



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

多气体组分环境下原位保压煤样瓦斯压力衰减特性及演化规律

高明忠 季冰 李永程 宋杰 谢晶 郝海春 王智鹏

引用本文:

高明忠, 季冰, 李永程, 等. 多气体组分环境下原位保压煤样瓦斯压力衰减特性及演化规律[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 87–101.

GAO Mingzhong, JI Bing, LI Yongcheng. Gas pressure attenuation characteristics and evolution law of in-situ pressure preservation coal samples under multi-gas component environment[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 87–101.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0499>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

覆压注水作用下含瓦斯煤解吸特性试验研究

Experimental study on desorption characteristics of gas-containing coal under the action of overburden pressure and water injection
煤炭科学技术. 2023, 51(9): 112–120 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1187>

基于水力割缝卸压的煤岩与瓦斯动力灾害防控技术

Prevention and control technology of coal-rock and gas dynamic disaster based on water jet slotting pressure relief
煤炭科学技术. 2021, 49(4): 133–141 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.016>

深部煤层原位保压保瓦斯取心技术装备及初步应用

Technology and application of in-situ pressure and gas maintaining coring for deep coal seam
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 143–154 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0156>

深部煤层不同类型隐伏构造致灾规律研究

Study on disaster-causing law of different types of hidden structures in deep coal seam
煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 50–59 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2239>

瓦斯抽采中煤层参数动态响应及其应用

Dynamic response of coal seam parameters during gas drainage and its application
煤炭科学技术. 2021, 49(5): 127–134 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7e9a602d-7a84-4336-b1d1-9ce6d48891dd>

高温高压条件下含瓦斯煤解吸自燃演化特性研究

Study on evolutionary characteristics of desorption-spontaneous combustion of gas-bearing coal under high temperature and pressure conditions
煤炭科学技术. 2024, 52(7): 101–113 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1046>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

高明忠, 季冰, 李永程, 等. 多气体组分环境下原位保压煤样瓦斯压力衰减特性及演化规律[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 87–101.

GAO Mingzhong, JI Bing, LI Yongcheng, *et al.* Gas pressure attenuation characteristics and evolution law of in-situ pressure preservation coal samples under multi-gas component environment[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 87–101.



高明忠, 男, 山西吕梁人, 深圳大学土木与交通工程学院特聘教授、博士生导师, 国家自然科学基金委青年科学基金项目(A类)获得者、何梁何利青年创新奖获得者、第六届杰出工程师青年奖获得者。中国自动化学会智慧矿山专业委员会副主任委员、绿色矿山产业联盟青年技术委员会副主任委员、全国煤炭标准化技术委员会委员。长期聚焦国家“三深”战略, 深耕深部资源安全高效科学开采的理论技术与装备研发。近年来主持国自然青年A/B类项目、国家重点研发计划、国自然联合集成/重点基金、国家重大仪器研制项目课题等16项。出版专著5部, 发表SCI/Ei检索论文180余篇, 授权/申请发明专利120余项, 研究成果获得教育部技术发明一等奖(第1)、广东省丁颖科技奖、中国煤炭工业科学技术特等奖(第1)、中国岩石力学与工程学会技术发明特等奖(第1)等省部级奖励10余项。

多气体组分环境下原位保压煤样瓦斯压力衰减特性及演化规律

高明忠^{1,2,3}, 季冰^{1,2}, 李永程^{1,2}, 宋杰^{1,2}, 谢晶³, 郝海春^{1,2}, 王智鹏^{1,2}

(1. 深圳大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 广东 深圳 518060; 2. 深圳大学 深地科学与绿色能源研究院, 广东 深圳 518060; 3. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 深部煤层原位瓦斯压力的精确测定对煤矿安全生产至关重要。然而传统取心测压技术, 较少考虑煤层内气体成分的复杂性, 忽略了取心过程中煤样自由体积的扩张对原位瓦斯压力的影响, 从而降低原位瓦斯压力测定的准确性。基于深部煤层保压保瓦斯取心技术理念, 聚焦于取心后煤样自由体积扩张导致的瓦斯压力重平衡过程, 自主研发原位保压煤样多气体组分解吸系统, 系统开展了多气体组分环境下的保压煤样解吸试验, 揭示了不同气体组分对原位瓦斯压力动态演化的影响机制。结果表明: ① 保压取心整个过程中瓦斯压力变化可分为初始吸附平衡阶段、变体积阶段和解吸平衡阶段, 而变体积阶段是瓦斯压力变化的主要阶段, 压力衰减速率随体积扩张逐渐减小; ② 瓦斯压力变化受取心体积扩张程度、初始吸附量及气体竞争吸附的共同影响, 自由体积扩张将导致气体分子间平均自由程增加, 进而减弱了分子间的碰撞频率与强度, 促使瓦斯压力下降; ③ 强吸附性气体(如CO₂)的存在对保压煤样的瓦斯压力衰减具有缓冲作用, 而弱吸附性气体(如N₂)则加速瓦斯压力下降; ④ 保压煤样取心过程中, CO₂的竞争吸附特性显著调控瓦斯压力的变化, CH₄主导初期瓦斯压力变化, N₂在低压阶段解吸量增加。研究结果可为深部煤层保压取心瓦斯压力准确获取提供一种新方法, 为煤矿瓦斯抽采达标评判和防突措施效果检验提供技术支撑。

关键词: 深部煤层; 多气体组分; 解吸规律; 瓦斯压力; 试验系统

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)08-0087-15

收稿日期: 2025-04-10

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 李雅楠

DOI: 10.12438/cst.2025-0499

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年科学基金资助项目(52225403); 深圳市杰出青年基金资助项目(RCJC20210706091948015); 国家重点研发计划资助项目(2023YFF0615400)

作者简介: 高明忠(1980—), 男, 山西吕梁人, 教授, 博士。E-mail: gaomzh@szu.edu.cn

通讯作者: 李永程(2001—), 男, 广东揭阳人, 硕士研究生。E-mail: liyongcheng2022@szu.edu.cn

Gas pressure attenuation characteristics and evolution law of in-situ pressure preservation coal samples under multi-gas component environment

GAO Mingzhong^{1,2,3}, JI Bing^{1,2}, LI Yongcheng^{1,2}, SONG Jie^{1,2}, XIE Jing³, HAO Haichun^{1,2}, WANG Zhipeng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Institute of Deep Earth Sciences and Green Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Accurate determination of in-situ gas pressure in deep coal seams is crucial to the safe production of coal mines. However, the traditional coring and pressure measurement techniques do not take into account the complexity of the gas composition in the coal seam and ignore the effect of the expansion of the free volume of the coal samples on the in-situ gas pressure during the coring process, which reduces the accuracy of the in-situ gas pressure measurement. Based on the concept of pressure-preserving gas coring in deep coal seams and focusing on the gas pressure rebalancing process caused by the expansion of the free volume of coal samples after coring, we independently developed a multi-gas component desorption system for in-situ pressure-preserving coal samples, and systematically carried out pressure-preserving coal sample desorption experiments under a multi-gas component environment, which reveals the mechanism of the influence of different gas components on the dynamic evolution of the in-situ gas pressure. The results show that: ① the gas pressure change during the whole process of fidelity coring can be divided into the initial adsorption equilibrium stage, the variable volume stage and the desorption equilibrium stage, while the variable volume stage is the main stage of the gas pressure change, and the rate of pressure decay decreases gradually with the expansion of the volume; ② the change of the gas pressure is affected by the degree of expansion of the coring volume, the initial adsorption amount and the gas competition for adsorption, and the expansion of the free volume will result in the free volume expansion will lead to an increase in the mean free range of gas molecules, which will weaken the frequency and intensity of intermolecular collisions and contribute to the decrease of gas pressure; ③ The presence of strongly adsorbable gases (e.g., CO₂) has a buffering effect on the decay of gas pressure in the pressure-retaining coal samples, whereas the weakly adsorbable gases (e.g., N₂) accelerated the decrease of gas pressure; ④ In the process of the pressure-retaining coal samples coring, the competitive adsorption characteristics of CO₂ significantly modulate the change of gas pressure, and CH₄ dominated the initial gas pressure change, with CH₄ dominating the initial gas pressure change, and N₂ desorption increases in the low-pressure stage. The results of this study can provide a new method for accurately obtaining the gas pressure in deep coal seams by pressure preservation coring, and provide technical support for judging the gas extraction standard and checking the effect of anti-surge measures in coal mines.

