分析

Table 5 Frequency analysis of topic terms in the field of research on geological storage of “three wastes” in coal mines and eco-environmental co-development

序号	高频关键词	词频	序号	高频关键词	词频
1	Water pollutants chemical	4 066	11	Metals heavy	829
2	Waste disposal fluid	3 153	12	Refuse disposal	646
3	Coal ash	3 078	13	Air pollutants	625
4	Sewage	2 397	14	Industrial waste	587
5	Water purification	1 864	15	Environmental monitoring	566
6	Carbon	1 530	16	Water pollutants chemical	471
7	Particulate matter	1 460	17	Soil pollutants	418
8	Biodegradation environmental	1 302	18	Solid waste	417
9	Adsorption	1 291	19	Hydrogen ion concentration	408
10	Coal	1 224	20	Particle size	332

名第3为 Coal ash (粉煤灰), 可以看出该领域研究最多的方向与水污染物化学品、废物处理液和粉煤灰有关, 煤矿固体、液体废物的处理和环境保护是该领域的重点研究内容。

1.6.2 研究主题方向分析

根据论文的关键词和研究内容, 对研究方向进行分类。按照发文量进行排名, 该领域发文量排名前5的研究方向为: ① Engineering, 工程, 发文量约为13 501篇; ② Energy fuels, 能源燃料, 发文量约为10 295篇; ③ Environmental sciences ecology, 环境科学和生态学, 发文量约为10 146篇; ④ Chemistry, 化学, 发文量约为6 476篇; ⑤ Public environmental occupational health, 公共环境职业健康, 发文量约为4 791篇。这可以看出, 煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展研究领域研究方向主要集中在与工程、能源燃料和环境科学相关的方向。

2 知识产权研发情况

根据煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展的研究主题, 在EPO数据库中输入相关关键词进行检索, 检索时间2022年9月, 对所检索的专利信息进行整理分析, 结果如下:

2.1 专利申请时间分布

由图5煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展国内外专利申请来看, 该领域全球首项专利申请于1932年以前, 中国在该领域的第1项专利发布于1992年, 晚于国外60余年。但在2006年后中国专利申请数量显著提升, 且有持续上涨的趋势^[67]。在2007—2022年中国专利申请数量保持快速增长, 年度专利申请数量占全球专利申请数量的75%以上。

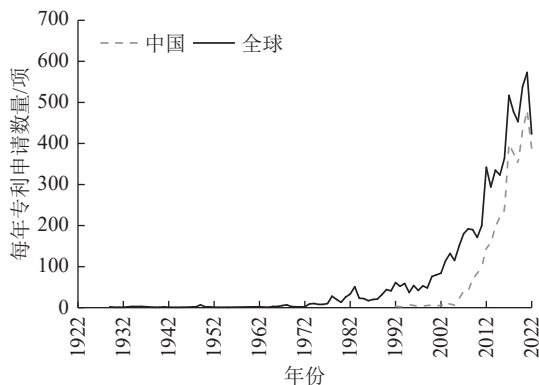


图5 煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展专利年代分布

Fig.5 Chronological distribution characteristics of patents published in the field of “three wastes” geological storage and eco-environmental synergistic development of coal mines

2.2 专利申请国家分布

图6为煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展领域专利申请来源国家分布, 可以看出, 中国在该领域的专利申请数占比最大, 为52.70%, 分别高于排名第2、第3的美国和日本40.96%和42.10%。此外俄罗斯、世界知识产权组织、加拿大、澳大利亚等国家也占有小部分的专利申请百分比。

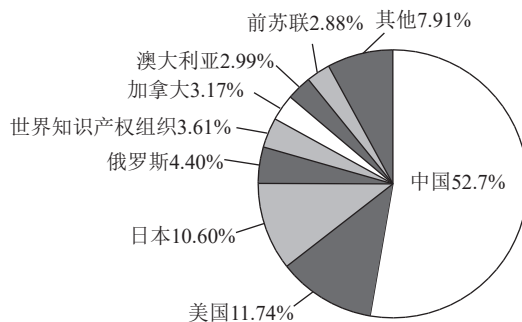


图6 专利申请来源国家分布

Fig.6 Distribution of patent application source countries

2.3 主要专利权人分析

从专利申请数量排名前10机构的分布(表6)可以看出, 前10的机构中属于中国的机构有7家, 且其中6家为大学, 1家公司。另外3家机构中日本2家、德国1家。排名第1位的专利申请人为中国矿业大学, 专利申请数量为205项; 排名第2的是日本TAIHEIYO CEMENT CORP公司, 专利申请数量为71件; 山东科技大学排名第3, 专利申请数量为65件。可以看出, 在煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展的专利数量上, 中国机构专利数量最多, 在排名前十的机构中属于中国的机构占比为70%。说明中国在煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展领域的

