煤体吸附膨胀应力试验装置研发及应力演化特征研究

张遵国[1,2],陈　毅[1,3],张宏虎[1,3],唐　朝[1,3]
(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院,辽宁 葫芦岛　125105;2. 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室,辽宁 葫芦岛　125105;3. 葫芦岛渝庆矿山科技服务有限公司,辽宁 葫芦岛　125105)

摘要: 为探究煤体吸附CO_2过程膨胀应力动态演化特征,从装置气密性、限位有效性和测力计可靠性等关键技术难点着手,研发了集轴向限位系统、数据监测系统、孔隙压控制系统和温度控制系统于一体的煤体吸附膨胀应力试验装置. 结果表明:研发的煤体吸附膨胀应力试验装置具有良好的气密性与轴向限位能力,能够有效控制煤体95%以上的轴向变形量,实现10 MPa以内的气体压力及吸附膨胀应力动态测试功能. 基于该装置开展了CO_2作用下煤体吸附膨胀应力试验,分析了膨胀应力动态演化特征. 煤体吸附CO_2过程中的吸附膨胀应力随时间的动态演化曲线表现出3类曲线形式. CO_2气体压力较低时,吸附气体对煤体的力学损伤作用不明显,曲线主要由充气压缩应力减小和吸附膨胀应力增大两阶段构成,表现为Ⅰ类曲线,具有显著的Langmuir曲线特征;随着气体压力升高,煤体因吸附"蚀损"作用引发的力学损伤导致曲线出现应力减小现象,形成Ⅱ类曲线;一旦力学损伤导致的应力减小值超过吸附膨胀导致的应力增大值,吸附平衡后的吸附膨胀应力值较初始值明显减小,表现为Ⅲ类曲线. 建立了考虑煤体力学损伤的吸附膨胀应力动态演化双Langmuir模型,能精确拟合吸附膨胀应力随时间的演化关系.

关键词: 气固耦合;膨胀应力;应力演化;试验装置;吸附膨胀应力模型
中图分类号: TD 712　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)01-0136-12

Development of a test apparatus for coal adsorption-induced swelling stress to investigate the stress evolution characteristics

ZHANG Zunguo[1,2], CHEN Yi[1,3], ZHANG Honghu[1,3], TANG Chao[1,3]
(1. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao, Liaoning 125105, China; 2. Mine Thermo-motive Disaster & Prevention, Ministry of Education, Huludao, Liaoning 125105, China; 3. Huludao Yuqing Mining Technology Service Co., Ltd., Huludao, Liaoning 125105, China)

Abstract: In order to investigate the dynamical evolution characteristics of the swelling stress during the CO_2 adsorption process in coal, embarking on the key technical challenges such as the airtightness of the device, the effectiveness of the confinement system and the reliability of the dynamometer, a test apparatus for coal adsorption-induced swelling stress has been developed, which in-

收稿日期: 2025-08-13　　**修回日期:** 2025-10-27　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250320
基金项目: 国家自然科学基金项目(51704147);辽宁省教育厅科学研究项目(LJKZ0345)
第一作者: 张遵国(1986—),男,重庆市人,副教授,博士生导师.
通信作者: 陈　毅(1996—),男,重庆市人,博士研究生. E-mail: 791080964@qq.com
引用格式: 张遵国,陈　毅,张宏虎,等.煤体吸附膨胀应力试验装置研发及应力演化特征研究[J].中国矿业大学学报,2026,55(1):136-147.
ZHANG Zunguo, CHEN Yi, ZHANG Honghu, et al. Development of a test apparatus for coal adsorption-induced swelling stress to investigate the stress evolution characteristics[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(1): 136-147.