Key words: deep coal seam; multiple gas components; desorption law; gas pressure; experimental system

0 引 言

深部煤层瓦斯作为一种重要的非常规天然气资源,其高效开发和精准测定对能源安全与煤矿安全开采具有重要意义^[1-3]。然而,传统煤层瓦斯压力测定技术存在取心过程中瓦斯逸散严重、保压性差等问题,难以准确获取瓦斯压力^[4-6]。谢和平院士团队^[7-10]通过创新性的装备设计,提出的保压保瓦斯取心技术,显著减少了瓦斯的损失。深部煤层瓦斯通常包含甲烷(CH₄)、二氧化碳(CO₂)、氮气(N₂)等气体,在多气体组分复杂环境下,保压保瓦斯取心技术对于原位煤层瓦斯压力的演化规律尚不明晰,不同气体组分之间的相互作用对原位瓦斯压力的影响仍需深入研究^[11-12]。

多年来,国内外学者在多气体组分对瓦斯压力影响的研究取得了大量成果。煤体中不同气体竞争吸附行为是理解瓦斯压力变化的基础,基于 THM 模型与分子模拟发现 CO₂ 在竞争吸附中占优, N₂ 扩散

系数更高但驱替效果弱于 CO₂,提出了 N₂ 和 CO₂ 的最佳注气压力范围^[13]。研究表明^[14],高阶煤吸附能力更强,且在混合气体环境中占据主导地位;针对多元气体在煤层中的吸附与运移机制,不同气体组分的吸附选择性会随瓦斯压力的变化呈现动态变化特征^[15],揭示了压力对气体竞争吸附的关键调控作用。在相似的吸附量条件下,强吸附质对混合气体的吸附行为起主导作用,而弱吸附质则具有更高的扩散系数。基于 CO₂ 置换含瓦斯烟煤的吸附行为与煤体形变特性研究^[16],发现驱替过程存在动态转化规律:在初始阶段,CO₂ 通过强吸附优势快速置换煤层中的瓦斯(CH₄),但随着吸附量增加,煤体因膨胀形变导致孔隙结构改变,驱替作用逐渐转向物理置换主导,且瓦斯压力演化直接影响置换效率。对比不同煤体结构的解吸动力学特性发现^[17-18],原煤与构造煤的瓦斯解吸速率和扩散能力存在显著差异,构造煤因孔隙连通性增强,在相同吸附平衡压力下表现出更高的解吸速率和扩散系数,进一步揭示了瓦斯压力

变化对原位煤层中气体流动特性的调控机制。针对钻孔取心过程中煤心温度变化及瓦斯解吸动态响应特性,通过试验和数值模拟,结果表明,取心过程中煤心温度升高会导致瓦斯解吸速度加快,且取心深度、煤心粒度和瓦斯压力对煤心温度和瓦斯解吸率有显著影响^[19]。相关研究^[20-21]基于煤粒瓦斯解吸规律的特性,提出并优化多气体组分下瓦斯运移模型,并通过试验研究了煤粒瓦斯的解吸规律,分析了煤粒瓦斯解吸过程中瓦斯压力衰减特性。

国内外学者对煤层含气量的测试、模拟与预测研究具有一定进展,指出多气体组分对瓦斯含量测定的影响,系统罗列了不同测试技术的优缺点,为煤层气含量的精准预测提供了理论依据^[22]。其中,孙四清等^[23]研究了可提高取心精度的地面井煤层气含量精准测试密闭取心技术及设备,但未考虑取心过程中瓦斯压力的变化;景兴鹏^[24]开发了煤层气含量密闭测定装置,强调了密闭取心在减少瓦斯损失中的作用,但未量化自由体积变化导致的瓦斯压力变化。

综上所述,目前的研究尚未明确原位保压煤样在多气体组分共存条件下的解吸机制,且现有试验系统多聚焦于单一气体环境,无法模拟多气体组分竞争吸附对解吸速率的影响,缺乏对试验环境的体

积动态控制。因此,笔者基于保压保瓦斯取心技术,创新性地研制原位保压煤样多气体组分解吸系统,分析保压煤样在多气体组分复杂环境下瓦斯压力的衰减特性,揭示不同气体组分对原位瓦斯压力动态演化的影响机制,为深部煤层原位瓦斯压力测定提供理论依据,进一步指导现场灾害防控与资源高效开发。

1 多气体组分环境下瓦斯压力测试分析试验

1.1 原位保压煤样多气体组分解吸试验系统工作原理

为研究多气体组分环境对瓦斯压力重平衡过程的影响,创新研发原位保压煤样多气体组分解吸系统,系统集成 6 大模块,其中多气体组分定量注入模块以高流量精度且性能平稳为目标进行参数优化设计;伺服变体积模块以高频稳定的体积控制为目标进行体积-压力匹配设计;降压采样模块以微扰动压力环境的气样采集分析(平均取样一次,试验腔体压降 0.05 MPa)为目标进行设计,可实现“深部煤层瓦斯环境模拟”、“保压取心体积扩充过程模拟”和“压力数据及气样采集分析”3 大功能,完成保压取心过程中瓦斯压力规律研究,模块架构如图 1 所示。

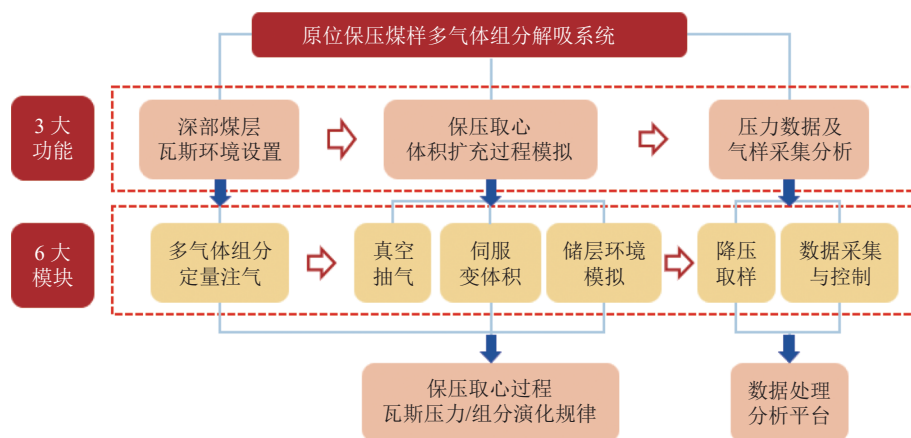


图 1 原位保压煤样多气体组分解吸系统模块架构

Fig.1 In-situ pressurized coal sample multi-gas component desorption system module architecture diagram

试验系统的详细构件组成如图 2 所示,其中多气体组分定量注气模块由伺服注气功能、定量配比功能、实时监测功能等组成;原位保压煤样瓦斯压力测试模块由真空抽气功能、伺服变体积降压功能及不同储层环境模拟功能组成;压力数据及气样采集分析模块由压力传感器、位移传感器、温度传感器、回压系统、气样采集功能及气相色谱仪组成。

原位保压煤样多气体组分解吸试验系统(图 3)利用多气体组分定量注气系统模拟原位煤层的多气

体组分瓦斯环境,考虑取心过程中将煤样取样至取心器内时的自由空间扩充,通过原位保压煤样瓦斯压力测试模块模拟取心前后瓦斯压力及气体组分变化过程,最后利用压力数据及气样采集分析模块进行记录、采集及分析试验数据。通过取心模拟环境下的瓦斯压力测试分析,开展不同气体组分环境下原位保压煤样瓦斯压力动态演化试验。

1.2 深部煤层试验煤样制备

试验样品取自山西省晋城市成庄矿区(图 4),位

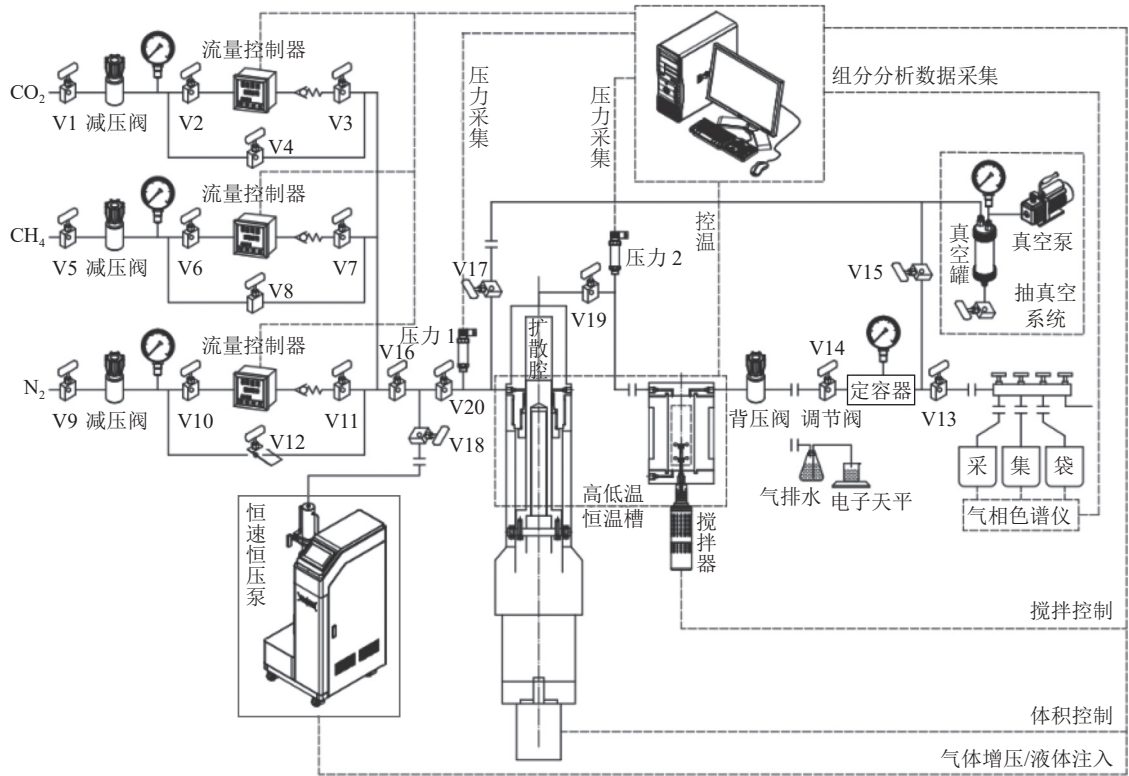


图 2 原位保压煤样多气体组分模拟环境瓦斯压力测试分析系统构件示意

Fig.2 Schematic diagram of the components of the gas pressure testing and analyzing system for simulating the environment of multi-gas components of in-situ pressure preservation coal samples



图 3 原位保压煤样多气体组分模拟环境瓦斯压力测试分析系统

Fig.3 In-situ pressure-preserved coal sample multi-gas component simulated environment gas pressure testing and analyzing system

于沁水煤田南翼，晋城西北 20 km 处，跨泽州和沁水两县。成庄矿区煤层普遍埋深超过 800 m，属于深部开采煤层，煤层变质程度属于无烟煤，该煤井含煤地层沉积类型和特征与晋东南其它地区大致相同，煤层主要分布在二叠系地层中，自下到上有 7 层发育较好的砂岩和 1 层桃花泥岩；且该矿区 CH₄ 占比普遍高于 80%，同时伴生 CO₂ 与 N₂，高度吻合深部煤层瓦斯环境。试验样品工业分析煤岩显微组分结果见表 1。