表6 申请数量排名前10的专利申请人

Table 6 Top 10 patent applicants in terms of number of applications

排名	申请人	专利数量/项
1	中国矿业大学	205
2	TAIHEIYO CEMENT CORP	71
3	山东科技大学	65
4	太原理工大学	49
5	徐州中矿大贝克福尔科技股份有限公司	48
6	西安科技大学	33
7	KAWASAKI HEAVY IND LTD	27
8	中国矿业大学(北京)	25
9	BASF SE	23
10	北京科技大学	20

创新优势十分明显。

2.4 中国专利权人情况分析

中国在煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展领域专利申请排名前10的机构见表7,可以看出中国矿业大学在该领域的专利申请数量明显高于国内其他机构,在该领域的研究具有较大的优势。在排名前十的机构中,有7所大学和3家公司,大学在该领域的研究机构中占据了主要部分。

表7 申请数量排名前10的专利申请机构

Table 7 Top 10 patent prosecution organizations in terms of number of applications

排名	申请人	专利数量
1	中国矿业大学	205
2	山东科技大学	65
3	太原理工大学	49
4	徐州中矿大贝克福尔科技股份有限公司	48
5	西安科技大学	33
6	中国矿业大学(北京)	25
7	北京科技大学	20
8	中国神华能源有限公司	17
9	湖州霍里思特智能科技有限公司	16
10	河南理工大学	15

3 我国开展“三废”地质封存存在的问题、优势及建议

3.1 “三废”地质封存存在的问题

(1) 标准规范障碍。“三废”的地质封存其主要目的是将废物充填或注入地下岩层空区或土壤地层,使废物远离人类生物圈降低或减少对人类生态环境污染的影响、开辟新的环境容量、减少污染物处置成本等,但目前地质封存技术并不能完全避免环境污染风险。地质封存的难题是随着环境和生态保护工作的深化和技术提升而出现的新难题,尤其是针对废液的深井灌注技术,我国当前出于科学和审慎的严谨态度,现阶段2021-07-01修订实施的《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》(GB 18599—2020)增加了回填和充填的技术路线和风险评估要求,但其他方面标准规范仍然缺失。

(2) 技术障碍。我国在“三废”地质封存方面的技术水平落后发达国家,尤其是在废液和废气封存方面,如美国和俄罗斯的实践历史已超过50 a,并发展成为一种安全、稳定和经济的废物处理技术。由于我国对地下饮用水资源实行更严格的保护政策,因此为防止

地下水资源污染,对深井灌注技术的引入持保守态度^[27],所以国内对深井灌注技术的研究和使用较少,尤其是在封存区域岩层的选择、深井的设计与完井工艺、深井的监测和分析等方面的技术亟需进行深入研究。

(3) 成本障碍。我国在“三废”地质封存方面的技术成本整体偏高,高成本和高技术门槛导致许多相关企业在采用该技术时难以达到国家排放标准,造成技术应用推广上受限制。如煤基固废膏体充填法,充填成本120元/t以上;连采连充法,充填矸石成本约为100元/t。目前我国高矿化度矿井水深井灌注,成本约为25~28元/t。

(4) 规模障碍。由于我国在地质封存技术上的不成熟,导致工程应用受限,进而影响了规模化发展。比如连采连充法,年充填煤矸石量约30万t,效率低、不适合机械化作业;膏体充填法,年充填矸石量100万t以下,效率低、需要布设特殊支架才能作业。在废液地质封存方面,我国开展的较少,中煤能源母杜柴登矿利用深井回灌技术年注入量100万m³高矿化度水。根据《中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2023)》:中国已投运或规划建设中的CCUS示范项目已接近百个,捕集能力约400万t/a,主要以石油、煤化工和电力等行业的捕集驱油的形式存在,大规模的多种技术融合的全流程工业化示范项目数量较少^[68]。