tegrates the axial confinement system, the data monitoring system, the pore pressure control system and the temperature control system. The results show that the developed coal adsorption-induced swelling stress test device has excellent air-tightness and axial confinement capability, is capable of achieving more than 95% axial deformation of coal samples and enables dynamic testing of gas pressure and coal swelling stress within 10 MPa. The experiments of coal swelling stress under CO_2 are conducted based on this device to analyze its dynamical evolution characteristics. The dynamical evolution curve of adsorption-induced swelling stress in coal during CO_2 adsorption over time exhibits three pattern types. When the CO_2 pressure is low, there is no significant mechanical damage effect due to the adsorbed gas in the coal, resulting in the curve that is primarily characterized by two stages: The reduction of the compressive stress due to gas injection and the subsequent increase in swelling stress due to gas adsorption, presenting a type-Ⅰ curve with a distinct Langmuir curve characteristics. As the gas pressure increases, the mechanical damage caused by the "erosion" effect of gas adsorption leads to a decrease in swelling stress, forming a type-Ⅱ curve. Once the stress reduction due to mechanical damage exceeds the stress increase due to adsorption swelling, the swelling stress after adsorption equilibrium is significantly lower than the initial value, presenting a type-Ⅲ curve. A dual Langmuir model for the dynamical evolution of the adsorption-induced swelling stress has been developed, which takes into account the coal mechanical damage, can accurately fit the evolution relationship of the swelling stress over time.

Key words: gas-solid coupling; swelling stress; stress evolution; test apparatus; adsorption-induced swelling stress model

"双碳"战略驱动下化石能源低碳化利用成为研究热点，煤层CO_2封存及煤层气高效开采技术受关注程度不断提高[1-2]. 注CO_2增产煤层气过程会打破地应力、孔隙压力与气体吸附作用形成的三重应力场间的耦合平衡状态，改变煤体应力状态，影响气体在煤层中的运移与吸附[3]. 这些变化除了受煤体应力和气体压力作用外，还明显受煤吸附气体产生的膨胀变形及其引发的吸附膨胀应力控制作用[4]. 但目前煤体吸附膨胀应力演化规律尚不明晰，开展煤吸附过程的应力响应研究，厘清气体吸附对煤体力学行为的调控机制十分必要.

已有相关煤层应力演化模型大多基于双重应力场建立，未能清晰揭示气体吸附对原位煤层力学状态的控制作用[5]. 随着多孔介质流固耦合理论的不断发展，传统考虑双重应力场的太沙基有效应力理论在煤体流固耦合研究中已表现出明显局限性[6-7]. 许多学者已逐渐意识到吸附膨胀应力是有效应力理论的关键组成部分[8]，通过在传统应力控制方程的吸附项前添加修正系数，量化煤体吸附膨胀应力对有效应力的贡献，建立考虑吸附膨胀应力作用的含气煤体有效应力方程，推进了对注气吸附过程流固耦合作用机理的进一步认识[9-10]. 吸附膨胀应力本质上是煤体吸附变形受外部约束时所产生的应力. 文献[11]早在1979年就提出煤层体积受限时吸附甲烷会产生吸附膨胀应力. 对此，文献[12]在1993年首次于国内试验测定了不同气体压力下煤体的吸附膨胀应力，提出吸附变形与吸附膨胀应力存在线性关系，但此后很长时间均未见有关吸附膨胀应力的试验研究，相关研究多采用理论分析手段开展. 但现有理论普遍将煤体简化为各向同性的刚性体[13]. 文献[14-15]均假设煤的吸附膨胀应力与应变的关系服从Hooke定律，默认煤的弹性模量不变，并据此建立了吸附膨胀应力模型. 然而，大量研究发现煤体吸附过程其力学特性会发生劣化，将煤的弹性模量设为定值存在一定的局限性[16-17]. 直至2019年后，文献[5,18-19]才开始通过三轴试验系统对吸附膨胀应力进行测量，研究吸附膨胀应力与气体压力和吸附量间的关系. 综上所述，目前关于煤体吸附膨胀应力特征的试验研究相对匮乏，同时将煤体简化为各向同性的刚性体过于理想化，相关理论模型缺乏试验依据，煤体吸附膨胀应力真实的演化特征亟待深入研究.

