

引文格式:陆伟,任少平,路瑶,等.采空区固碳充填协同煤自燃灾害防治技术研究[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2025,45(5):62-77.

DOI: 10.3969/j.issn.1672-1098.2025.05.005

采空区固碳充填协同煤自燃灾害防治技术研究

陆伟^{1,2,3},任少平^{1,2},路瑶^{1,2},亓冠圣⁴,王昌祥^{1,2},
李金亮^{1,2},孔彪⁴,张茜⁴,吴明跃⁴

(1.安徽理工大学深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室,安徽淮南 232001;2.安徽理工大学安全科学与工程学院,安徽淮南 232001;3.安徽理工大学发展规划处,安徽淮南 232001;4.山东科技大学安全与环境工程学院,山东青岛 266590)

摘要:目的在“双碳”战略推动煤炭行业绿色转型的背景下,针对采空区煤自燃灾害防治与碳减排的双重需求,提出了采空区固碳充填协同煤自燃灾害防治技术构想。**方法**基于采空区物理封存与化学封存的固碳机理,系统分析了 CO₂ 来源及输送方式,研发了以固废为原料的仿生多孔固碳充填材料,并构建“精准识别-材料开发-安全注入-效果评价”的协同技术体系。**结果**该材料的开孔结构可显著加速矿化反应,使矿化深度提升约 2 倍,矿化率提高 39%;其注浆固化可使煤样交叉点温度较原煤提高 19.6~20℃,并通过物理隔氧与化学阻化的协同作用,有效降低 CO 和 CO₂ 生成浓度,抑制煤自燃氧化进程。**结论**研究成果实现了固碳与防灭火的有机融合,提出了“以矿为场、以气治灾、以封减碳”的协同思路,为煤矿灾害治理与碳封存提供了新范式 and 重要工程应用价值。

关键词:采空区;煤自燃;固碳充填;CO₂ 矿化;灾害防治

中图分类号:TD755 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2025)05-0062-16

Research on Carbon Sequestration and Coal Spontaneous Combustion Disaster Prevention Technology in Mining Areas

LU Wei^{1,2,3}, REN Shaoping^{1,2}, LU Yao^{1,2}, QI Guansheng⁴, WANG Changxiang^{1,2},
LI Jinliang^{1,2}, KONG Biao⁴, ZHANG Qian⁴, WU Mingyue⁴

(1.State Key Laboratory of Safe Mining of Deep Coal and Environmental Protection, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2.College of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 3.Department of Development Planning, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 4.College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266590, China)

Abstract: **Objective** Under the impetus of the "dual carbon" strategy driving the green transformation of the coal industry, this study proposes a novel concept of carbon sequestration filling in goafs coupled with spontaneous combustion prevention, aiming to address the dual challenges of disaster control and carbon reduction. **Methods** The mechanisms of physical and chemical carbon sequestration in goafs were elucidated, while the sources and transportation pathways of CO₂ were systematically analyzed. A biomimetic porous filling material, synthesized

收稿日期:2025-07-23

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2023YFC3009100, 2023YFC3009102);国家自然科学基金青年基金资助项目(52304198);国家自然科学基金面上资助项目(52374216);山东省自然科学基金面上资助项目(ZR2023ME074)

作者简介:陆伟(1977-),男,四川武胜人,教授,博士,研究方向:煤自燃火灾防治。

from industrial solid waste, was developed to enhance CO₂ mineralization, and a collaborative technical framework of "precise identification-material development-safe injection-effect evaluation" was established. **Results** Experimental investigations demonstrate that the open-pore structure of the material markedly accelerates mineralization, increasing the mineralization depth by approximately 2 times and the mineralization rate by 39%. Grouting solidification was shown to elevate the crossing-point temperature of coal samples by 19.6 ~ 20 °C compared with raw coal, while the synergistic effects of physical oxygen isolation and chemical inhibition significantly suppressed the generation of CO and CO₂, thereby mitigating the oxidation pathway of spontaneous combustion. **Conclusion** The research achieves an organic integration of carbon sequestration and fire prevention, and advances the collaborative paradigm of "mines as sequestration sites, gases for hazard control, and sealing for carbon reduction" providing a new framework with substantial engineering value for synergistic disaster mitigation and carbon storage in coal mines.

Key words: mined-out area; coal spontaneous combustion; carbon sequestration backfilling; CO₂ mineralization; disaster prevention and control

随着全球气候变化加剧,生态环境安全日益受到关注,“双碳”目标下,作为高碳排放主体的煤炭行业面临绿色转型的迫切需求与政策机遇。我国煤矿资源丰富,长期开采形成了庞大的采空区,预计到2030年将达到241亿cm³^[1],采空区普遍存在遗煤残留和漏风现象,易诱发煤体氧化自燃及次生火灾,严重威胁矿井安全生产。因此“双碳”目标下,探索新的采空区煤自燃防治技术,对实现煤矿安全生产与行业绿色转型具有重要现实意义。

现有研究统计了我国煤矿地下空间容量,针对煤炭开发过程中碳排放特征,提出应尽快谋划采空区治理与CO₂封存协同技术^[2]。同时,建议推动CO₂地质封存,推动废弃矿井能源化、资源化、功能化综合开发利用,通过废弃矿井CO₂地质封存助力实现“碳达峰、碳中和”目标^[3]。已有工作对煤炭开采扰动空间中CO₂地下封存的途径与技术难题进行了探讨,提出了封存方法与技术路线,为实现碳中和提供参考^[4-5]。另有研究提出通过密闭、矿化、吸附封存等途径,实现煤炭开采过程CO₂的近零排放^[6]。此外,还有研究提出了CO₂地下封存及功能性充填的关键技术,并探索了煤矿区固废矿化固定CO₂的机理与应用前景^[7]。以上采空区固碳充填技术的提出与构想,展现出资源利用、碳减排与灾害治理的协同优化潜力。

为了探索采空区CO₂固碳协同煤自燃防治新技术,本研究在构想采空区固碳机制的基础上,分析采空区固碳方式、CO₂来源与输送及固碳充填材料的制备,梳理现阶段采空区煤自燃灾害机理

与防治技术,系统开展采空区CO₂固碳协同煤自燃灾害防治研究。本研究拟构建以“精准识别-材料开发-安全注入-效果评价”为核心的绿色低碳充填治灾技术体系,提出“以矿为场、以气治灾、以封减碳”的复合型治理思路,探索将CO₂封存、灾害防治与固废资源化利用有机融合的煤矿安全生产新模式。

1 采空区固碳现有基础条件

在“双碳”战略目标驱动下,如何在保障煤炭稳定供应的同时,最大限度削减碳排放、实现固废资源化利用,已成为当前煤炭绿色低碳转型的重要技术命题。采空区具备可利用的封闭性、多孔隙性及良好的围岩封堵条件,是实现CO₂地下封存与原位矿化的重要潜在场所。围绕采空区构建“固碳-充填-治灾”一体化技术体系,不仅有助于实现CO₂的长期安全封存,还可有效利用固废资源,减少有效防控采空区火灾、地表沉陷及动力灾害等典型矿山隐患,具有显著的资源-环境-安全多重耦合效益。

为保障采空区固碳治灾技术顺利实施,亟需统筹采空区固碳方式、CO₂来源与输送、提升矿化充填材料固碳性能等关键环节,形成覆盖“碳源捕集-定向注入-固碳矿化”的全链条技术体系,如图1所示。探索以采空区为核心的多元固碳机制,不仅为煤炭行业超低碳排放提供了可行路径,也为我国能源资源型区域“双碳”目标的达成与绿色矿山高质量发展注入了新的技术动能。

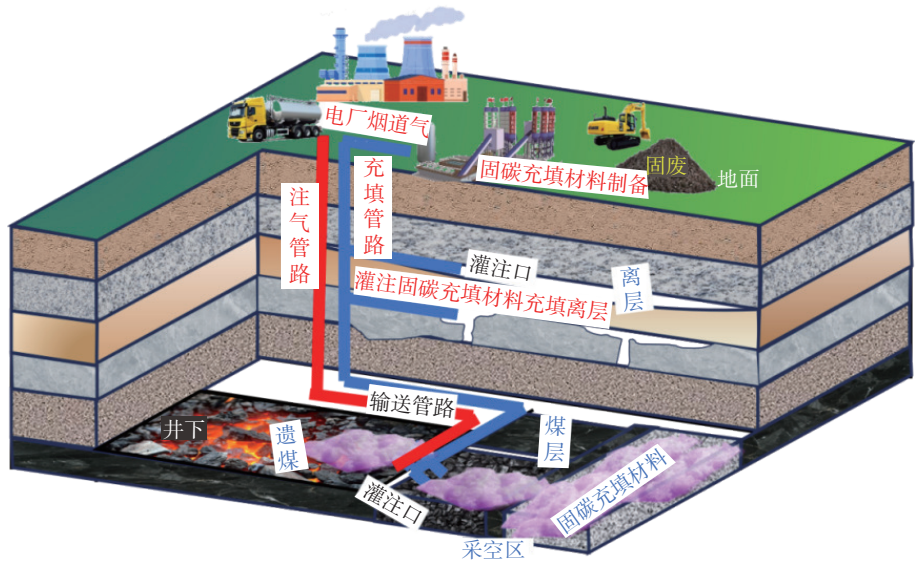


图 1 煤矿采空区固碳治灾构想图

1.1 采空区固碳方式

碳捕集、利用与封存(CCUS)技术是指通过碳捕集技术,将工业和有关能源产业所生产的 CO₂ 分离出来,再将其输送并封存到海底或地下等地方。CCUS 技术主要包括 CO₂ 捕集、CO₂ 运输、CO₂ 利用和封存 3 部分^[8]。现有的 CO₂ 封存与利用技术有海洋存储、地质存储、化学固定或利用、生物固定或利用等^[9]。地质封存 CO₂ 的原理类似于自然界中地质封存天然气等气体的原理,是非常有潜力的