总体来说,目前针对“三废”的地质封存处理方式存在规模小、成本高、技术不完善、标准规范不完善,迫切需要因地制宜、寻找新的技术和途径,实现矿山“三废”的大规模、低成本(如将固废处理成本降低30%,废水处理成本降低60%,CO₂处理成本降低50%)、且满足生态环境安全的地质封存技术。同时,建立系统封存理论与耦合体系,对解决我国煤矿大规模“三废”低成本地质封存问题具有重要价值,对促进生态文明建设意义重大。

3.2 目前我国开展“三废”地质封存的优势

我国存在大范围适合地质封存的地层和区域,可开展地下灌注工程的潜力巨大。

(1) 我国现存较多的沉积盆地为实施地下灌注提供了合适的地质条件^[69]。同时,广泛分布的沉积地层也帮助我国在利用地下灌注技术处理废物方面提供了充足的空间容量。

(2) 地下盐穴的低渗透性和良好的密封性等特点,在防止灌注基质与地下水互通方面具有较大的帮助,并且在满足一定地质条件的情况下是储气、处理矿井废水及高危放射性废物等的理想场所^[70]。在优先满

足我国储气和储油的战略资源储备前提下,可考虑将放射性强、危害性大的废物封存在地下。同时,加强对我国地下盐穴行业的监督管理,使其使用更加规范和合理。

(3) 枯竭石油天然气、矿井。我国石油、煤炭、金属及盐矿等矿硐分布广泛,地下空间容量大^[71]。有关数据显示,我国 400 余座矿业城市中有八成以上仍处于鼎盛期和衰退期^[72],这就表明在今后一段时间内将出现大量矿井关闭,利用关闭矿井的地下空间实施废弃物的地下充填、回填或灌注,不仅能较大程度上降低废物的污染危害,而且能够高效处置工业污染物,对由于开采导致地压下降引发的伴生地质、环境灾害同样有一定的控制作用。

3.3 推进“三废”低成本地质封存及生态环境协同发展的建议

(1) 协调环境机制。国家发展改革委、生态环境部等多个部门发布了《煤矸石综合利用管理办法(2014 年修订版)》,提到新建煤矿及选煤厂若要建设临时煤矸石堆场,原则上其堆存总量不应超过 3 a 的计划堆存量,且后续利用和处理方案应明确。根据现有的煤基固废资源化利用技术、运输半径经济成本等,不足以消纳掉这么大体量的煤矸石,井下充填由于受地质空区条件影响和现有充填技术的限制,仍然有大量的煤矸石没有去处。地表回填采坑、沟壑及塌陷区是目前大量消纳矸石的主要途径,也是恢复采坑、塌陷区地貌所需回填材料的重要来源。但由于涉及部门较多,因此实施起来并不容易,建议从政府层面打通环评、土地、林草等环节壁垒,建立统一的环境协调机制,明确审批程序、审批范围和资料要求,明确地质封存的施工内容,明确污染防治的措施要求,推进煤基固废地表回填采坑、塌陷坑等地质封存路径的顺利实施。

(2) 完善标准规范。我国针对煤基固废的井下充填和回填的相关标准规范均较成熟和完善;而针对废液、废气地下灌注技术还未形成明确的标准规范。应尽早建立地下灌注技术的标准规范。其次应针对地下灌注技术的特点对生物圈地质环境进行风险评估,充分考虑环境的安全性。

(3) 加大技术研发。虽然在煤基固废的井下充填及地表回填的技术都很成熟,但仍需要在特殊地层(比如软岩)充填技术上进行新的技术和工艺上突破,研发边采边充的高效、低廉的采矿方法和充填工艺。针对废液、废气的地下灌注技术由于涉及地质学、环境生态学、地球化学和流体力学等多学科门类,因此需要更多不同学科的研究人员,进行交叉学科领域技

术攻关,开展封存岩层的选择技术评价标准等方面的技术标准研究,出台相关技术标准以指导灌注技术的安全、高效、低成本的推广和应用。

(4) 强化行业联盟交流。为了促进技术的突破,易形成和强化两大联盟:一是强化不同行业间的产业联盟技术交流融合,比如石油行业、煤矿高矿化废水灌注、浆体充填、CO₂ 封存、危险性废物和放射性废物封存等不同行业间的技术联盟交流,形成跨行业的交叉、技术借鉴和成果创新;二是强化同行业内联盟技术交流融合,实现技术共享,互通有无,促进行业技术新突破。