煤样随机反射率平均值为 3.69%，显微组分以镜质组与惰质组为主，符合无烟煤变质特征。煤样采集并除去矸石后，进行粒径筛分，基于煤样极限粒度理论^[25-26]，采用标准振动筛，筛取 6 ~ 10 mm 粒径煤样(经图像分析软件-ImageJ 验证，6 ~ 10 mm 粒径煤样占比超 95%)进行原位瓦斯压力测试分析模拟试验，如图 5 所示。将试验煤样置于 120 ℃ 温度(<2 nm 微孔结构保持稳定)恒温箱中，烘干 48 h 以除去水分，避免煤样内部水分参与后续吸附/解吸瓦

表 1 煤样工业分析及显微组分分析结果

Table 1 Industrial analysis & micro-component analysis results of coal samples

煤样工业分析/%				全硫分析		变质程度	随机反射率 平均值/%	最大反射率 平均值/%	体积分数/%			标准 误差/%
M_{ad}	A_{ad}	V_{daf}	FC_{ad}	St_{ad}	St_d				镜质组	惰质组	矿物	
2.34	29.28	11.68	60.40	0.22	0.24	无烟煤	3.69	4.35	44.92	53.38	1.69	0.153

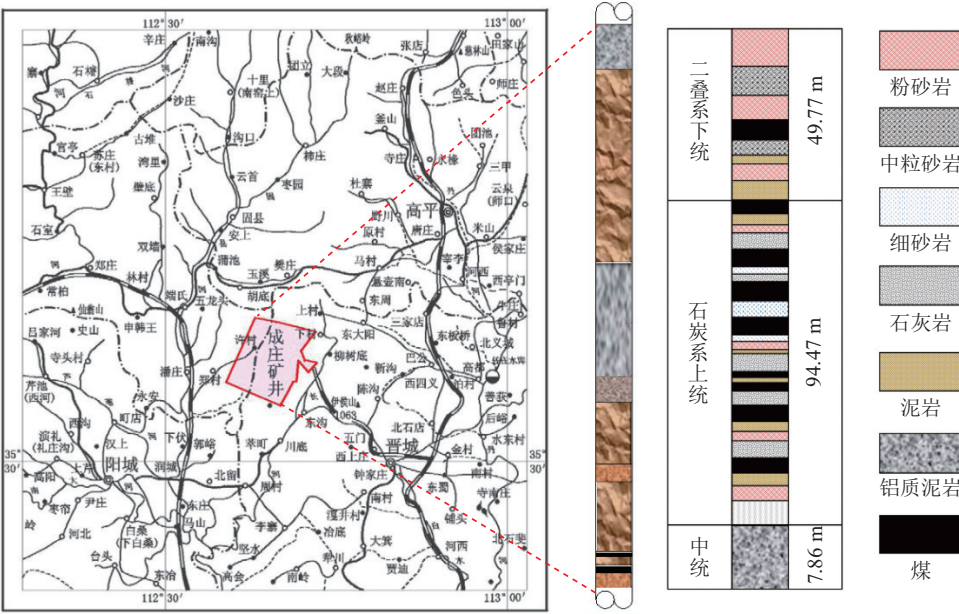


图 4 晋城成庄矿区煤层地质概状

Fig.4 Geological overview of coal seams in Chengzhuang mine, Jincheng

斯过程^[27]。利用高精度电子天平，记录放入样品罐内的处理后试验煤样质量，为 64.05 g，处理流程如图 5 所示。

1.3 保压煤样解吸试验设计

煤层瓦斯气体主要包含甲烷、二氧化碳和氮气等气体，煤对不同气体组分表现为相异的吸附特性，各组间存在相互竞争吸附效应。在原位保压煤样取心过程中，样品进入保压仓后会发生体积膨胀现象，导致初始吸附解吸的平衡状态被破坏，在保压空间内出现再平衡过程，要实现原位瓦斯压力的精准测算，需要对多气体组分工况下保压空间内的瓦斯压力演化规律开展研究。试验模拟埋深为 1 000 m，

晋城矿区地温梯度 1.64 °C/100 m^[28]，故统一设定试验温度恒定为 30 °C，尽管解吸过程可能伴随吸附热释放，但煤样质量较小且试验腔体采用成熟的 PID 控温技术，温度波动小于 0.3 °C(经预试验验证)，温度干扰影响可忽略。分别设置单气体、双气体及多气体组分试验环境，具体环境设计见表 2。

按瓦斯风化带下部边界条件^[29](甲烷及重烃浓度之和为 80%)，而深部煤层甲烷高于 80%，故设置双气体组分试验环境分别为 80% 甲烷+20% 二氧化碳，80% 甲烷+20% 氮气，用以探究注入少量二氧化碳、氮气分别对煤样解吸特性影响。多气体组分环境中，首先在控制甲烷不变(80%)的条件下，同时注

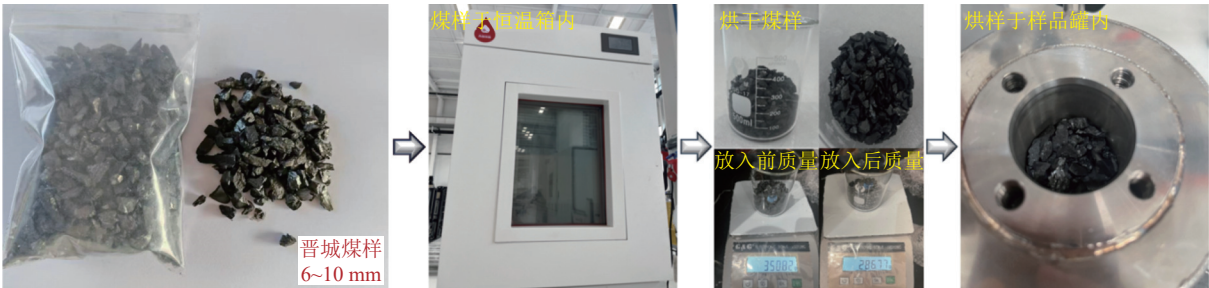


图 5 试验煤样处理流程

Fig.5 Flow chart of test coal sample processing

表 2 试验煤样多气体组分环境设置
Table 2 Environmental settings for multi-gas components of test coal samples

类别	序号	CH ₄ 体积占比	CO ₂ 体积占比	N ₂ 体积占比
CH ₄ 、CO ₂ 、N ₂	1	100	0	0
	2	0	100	0
	3	0	0	100
CH ₄ +CO ₂	1	80	20	0
CH ₄ +N ₂	2	80	0	20
CH ₄ +CO ₂ +N ₂	1	80	10	10
	2	60	30	10
	3	60	10	30
	4	34	33	33

入等量的二氧化碳(10%)、氮气(10%),分析以甲烷主导的多气体环境下瓦斯压力变化规律;然后降低甲烷的初始注入比(至 60%),分别提升二氧化碳、氮气的初始注入比,探究解吸特性影响的瓦斯压力变化规律;最后对不同气体组分设置相同的初始注入比(33%),进一步分析解吸特性影响的瓦斯压力变化规律。

为分析保压取心前后瓦斯压力演化规律,将取心器内部结构简化成煤心与取心筒这 2 部分,岩心筒可简化尺寸约为 $\phi 52\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的空心圆筒,煤心则可简化成尺寸约为 $\phi 50\text{ mm}\times 350\text{ mm}$ 的圆柱状煤样,所处体积约扩容 1.24 倍。试验系统利用变体积机构的柱塞移动实现体积伺服变化,设置柱塞自初始位置(距顶端 0 mm 处)依次下降 10、20、30、40、50 mm,即柱塞下降的位移对应试验腔体扩充 10、20、30、40、50 mL 容积。通过设置不同气体组分环境,利用伺服变体积机构改变瓦斯压力,结合瓦斯压力测试分析瓦斯压力及气相数据,进而探究原位保压煤样在压力与组分耦合作用下的原位瓦斯压力演化规律。

2 不同气体组分环境下瓦斯压力衰减特性

通过不同的体积扩张阶段来模拟取心过程中煤样的解吸动力学特征,试验设计依次为:① 突然暴露;② 0~10 mL;③ 10~20 mL;④ 20~30 mL;⑤ 30~40 mL;⑥ 40~50 mL 变体积阶段。各阶段均以体积变化前的吸附平衡压力为初始条件,持续监测体积变化 20 min 后的不同气体组分环境下瓦斯衰减过程。

2.1 含单气体组分瓦斯压力衰减特性

针对单气体组分环境,保压煤样的初始吸附平

衡压力为 4.51 MPa,突然暴露后瓦斯压力骤降,这是由于体积突然变化导致平衡状态失效,煤样中的气体瞬间解吸。N₂、CH₄、CO₂ 3 种气体具有不同的吸附解吸特征,在体积突然暴露后,CH₄ 组压力由初始压力下降至 3.68 MPa 后仍表现为快速下降状态,表明 CH₄ 气体仍处于吸附运移过程;CO₂ 组在突然暴露阶段中同样表现为压力骤降状态,降至约 3.8 MPa,略高于 CH₄ 气体,但 CO₂ 压力的解吸平衡点升高;对于仅含 N₂ 组煤样,N₂ 压力骤降后表现出急剧的解吸现象,由初始压力 4.52 MPa 降至 3.6 MPa,低于其他单气体组暴露后的压力,这是由于煤对 N₂ 的初始吸附量低于 CH₄、CO₂ 气体,在煤样暴露后,腔体内的 N₂ 压力表现为压力“回升”状态,表明煤颗粒内部受到压力梯度的刺激而不断脱附解吸出新的 N₂ 气体,如图 6 所示。