CO₂ 封存技术。大多学者对 CO₂ 地质封存的研究主要是对贫化(或几乎贫化)的油气藏^[10]、不可采煤层^[11]和盐碱含水层^[12]注入二氧化碳并进行永久封存。

在“双碳”战略驱动下,煤矿采空区具备实现大规模碳封存的潜力,可作为 CO₂ 封存与资源化利用的重要场所。目前,国内外学界对采空区固碳技术的探索主要聚焦于两条路径:物理封存和化学封存(见图 2)。

对比维度	物理封存	化学封存
封存机理	空间捕集+盖层封闭+毛细作用+残余气体捕集	气-液-固三相反应,形成稳定碳酸盐
主要方式	构造封存、吸附封存(煤层)、溶解封存(地层水)	矿物碳酸化、生物固碳
封存形态	气态或超临界态CO ₂	固态碳酸盐矿物
反应类型	纯物理过程	矿物碳酸化反应(CaO、MgO、硅酸盐等)
封存容量	采空区空间体积与孔隙度	矿物含量与反应深度
安全性	中等,有CO ₂ 泄漏风险	高,封存产物稳定且无毒
环境影响	可能引发土壤、地下水酸化	环境友好,可同步利用废料、修复地质结构
成本投入	注入设备简易、运行成本低	原料活化、反应促进剂、控制系统等成本较高
地质要求	需要封闭环境	大部分采空区适用

图 2 采空区物理封存与化学封存对比

采空区物理封存以采空区空间本体为储层,利用充填物或围岩的天然封闭性,将捕集的 CO₂ 通过管道注入到采空区裂隙、孔隙及残余空腔中,实现

气体在地下的长期封存。物理封存容量主要取决于采空区空间体积及储层孔隙度。与传统深部咸水层封存或枯竭油气藏封存相比,采空区固碳具有

封存规模大、注入便利、成本相对可控等优点^[13]。然而,物理固碳高度依赖采空区围岩的完整性和注入后的密闭性,易受后期矿压、顶板垮落及裂隙发育影响,若未实现有效封堵,存在 CO₂ 泄漏风险^[14]。此外,物理封存在长期运行中可能对地下环境产生一定的酸化作用,甚至引发地质结构破坏,从而对生态环境造成潜在影响^[15]。其优点在于注入设备相对简单、运行成本较低,适用于具备较好封闭性的特定地质构造。

采空区化学封存充分利用富含活性钙镁离子及硅铝质的工业固废(如煤矸石、粉煤灰、电石渣、尾矿砂等),制备可注入采空区的固碳充填材料,CO₂ 与 CaO、MgO、硅酸盐等矿物组分发生气-液-固多相矿化反应,将 CO₂ 转化生成稳定的固态碳酸盐,封存形态稳定且无毒,大幅提升封存的安全性与长期有效性。与物理封存相比,化学封存对地质条件要求相对宽泛,适用于大部分采空区,同时在反应过程中可利用工业固废、尾矿等资源,对修复地质结构、改善环境具有积极意义^[16]。虽然化学封存需要额外的固碳充填材料研发及充填系统,导致前期成本投入较高,但其长期环境友好性及封存不可逆性优势明显,有助于实现 CO₂ 封存的持久化^[17-18]。然而,由于矿化反应过程受材料活性、温度、孔隙流动性及反应动力学等多因素制约,其矿化速率相对较慢,矿化程度与矿化深度的可控性仍是采空区化学封存目前面临的主要技术瓶颈。

综上所述,采空区化学固碳在适用条件与环境友好性上更具优势,其在采空区防灾减灾及固废资源化利用中的应用,已成为煤矿绿色低碳转型与“双碳”目标达成的热门研究方向,亟需在 CO₂ 来源与输送、固碳充填材料开发及治灾机理等方面持续深入探索。

1.2 CO₂ 来源与输送

中国是全球最大的煤炭生产与消费国,煤炭长期在一次能源消费结构中占据主导地位,燃煤电厂作为主要的煤炭终端利用场景之一,是我国 CO₂ 排放的核心来源。燃煤电厂碳排放量约占全国碳排放总量的 40%,对我国温室气体排放总量和“双碳”目标的实现构成巨大压力^[19]。近年来,随着碳达峰、碳中和目标的提出,燃煤电厂碳减排已成为我国能

源转型和绿色发展的重要议题。在当前能源结构难以在短期内彻底摆脱煤炭依赖的背景下,将采空区固碳与资源化利用燃煤电厂排放 CO₂ 相结合,对促进煤电行业低碳化运行、实现国家碳减排目标具有重要战略意义。为实现燃煤电厂捕集的 CO₂ 在健康、安全、环境友好且经济可行条件下高效运输至采空区,需构建科学合理的 CO₂ 输送系统,包括地面运输和井下直注运输。

管道运输被认为是大规模、远距离 CO₂ 输送的最优方式,具有输送能力大、成本相对较低、对沿线环境扰动小等优势^[20]。在设计 CO₂ 管道时,应充分考虑气体相态、压力和温度条件的控制,以提高输送密度、降低单位体积运输成本^[21]。同时,需采取多重安全措施,设置在线泄漏监测与预警系统,制定应急处置预案等,最大限度降低潜在的泄漏及爆炸风险,确保运输过程对人员健康和周边环境的影响最小化^[22]。CO₂ 井下直注运输目前被广泛应用于采空区防灭火领域,目前发展目前井下 CO₂ 防灭火主要有钻孔输送液态 CO₂^[23]、地面气化管路灌注^[24] 和井下移动式灌注^[25] 3 种方式。

1.3 固碳充填材料

如图 3 所示,近年来我国大宗工矿业固废产量均超过 30 亿吨,利用率不足六成,累计堆存的工业固废总量已超过 600 亿吨。同时我国煤炭生产、利用过程伴生大量固体废弃物,如年产粉煤灰 4.5 亿吨、钢渣 1 亿吨、脱硫渣 0.8 亿吨等。若充分利用上述固废制备固碳充填材料,初步估算年度固定减排 CO₂ 或超过 5 亿吨。例如利用建筑垃圾固定约 4.62 亿吨 O₂, 钢渣固定约 0.42 亿吨 CO₂, 粉煤灰固定 0.81 亿吨 CO₂, 通过电石渣固定 892 万吨 CO₂。

目前已有研究者对固废(粉煤灰^[26]、钢渣^[27]、赤泥^[28]等)开展 CO₂ 固碳反应研究。研究表明,CO₂ 矿化封存受压力、温度以及粒径等因素影响较大^[29]。增大压力可以促进 CO₂ 的溶解,加速钙镁离子的浸出;适当增加反应温度可以促进反应进行;粒径越小,反应面积越大,可以提高反应速率。除了上述方法外还包括微波养护制度^[30]、超声波技术^[31] 及 PH SWING^[32] 等加速矿物矿化方法。这些方式虽有利于提升固废材料的固碳性能,但矿化反

应条件严苛,不适用于采空区的常温常压环境,亟需探索在采空区常温常压条件下实现高效、可控矿化固碳的技术路径;同时结合物理充填与化学矿化

双重机制,构建兼具灾害治理与固碳封存功能的一体化固废充填材料体系,可为采空区 CO_2 安全封存和灾害防治提供技术支撑。

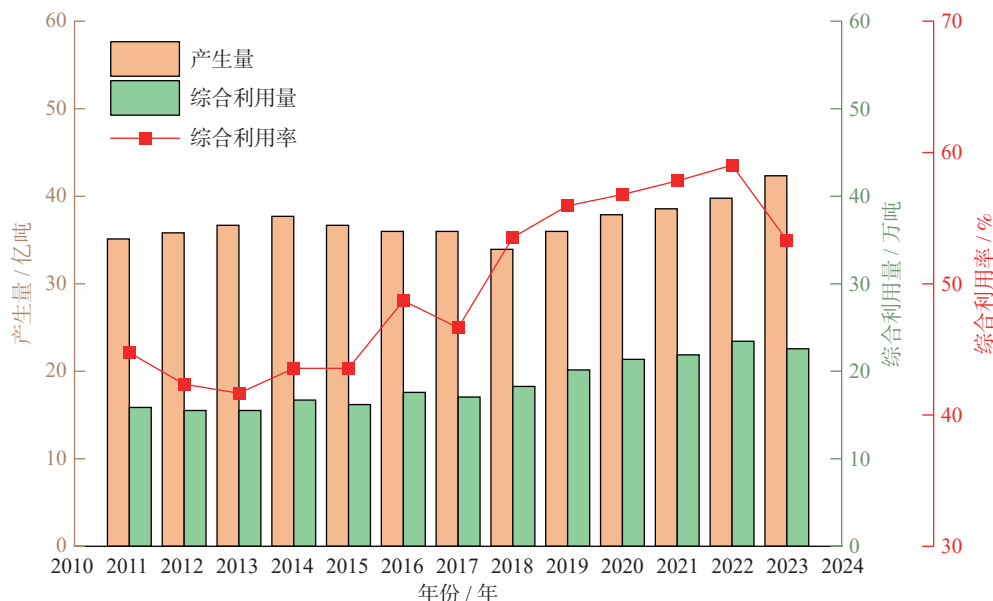


图3 2011~2023年中国大宗工业固废产生及利用量

2 采空区固碳协同煤自燃技术构想

煤炭自燃是煤矿开采领域亟待解决的重大灾害隐患,其危害性不仅体现在对井下作业人员生命安全的严重威胁,更造成大量可采资源因火区封闭而永久损失,并可能诱发次生性瓦斯爆炸等热动力灾害。“双碳”背景下,应针对采空区多灾害耦合特性与治理难点,探索出采空区 CO_2 固碳协同煤自燃灾害防治的思路,以期实现矿井灾害治理与碳封存协同增效,推动矿区向安全、高效与绿色低碳方向转型发展。