(5) 建设示范基地。由于我国在煤基固废大规模井下充填技术方面还有瓶颈,废液和废气灌注技术方面属于探索阶段,因此,在国家层面选择在此领域技术领先的企业,建设示范地基,起到示范引领的作用。在示范基地开展地质封存的新技术、新模式、新机制及相关法规等方面的探索和尝试,为技术的今后推广提供依据。

(6) 加强环境监管。化解地质封存的风险,增加地质封存的收益。在开展煤基固废井下充填和地表回填的施工期间和工程结束后,要开展定期的环境监测和评估,动态化实施环境监管。针对废液、废气灌注技术因我国还未有相关标准规范,对已经开展地下灌注的项目无监管手段,增大了环境污染风险。根据灌注深度、灌注介质和主要用途的不同,易采取分类分级的环境监管措施。

4 结 论

(1) 我国煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展体系正在形成,目前已在相关领域取得了初步的研究成果。但仍需深入系统研究,尤其是对大规模“三废”地质封存、深部采空区地质封存技术、煤矿开采全周期“三废”地质封存循环系统、煤矿 CO₂ 捕集利用封存(CCUS) 技术等方向的研究,这些是“碳达峰、碳中和”目标下的重要研究内容之一,其目的是推动煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展体系的进一步完善。

(2) 在 2020 年之后,针对煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展领域的研究逐年增多,中国的发文量占据全球领先地位,这反映了中国对煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展领域的研究极为重视。在论文发表机构中,国内高校和研究院所是主要组成部分,但论文发表的刊物则以国外期刊为主。

(3) 煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展领域的专利申请上,中国起步晚于国外发达国家 60 余

年,但自2006年后中国专利申请数量显著增加,且增长速率逐年提升。中国专利申请数量占全球总量的一半以上,其中申请专利的主要为国内高校和研究院所,这反映了中国在该领域的创新优势十分明显。

(4) 我国开展煤矿“三废”地质封存在标准规范、技术成熟度、经济成本及规模方面还有待完善。针对“三废”地质封存处理方式存在规模小、成本高、技术不完善等缺点,尽快建立系统封存理论与耦合体系,对解决我国煤矿大规模“三废”低成本地质封存问题及促进生态文明建设意义重大。

(5) 我国开展煤矿“三废”地质封存具有明显的优势,包括沉积地层、枯竭油气与矿井和地下盐穴,对开展地下灌注工程大有裨益。通过完善标准规范、加大技术研发、成立行业联盟、建设示范基地和加强环境监管,能够促进我国煤矿“三废”地质封存及生态环境协同发展领域的快速发展,起到降碳减排协同的作用,可助力我国“碳达峰、碳中和”目标尽早实现。

参考文献(References):