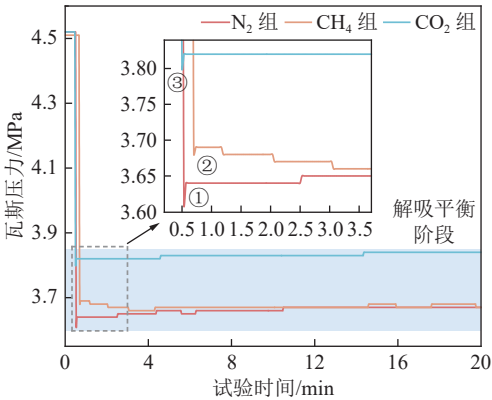


图 6 保压煤样突然暴露瓦斯压力响应特征-单气体组分
Fig.6 Characterization of the gas pressure response to sudden exposure of pressurized coal samples-single gas fraction

在仅含单气体组分的瓦斯压力衰减过程中,可以清晰看出瓦斯压力衰减过程以变体积动作主要分为 3 阶段:① 体积未扩增时,瓦斯压力稳定在初始吸附平衡状态;② 随着变体积状态开始,瓦斯压力不断下降,在此阶段煤颗粒表面与煤颗粒内部均不断发生着气体脱附现象,复杂的孔裂隙结构导致颗粒内部产生的解吸效应滞后于颗粒表面;③ 当腔体体积达到阈值后,瓦斯压力衰减程度减弱,直至煤样内部瓦斯压力与自由游离态瓦斯压力达到重平衡。

如图 7 所示,在变体积阶段,CH₄ 压力随着变体积行程的推移而逐渐降低,CH₄ 压力处于不断发展的动态平衡状态。随着时间的推移,煤样内部的吸附空间与外界的密闭空间不断进行气体交换,当内部压力与游离气体压力达到新的平衡吸附解吸压力时停止交换。随着体积扩张阶段的推移,瓦斯压力衰减速度减缓,瓦斯压力降低幅度减弱,在变体积阶段

内, CH_4 气体便已完成气体交换过程, 在解吸平衡阶段处于动态平衡状态

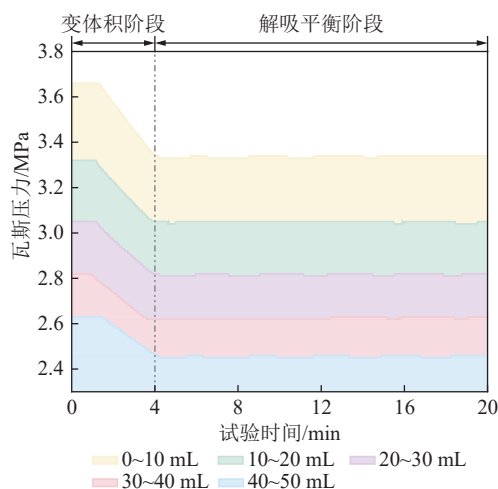


图 7 保压煤样解吸动力学曲线-纯 CH_4 气体

Fig.7 Kinetics of desorption of pressurized coal samples-pure CH_4 gas

如图 8 所示, 由于 CO_2 的强吸附性, 在高压状态下呈现出持续时间较长的解吸过程, 表现为更为稳定的解吸动力学特征。在变体积阶段, 煤样内部 CO_2 气体缓慢解吸, 并脱附于保压密闭空间内, 随外部环境气体压力不断降低, 煤颗粒内部不断解吸出更多的 CO_2 气体, 由孔裂隙结构流动、扩散至腔体空间。在不同体积扩张阶段中, 煤样瓦斯压力随着体积扩张而衰减速率减缓, 同时, 在各体积扩张阶段, 煤样对 CO_2 吸附量均高于 CH_4 气体, 但煤样扩容解吸过程中会释放大量的附着于煤样表面的 CO_2 , 最终导致降压后的瓦斯压力高于 CH_4 。

如图 9 所示, 由于 N_2 具有较强的扩散能力, 在

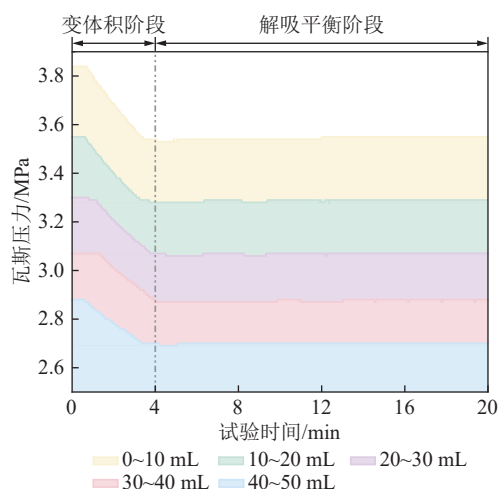


图 8 保压煤样解吸动力学曲线-纯 CO_2 气体

Fig.8 Kinetics of desorption of pressurized coal samples-pure CO_2 gas

整个扩容取心过程中表现出较为剧烈的变化。在自由空间不断扩张时, N_2 组煤样的快速解吸导致瓦斯压力下降速率较快, 且扩容解吸后的解吸平衡阶段中, 含 N_2 的瓦斯压力相比 CO_2 与 CH_4 更快地达到平衡压力。在整个模拟取心过程中, 仅含 N_2 的瓦斯压力随自由体积扩张表现出明显的下降趋势, 在 $0 \sim 10 \text{ mL}$ 阶段下降速率为 -0.035 MPa/mL , 发展到 $40 \sim 50 \text{ mL}$ 扩张阶段时下降速率则为 -0.019 MPa/mL , 下降速率变化值为 0.016 MPa/mL 。同时, 瓦斯压力随时间变化表现为先快速升高, 随后缓慢增长至新的吸附-解吸平衡压力。

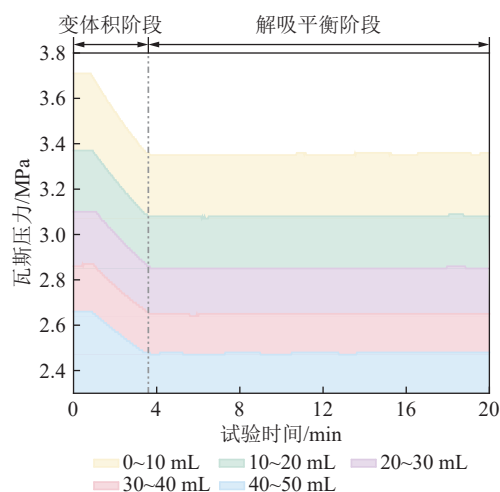


图 9 保压煤样解吸动力学曲线-纯 N_2 气体

Fig.9 Kinetics of desorption of pressurized coal samples-pure N_2 gas

2.2 含双气体组分瓦斯压力衰减特性

通过对比分析单气体组分环境下瓦斯压力的衰减规律, 得到 N_2 、 CH_4 、 CO_2 3 种气体在模拟取心过程中的解吸动力学特征, 并基于上述单气体组分环境下不同扩容阶段瓦斯压力的衰减情况, 分别设置以 CH_4 气体为主 (80%), CO_2/N_2 为辅 (20%) 的双气体组分试验组, 开展含双气体组分的保压煤样解吸动力学研究。

如图 10 所示, 在 $\text{CH}_4 : \text{CO}_2 = 8 : 2$ 的初始注入条件下, 初始瓦斯压力为 4.53 MPa , 暴露后压力急剧衰减至 3.69 MPa , 这与仅含 CH_4 气体煤样暴露后的压力较为接近。

在解吸平衡阶段, 煤样内部 CO_2 大量脱附于密闭空间内, 瓦斯压力快速上升至 3.76 MPa , 明显高于相同阶段仅含 CH_4 气体煤样的压力。

在 $\text{CH}_4 : \text{N}_2 = 8 : 2$ 的初始注入条件下, 初始瓦斯压力为 4.5 MPa , 暴露后瓦斯压力为 3.67 MPa , 变化较为相似, 说明占绝对优势的游离态 CH_4 直接影

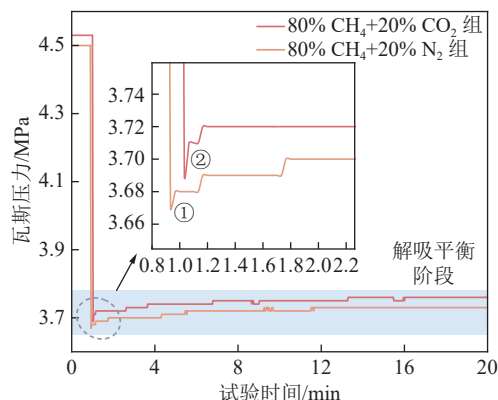


图 10 保压煤样突然暴露瓦斯压力响应特征-双气体组分
Fig.10 Characterization of the gas pressure response to sudden exposure of pressurized coal samples-single gas fraction

响着初始暴露瓦斯压力的衰减情况。在煤样解吸平衡阶段,瓦斯压力随时间推移而增大,煤样内部瓦斯脱附反应迟滞,未完全扩散至保压密闭空间,导致瓦斯压力持续增大直至达到平衡状态。

如图 11 所示,在不同的伺服变体积阶段中,含 80% CH₄+20% CO₂ 气体组分的瓦斯压力均随着时间的推移呈现出先衰减后缓慢回升的波动规律,在变体积阶段实现了绝大部分的气体交换过程,说明体积扩容是影响瓦斯压力变化的直接因素。在整个体积扩充过程中瓦斯压力高于仅含 CH₄ 试验组,在体积扩张初期受主导气体(80% CH₄)的影响,煤样解吸速率和解吸量直接决定了瓦斯压力的下降速率,在体积不断扩张过程,受 CO₂ 的强吸附性的影响,促进了煤样对 CH₄ 气体的解吸程度,提高了煤样在自由体积扩张后的瓦斯压力,减缓瓦斯压力的衰减过程,但瓦斯压力下降速率随着 CO₂ 吸附量的降低而逐渐接近纯 CH₄ 试验组。