现有试验研究通常采用力传感器测定吸附膨胀应力[18-19]，通过弹性元件的形变间接测量力. 吸附膨胀应力试验的核心难点在于需对煤体施加刚性约束，严格抑制其吸附膨胀变形. 由于煤吸附气体产生的膨胀变形量极其微小，通常在千分级

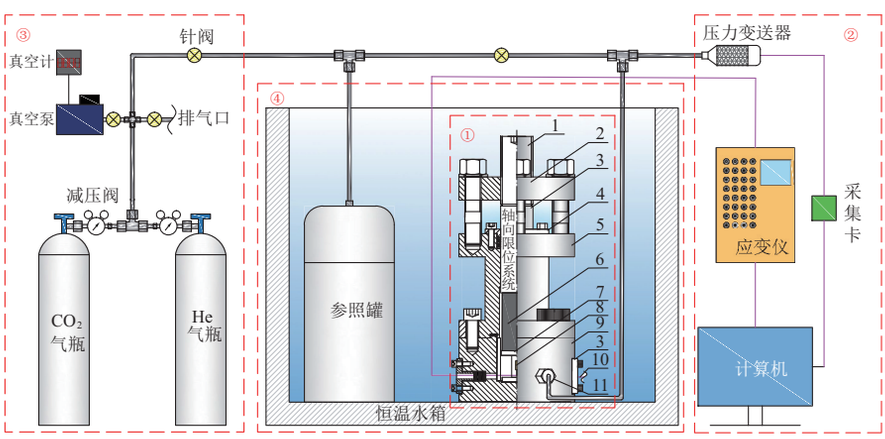
(‰)范围内[12],测量过程中弹性元件形变会使煤体因吸附膨胀变形产生的膨胀应力以弹性势能的形式散失掉,导致测试结果失真.因此,如何在确保测量装置自身具有极高刚度的同时实现吸附膨胀应力的有效测量,实现测量精度与系统刚度的平衡是吸附膨胀应力试验装置面临的最大挑战,这也是迄今国内外吸附膨胀应力试验研究相对匮乏的根本原因.

鉴于此,本文通过研发一种煤体吸附膨胀应力测试装置,并开展CO_2吸附过程煤体膨胀应力测试,分析吸附膨胀应力动态演化特征.研究成果对推进注气吸附过程煤体有效应力理论的发展、指导煤层气高效开采具有重要意义.

1 膨胀应力试验装置研制

1.1 整体技术方案

如图1所示,煤体膨胀应力测试装置包括①轴向限位系统、②数据监测系统、③孔隙压控制系统和④温度控制系统.其中轴向限位系统用于实现煤体轴向限位功能,数据监测系统通过压力变送器实时监测孔隙压力,通过测力计实时监测煤体吸附膨胀应力.孔隙压控制系统和温度控制系统则用于提供不同气体压力和不同温度的试验环境.



注:1:压杆;2:限位盘;3:限位杆;4:压环;5:腔体上座;6:煤体;7:测力计;8:应变片;9:底座;10:接线口;11:进气口

图1 煤体吸附膨胀应力测试装置

Fig. 1 Test apparatus for coal adsorption-induced swelling stress

1.1.1 轴向限位系统

轴向限位系统(图2)用于限制煤体轴向吸附膨胀变形并进行气体吸附,主要包括压杆、限位盘、限位杆、腔体上座、腔体底座和测力计.

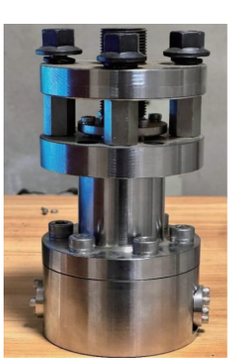


图2 轴向限位系统实物

Fig. 2 Axial confinement system

轴向限位系统具体技术特征为:腔体上座为中空环形结构,内置限位杆,其顶部安装带有螺纹通孔的限位盘.压杆旋入此通孔并与限位杆面接触.腔体底座设有连接孔隙压控制系统的进气口和连接导线的接线口,腔体底座上安装测力计.试验时将煤体置于测力计上方中心处,通过六角扳手旋拧压杆使其在螺纹作用下向下推动限位杆对煤体施加一定的应力,确保限位杆与煤体充分接触[20],通过轴向限位用以控制煤体轴向变形.

1.1.2 数据监测系统

数据监测系统用于监测试验过程中的气体压力和吸附膨胀应力,由计算机、压力变送器、采集卡、测力计和应变仪组成.采用CYYZ11-Z压力变送器将气体压力转为模拟信号,并通过MPS-010602多功能USB信号采集卡将信号传输到计算机,采集试验过程实时的气体压力数据.测力计置于轴向限位系统腔体底座内,在测力计中部表面竖直粘贴BE120-5AA应变片,并通过数据线经轴向限位系统的接线孔连接至DH3818Y应变仪,通过应变仪监测测力计应变.试验前使用UTM5105X微机控制电子压力试验机对测力计进行标定,得到测力计弹性系数,试验时根据Hooke定律结合测力计的应变值即可计算得到对应应力值.