- [1] BP. Statistical Review of World Energy 2021[R]. London: British Petroleum, 2021.
- [2] 杨越. 我国煤矸石堆存现状及其大宗量综合利用途径[J]. 中国资源综合利用, 2014, 32(6): 18–22.
YANG Yue. Coal gangue stacked and its comprehensive utilization[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2014, 32(6): 18–22.
- [3] 杜建磊, 杜根杰, 高建勇, 等. 我国大宗工业固废综合利用产业发展问题及建议[J]. 现代矿业, 2023, 39(2): 23–26.
DU Jianlei, DU Genjie, GAO Jianyong, et al. Development issues and suggestions on comprehensive utilization of bulk industrial solid waste in China[J]. Modern Mining, 2023, 39(2): 23–26.
- [4] 刘峰, 郭林峰, 赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1–15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1–15.
- [5] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1–15.
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1–15.
- [6] ZHAO K, HE Z W, YANG J, et al. Investigation of failure mechanism of cement-fiber-tailings matrix composites using digital image correlation and acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2022, 335: 127513.
- [7] ZHAO K, ZHOU Y, YU X, et al. Dynamic prediction model of overburden settlement in deep mining areas based on space-time relationship[J]. Natural Resources Research, 2021, 30(5): 3839–3852.
- [8] 黄定国, 杨小林, 余永强, 等. CO₂地质封存技术进展与废弃矿井采空区封存CO₂[J]. 洁净煤技术, 2011, 17(5): 93–96.
HUANG Dingguo, YANG Xiaolin, YU Yongqiang, et al. Technical progress of CO₂ geological sequestration and CO₂ sequestration by antiquated mine goaf[J]. Clean Coal Technology, 2011, 17(5): 93–96.
- [9] 崔振东, 刘大安, 曾荣树, 等. 中国CO₂地质封存与可持续发展[J]. 中国人口·资源与环境, 2010(3): 9–13.
CUI Zhendong, LIU Daan, ZENG Rongshu, et al. Geological sequestration of CO₂ and China's sustainable development[J]. China Population, Resources and Environment, 2010(3): 9–13.
- [10] 陈宏坤, 王晓华, 于景琪, 等. 地下灌注技术及其在美国的应用[J]. 环境保护, 2007, 35(6): 76–79.
CHEN Hongkun, WANG Xiaohua, YU Jingqi, et al. Underground perfusion technology and its application in the United States[J]. Environmental Protection, 2007, 35(6): 76–79.
- [11] 包一翔, 李井峰, 郭强, 等. 二氧化碳用于地质资源开发及同步封存技术综述[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 84–95.
BAO Yixiang, LI Jingfeng, GUO Qiang, et al. Review on technologies of geological resources exploitation by using carbon dioxide and its synchronous storage[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 84–95.
- [12] 王建秀, 吴远斌, 于海鹏. 二氧化碳封存技术研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 81–90.
WANG Jianxiu, WU Yuanbin, YU Haipeng. Review of the technology for sequestration of carbon dioxide[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 81–90.
- [13] 陈兵, 肖红亮, 李景明, 等. 二氧化碳捕集、利用与封存研究进展[J]. 应用化工, 2018, 47(3): 589–592.
CHEN Bing, XIAO Hongliang, LI Jingming, et al. Advances in research on carbon capture, utilization and storage[J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(3): 589–592.
- [14] 刘浪, 方治余, 王双明, 等. 煤矿充填固碳理论基础与技术构想[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 292–308.
LIU Lang, FANG Zhiyu, WANG Shuangming, et al. Theoretical basis and technical conception of backfill carbon fixation in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2): 292–308.
- [15] 李才广. 煤矿废水灌溉农田的调查研究[J]. 中华卫生杂志, 1965(3): 143–145.
LI Caiguang. Investigative study of coal mine wastewater irrigating agricultural land[J]. Chinese Journal of Health, 1965(3): 143–145.
- [16] 谷口敏彦, 平野昌三, 王化信. 水质污染及对作物的危害[J]. 新疆环境保护, 1980, 2(1): 32–38.
GU Kouminyan, PING Yechangsan, WANG Huaxin. Water pollution and its harm to crops[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 1980, 2(1): 32–38.
- [17] 李燮纳. 污水处理动态[J]. 煤矿设计, 1982, 14(2): 48.
LI Xiena. Sewage treatment trends[J]. Coal Engineering, 1982, 14(2): 48.
- [18] 谢晓文. 介绍美国一座全自动的煤矿酸性废水处理厂[J]. 建筑技术通讯(给排水), 1982, 8(2): 45–46.
XIE Xiaowen. This paper introduces a fully automatic acid wastewater treatment plant in coal mines in the United States[J]. Water & Wastewater Engineering, 1982, 8(2): 45–46.