2.1 煤自燃防治技术

煤自燃防治的前提是及时识别出煤自燃的隐患或者前兆。在煤自燃灾害识别方面,主要围绕采空区复杂环境下的多源信息获取、数据无线传输与集成以及多参数危险性判别方法等关键技术展开。一方面,通过布设多类型原位传感器(如电化学式、热导式、催化燃烧式)与束管抽采监测系统,结合色谱分离、傅里叶变换红外光谱(FTIR)、非分散红外(NDIR)、可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)等先进检测手段,实现了对 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 O_2 等多组分气体的实时高效采样与成分分析^[33]。另一方面,

基于热电偶阵列^[34]、光纤测温^[35-36]、同位素测氦法^[37-38]和红外探测技术^[39-40],可对采空区残煤氧化放热引发的局部升温异常进行快速捕获与空间定位。同时,结合无线传感网络、多源数据融合及云端智能化分析平台,可对获取的气体、温度、湿度等多维监测数据进行实时传输与动态解析,依托多场耦合数值模拟与机器学习算法,构建危险性辨识与超前预警模型,从而显著提升了采空区煤自燃的监测预判能力与响应处置水平^[41]。

在采空区防灭火技术方面,针对遗煤低温氧化易引发自燃的致灾机理,目前研究与工程实践中普遍采用物理防治与化学防治两大途径^[42]。其中,物理防治主要依托阻隔氧源、降低局部温度或改变煤体传热条件等手段,有效切断煤自燃所必需的供氧条件与持续热源。常见方法包括向采空区或残煤集中区注入浆液^[43]、惰性气体^[44]、胶体^[45]、泡沫^[46]及盐类阻化剂^[47]等,通过填充裂隙、封闭漏风通道及建立局部高浓度惰性气体环境,显著降低氧气渗透与煤氧化放热速率,从而抑制“自热-放热-加速氧化”的正反馈循环,有效延缓或阻断煤自燃过程。化学防治侧重于从煤自燃的分子层面入手,针对煤体内部活性官能团(如羟基、羧基、羰基等)易与氧气发生的链式自由基氧化反应,通过引入抗氧化剂、

离子液体、过硫酸盐等高效化学抑制剂,与煤中活性基团优先发生化学反应,消耗或钝化自由基生成与扩散,破坏自燃所依赖的连续氧化链式机理,有效降低煤氧化活化能,抑制低温放热峰值,延缓自燃临界温度的到达,显著提升煤体的热稳定性^[48-49]。

2.2 采空区固碳协同煤自燃防治

如图4所示,依据现有防控技术体系,围绕“固碳-充填-抑火-评价”全过程,亟需构建集精准火区识别、功能化固碳充填材料开发、CO₂惰化注入及全过程效果评价于一体的多环节耦合防治技术体系。

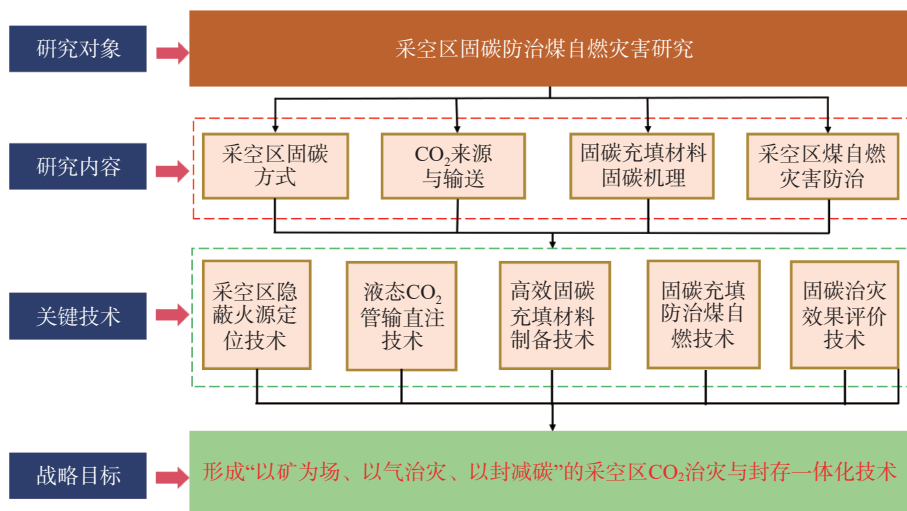


图4 采空区固碳协同煤自燃灾害防治技术路线图

通过基于多源传感、智能化分析的火区精准识别,可实时掌握采空区及残煤的氧化放热状态,实现灾害源头的超前感知与预判;依托固废资源高效利用与多功能改性,开发兼具良好流动性、渗透性及CO₂矿化能力的固碳充填材料,可有效封堵裂隙通道、阻隔氧源供应,并促进CO₂原位封存;CO₂惰化注入不仅可在火区内构建高浓度惰性隔绝带,显著抑制煤自燃氧化过程,还可稀释局部高浓度甲烷,降低爆炸极限及事故风险,实现抑火与抑爆的协同防控。

结合实验观测与多场耦合数值模拟,可对注入过程中的CO₂渗流迁移、吸附解吸与相态转化行为进行定量解析,科学优化注入参数及防控策略。最终,基于物联网和大数据技术的智能化调控平台,构建覆盖全过程的防治效果评价与动态反馈机制,实现多源数据的动态感知、远程集成与风险预警,为煤自燃灾害的全过程智能管控与碳封存高效协同提供有力支撑,形成“精准识别-材料开发-安全注入-效果评价”闭环技术链,为煤自燃安全防控及CO₂地质封存协同应用提供坚实的技术支撑。

1)采空区隐蔽火源定位技术 针对煤矿采空区煤自燃隐蔽火源空间分布不确定、传统探测手段响应滞后及覆盖不足等技术瓶颈,笔者团队结合煤体

自燃多物理场信息释放特性,构建了基于电磁辐射监测-声发射监测-(次)声波探测的多元化隐蔽火源定位成套技术体系^[50-51]。

电磁辐射探测技术^[52]利用煤体在自燃升温及燃烧过程中,内部裂隙扩展、粘结及断裂所释放的电磁波信号,作为识别煤自燃的物理标志。该信号主要源于微裂隙快速扩展时产生的瞬时放电、电荷分离及摩擦带电等物理效应。通过在采空区布设电磁辐射探测器,可实现对高温异常区的非接触式实时探测与空间定位,从而准确识别火源位置。相比传统温度探针,电磁辐射探测具有穿透性强、响应迅速和可远距离布设的优势,尤其适合于密闭或人员难以进入的火区环境。

声发射监测技术^[53]利用煤体在升温及氧化自燃阶段微裂隙启裂、扩展及相互贯通时产生的声发射信号变化,作为自燃过程的物理特征。煤体内声发射信号的强度、频率及事件数随温度升高呈非线性变化,且在关键温度区间(约100~200℃)出现显著突变,反映了裂隙演化和应力集中的过程。通过布设高灵敏度声发射传感器并结合定位算法,可有效反演火源位置及规模,实现动态监测与预警。

较低频率的声波^[54]与次声波^[55]监测技术利用

火源高温区与周围介质温差导致的声速变化,作为识别煤自燃标志信号。通过多点布设声波发射与接收装置,分析传播时延差,实现对火区位置的逆向定位和三维空间解析。同时,火区自燃产生的低频次声波信号结合井下管道传输与滤波技术,有效克服了高温、粉尘及风流干扰,拓展了隐蔽火源远距离在线监测的可行性。相比常规声波,次声波具有更长波长和更强绕射能力,更适合复杂几何空间的多路径传播,提升了火源探测的准确性和安全性。

以上多种物理场探测技术的协同应用,为采空区隐蔽火源的早期发现与精准定位提供了有力技术保障,有助于提高煤矿火灾防控的智能化和科学化水平。

2) 液态 CO_2 管输直注技术 鉴于传统液态 CO_2 地面直输方式存在的管道堵塞风险及汽化后冷量损失与 CO_2 逃逸问题^[56],笔者团队围绕液态 CO_2 在大高差、小管径、远距离输送条件下的传输安全性与相态稳定性,系统开展了温压演化规律及多相转化机制的研究工作^[57-58]。在此基础上,如图 5 所示,作者团队率先提出了束管型液态 CO_2 安全直注防火新方法及其配套成套技术体系^[59],实现了输送过程中对温度异常、压力波动及泄漏风险的快速感知与精准预警。通过实验与现场试验验证,该套束管型液态 CO_2 安全直注系统有效克服了传统单管大流量输送的冷量损失与气体逸散问题,保证了 CO_2 在井下的直接、高效、安全注入,显著提升了 CO_2 注入防火技术在复杂矿井环境下的可行性与适应性,为实现采空区绿色固碳与灾害协同防治提供了可靠的工艺支撑与技术保障。