1.1.3　孔隙压控制系统

孔隙压控制系统与轴向限位系统的进气孔相连，用于控制吸附气体压力，主要包括气瓶、减压阀、针阀、真空泵和真空计．通过减压阀控制高纯He气瓶与高纯CO_2气瓶气体输出压力；通过真空泵对气路进行抽真空，防止杂质气体对试验结果造成影响．试验时首先采用He标定轴向限位系统的自由空间体积．然后采用CO_2作为吸附质，向参照罐通入一定压力的CO_2，待压力稳定后将参照罐的CO_2通入轴向限位系统并实时测定试验过程中的吸附膨胀应力，当轴向限位系统压力稳定后按照加压—平衡—加压过程逐级提高气体压力，当达到最高试验压力后停止试验．

1.1.4　温度控制系统

温度控制系统主要由循环水浴箱构成，用于精确控制试验温度．开展煤体吸附膨胀应力试验时，将轴向限位系统直接浸入循环水浴箱的恒温水中，确保试验温度恒定．

1.2　装置关键技术

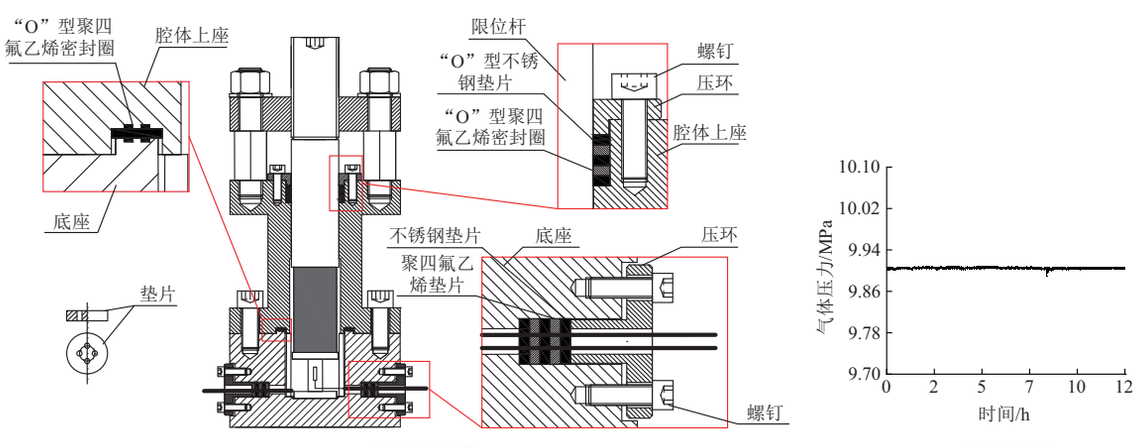
1.2.1　轴向限位系统高压密封技术

轴向限位系统的有效密封是实现不同压力（尤其是高压）条件下吸附膨胀应力测试功能的必要保障．为了保证轴向限位系统的密封性，采取如下技术措施．

1）限位杆密封．如图3a所示，在限位杆与腔体上座之间采用“O”型聚四氟乙烯密封圈密封，与“O”型不锈钢垫片交替放入预留槽内，通过螺钉使压环将“O”型密封圈压紧变形，填充腔体上座与限位杆之间的缝隙，进而实现限位杆的有效密封．

2）腔体上座与底座之间密封．在腔体上座与底座连接处均开“凹”型槽，之间采用“O”型聚四氟乙烯密封圈进行密封．通过拧紧螺栓密封圈压紧变形，填充腔体上座与底座间的“凹”型槽，进而实现腔体上座与底座之间的有效密封．