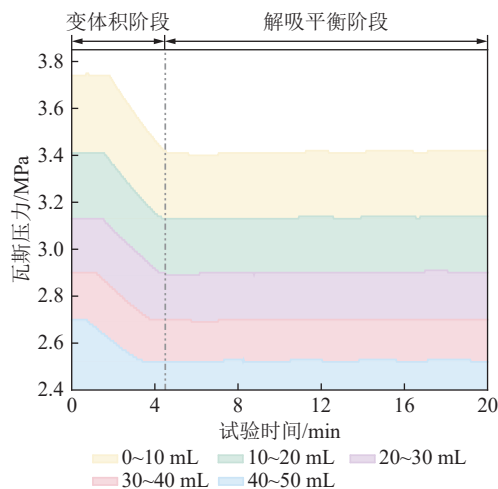


图 11 保压煤样解吸动力学曲线(CH₄:CO₂=8:2)
Fig.11 Kinetics of desorption of pressurized coal samples (CH₄:CO₂=8:2)

如图 12 所示,对于含 80% CH₄+20% N₂ 的气体组分瓦斯压力,在不同的伺服变体积阶段,瓦斯压力随着时间推移表现先衰减后缓慢上升,直至达到平衡状态。在变体积后 4 min 内完成大部分解吸平衡过程,瓦斯压力达到动态平衡状态。同时,N₂ 与 CH₄ 气体的解吸差异性随着体积扩张而逐渐减弱,瓦斯压力下降速率接近仅含 CH₄ 试验组。双气体组分的最初瓦斯压力下降速率均为-0.033 MPa/mL,含 80% CH₄+20% N₂ 试验组的瓦斯压力下降速率略高于其对照组;在 40~50 mL 阶段时,试验组的瓦斯压力下降速率均恢复至相同水平,为-0.018 MPa/mL。

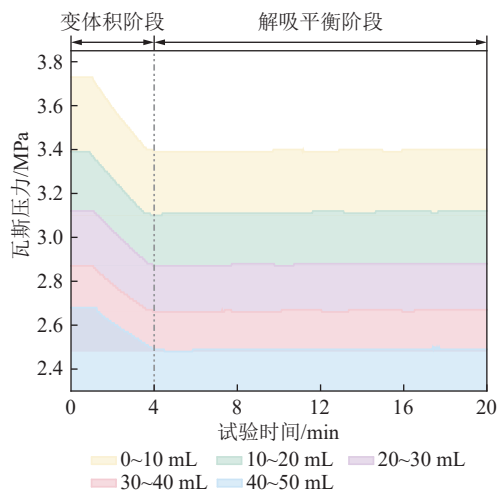


图 12 保压煤样解吸动力学曲线(CH₄:N₂=8:2)
Fig.12 Kinetics of desorption of pressurized coal samples (CH₄:N₂=8:2)

2.3 含多气体组分瓦斯压力衰减特性

基于单气体、双气体组分环境下的不同扩容阶段瓦斯压力衰减规律,结合深部煤层原位瓦斯环境,设置含 CH₄、CO₂、N₂ 不多气体组分试验组,以不同注入比例开展多气体组分影响下的保压煤样解吸动力学研究。以 CH₄ 气体为主导,分别设置 CH₄:CO₂:N₂ = 8:1:1、1:1:1、6:3:1、6:1:3 四种初始气体组分注入条件。混合气体体系的初始瓦斯压力均设定为 4.52 MPa,对比分析含有不同吸附能力气体的压力衰减特性。

如图 13 所示,在煤样突然暴露后,811 组瓦斯压力瞬间跌落至 3.7 MPa,与 CH₄:CO₂=8:2 试验组对应的解吸平衡阶段的瓦斯压力上升特征相似,呈现为片段式上升;而 111 组在经历初始暴露后,瓦斯压力降至 3.68 MPa。对于 631 组,当煤样突然暴露于外界环境时,瓦斯压力迅速下降至 3.71 MPa,这与双组分气体体系相近,表明 CO₂ 强吸附特征在多气体混合体系中对瓦斯压力瞬间波动的缓冲作用并不

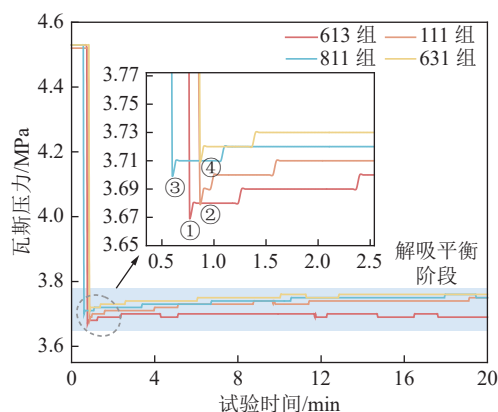


图 13 保压煤样突然暴露瓦斯压力响应特征-多气体组分
Fig.13 Characterization of gas pressure response to sudden exposure of pressurized coal samples-multi-gas component

明显, 受限 CH_4 、 N_2 等非强吸附性气体组分稀释作用的影响。对于 613 组, 突然暴露后的瓦斯压力迅速降至 3.67 MPa, 略低于 631 组相同阶段的瓦斯压力, N_2 的强解吸特性会加剧体积暴露后瓦斯压力的降低程度。

对比 811 组与 111 组可知(图 14), 811 组体积扩张初期的瓦斯压力下降速率接近仅含 CH_4 组(为 -0.033), 随自由空间体积扩张, 811 组的瓦斯压力响应特征介于 2 个双气体体系的试验组之间, 表明初期瓦斯压力的变化主要受到 CH_4 气体主导性影响, 随体积扩张, 其他气体对瓦斯解吸特性产生影响, CH_4 气体主导能力减弱, 煤样中 CH_4 的吸附含量逐渐减少, 但瓦斯压力降低后 CO_2 和 N_2 气体影响作用减弱, 在忽略吸附量差异的情况下, 811 组的解吸动力学特征与仅含 CH_4 气体组的煤样较为相似。对于 111 组, N_2 和 CO_2 气体的相对含量较高, 其吸附量存在明显差异, 在体积扩张初期, 111 组瓦斯压力下降速率由相对含量高、吸附性强的 CO_2 及 CH_4 联合控制, 随体积不断扩张, 瓦斯压力衰减速率受 CO_2 缓冲效应及 N_2 弱吸附性的稀释作用影响, 在达到吸附饱和状态下, CO_2 因自身的强吸附性更倾向于附着于煤样孔裂隙内, 而不是脱附、解吸扩散至自由空间, 因此瓦斯压力处于动态平衡状态。

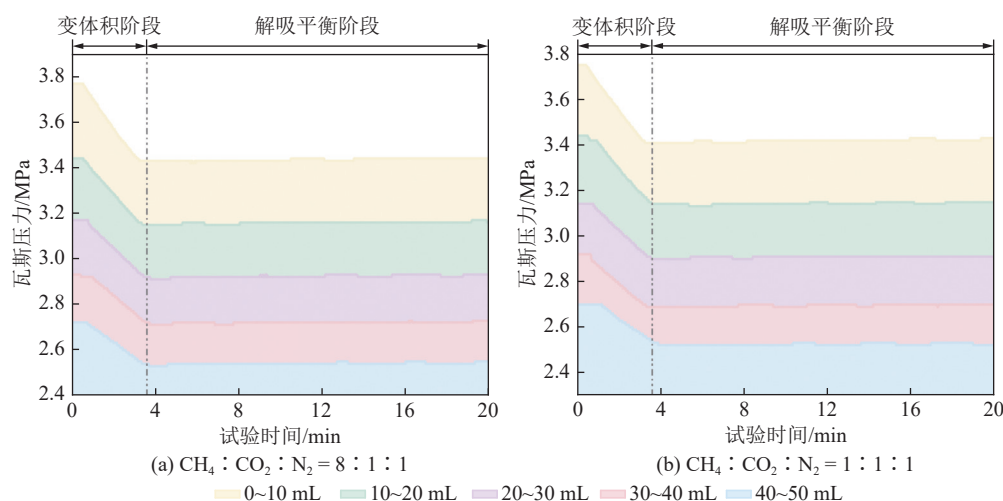


图 14 保压煤样解吸动力学曲线
Fig.14 Desorption kinetic curves of pressurized coal samples

对比 631 组与 613 组可知(图 15), 在 CH_4 含量占比相同的条件下, CO_2 占比越高的复合气体体系吸附量越多, 扩容导致的瓦斯解吸量高于 CO_2 占比低的试验组, 且不同变体积阶段下的 631 组瓦斯压力均高于 613 组。当达到解吸平衡状态时, 由于 N_2 的弱吸附性, 使大量 N_2 存在于自由空间内, 当混合气体体系不断暴露在外界环境中, 游离的 N_2 迅速反应并扩散至新的密闭空间内。故在相同初始条件下, 复合气体体系吸附量差异较大时, CO_2 相对更易附着于煤样孔隙内, 与 CO_2 占比低的试验组解吸量差值无法忽略, 受到解吸特性与解吸量的共同影响, 导致

瓦斯压力衰减规律存在差异。随着时间的推移, N_2 占比较高的试验组受 N_2 强扩散性的影响首先达到新的瓦斯压力动态平衡。

综上所述, 气体间的协同作用显著影响了瓦斯解吸动力学特征, 不同气体组分环境下瓦斯压力的衰减特性在整个模拟取心过程中受气体含量影响显著。在体积暴露初期瓦斯压力瞬间下降至临界值, 受不同气体体系间竞争吸附效应的影响, 解吸平衡阶段表现出不同的变化规律, 其中强吸附性气体 CO_2 的存在能够减缓瓦斯压力的突然变化, 且 CO_2 相对含量高的试验组表现较为明显, 而 CH_4 、 N_2 等弱