同时,针对液态 CO_2 从地面输送至井下过程易

发生液-气-固三相相变、堵管及输送不稳定等工程难题,笔者团队创新性提出了“小管径-多管路-恒温压”耦合的束管式 CO_2 输送方案,运用 ASPEN HYSYS 过程模拟软件建立液态 CO_2 管束型直注输送模型,阐明了多管并联条件下输送管径、入口温压及巷道环境温度等关键参数对 CO_2 沿程传输的耦合影响机制,揭示了不同流量及管径下液态 CO_2 沿程温度、压力、持液率等参数的非线性变化规律,明确了系统稳定输送所需的入口工况与沿程安全控制边界^[60]。

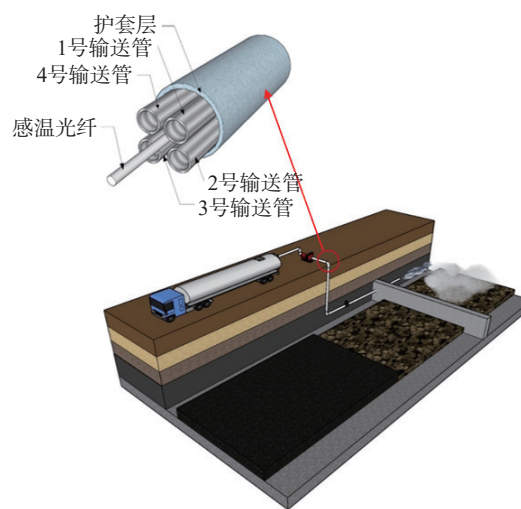


图 5 束管型液态 CO_2 安全直注系统

3) 高效固碳材料制备技术 固碳材料充入采空区后, CO_2 与材料表面的活性位点(如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等)发生接触反应,生成致密的碳酸盐层,初步固碳的同时,对煤体起到了隔氧降温的作用,但该碳酸盐层同时阻碍了 CO_2 向材料内部的进一步传输与深度矿化,从而降低了整体的固碳转化率,如图 6 所

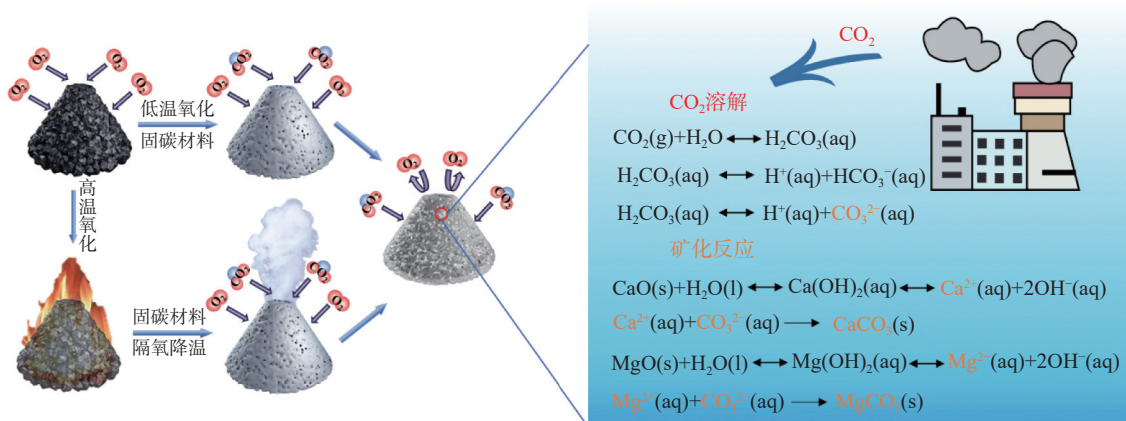


图 6 固碳材料防火及矿化机理

示。因此, 如何有效提升固碳充填材料的矿化活性(如提高 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及引入有机胺等活性组分)并增强材料的内部矿化深度(如优化孔隙结构和孔隙率), 已成为提高固碳效率的关键技术路径之一。

针对上述问题, 笔者团队受自然界“蜂巢”多孔结构的启发, 以固废电石渣、粉煤灰为原料, 利用物理共混的方法, 研发了适用不同矿井火灾类型的仿生多孔固碳注浆充填材料^[61]、多孔固碳凝胶^[62-63]、多孔堵漏固碳颗粒^[64]、多孔固碳凝胶泡沫^[65]等, 如图 7 所示。通过调控多孔网络的孔径分布与连通

性, 显著增加了 CO_2 与材料内部活性位点的接触面积与传质速率, 有效克服了表层碳酸盐层阻隔效应。同时, 明确了多孔固碳材料的可控制备工艺及井下充填工艺参数, 揭示了其在矿化过程中的孔隙演化行为、碳酸盐生成及迁移机理, 阐明了其对采空区火源隔绝、氧气稀释等防灾功能的协同作用机制。相关研究表明, 该系列仿生多孔固碳充填材料在采空区常温常压条件下表现出优异的 CO_2 矿化固封能力, 为实现采空区源头减排与安全治理提供了可行的材料技术支撑。

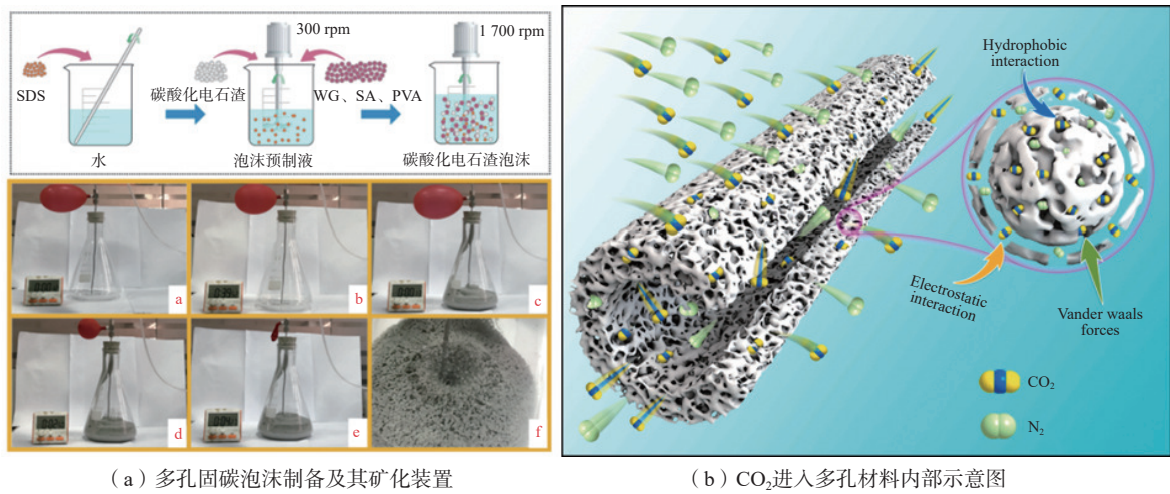


图 7 部分多孔固碳充填材料及矿化机理

4) 固碳充填防治煤自燃技术 固碳充填材料主要以无机固废(如电石渣、粉煤灰、矿渣等)作为原料, 通过制备成浆体、凝胶或泡沫等多种形态, 注入采空区内部, 用以实现对煤矿火源的综合防控, 固碳充填防治煤自燃技术机理如表 1 所示。

表 1 固碳充填防治煤自燃技术机理		
机理类别	具体作用描述	防治效果
物理作用	封堵采空区裂隙及孔隙	切断漏风通道
化学作用	生成致密稳定的碳酸盐矿物层	增强隔氧效果
CO_2 作用	降低氧气浓度及环境温度	窒息抑火、降温阻燃
协同效应	物化充填与 CO_2 惰化联合作用	提高采空区防灭火的可靠性与持久性

在物理作用层面, 充填材料可有效封堵采空区内的裂隙及孔隙, 切断漏风通道, 从而显著降低氧

气向残煤或浮煤区域的输送效率, 削弱煤体持续氧化和自燃的发生条件。在化学作用层面, 材料中富含的碱性活性组分(如 CaO 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 MgO 等)可与 CO_2 或火区热解产物发生反应, 生成致密且稳定的碳酸盐矿物层, 进一步阻隔氧气与残煤的接触, 增强隔氧效果。

此外, 通过向采空区定向注入液态 CO_2 , 可快速在局部形成富 CO_2 环境, 有效稀释并置换可燃区域内的氧气, 促使氧浓度降至煤自燃所需的临界限值, 从而达到窒息抑制火源的目的。液态 CO_2 在注入过程中的相变及气化吸热效应, 亦可显著吸收周围环境热量, 降低煤体及邻近岩层温度, 破坏自燃所需的热积累条件。物理充填与 CO_2 惰化的联合作用形成了多机理叠加的协同效应, 有效提升了采空区防灭火的整体可靠性与长效性。

5) 固碳治灾效果评价技术 为科学量化固碳充填在采空区防治煤自燃治理效果, 需建立一套系统

化的多维度效果评价技术体系,涵盖固碳充填材料的物理封堵性能、氧气隔绝及惰化效应、温控抑火能力、 CO_2 矿化固存程度以及封堵结构的长期稳定性等关键要素。

物理封堵性能评价:通过固碳充填材料有效填充和封堵采空区裂隙与孔隙,可显著降低漏风通道渗透性,阻断氧气与煤体的接触。评价可综合运用地质雷达探测、示踪气体跟踪及钻孔取样等手段,并结合三维几何建模,量化充填率、裂隙充填度及封堵体的连续性。