- [19] 陈长兴, 田德林. 露天煤矿污染物排放分析[J]. 环境保护科学, 1986, 12(1): 66-71.
CHEN Changxing, TIAN Delin. Analysis of pollutant emission in open-pit coal mine[J]. Environmental Protection Science, 1986, 12(1): 66-71.
- [20] 付万军, 于宏伟. 舒兰煤矿井下污水处理与利用[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(5): 122-124.
FU Wanjun, YU Hongwei. Treatment and utilization of polluted water in underground mine of Shulan Mine[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(5): 122-124.
- [21] 施宅骅. 煤矿污水的处理和回用[J]. 煤矿设计, 1991, 23(11): 32-34.
SHI Zhaixing. Treatment and reuse of coal mine sewage[J]. Coal Engineering, 1991, 23(11): 32-34.
- [22] 汪振邦. 煤矿酸性水的处理[J]. 中国煤炭, 1995, 21(2): 66-68.
WANG Zhenbang. Treatment of acidic water in coal mine[J]. China Coal, 1995, 21(2): 66-68.
- [23] 张毅, 尚菊红. 煤矿矿井废水综合治理探讨[J]. 中国环境监测, 2000, 16(4): 61-62, 66.
ZHANG Yi, SHANG Juhong. Approach to the comprehensive management coal mine wastewater[J]. Environmental Monitoring in China, 2000, 16(4): 61-62, 66.
- [24] 张宗新, 刘心中, 董凤芝. 煤矿酸性废水处理研究方法研究[J]. 淄博学院学报(自然科学与工程版), 2000(3): 29-32.
ZHANG Zongxin, LIU Xinzong, DONG Fengzhi. Study on the method in disposal of the acid waste water in the colliery[J]. Journal of Zibo University, 2000(3): 29-32.
- [25] 杨苗, 张玉林, 彭光华, 等. 气浮法处理煤矿井下排水试验研究[J]. 宁夏工程技术, 2003, 2(2): 127-129.
YANG Zhuo, ZHANG Yulin, PENG Guanghua, et al. Experimental study on the air floatation treating mine wastewater[J]. Ningxia Engineering Technology, 2003, 2(2): 127-129.
- [26] 崔树军, 张建云, 谷立坤, 等. 微生物技术在煤矿酸性水处理中的应用[J]. 中国给水排水, 2010, 26(16): 27-28, 35.
CUI Shujun, ZHANG Jianyun, GU Likun, et al. Application of microbial technology in treatment of acid mine water[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(16): 27-28, 35.
- [27] 万玉山, 张雁秋, 邓喀中. 利用煤矿塌陷盆地处理矿区生活污水和井下水[J]. 能源环境保护, 2003, 17(4): 38-40.
WAN Yushan, ZHANG Yanqiu, DENG Kazhong. Treatment of domestic wastewater and mine drainage utilizing coal mine collapse basin[J]. Energy Environmental Protection, 2003, 17(4): 38-40.
- [28] 杜松, 张超, 吴唯民, 等. 深井灌注技术用于处理煤矿高盐废水的展望[J]. 中国给水排水, 2020, 36(16): 40-48.
DU Song, ZHANG Chao, WU Weimin, et al. Prospect of deep well injection for treatment of coal mine drainage brine wastewater[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(16): 40-48.
- [29] 郭强, 宋喜东, 虎晓龙, 等. 高矿化度矿井水井下深度处理与浓盐水封存技术研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(12): 16-19.
GUO Qiang, SONG Xidong, HU Xiaolong, et al. Treatment of high salinity mine water and storage of concentrated brine[J]. Coal Engineering, 2020, 52(12): 16-19.
- [30] 周珂, 张璐, 吕明德. 深井灌注技术的环境法律控制[J]. 环境保护, 2004, 32(11): 15-18.
ZHOU Ke, ZHANG Lu, LÜ Mingde. Environmental legal control deep well injection[J]. Environmental Protection, 2004, 32(11): 15-18.
- [31] 黄艳利, 王文峰, 卞正富. 新疆煤基固体废弃物处置与资源化利用研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 319-330.
HUANG Yanli, WANG Wenfeng, BIAN Zhengfu. Prospects of resource utilization and disposal of coal-based solid wastes in Xinjiang[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 319-330.
- [32] 苏述霞. 关于煤矸石发电的建议[J]. 煤炭加工与综合利用, 1985(1): 23-26.
SU Shuxia. Suggestions on coal gangue power generation[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 1985(1): 23-26.
- [33] 赵树珍, 李荫重, 杜铭华. 煤矸石综合利用电厂现状与发展[J]. 煤炭经济研究, 2002, 22(10): 26-28.
ZHAO Shuzhen, LI Yinchong, DU Minghua. Present situation and development of coal gangue comprehensive utilization power plant[J]. Coal Economic Research, 2002, 22(10): 26-28.
- [34] 李尉卿, 崔淑敏. 煤矸石活化制作吸附材料的初步研究[J]. 环境工程, 2004, 22(1): 53-56, 4-5.
LI Yuqing, CUI Shumin. Elementary study on making adsorptive material by activation of gangue[J]. Environmental Engineering, 2004, 22(1): 53-56, 4-5.
- [35] 赵白航, 范飒, 卞伟, 等. 煤矸石对高矿化度矿井水中溶解性有机质的吸附性能[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(9): 989-997.
ZHAO Baihang, FAN Sa, BIAN Wei, et al. Dissolved organic matter adsorption removal by coal gangue in high salinity mine water[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(9): 989-997.
- [36] 王姣, 林昶锬, 李逸飞. 煤矸石负载 Fe/FeO_x 纳米颗粒的制备及其对镉的吸附性能[J]. 复合材料学报, 2022, 39(7): 3317-3329.
WANG Jiao, LIN Changkun, LI Yifei. Synthesis of gangue-supported Fe/FeO_x nanoparticles with application for adsorption of cadmium[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(7): 3317-3329.
- [37] 赵康, 朱胜唐, 周科平, 等. 钼铈矿尾砂胶结充填体力学特性及损伤规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(2): 413-419.
ZHAO Kang, ZHU Shengtang, ZHOU Keping, et al. Research on mechanical properties and damage law of tantalum-niobium ore cemented tailings backfill[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(2): 413-419.
- [38] 郭育霞, 赵永辉, 冯国瑞, 等. 矸石胶结充填体单轴压缩损伤破坏尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2434-2444.
GUO Yuxia, ZHAO Yonghui, FENG Guorui, et al. Study on damage size effect of cemented gangue backfill body under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2434-2444.
- [39] 吴疆宇, 靖洪文, 浦海, 等. 分形矸石胶结充填体的宏细观力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 2083-2100.
WU Jiangyu, JING Hongwen, PU Hai, et al. Macroscopic and mesoscopic mechanical properties of cemented waste rock backfill using fractal gangue[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10): 2083-2100.
- [40] 赵康, 伍俊, 严雅静, 等. 尾砂胶结充填体裂纹演化多尺度特征[J].