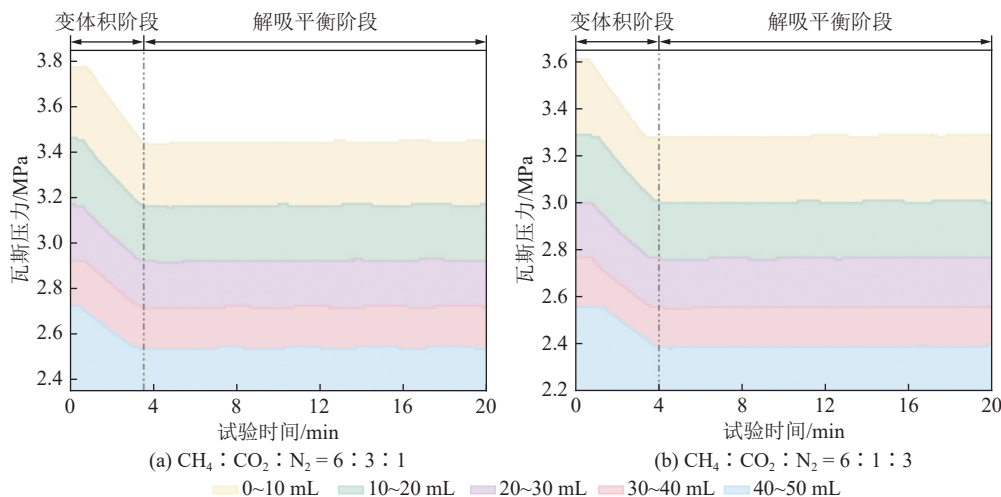


图 15 保压煤样解吸动力学曲线

Fig.15 Desorption kinetic curves of pressurized coal samples

吸附性气体将稀释并限制 CO_2 吸附, 导致在解吸平衡的过程中, 气体体系内瓦斯压力持续缓慢上升, 直至脱附及扩散速率与吸附速率达到一致, 实现动态平衡。

3 不同气体组分环境下瓦斯压力演化规律

基于不同气体组分环境下瓦斯压力的衰减特性, 引入 He 气体(煤样不吸附)的同试验压力变化曲线, 对比分析不同气体组分环境下瓦斯压力演化规律。设定初始吸附瓦斯压力均为 4.51 MPa, 由于煤样在不同气体环境初始注入条件下具有不同的初始吸附量, 不同体积扩张导致的解吸响应也有所差异, 故依次开展单气体组分体系、吸附特性相似试验组、吸附特性相异试验组等体系下的瓦斯压力演化规律分析。

3.1 单气体组分体系瓦斯压力演化规律

如图 16 所示, 在模拟煤层取心过程中, 根据体积变化划分为 2 个阶段: 突然暴露阶段、自由体积扩张阶段。He 作为惰性气体, 与煤样不发生吸附脱附, 可用于判别不同气体组分在不同体积扩张点的解吸情况。

在初始吸附平衡压力相同条件下, 强吸附性气体 CO_2 压力在全过程中均高于其他气体, 压力差随着体积扩张而呈现增大的趋势; 吸附能力相似的气体(CH_4 、 N_2)压力曲线十分接近, 且随着自由体积扩张而不断靠拢。对比 He 曲线, 发现随着体积扩张的不断发展, 瓦斯解吸量逐渐增加, 表现为各气体压力曲线与 He 气体压力差值相对增加。认为在相同的初始压力条件下, 煤对 CO_2 的吸附量显著高于其他气体, 导致其与其他气体的初始吸附量存在较大差

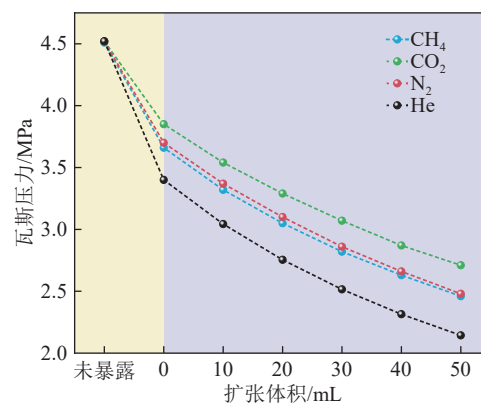


图 16 单气体组分瓦斯压力演化图

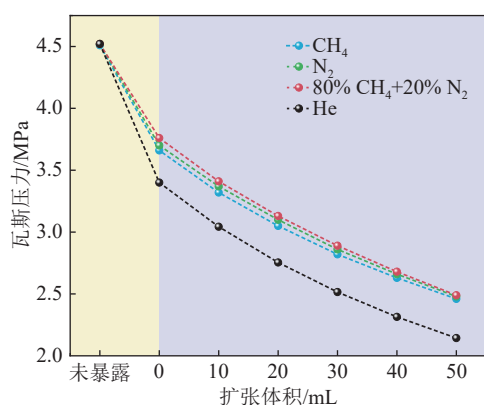
Fig.16 Evolution of gas pressure for single gas components

异。故在体积变化过程中, 游离气体压力一旦降低, CO_2 气体将大量从煤基质中解吸出来, 表现为 CO_2 压力高于其他气体; 值得注意的是, 尽管在解吸过程中二氧化碳大量释放, 煤孔隙中仍然保留了相对较多的二氧化碳。而 CH_4 、 N_2 的初始吸附量大致相当, 表现为两压力曲线大致接近, 解吸特性差异导致的瓦斯压力变化幅度不是很大。

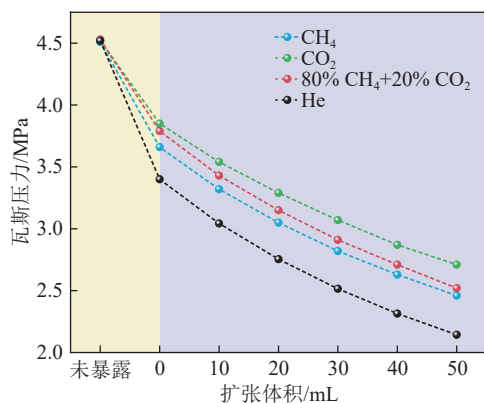
3.2 吸附特性相似体系瓦斯压力演化规律

对比注入占比相似的单气体组分与双气体组分试验组(图 17), 在初始吸附平衡压力相同情况下, 吸附能力相近的气体(CH_4 、 N_2)的吸附量相近, 瓦斯压力曲线变化趋势较接近; 其中双气体组分瓦斯压力略高于单组分气体, 该体系中各组分在体积扩张过程中展现出相似的变化特性。在变体积阶段, 一方面以吸附能力评价: 煤样对 CH_4 的吸附能力强于对 N_2 的吸附能力, 体积扩张后煤孔隙会保留更多的 CH_4 气体, 即相对解吸量更少, 故 CH_4 的瓦斯压力曲线低于 N_2 ; 但二者的吸附特性差异随着瓦斯压力的

降低而减小,表现为瓦斯压力曲线不断靠拢。另一方面以吸附量评价:含有 80% CH_4 试验组相较于纯 N_2 组,具有更高的初始吸附量,并随着体积扩张表现出较大的解吸量差异,即更高解吸量导致瓦斯压力高于纯 N_2 组,具体表现为含有 80% CH_4 的双组分瓦斯压力曲线高于纯 N_2 。综合认为:在扩容降压初期时,瓦斯压力较高,解吸量影响较大;随着自由体积继续扩张,试验腔体中瓦斯压力继续下降, CH_4 和 N_2 解吸特性差异逐渐模糊,3 条瓦斯压力曲线不断靠近,直至重合。

图 17 CH_4 与 N_2 体系瓦斯压力演化图Fig.17 Evolution of gas pressure in the CH_4 and N_2 system

对比初始吸附量相异的气体(CH_4 、 CO_2)与双气体组分试验组(图 18),不同气体组分瓦斯压力曲线呈现出显著差异,表现为:纯 CO_2 >双组分>纯 CH_4 。由于煤样初始吸附了大量 CO_2 气体,当煤样的自由体积发生变化时, CO_2 气体大量解吸,吸附能力的差异成为控制瓦斯压力的主导因素。相对高吸附量的仅含 CO_2 煤样在解吸时将释放更多瓦斯,进而导致自由空间瓦斯压力升高。随着自由体积扩张,含 20% CO_2 的煤样瓦斯压力曲线相对下降,表现为向纯 CH_4 压力曲线靠近;这是因为双气体组中 CO_2 含

图 18 CH_4 与 CO_2 体系瓦斯压力演化图Fig.18 Evolution of gas pressure in the CH_4 and CO_2 system

量较低,且 CO_2 更易保留存在于煤样中,变体积过程中 CH_4 的解吸量主导影响着瓦斯压力的变化。所以,在吸附量差异可忽略情况下,解吸特性差异随着压降而逐渐模糊,瓦斯压力将不断趋于纯 CH_4 组瓦斯压力。

对比吸附量相似的双气体组分体系与 CH_4 : CO_2 : N_2 = 8 : 1 : 1 多气体组分,瓦斯压力演化规律如图 19 所示。在不同阶段的变体积过程中,3 条瓦斯压力曲线十分接近,多气体组瓦斯压力略高于含 20% CO_2 组,高于 20% N_2 组,且瓦斯压差随着扩容而逐渐增大;以吸附量评价:各组的初始瓦斯吸附量几乎相同,含量占据绝对优势的 CH_4 直接影响了不同体积扩张阶段下的瓦斯压力;且突然暴露后的瓦斯压力与 CO_2 相对含量成正比,即暴露后瓦斯压力: 20% CO_2 >10% CO_2 >无 CO_2 。该规律表明:在同一初始吸附平衡压力下, CO_2 含量相对占比越高,暴露后的解吸量也越高,进而导致暴露后的瓦斯压力越高。表现为随着压力下降,含 CO_2 组瓦斯压力相对上升,而含 20% N_2 的双气体组分试验组瓦斯压力相对下降。以吸附能力评价:随着腔体内部体积变化,含 CO_2 气体含量越高的煤样脱附越困难,往往需要更大的压差才能解吸出等量的 CO_2 ,具体表现为变体积解吸过程中,含多气体组分的瓦斯压力高于含 20% CO_2 组,而无 CO_2 组由于初始吸附量最低,瓦斯压力一直处于最低处。