3）接线口密封．接线口处采用“纽扣”式不锈钢垫片和聚四氟乙烯垫片进行密封．不锈钢垫片和聚四氟乙烯垫片上均开设4个与数据线直径对应的小孔，将4根数据线分别穿入交替排列的不锈钢垫片和聚四氟乙烯垫片的4个小孔后放入预留槽内，随后使用螺钉将压环与底座连接，聚四氟乙烯垫片受压环挤压变形后充分填充底座、垫片、数据线之间的缝隙，从而实现数据线的有效密封．



(a) 密封结构示意　　(b) 密封性测试

图3　轴向限位系统密封设计

Fig. 3　Sealing design of axial limit system

试验前在轴向限位系统内充入约10 MPa的He，12 h内He压力变化如图3b所示．从图3b可以看出，12 h内He压力平均值为9.905 MPa，无明显压力降低现象，最大压力值为9.909 MPa，最小压力值为9.889 MPa，以平均值为基准值计算，压力波动度仅为−0.016 MPa～0.004 MPa，均处于压力变送器误差范围内，说明轴向限位系统气密性良好．

1.2.2　煤体有效限位技术

现有多数吸附膨胀应力试验需要给煤体套上橡胶胶套，通过液压压紧胶套实现围压施加功能，通过调节围压大小控制煤体径向变形恒定，一定程度上实现了煤体限位[18-19]．但采用橡胶胶套属于柔性限位方式，在高围压和吸附膨胀应力的作用下胶套会产生变形，导致煤体限位不充分，且无法对煤体限位程度进行量化．因此，对煤体吸附膨胀应力的有效测试必须解决煤体有效限位的难题．

1）测力计理论设计

测力计设计原理遵循Hooke定律，即线弹性材料在受力之后，应力与应变成线性关系[21]：

$$F=-k\Delta x, \tag{1}$$

式中：F 为线弹性材料所受力，N；k 为弹性系数，N/m；Δx 为线弹性材料形变量，m.

根据 Hooke 定律所设计的测力计优点在于简单易行、可靠性高. 但由式(1)可知，这种测力方式会损失一部分变形空间，所设计的测力计在产生形变后才能测得对应的应力值. 调研市面上的测力计(荷重传感器)，量程小的传感器刚度不足，为保证测量精度，其弹性元件的变形较大，无法对煤体进行有效限位；而量程大的传感器虽然刚度满足要求，但相同载荷条件下变形过小，导致传感器灵敏度较低，膨胀应力较小时测量误差较大. 如前所述，吸附膨胀应力测试装置的关键在于对煤体在吸附后形变的有效控制，为了保证试验可靠性，试验所用测力计为自行设计. 设计测力计时考虑了煤体允许的最大吸附变形量，并在此基础上保证较高的测量精度. 设计所测煤体吸附膨胀应力量程按 0～10 MPa 考虑，对应尺寸∅25 mm 煤体的压力为 0～4 909 N. 因此，设定测力计额定量程为 5 000 N. 由于煤体自由膨胀条件下的最大轴向吸附应变量约为 1%[22-23]，为保证有效限位达到 95% 以上，测力计允许最大变形量(ε_{max})应为 $\varepsilon_{max}=0.05\ \text{m}\times(1-95\%)\times1\%=25\times10^{-6}$ m，即 25 μm.

测力计设计为“工”字型结构(图 4)，中部粘贴应变片，通过监测试验过程中的应变值，计算得到对应的应力值. 当测力计受压时，其整体纵向变形量由式(2)[24]进行计算.

$$\Delta l=\frac{F_{max}l}{E_aA}, \tag{2}$$

式中：Δl 为测力计变形量，m；F_{max} 为测力计设计最大量程，取 5 000 N；l 为测力计的高，m；E_a 为测力计材料弹性模量，GPa；A 为测力计中部四棱柱截面积，m^2.



图 4 测力计

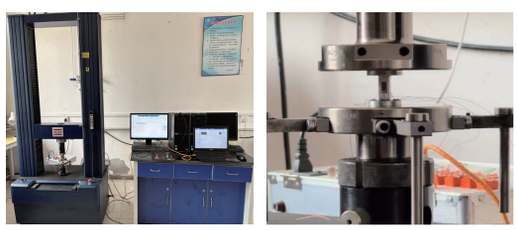
Fig. 4 Dynamometer

设计测力计最大变形量小于 25 μm，则测力计中心四棱柱截面积 A 需满足式(3)：

$$\Delta l=\frac{F_{max}l}{E_aA}\leqslant25\times10^{-6}\ \text{m}. \tag{3}$$

2) 测力计参数校准

利用 UTM5105X 微机控制电子压力试验机(图 5)对测力计进行标定，采用应力加载方式，加载速率为 5 N/s. 测力计标定结果如图 6 所示.