氧气隔绝与惰化效应评价:充填过程中注入的液态 CO_2 气化后形成富 CO_2 环境,对火区及邻近瓦斯富集区进行氧气稀释与置换,使局部氧浓度降至煤自燃临界值以下。需结合采空区气体成分的实时在线监测,对比充填前后 O_2 、 CO_2 等关键组分的动态变化,以验证惰化效能。

温控抑火能力评价:液态 CO_2 的相变吸热效应与充填材料水化热的耦合作用,可有效降低火区温度,抑制热积累及链式燃烧过程。评价需结合埋设式热电偶、红外热成像及温度场数值模拟等手段,对比分析火区温度场分布特征及降温速率。

CO_2 矿化固存程度评价:充填材料中富含的 CaO 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等碱性活性组分可与 CO_2 反应生成稳定的碳酸盐矿物。通过钻孔采样、X 射线衍射 (XRD)、X 射线荧光光谱 (XRF) 及热重分析 (TG)

等方法,测定矿化转化率及碳酸盐生成量,以评估固碳封存的长期有效性。

长期稳定性评价:为确保固碳充填体的长期安全可靠,需动态跟踪与评价其力学性能、渗透性及 CO_2 潜在二次渗漏风险。可通过定期岩芯取样、封堵体强度试验及渗漏气流监测等手段,建立多参数时间序列数据库,为后续补充注浆或局部修复提供决策依据。

3 开孔矿化加速效果验证性试验

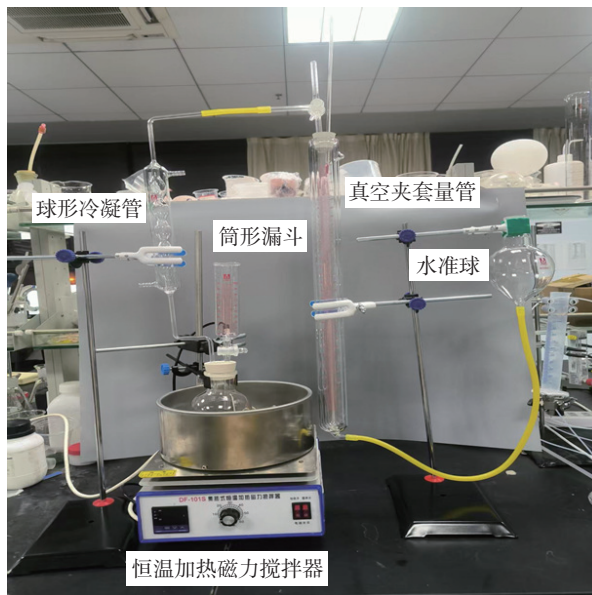
3.1 开孔矿化加速试验装置

1) 自制矿化装置 如图 8(a) 所示,采用的矿化装置是将托盘放入密封袋(矿化袋)中自制而成。操作步骤如下:将经过养护的试件置于矿化袋内,通入 CO_2 气体至一定高度,保证袋子充盈。初始阶段,试件矿化较快可能导致袋子收缩,需持续补充充气,间隔取决于反应速率和试件数量。随着反应进程,速率减缓,充气间隔相应延长。

2) 化学分析装置 自制碳酸盐化学分析装置如图 8(b) 所示,通过滴定研磨后的矿化粉末,利用过量的稀盐酸与碳酸盐发生反应,释放 CO_2 气体。通过量气管的液面变化来计量 CO_2 气体体积,进而计算矿化后粉末中碳酸盐含量,以 CaCO_3 的质量分数 w 表示,公式如下



(a) 自制矿化装置



(b) 化学分析装置

图 8 部分用到的试剂、仪器

$$w = \frac{PVM}{RTm} \times 10^{-2} \quad (1)$$

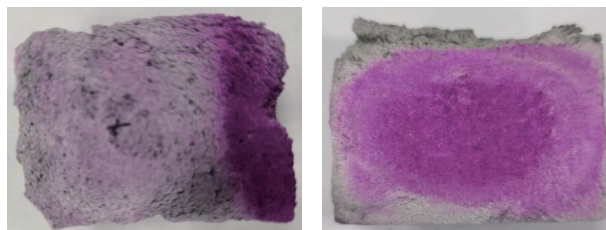
式中, P 为自然环境中的大气压力, kPa; V 为释放出的 CO_2 体积, mL; R 为气体常数; T 为装置内部温度, K; M 为 CaCO_3 摩尔质量; m 为矿化后粉末质量, g。

3) 开孔矿化加速试验方法 先将发泡(加过氧化氢)和未发泡浆液分别注入硅胶模具, 置于矿化袋托盘内进行二次矿化, 之后对试件劈开喷涂酚酞, 测量显色分界线预测矿化深度并确定切片厚度, 从外到内依次切片、编号、真空烘干、研磨过筛 ($\leq 0.16\text{mm}$), 保持隔绝空气防止再矿化; 最后取各层粉末 ($0.50 \pm 0.01\text{g}$), 用稀盐酸滴定测碳酸盐含量, 按深度绘制矿化曲线并分析。

3.2 开孔矿化加速效应分析

图9显示了开孔与未开孔注浆材料在二次矿化8h后的切片扩散情况。由图11可知, 开孔材料在切开至2.3cm深度时, 酚酞试剂喷洒后切面仅呈弱显色反应, 表明该深度材料呈弱碱性, 即 CO_2 矿化反应可扩散至材料内部约2.3cm; 而未开孔材

料切面显色深度约为1.2cm, 说明 CO_2 仅渗透至1.2cm, 矿化反应深度明显低于开孔材料。由此可见, 开孔处理有利于 CO_2 扩散, 从而加速材料的矿化反应。

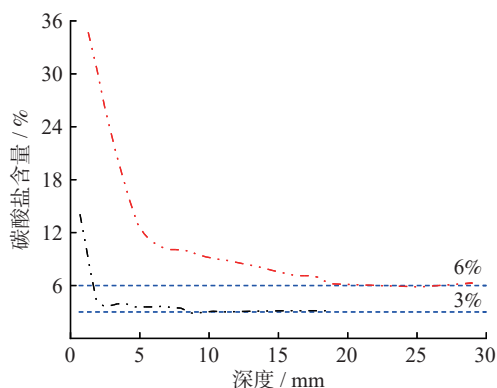


(a) 开孔-2.3 cm

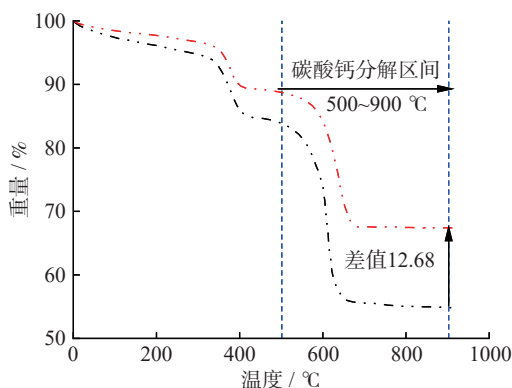
(b) 未开孔-1.2 cm

图9 开孔未开孔扩散对比

由图10可知, 开孔结构的矿化材料与未开孔的相比, 相同深度的碳酸钙的含量增大, 即其矿化程度逐渐增大, 说明开孔材料构成大量的连通孔, 有利于 CO_2 的扩散, 从而加速了可矿化成分的矿化过程。通过开孔、未开孔矿化后的热重对比也可知, 开孔后, 材料的整体矿化率提升了大约39%。随着矿化反应的进行, 气体扩散将成为制约矿化速率的关键步骤, 矿化提升率将会实现更大幅度提升。



(a) 不同深度的碳酸盐含量



(b) 热重

--- 开孔 --- 未开孔

图10 开孔、未开孔矿化效果对比

相较于不开孔的矿化注浆材料, 开孔材料实现了物理封存与化学矿化的协同并行与相互强化, 显著提升了封存效率和效果, 如图11所示。开孔矿化注浆材料在注入采空区并经历初步硬化后, 其内部独特的开孔结构(如连通孔隙、微通道)即成为容纳后续注入 CO_2 气体的物理空间。此阶段主要依赖材料的物理特性对 CO_2 进行初步捕获和封存。与此同时, 这些开孔结构提供了巨大的反应界面, 使得注入的 CO_2 气体能够直接、充分地接触并渗透

到材料内部暴露的活性成分(如未反应的 CaO 、 MgO 或水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等)。在孔隙水(H_2O)存在的环境下, CO_2 溶解形成碳酸(H_2CO_3), 进而解离出 H^+ 和 $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ 离子。这些离子与材料溶解释放的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子发生深度矿化反应, 生成稳定的碳酸盐矿物(如方解石 CaCO_3 、菱镁矿 MgCO_3 等), 实现 CO_2 的永久化学固存。

开孔结构的核心优势在于其高效的传输通道作用。它允许后续注入的 CO_2 快速、深入地扩散渗

透至注浆体内部,甚至穿透到包裹的破碎矸石间隙中,极大地增加了 CO_2 与矿化注浆材料中活性组分的接触面积和反应机会。这不仅显著加速了矿化反应速率,也使得矿化反应在材料内部得以更充分、更均匀地发生。