- 岩石力学与工程学报, 2022, 41(8): 1626–1636.
- ZHAO Kang, WU Jun, YAN Yajing, et al. Multi-scale characteristics of crack evolution of cemented tailings backfill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(8): 1626–1636.
- [41] 张鹏飞, 赵同彬, 马兴印, 等. 矸石充填开采顶板裂隙分布及演化特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(5): 969–978.
- ZHANG Pengfei, ZHAO Tongbin, MA Xingyin, et al. Analysis on crack distribution and evolution characteristics of gangue backfilled working face roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(5): 969–978.
- [42] 冯国瑞, 解文硕, 郭育霞, 等. 早期受载对矸石胶结充填体力学特性及损伤破坏的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(4): 775–784.
- FENG Guorui, XIE Wenshuo, GUO Yuxia, et al. Effect of early load on mechanical properties and damage of cemented gangue backfill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(4): 775–784.
- [43] 张吉雄, 屠世浩, 曹亦俊, 等. 煤矿井下煤矸智能分选与充填技术及工程应用[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 417–430.
- ZHANG Jixiong, TU Shihao, CAO Yijun, et al. Coal gangue intelligent separation and backfilling technology and its engineering application in underground coal mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3): 417–430.
- [44] International Energy Agency. CO₂ Emissions in 2022[R]. (2023–03–11)[2024–03–22]. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>.
- [45] 桑树勋, 袁亮, 刘世奇, 等. 碳中和地质技术及其煤炭低碳化应用前瞻[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1430–1451.
- SANG Shuxun, YUAN Liang, LIU Shiqi, et al. Geological technology for carbon neutrality and its application prospect for low carbon coal exploitation and utilization[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1430–1451.
- [46] 桑树勋, 刘世奇, 朱前林, 等. CO₂地质封存潜力与能源资源协同的技术基础研究进展[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2700–2716.
- SANG Shuxun, LIU Shiqi, ZHU Qianlin, et al. Research progress on technical basis of synergy between CO₂ geological storage potential and energy resources[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2700–2716.
- [47] 朱世良, 邵丽伟, 周效志, 等. 煤基 CO₂地质封存对顶板裂隙导流能力影响实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 128–132, 139.
- ZHU Shiliang, SHAO Liwei, ZHOU Xiaozhi, et al. Experimental study on the influence of coal-based CO₂ geological storage on roof fracture conductivity[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(3): 128–132, 139.
- [48] 张遵国, 陈毅, 唐朝, 等. 煤体 CO₂吸附/解吸变形特征及变形模型[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 3128–3137.
- ZHANG Zunguo, CHEN Yi, TANG Chao, et al. Deformation characteristics and model of coal adsorption/desorption on CO₂[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3128–3137.
- [49] 肖畅, 王开, 张小强, 等. 超临界 CO₂作用后无烟煤力学损伤演化特性及机理[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2340–2351.
- XIAO Chang, WANG Kai, ZHANG Xiaoqiang, et al. Mechanical damage evolution characteristics and mechanism of anthracite treated with supercritical CO₂[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2340–2351.
- [50] 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 the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197–2211.
- [51] 谢和平, 王金华, 王国法, 等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1187–1197.
- XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1187–1197.
- [52] 姚强岭, 曹胜根, 闫仑, 等. 煤矿采动空间 CO₂地质封存、运移与固化理论和技术框架[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 1003–1017.
- YAO Qiangling, CAO Shenggen, YAN Lun, et al. Research framework of theory and technology for CO₂ geological storage, migration and solidification in coal mining-induced space[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 1003–1017.
- [53] FINKELMAN R B, OREM W, CASTRANOVA V, et al. Health impacts of coal and coal use: Possible solutions[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2002, 50(1–4): 425–443.
- [54] 国土资源部. 矿山地质环境保护规定[EB/OL]. (2009–03–02)[2022–10–20]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2009/content_1449013.htm.
- [55] 国务院. 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL]. (2021–10–24)[2022–10–20]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5649731.htm.
- [56] 国务院. 中共中央国务院印发的关于加快推进生态文明建设的意见[EB/OL]. (2015–04–25)[2022–10–20]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content_2864050.htm.
- [57] YAO Z T, JI X S, SARKER P K, et al. A comprehensive review on the applications of coal fly ash[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 141: 105–121.
- [58] DAI S F, REN D Y, CHOU C L, et al. Geochemistry of trace elements in Chinese coals; a review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 94: 3–21.
- [59] NIU Y Q, TAN H Z, HUI S E. Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2016, 52: 1–61.
- [60] ZHUANG X Y, CHEN L, KOMARNENI S, et al. Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 125: 253–267.
- [61] YAO Z T, XIA M S, SARKER P K, et al. A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China[J]. *Fuel*, 2014, 120: 74–85.
- [62] BLISSETT R S, ROWSON N A. A review of the multi-component