(a) 电子压力试验机 (b) 测力计弹性系数测定

图 5 测力计标定

Fig. 5 Calibration the dynamometer

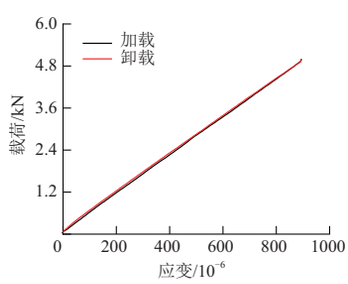


图 6 测力计加、卸载曲线

Fig. 6 Loading and unloading curve of dynamometer

从图 6 可以看出，测力计载荷-应变曲线具有显著的线弹性特征，且加、卸载过程载荷-应变曲线基本重合，保证了试验具有可重复性. 分别对加载和卸载曲线的线性拟合结果求均值，得到测力计压缩应变为 1×10^{-6}，对应载荷为 5.6 N. 此外，测力计在最大载荷 5 000 N 时对应的应变量为 893.8×10^{-6}，对应的变形为 24.9 μm，该值小于 25 μm，符合设计要求.

3) 测力计原位测试

现有吸附膨胀应力研究所用的试验系统主要通过外置称重传感器或力传感器对应力进行测定[18-19]. 为了保证高压试验条件，试验系统必须严格保证压力室与压头之间的密封性，使应力加载和测试过程压力室与压头间存在较大摩擦力，导致吸附膨胀应力测试结果出现较大误差，在低压阶段可能因为吸附膨胀应力小于压头与压力室之间的静摩擦力导致测不出吸附膨胀应力值. 因此，本装置将测力计置于轴向限位系统内部，对吸附膨胀应力进行原位测试. 考虑到高压气体会直接作用在测力计上，对测试结果产生影响，将高压 He 充入到轴向限位系统内部，得到不同气体压力下测力计示数变化如图 7 所示(图中，F_r 为测力计示数，N；P_{He} 为 He 气体压力，MPa).

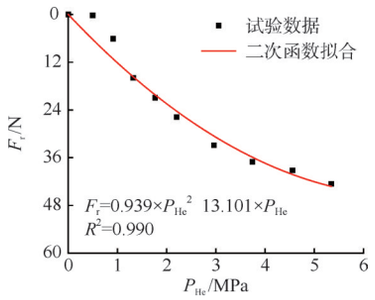


图 7　测力计示数与 He 气体压力关系

Fig. 7　The relationship between the reading of dynamometer and He gas pressure

从图 7 可以看出，He 作用下测力计示数与气体压力呈反比，且随 He 压力增大，测力计示数下降速率逐渐降低．5.35 MPa 气体压力下，测力计示数累计减小 42.6 N，等效为煤体应力减小约 0.087 MPa．根据测力计受力及变形分析（图 8）可知，由于测力计为“工”字型结构，在单轴限位腔体内充入 He 之后，测力计上盘顶部由于放置煤体，受力面积小于上盘底部，在气体压强作用下测力计发生拉伸变形，测力计示数减小．但由于煤体是具有复杂孔隙的多孔介质，随气体压力升高，He 扩散进煤体深部，测力计上盘顶部受力面积逐渐增大，抵消了一部分拉伸作用力，且这种抵消作用随气体压力增加而增大，导致测力计示数的下降速率逐渐降低．