物理封存为化学矿化提供了充足的反应物(CO_2)和反应场所(孔隙空间),保障了矿化反应的

持续进行;而深度发生的化学矿化反应,一方面消耗了封存的 CO_2 ,降低了孔隙压力和气相渗透性;另一方面,生成的碳酸盐矿物会填充、密实开孔结构本身及其与矸石接触的界面。这种矿化产物的原位生长,不仅强化了物理封存的长期密封性,还作为“胶结剂”显著提升了矿化注浆材料整体的力学强度和结构完整性,形成一种自我强化的良性循环。

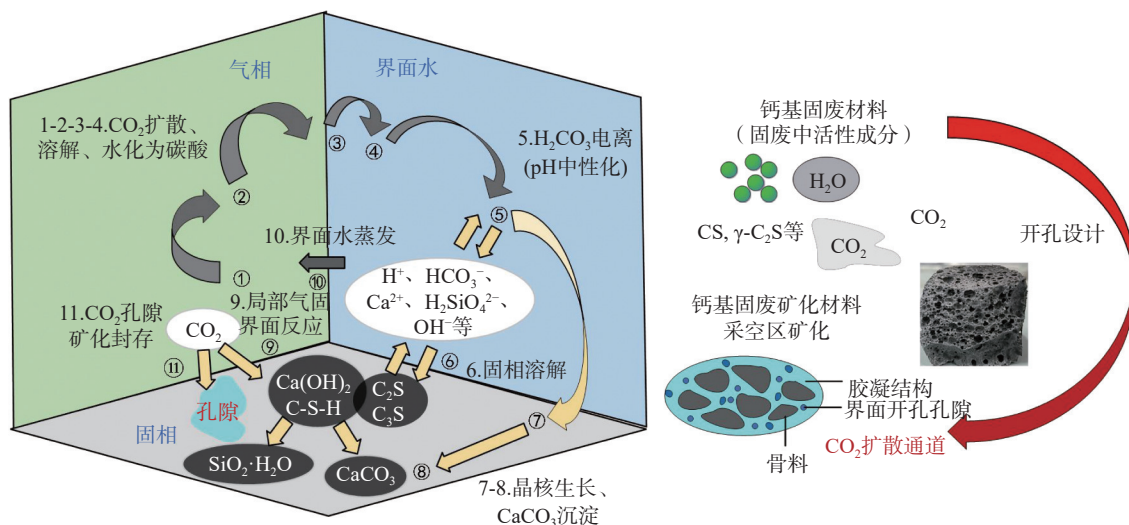


图 11 开孔结构加速矿化示意图

因此,开孔矿化注浆材料通过其内在的多孔结构设计,巧妙地耦合了物理封存的安全缓冲与化学矿化的永久固定,并通过两者的动态协同与相互促进,最终实现了对 CO_2 更高效、更稳固且具有自增强能力的矿化封存效果。

4 固碳注浆防灭火效果验证性试验

4.1 试样制备及试验方法

按《煤层煤样采取方法》(GB/T 482—2008)与《煤样制备标准》(GB/T 474—2008),采集井下煤块,经破碎、筛分(60~100目),50℃真空干燥24h,真空密封保存,制备样品如图12所示。注浆材料制备后分别通氮气或 CO_2 搅拌3h,取3份20±1g原煤,分别与10g固碳前(氮气)和固碳后(CO_2)材料混合,混合后50℃真空干燥24h,干燥后真空密封保存。

本研究采用煤自燃特性综合测试系统对原煤、固碳前和固碳后固碳注浆材料处理的煤样进行隔

氧阻化性能定量评价。如图13所示,该集成化测试平台由气源供给单元、煤氧反应监测单元和气体分析单元三大子系统构成。



图 12 固碳注浆材料处理煤样

具体的测试步骤如下:首先,将制备的单个煤样全部放入煤样罐中,向设备中通氮气流(150mL/min),目的是去除设备中的其他气体;然后,将氮气流更改为干燥空气流,流速设为100mL/min,初始温度设定为30℃,升温速率为1℃/min;最后,升温系统的温度检测装置会自动记录煤温、炉温以及罐温和炉温随温升的变化情况。

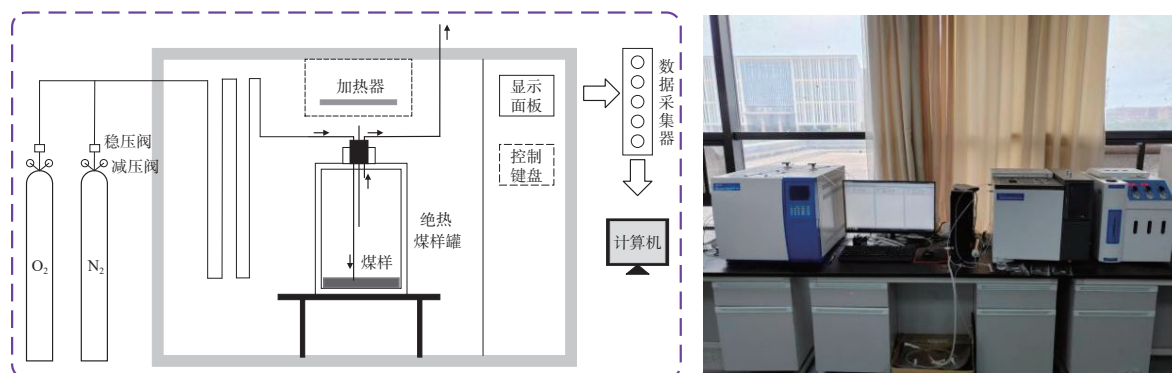


图13 煤自燃特性综合测试系统示意图和实物图

4.2 隔氧阻化特性研究

1)交叉点温度分析 图14展示了原煤、固碳前及固碳后固碳注浆材料处理煤样在实验过程中罐温与炉温随时间变化的曲线。从图14可以看出,煤样自初始的30℃开始升温,在实验初期,煤样罐温均低于控温箱设定温度,且原煤、固碳前和固碳后处理煤样的罐温与炉温变化趋势基本一致,说明在较低温度阶段,固碳注浆材料对煤样氧化过程的影响相对有限。随着实验的持续进行,在控温箱恒温加热及煤氧化放热的双重作用下,煤样温度持续上升并最终超过控温箱设定值。实验结果表明,原煤、固碳前及固碳后处理煤样的交叉点温度(CPT)分别为124.6℃、144.2℃和144.6℃,相比原煤,固碳前和固碳后处理煤样的交叉点温度分别提高了19.6℃和20℃,这充分表明固碳注浆材料在固碳处理前后均能有效提升煤样的隔氧性与抑制自燃能力。

上述现象的产生主要归因于以下两个方面:一方面,固碳前与固碳后的注浆材料均含有碱性组分,这些碱性物质可与煤分子中的活性官能团(如甲基、亚甲基等)发生络合作用,减少煤中易氧化基团(如羰基、羧基、甲基、亚甲基)的数量,从而在分子层面削弱煤的氧化活性,发挥化学阻化作用。同时,碱性盐类材料本身具有较强的吸水性和保水性,当煤体温度升高时,材料中所含的自由水分优先蒸发并吸收热量,有效延缓煤体升温速率,起到物理降温作用。另一方面,固碳后的注浆材料在固碳过程中对CO₂具有一定的物理吸附能力,当煤样受热时,吸附的CO₂会逐步释放,降低煤体周围环境中的氧气浓度,从而抑制煤氧化反应的发生。此外,材料

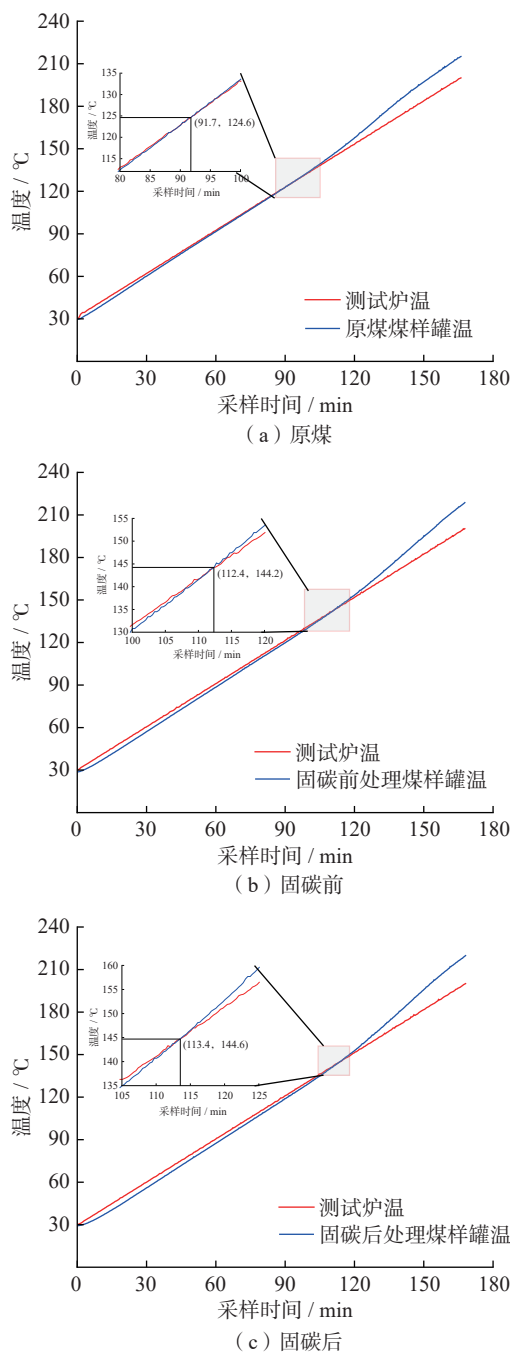


图14 煤样罐温与炉温随着时间的变化曲线

碳化后生成的 CaCO_3 能在煤体表面形成一层致密的碳酸盐覆盖层,进一步起到物理隔氧、阻断氧气渗透的作用,协同增强对煤自燃过程的防控效果。

2) CO 和 CO_2 浓度分析 图 15(a) 显示了煤样罐出气口 CO 浓度随温度变化的趋势。从图 15(a) 可以看出,当温度低于 75°C 时,原煤、固碳前处理及固碳后处理煤样均未检测到 CO 生成;当温度升至 $75 \sim 200^\circ\text{C}$ 时,随温度升高,各煤样 CO 浓度显著上升,且其数值关系依次为:原煤样>固碳前处理煤样>固碳后处理煤样。这表明,固碳注浆材料在固碳处理前后均对煤氧化过程具有明显的抑制作用。