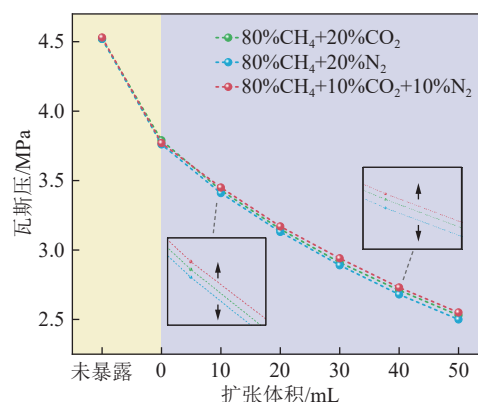


图 19 三元气体体系瓦斯压力演化图-吸附量相似

Fig.19 Evolution of gas pressure for the ternary gas system-similarity in adsorption

3.3 吸附特性相异体系瓦斯压力演化规律

对比吸附特性差异较大的多气体组分试验组,如图 20 所示,在相同的初始吸附压力情况下, CH_4 : CO_2 : N_2 = 1 : 1 : 1 气体组分(111 组)与 CH_4 : CO_2 : N_2 = 6 : 3 : 1 气体组分(631 组)的解吸瓦斯压力演化曲线较为接近,高于仅含 10% CO_2 组

(CH₄ : CO₂ : N₂ = 6 : 1 : 3, 631 组)。当 CO₂ 占比达到 30% 后, 煤样吸附量受其主要控制, 并主导变体积阶段的瓦斯压力变化。结合第 2.3 节瓦斯压力衰减特性可知, CO₂ 的存在可促进煤样中 CH₄ 的解吸, 在体积暴露后瓦斯压力将缓冲下降, 且 CO₂ 的动力学直径相对更小, 煤样吸附势能更大, 相对吸附量更大。故体积扩张过程中 CO₂ 相对吸附最为稳定, 吸附占比将持续上升, 而 N₂ 则持续下降。

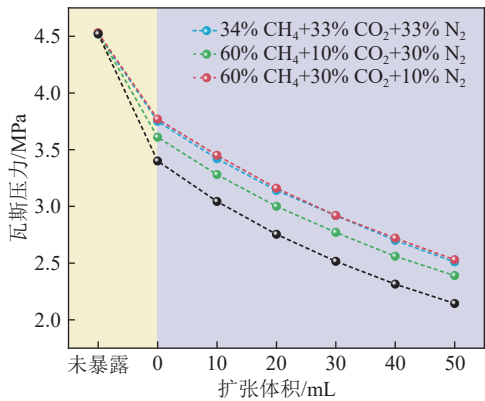


图 20 多气体体系瓦斯压力演化图-吸附量相异
Fig.20 Evolution of gas pressure in a multi-gas system-adsorption variance

当 CO₂ 的初始注入占比较高时, 其吸附量将直接影响煤样解吸行为, 进而调控瓦斯压力的变化, 表现为 111 组与 631 组瓦斯压力接近, 且维持在较高压力水平。在复杂的多气体组分环境下, CO₂ 仍能保持较强劲的吸附强度, 并抢占部分 CH₄、N₂ 的吸附位; 而 N₂ 因其弱吸附性、良好的扩散能力, 吸附态 N₂ 相

对更易被其他气体组分所替代, 解吸并扩散。对比 He 压力曲线, 发现 613 组与 He 压力差值有较为明显的扩大趋势, 即 613 组瓦斯解吸量随着自由体积扩张而增大, 认为 N₂ 在高低压的解吸特性差异是影响体积扩张后期的 N₂ 占比较高组瓦斯压力反升的主要因素。在吸附量差异不大的情况下, 当煤样瓦斯含量中 CO₂ 相对占比越高, 瓦斯越倾向于附着在煤体中, 吸附态瓦斯的解吸能力越弱, 导致瓦斯压力越低。随着自由体积扩张导致的瓦斯压力下降, 解吸特性趋于接近, 瓦斯压力受各气体组分的初始吸附量影响逐渐显著, 瓦斯压力的响应特性将由整体解吸特性影响, 不再表现为明显受单一气体组分主导。

3.4 不同气体组分环境下保压煤样解吸机理分析

保压煤样解吸响应特性受吸附竞争效应、瓦斯压力环境、气体分子解吸扩散行为的综合影响。CO₂ 通过强吸附性(置换能力)主导解吸过程, N₂ 因弱吸附性及良好的扩散能力优先解吸, 而 CH₄ 的解吸行为则受 CO₂ 抑制和压力调控的双重作用。如图 21 所示, 不同气体分子的解吸特性差异会导致煤样解吸响应分异显著。随着煤样的自由体积扩张, 煤基质优先选择保留吸附分子作用力强的气体, 而气体组分动态变化表现为密闭空间中各气体组分的体积分数变化与气体分压变化。随着体积扩张阶段的发展, 即煤样自由体积越来越大, 瓦斯压力衰减速率不断降低, 认为是气体分子浓度差降低导致的。

瓦斯压力下降速率与气体组分的吸附量差异密

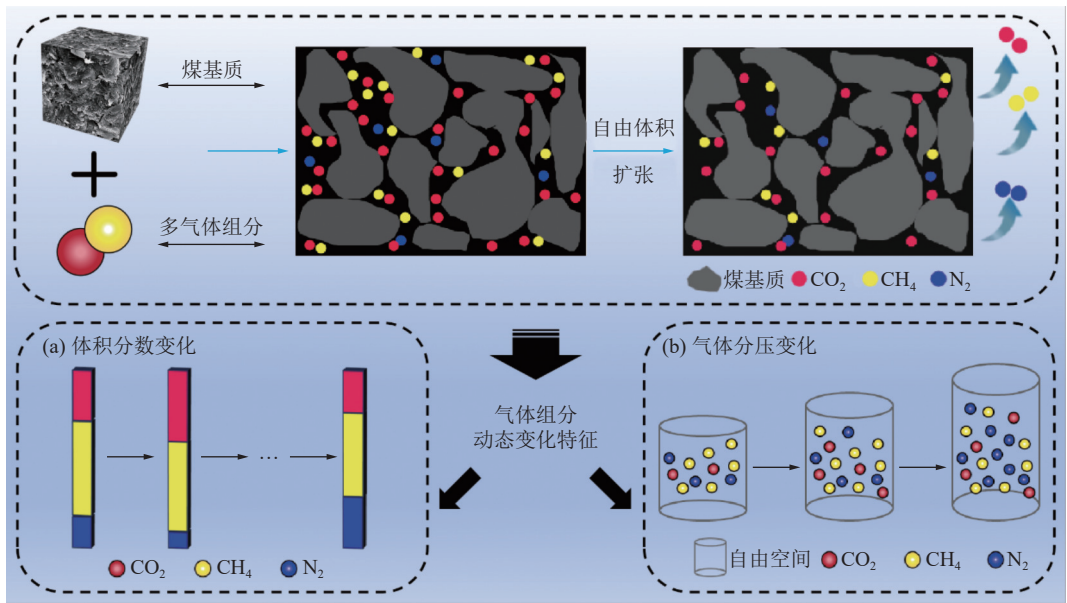


图 21 多气体组分环境下瓦斯压力演化示意
Fig.21 Schematic diagram of gas pressure evolution in a multi-gas component environment

切相关。强吸附性气体(如 CO_2 、 CH_4)因具有更高的吸附势能和更大的吸附量,在体积扩张初期优先占据煤基质表面活性位点,形成竞争吸附。当煤样因体积扩张触发解吸时,强吸附性气体因分子与煤基质间更强的范德华力和偶极作用力,解吸能垒较高,而弱吸附气体(如 N_2)因吸附量较低,率先从游离态快速逸出,导致瓦斯压力初期显著下降;而强吸附性气体因解吸受限,其吸附态向游离态的转化速率较慢,在解吸中后期逐渐主导压力变化。气体组分吸附量的差异通过调控解吸顺序和速率,最终表现为瓦斯压力下降曲线的分段特征。不同气体体系均在变体积阶段实现了绝大部分的瓦斯气体转换,说明体积扩张是影响瓦斯压力变化的主要因素。

气体吸附特性通过分子作用力调控多组分体系的解吸动力学,不同气体组分的吸附量差异和解吸特性是决定瓦斯压力演变的直接因素。在不同的同服变体积阶段,多气体组分试验组均表现为瓦斯压力逐渐降低,当变体积达到设定阈值后瓦斯压力下降速度减缓,最终达到稳定状态。不同变体积阶段的瓦斯压力曲线变化规律方面表现特征:在体积扩增时间内,瓦斯压力逐渐降低,这是由于腔体体积的增大导致气体分子间平均自由程度增加,减弱了分子间的碰撞频率与碰撞强度,从而降低了瓦斯压力;当腔体体积达到设定体积值后,瓦斯压力的降低速度大幅减缓,这是因为随着体积的稳定,气体分子间的动态平衡逐渐建立,瓦斯压力的变化趋于平缓;随后,瓦斯压力稳定平衡于某一压力,这反映了在给定的气体组分和体积条件下的瓦斯压力稳态值。

4 结 论

1)保压取心瓦斯压力变化可分为3个阶段:初始吸附平衡阶段、变体积阶段、解吸平衡阶段,而变体积阶段实现了绝大部分的瓦斯压力变化值,瓦斯压力衰减速率随体积扩张的发展而不断减小,且强吸附性气体(CO_2)的存在会减缓瓦斯压力的下降幅度。