- utilisation of coal fly ash[J]. *Fuel*, 2012, 97: 1–23.
- [63] IZQUIERDO M, QUEROL X. Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 94: 54–66.
- [64] CORDOBA P. Status of Flue Gas Desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs[J]. *Fuel*, 2015, 144: 274–286.
- [65] BUKHARI S S, BEHIN J, KAZEMIAN H, et al. Conversion of coal fly ash to zeolite utilizing microwave and ultrasound energies: A review[J]. *Fuel*, 2015, 140: 250–266.
- [66] KLEINHANS U, WIELAND C, FRANSEN F J, et al. Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 68: 65–168.
- [67] 陈彪, 陈慧, 孙青, 等. 燃煤电厂脱硫废水零排放技术研究进展[J]. *当代化工*, 2021, 50(4): 953–957, 975.
CHEN Biao, CHEN Hui, SUN Qing, et al. Research progress in the zero-discharge treatment technology for desulfurization wastewater from coal-fired power plants[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2021, 50(4): 953–957, 975.
- [68] 张贤, 杨晓亮, 鲁玺. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023)[R]. 中国 21 世纪议程管理中心, 全球碳捕集与封存研究院, 清华大学, 2023.
- [69] 何庆成. 开辟污染物处理新空间[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36(1): 142.
HE Qingcheng. Open up a new space for pollutant treatment[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(1): 142.
- [70] 陈锋. 盐岩力学特性及其在储气库建设中的应用研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院 (武汉岩土力学研究所), 2007: 5–6.
CHEN Feng. The mechanical behavior of salt rock and its application on the natural gas storage construction[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007: 5–6.
- [71] 臧雅琼, 高振记, 钟伟. CO₂ 地质封存国内外研究概况与应用[J]. *环境工程技术学报*, 2012, 2(6): 503–507.
ZANG Yaqiong, GAO Zhenji, ZHONG Wei. Overview of research and application of CO₂ geological sequestration at home and abroad[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2012, 2(6): 503–507.
- [72] 付梅臣, 曾晖, 张宏杰, 等. 资源枯竭矿区土地复垦与生态重建技术[J]. *科技导报*, 2009, 27(17): 38–43.
FU Meichen, ZENG Hui, ZHANG Hongjie, et al. Land reclamation and ecological reconstruction in resourceexhausted mining areas[J]. *Science & Technology Review*, 2009, 27(17): 38–43.