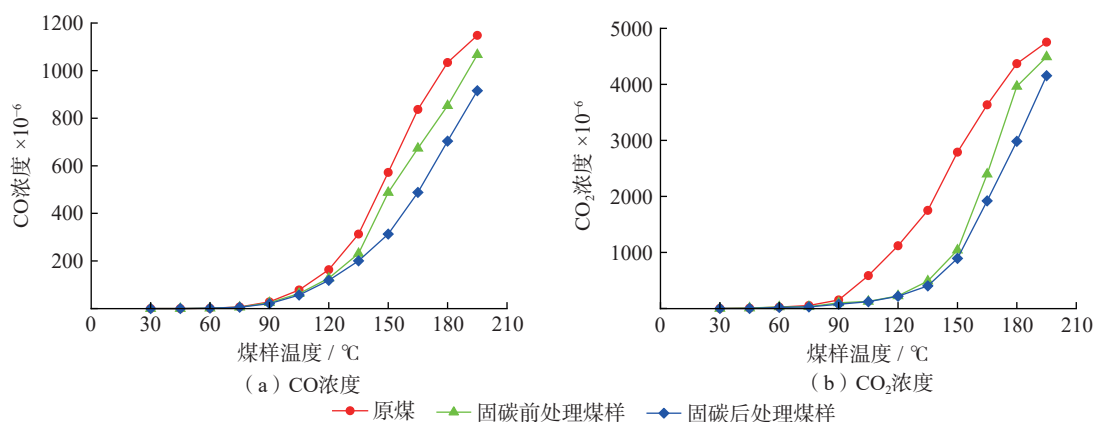


图 15 煤样罐出气口 CO 、 CO_2 浓度随温度的变化曲线

图 15(b) 展示了煤样罐出气口 CO_2 浓度随温度变化的规律。在 $30 \sim 75^\circ\text{C}$ 阶段,随着温度升高,各煤样 CO_2 浓度均呈缓慢增长趋势;而在 $75 \sim 200^\circ\text{C}$ 区间, CO_2 浓度随温度显著上升。与原煤相比,固碳前及固碳后处理煤样的 CO_2 浓度均明显偏低,进一步验证了固碳注浆材料对煤氧化的抑制效果。其抑制机理主要体现在材料良好的保水性,可在煤体表面形成保水层,通过自由水的蒸发吸热降低煤体表面温度,减缓煤氧化反应速率。在 $120 \sim 200^\circ\text{C}$ 阶段,相较固碳前处理煤样,固碳后处理煤样产生的 CO_2 浓度更低,表明其表面生成的 CaCO_3 覆盖层在高温下有效阻隔了氧气渗透,进一步强化了对煤氧化的抑制作用。

5 结论与展望

本研究针对“双碳”背景下煤炭行业绿色低碳转型需求,系统开展了采空区固碳充填协同煤自燃

在不同升温阶段,固碳注浆材料的抑制机理有所差异:当温度处于 $75 \sim 90^\circ\text{C}$ 区间时,抑制作用主要来源于材料中自由水的蒸发吸热效应,此阶段各煤样 CO 浓度差异较小。随着温度超过 90°C ,煤体与注浆材料中的自由水趋于蒸发殆尽,材料在煤体表面形成的物理隔氧阻化层开始发挥主导作用,同时其中所含碱性组分可进一步削减煤分子中活性基团数量,有效减缓氧化反应速率。随着温度继续升高,固碳处理煤样与原煤样之间的 CO 浓度差距逐渐扩大,且固碳后处理煤样抑制效果更优,进一步证明了固碳后注浆材料的隔氧阻化性能更为显著。

防治技术研究,取得如下主要成果:构建了“固废协同利用- CO_2 矿化封存-灾害源精准干预”的一体化技术体系,实现了物理封存与化学封存的协同机理;通过多元监测技术结合束管型液态 CO_2 直注系统,实现了隐蔽火源的高精度识别及全流程防控;研发了仿生多孔注浆材料及矿化加速技术,开孔结构显著增强 CO_2 扩散深度和矿化率,形成物理隔氧与化学阻化的双重作用;实验验证表明,固碳充填可有效抑制煤自燃,交叉点温度提升约 20°C , CO 与 CO_2 生成浓度显著降低,尤其在 $120 \sim 200^\circ\text{C}$ 区间, CaCO_3 覆盖层与 CO_2 惰化作用的阻化效果最为显著。

未来研究可进一步优化注浆材料孔隙结构、颗粒粒径及配比,深入揭示 CO_2 矿化过程与煤自燃演化的耦合机理,并结合数值模拟与现场验证,建立更加完善的采空区固碳-灾害防控协同技术体系,以实现煤矿绿色低碳开采与安全生产的长期稳定运行,为相关工程应用提供理论支撑和技术示范。

参考文献:

- [1] 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): 1 487-1 503.
- [2] 任世华,谢亚辰,焦小森,等. 煤炭开发过程碳排放特征及碳中和发展的技术途径[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 60-68.
- [3] 袁亮. 废弃矿井资源综合开发利用助力实现“碳达峰、碳中和”目标[J]. 科技导报, 2021, 39(13): 1.
- [4] 王双明,申艳军,孙强,等. “双碳”目标下煤炭开采扰动空间 CO₂ 地下封存途径与技术难题探索[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 45-60.
- [5] 刘浪,王双明,朱梦博,等. 基于功能性充填的 CO₂ 储库构筑与封存方法探索[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1 072-1 086.
- [6] 卞正富,伍小杰,周跃进,等. 煤炭零碳开采技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2 613-2 625.
- [7] 奚弦,桑树勋,刘世奇. 煤矿区固废矿化固定封存 CO₂ 与减污降碳协同处置利用的研究进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(8): 3 619-3 634.
- [8] HASZELDINE R S. Carbon capture and storage: how green can black be?[J]. Science, 2009, 325(5 948): 1 647-1 652.
- [9] BOOT-HANDFORD M E, ABANADES J C, ANTHONY E J, et al. Carbon capture and storage update[J]. Energy & Environmental Science, 2014, 7(1): 130-189.
- [10] ALHARTHY N, TEKLU T, KAZEMI H, et al. Enhanced oil recovery in liquid-rich shale reservoirs: Laboratory to field[J]. Spe Reservoir Evaluation & Engineering, 2018, 21(1): 137-159.
- [11] BAUBLYS K A, HAMILTON S K, GOLDING S D, et al. Microbial controls on the origin and evolution of coal seam gases and production waters of the walloon subgroup; surat basin, Australia[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 147: 85-104.
- [12] RANAEE E, KHATTER R, INZOLI F, et al. Assessment and uncertainty quantification of onshore geological CO₂ storage capacity in China[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2022, 121: 103804.
- [13] 王双明,申艳军,宋世杰,等. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2 599-2 612.
- [14] 王伟彬,刘淑琴,戚川,等. 基于深部煤炭地下气化的 CO₂ 地质封存潜力及研究进展[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(4): 14-23.
- [15] 张鑫刚,何庆成,黄文韬,等. 全球 CO₂ 地质封存类型、案例与启示[J/OL]. 中国地质, [2025-09-16]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1167.p.20250303.1537.002>.
- [16] 马立强,翟江涛, NGO ICHHUY. CO₂ 矿化煤基固废制备保水开采负碳充填材料试验研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4 288-4 236.
- [17] 史全林,秦波涛,孙永江. 超声处理辅助粉煤灰浸出钙离子矿化 CO₂ 及其产物防灭火特性[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1 034-1 046.
- [18] 朱磊,古文哲,宋天奇,等. 煤基固废矿化封存 CO₂ 技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 309-328.
- [19] 朱玲玲,朱伟,贾庆,等. 浅谈“双碳”背景下的二氧化碳捕集利用与封存[J]. 中国水泥, 2022(6): 17-20.
- [20] 陆诗建,张娟娟,杨菲,等. CO₂ 管道输送技术进展与未来发展浅析[J]. 南京大学学报(自然科学), 2022, 58(6): 944-952.
- [21] 张对红,李玉星. 中国超临界 CO₂ 管道输送技术进展及展望[J]. 油气储运, 2024, 43(5): 481-491.
- [22] 黄辉,周晶,栗科华. CO₂ 输送管道工程设计标准的探讨[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 131-134.
- [23] 邓军,习红军,翟小伟,等. 煤矿采空区液态 CO₂ 灌注防灭火关键参数研究[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(5): 605-609.
- [24] 赵美成. 大流量气态 CO₂ 防灭火技术在采空区自燃火灾治理中的应用[J]. 煤矿安全, 2021, 52(3): 122-126.
- [25] 姚宏章,刘贵成,董旗,等. 液态 CO₂ 惰性灭火装置的研制与应用[J]. 中州煤炭, 2010(3): 17-18.
- [26] UKWATTAGE N L, RANJITH P G, WANG S H. Investigation of the potential of coal combustion fly ash for mineral sequestration of CO₂ by accelerated carbonation[J]. Energy (Oxford), 2013, 52: 230-236.
- [27] LIBRANDI P, NIELSEN P, COSTA G, et al. Mechanical and environmental properties of carbonated steel slag compacts as a function of mineralogy and CO₂ uptake[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2019, 33: 201-214.
- [28] AZADI M, E DRA KI M, FARHANG F, et al. Opportunities for mineral carbonation in Australia's mining industry[J]. Sustainability, 2019, 11(5): 1250.
- [29] CHANG E E, PAN S, CHEN Y, et al. CO₂ sequestration by carbonation of steelmaking slags in an autoclave reactor[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 195: 107-114.
- [30] 陈亿琴,瞿昌毓,彭昭霞,等. 煤矸石微波辅助合成沸