2)瓦斯压力变化受取心体积扩张程度、初始吸附量及气体竞争吸附共同影响。初始吸附量是影响瓦斯压力变化的主导因素,二氧化碳气体的竞争吸附显著调控瓦斯压力演化,氮气在高低压环境下的解吸特性差异将导致体积扩张后期解吸量的增加。

3)强吸附性气体由于高吸附势能、解吸能垒,在自由体积扩张过程中倾向滞留于煤基质活性位点,影响保压煤样瓦斯解吸;而气体组分吸附量差异通过

调控解吸优先顺序和解吸量,将导致解吸响应特性差异,形成不同的压力下降曲线。

5 应用前景

1)保压取心技术标准化:自主研发的多气体组分分解吸系统可推广至煤矿现场勘探领域,结合原位保压取心技术,建立标准化的取心-测试标准化瓦斯压力测定流程;

2)非常规天然气开发:研究成果可为煤层气、页岩气等复杂气体资源的开发提供理论支撑,尤其适用于高 CO_2 含量气藏的解吸动态预测与开发方案设计;

3)原位瓦斯压力动态校正:明确煤层 CO_2 对瓦斯压力衰减的缓冲效应及 N_2 的加速扩散特性,可反演原位瓦斯压力的初始值,减少传统技术中因体积扩张导致的数据偏差。

参考文献(References):

- [1] 林柏泉,杨威,刘统.深部高突煤层典型特征、诱突机制及防治对策[J].煤炭学报,2025,50(1):311-325.
LIN Baiquan, YANG Wei, LIU Tong. Typical characteristics of deep coal seams with high outburst risk, outburst inducing mechanism and prevention measures[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 311-325.
- [2] 张超林,刘明亮,王恩元,等.煤层渗透性对煤与瓦斯突出的影响规律及控制机理[J].煤炭学报,2024,49(12):4842-4854.
ZHANG Chaolin, LIU Mingliang, WANG Enyuan, et al. Influence law and control mechanism of coal seam permeability on coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(12): 4842-4854.
- [3] 李勇,熊先钺,徐立富,等.中国煤层气商业开发典型案例及启示[J].煤炭科学技术,2025,53(3):31-46.
LI Yong, XIONG Xianyue, XU Lifu, et al. Inspirations of typical commercially developed coalbed methane cases in China. [J/OL]. Coal Science and Technology, 2025, 53(3): 31-46.
- [4] 王恩元,张国锐,张超林,等.我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J].煤炭学报,2022,47(1):297-322.
WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 297-322.
- [5] 吴宽,王兆丰,李守一,等.基于瓦斯量补偿的煤层瓦斯压力确定方法研究[J/OL].煤炭科学技术,1-10[2025-2-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20250221.1653.010.html>.
WU Kuan, WANG Zhaofeng, LI Shouyi, et al. Research on determination method of coal seam gas pressure based on gas quantity compensation[J/OL]. Coal Science and Technology, 1-10 [2025-2-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20250221.1653.010.html>.

- [6] 杨科, 张寨男, 华心祝, 等. 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术研究进展、关键科学问题与展望[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 944-964.
- YANG Ke, ZHANG Zhainan, HUA Xinzhu, et al. Research progress, key scientific issues, and prospects of segmented fracturing and pressure relief gas drainage technology for coal seam roof horizontal wells[J/OL]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 944-964.
- [7] 高明忠, 陈领, 凡东, 等. 深部煤矿原位保压保瓦斯取芯原理与技术探索[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 885-897.
- GAO Mingzhong, CHEN Ling, FAN Dong, et al. Principle and technology of coring with *in situ* pressure and gas maintaining in deep coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 885-897.
- [8] 谢和平, 高明忠, 张茹, 等. 深部岩石原位“五保”取芯构想与研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(5): 865-876.
- XIE Heping, GAO Mingzhong, ZHANG Ru, et al. Study on concept and progress of *in situ* fidelity coring of deep rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(5): 865-876.
- [9] 高明忠, 叶思琪, 杨本高, 等. 深部原位岩石力学研究进展[J]. 中国科学基金, 2021, 35(6): 895-903.
- GAO Mingzhong, YE Siqi, YANG Bengao, et al. Progress in research on deep *in situ* rock mechanics[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(6): 895-903.
- [10] 谢和平, 崔鹏飞, 尚德磊, 等. 深部煤层原位保压取心技术原理与瓦斯参数测定研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(8): 1-12.
- XIE Heping, CUI Pengfei, SHANG Delei, et al. Research advances on the *in situ* pressure-preserved coring and gas parameter determination for deep coal seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(8): 1-12.
- [11] 周厚权. 关于煤层瓦斯含量有关问题的分析与探讨[J]. 矿业安全与环保, 2014, 41(5): 90-92, 97.
- ZHOU Houquan. Analysis and discussion of some problems about gas content in coal seam[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2014, 41(5): 90-92, 97.
- [12] 王可新, 傅雪海. 我国煤矿瓦斯中 H_2S 及 CO_2 等异常的成因分析[J]. 煤矿安全, 2006, 37(10): 47-50.
- WANG Kexin, FU Xuehai. Cause analysis of anomalies such as H_2S and CO_2 in coal mine gas in China[J]. Safety in Coal Mines, 2006, 37(10): 47-50.
- [13] YU H J, LI Z W, BAI Y S, et al. Influence of injection pressure on gas adsorption and desorption of anthracite[J]. Energy, 2024, 288: 129828.
- [14] 尉瑞, 宋鑫, 廉振山, 等. CH_4 , CO_2 和 N_2 及其多元气体在不同煤阶中吸附特性实验研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(10): 129-134.
- YU Rui, SONG Xin, LIAN Zhenshan, et al. Experimental study on adsorption properties of CH_4 , CO_2 and N_2 and their multivariate gases in different coal ranks[J]. Coal Technology, 2022, 41(10): 129-134.
- [15] 周军平. CH_4 , CO_2 , N_2 及其多元气体在煤层中的吸附-运移机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- ZHOU Junping. Study on adsorption-migration mechanism of CH_4 , CO_2 , N_2 and their multi-gas in coal seam[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [16] 张磊, 李菁华, 郭鲁成, 等. 含瓦斯烟煤 CO_2 置换吸附行为与形变特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(5): 901-913.
- ZHANG Lei, LI Jinghua, GUO Lucheng, et al. Experimental study of both the displacement behaviour by CO_2 and the characteristic of volumetric strain on methane saturated bituminous coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(5): 901-913.
- [17] TIAN H, LI Z H, RODRIGUEZ-DONO A, et al. Research on the desorption law and multifractal characteristics of coal gas based on infrared radiation[J]. Fuel, 2024, 376: 132744.
- [18] ZHANG X Y, CHEN F B. Research on the desorption law and diffusion kinetic properties of gas in raw coal and tectonic coal[J]. Fuel, 2024, 376: 132653.
- [19] 王俏. 钻孔取芯过程煤芯温度变化及瓦斯解吸动态响应特性[D]. 焦作: 河南理工大学, 2023.
- WANG Qiao. Dynamic response characteristics of coal core temperature change and gas desorption during drilling and coring[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2023.
- [20] SUN Y X, WANG Z F, YUE J W, et al. Study on gas desorption law and gas loss estimation in a positive pressure reverse circulation sampling process[J]. Fuel, 2023, 352: 129141.
- [21] YAO Z Z. Study on the characteristics and model optimization of coal particle gas emission law[J]. ACS Omega, 2023, 8(14): 12992-13003.
- [22] 傅雪海, 张小东, 韦重韬. 煤层含气量的测试、模拟与预测研究进展[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(1): 13-31.
- FU Xuehai, ZHANG Xiaodong, WEI Chongtao. Review of research on testing, simulation and prediction of coalbed methane content[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(1): 13-31.
- [23] 张群, 孙四清, 降文萍. 碎软低渗煤层煤矿区煤层气勘探开发关键技术及发展方向[J]. 石油学报, 2024, 45(5): 855-865.
- ZHANG Qun, SUN Siqing, JIANG Wenping. Key technologies and development direction of CBM exploration and development in coal mine area of fractured soft and low permeability coal seams[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(5): 855-865.
- [24] 景兴鹏. 煤层气含量密闭取心测定装置及测试技术[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(4): 603-609.
- JING Xingpeng. Testing device of methane content sealed coring and measuring technology[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(4): 603-609.
- [25] 韩恩光, 刘志伟, 冉永进, 等. 不同粒度煤的瓦斯解吸扩散规律实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(12): 83-87.
- HAN Enguang, LIU Zhiwei, RAN Yongjin, et al. Experimental study on gas desorption and diffusion laws of coal with different particle sizes[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(12): 83-87.
- [26] 贾彦楠, 温志辉, 魏建平. 不同粒度煤样的瓦斯解吸规律实验研究[J]. 煤矿安全, 2013, 44(7): 1-3.
- JIA Yannan, WEN Zhihui, WEI Jianping. Experimental study on

- gas desorption laws of coal samples with different particle size[J]. *Safety in Coal Mines*, 2013, 44(7): 1–3.
- [27] CLARKSON P M, FANG X H, LI Y, et al. The relevance of environmental disclosures: Are such disclosures incrementally informative?[J]. *Journal of Accounting and Public Policy*, 2013, 32(5): 410–431.
- [28] 陈敬轶. 成庄煤矿瓦斯地质图编制与煤层气资源量评价 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2007.
- CHEN Jingyi. Preparation of gas-geologic map of Chenzhuang mine and coalbed methane resource evaluation[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2007.
- [29] 王涛. 煤层瓦斯风化带的确定方法[J]. *江西煤炭科技*, 2001(1): 9–11.
- WANG Tao. Determination method of gas weathering zone in coal seam[J]. *Jiangxi Coal Science & Technology*, 2001(1): 9–11.