- 石分子筛的研究[J]. 煤化工, 2019, 47(1): 56-60.
- [31] 南相莉, 李风华, 胡恩柱. 基于超声波机械搅拌耦合作用下赤泥对二氧化碳的固化封存[J]. 环境工程学报, 2018, 12(10): 2 973-2 979.
- [32] AZDARPOUR A, ASADULLAH M, MOHAMMADIAN E, et al. A review on carbon dioxide mineral carbonation through pH-swing process[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 279: 615-630.
- [33] 梁运涛, 田富超, 冯文彬, 等. 我国煤矿气体检测技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1 701-1 714.
- [34] 申文斌, 王毅. 屯兰矿工作面采空区自然发火规律研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(9): 251-252.
- [35] GUO J, WEN H, ZHENG X, et al. A method for evaluating the spontaneous combustion of coal by monitoring various gases[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 126: 223-231.
- [36] 文虎, 吴慷, 马砺, 等. 分布式光纤测温系统在采空区煤自燃监测中的应用[J]. 煤矿安全, 2014, 45(5): 100-102.
- [37] WEN H, CHENG X, FAN S, et al. A method for detecting hidden fire source in deep mine goafs based on radon measurement and its experimental verification[J]. *Applied Geochemistry*, 2020, 117: 104603.
- [38] 林晨, 王俊峰, 董凯丽, 等. 固态长寿命氦子体 ^{210}Po 在采空区煤自燃火源位置探测中的应用研究[J]. 太原理工大学学报, 2023, 54(1): 73-80.
- [39] DU B, LIANG Y, TIAN F. Detecting concealed fire sources in coalfield fires: An application study[J]. *Fire Safety Journal*, 2021, 121: 103298.
- [40] 文虎, 马民, 费金彪. 基于红外成像技术的煤矿火灾治理[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(1): 28-30.
- [41] 范京道, 黄克军, 李川, 等. 我国煤矿智能化技术十年发展与实践[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(7): 1-24.
- [42] 余明高, 王亮, 李海涛, 等. 我国煤矿防灭火材料的研究现状及发展趋势[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(4): 22-36.
- [43] 王立杰, 王继仁, 张勋, 等. 采空区高位钻孔注浆防灭火浆液扩散特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(10): 71-77.
- [44] 陈晓坤, 汤旭, 李鹏兵, 等. 基于分级预警智能联动式采空区注氮防灭火技术及应用[J]. 西安科技大学学报, 2025, 45(3): 439-449.
- [45] 史全林, 杨红旗, 李洪彪. 成膜型胶体泡沫的制备及灭火降温特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(10): 121-126.
- [46] 马砺, 杜素, 张照允, 等. 采空区大掺量粉煤灰无机固化泡沫制备及特性研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 243-251.
- [47] 张勋, 邓存宝, 王雪峰, 等. 煤自燃阻化剂浓度优选及高效喷洒系统应用[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(11): 72-76.
- [48] 李增华, 苗国栋. 煤自燃大分子量气态产物生成规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6): 1 119-1 128.
- [49] 王福生, 孙玮, 张渝, 等. 过渡金属离子促进煤自燃机理的量子化学计算[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2 347-2 359.
- [50] 孔彪, 陆伟, 程卫民, 等. 用于煤矿井下的采空区高温火区位置声波探测方法及系统: 中国, CN201910889722.X[P]. 2021-03-19.
- [51] 陆伟, 孔彪, 程卫民, 等. 基于次声波信息传输的煤矿采空区火区探测系统及方法: 中国, CN201910889728.7[P]. 2021-02-09.
- [52] KONG B, WANG E, LU W. Application of electromagnetic radiation detection in high temperature anomalous areas experiencing coalfield fires[J]. *Energy*, 2019, 189: 116144.
- [53] 孔彪, 钟建辉, 陆伟, 等. 煤升温过程中声发射信号变化及产生机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 84-91.
- [54] 孔彪, 钟建辉, 陆伟, 等. 煤自燃过程中声波效应及前兆特征研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(2): 211-221.
- [55] 孔彪, 郑永超, 冯新, 等. 基于支持向量机的煤自燃声学预警方法研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2025, 65(4): 769-776.
- [56] 吴虎, 陆伟, 李金亮, 等. 液态 CO_2 防灭火管路输送特性影响分析[J]. 煤矿安全, 2022, 53(9): 157-161.
- [57] 亓冠圣, 陆伟, 程卫民, 等. 用于井下防灭火/降温的液态 CO_2 实时制备系统和使用方法: 中国, CN201810505273.X[P]. 2020-05-15.
- [58] 陆伟, 亓冠圣, 程卫民, 等. 一种矿用液态 CO_2 地面直注系统与方法: 中国, CN201810505189.8[P]. 2019-11-22.
- [59] 陆伟, 亓冠圣, 胡浩, 等. 全程在线实时监测的束管型多管管输液态 CO_2 系统与方法: 中国, CN201910219599.0[P]. 2023-08-18.
- [60] LU W, HU H, QI G. Effect of pipe diameter and inlet parameters on liquid CO_2 flow in transportation by pipeline with large height difference[J]. *Processes*,

- 2019, 7(10): 756.
- [61] 周勇强. 面向采空区的矿化充填材料制备及性能研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
- [62] 陆伟, 吴明跃, 吕茂云, 等. 基于电石渣—三乙烯四胺的多孔凝胶矿化固碳研究 [J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(4): 87–94.
- [63] ZHANG Q, LU W, WU M Y, et al. Preparation and properties of self-assembled gels based on electrostatic interactions: Applications for N_2 / CO_2 adsorption and inhibition[J]. *Fuel*, 2021, 302: 121053.
- [64] WU L, QI G, LU W, et al. Study on preparation and performance of calcium carbide slag foam for coal mine disaster reduction and CO_2 storage[J]. *Colloids and Surfaces A-physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, 606: 125322.
- [65] ZHANG Q, LU W, WU M Y, et al. Application of amine-modified porous materials for CO_2 adsorption in mine confined spaces[J]. *Colloids and Surfaces A-physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 629: 127483.
- (责任编辑: 丁 寒)

欢迎订阅《安徽理工大学学报(自然科学版)》, 欢迎投稿

《安徽理工大学学报(自然科学版)》编辑部

《安徽理工大学学报(自然科学版)》1981年创刊, 双月刊, 每期定价 5.00 元, 全年定价 30.00 元。《安徽理工大学学报(自然科学版)》为安徽理工大学主办的综合性学术刊物, 主要刊载地质工程、环境工程、测绘工程、采矿工程、安全工程、信息管理与信息系统、土木工程、建筑学、机械工程、测控技术与仪器、自动化、电子信息工程、计算机科学与技术、矿物加工工程、化学工程与工艺、弹药工程与爆炸技术、制药工程、信息与计算科学、应用物理学、医学以及相关基础学科的学术论文和最新研究成果等。

本刊国内外公开发刊, 侧重体现本校特色, 面向国内外组稿。本刊是《CAJ — CD 规范》执行优秀期刊, 美国《化学文摘》(CA) 源期刊, 美国《剑桥科学文摘》(CSA) 源期刊, 俄罗斯《文摘杂志》(VINITI) 源期刊, 《中国科技论文统计》源期刊, 《中文科技期刊数据库》源期刊, 《中国学术期刊综合评价数据库》源期刊, 此外, 本刊还是《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》全文收录期刊和《万方数据——数字化期刊群》上网期刊。另外, 本刊和全国各高校学报、科研院所出版的刊物均有学术交流, 凡被本刊发表的研究成果及论文, 能很快地传播并及时为国内外同行专家引用。

本刊参加全国非邮发报刊联合征订, 请读者向天津市大寺泉集北里别墅 17 号 (邮编 300385) 天津市河西联合征订服务部直接汇款订阅, 不必先索取订单, 由本刊负责将刊物寄给订户。也可直接向本刊订阅, 由邮局汇款到安徽省淮南市安徽理工大学学术出版中心。

邮政编码: 232001

电 话: 0554—6668044

E-mail: xbzrb@ aust.edu.cn