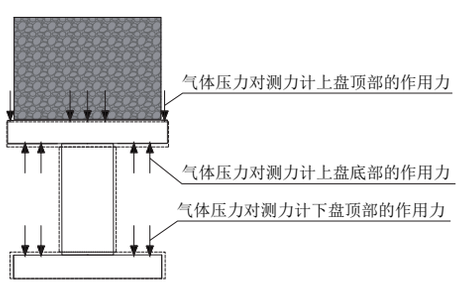


图 8　测力计受力及变形示意

Fig. 8　Diagram of force application and deformation of dynamometer

2　试验方法

2.1　煤体加工

试验煤体采自晋能控股装备制造集团有限公司寺河煤矿二号井 15#煤层无烟煤和黑龙江龙煤集团鹤岗矿业公司峻德煤矿 17#煤层 1/3 焦煤．

煤体制备流程如下：首先在原始煤块上沿垂直层理方向取芯，并用切割机粗加工成尺寸约为 ∅25 mm×50 mm 的煤柱，然后通过双端面磨平机进一步打磨煤体端面，确保端面平行后再用细砂纸将煤体端面打磨光滑，得到原煤煤体．为排除水分差异对试验结果的影响，试验前将制备好的原煤煤体放入烘干箱中，设置温度 75 ℃，烘干 12 h 以上，直至煤体 1 h 质量变化不超过 0.01 g，用于后续试验研究．

2.2　煤体基础参数

参照 GB/T 30732—2014《煤的工业分析方法 仪器法》，测试得到煤体工业分析结果见表 1．

表 1　工业分析结果

Table 1　Industrial analysis results

煤体	M_{ad}/%	A_{ad}/%	FC_{ad}/%	V_{ad}/%
寺河无烟煤	4.46	9.12	82.14	5.91
峻德 1/3 焦煤	1.62	6.78	58.52	33.08

注：M_{ad} 为空气干燥基水分含量；A_{ad} 为空气干燥基灰分含量；FC_{ad} 为固定碳含量；V_{ad} 为空气干燥基挥发分含量．

按照 GB/T 23561.12—2010《煤和岩石物理力学性质测定方法第 12 部分：煤的坚固性系数测定方法》，采用捣碎法测定煤的坚固性系数，并采用 iPore620 型高性能物理吸附分析仪，结合 DFT 理论分析低温 N_2 吸附法（孔径＞2 nm 的孔隙）和低压 CO_2 吸附法（孔径＜2 nm 的孔隙）测定的煤孔隙结构参数，得到煤的孔隙结构参数和坚固性系数如表 2 所示．

表 2　煤孔隙结构参数与坚固性系数

Table 2　Pore structure parameters and consistent coefficient of coal

煤体	低温 N_2 吸附		低压 CO_2 吸附		总比表面积/($m^2\cdot g^{-1}$)	总孔容/($cm^3\cdot g^{-1}$)	孔隙率	坚固性系数
	DFT 比表面积/($m^2\cdot g^{-1}$)	DFT 孔容/($10^{-3}cm^3\cdot g^{-1}$)	DFT 比表面积/($m^2\cdot g^{-1}$)	DFT 孔容/($10^{-3}cm^3\cdot g^{-1}$)				
寺河无烟煤	13.91	13.40	275.90	109.30	289.81	122.70	0.55	1.34
峻德 1/3 焦煤	0.79	1.89	66.35	12.76	67.14	14.65	0.12	1.40

2.3　试验步骤

试验气体为高纯 He 和 CO_2，试验对象为表面无明显裂隙的原煤煤体．试验前测量煤体具体尺寸和质量参数，然后将煤体安装至轴向限位系统内，连接好气路与数据线后开始试验，具体步骤如下．

1) 恒温

考虑到目前煤体吸附变形及吸附膨胀应力相关研究试验温度多采用30 ℃[19,22-23],因此设定试验温度为30 ℃,将轴向限位系统浸入循环水浴箱,直到测力计应变稳定.

2) 施加预应力

旋拧限位杆,使加载杆向下位移,对煤体施加预应力,用于限制煤体轴向变形.直到测力计显示0.5 MPa左右的预应力后,认为压杆与煤体充分接触,煤体受到有效限位.

3) 抽真空

待测力计应变稳定后,为排除装置中水分和空气影响,对试验系统抽真空,连续抽真空12 h以上且测力计应变稳定(1 h应变数据无变化)后,停止抽真空.

4) He标定

向参照罐内充入0.5 MPa的He,参照罐气体压力稳定(1 h压力变化小于0.01 MPa)后将气体充入轴向限位系统,直到气体压力和测力计应力均稳定后,根据高压容积法原理计算轴向限位系统的自由空间体积.

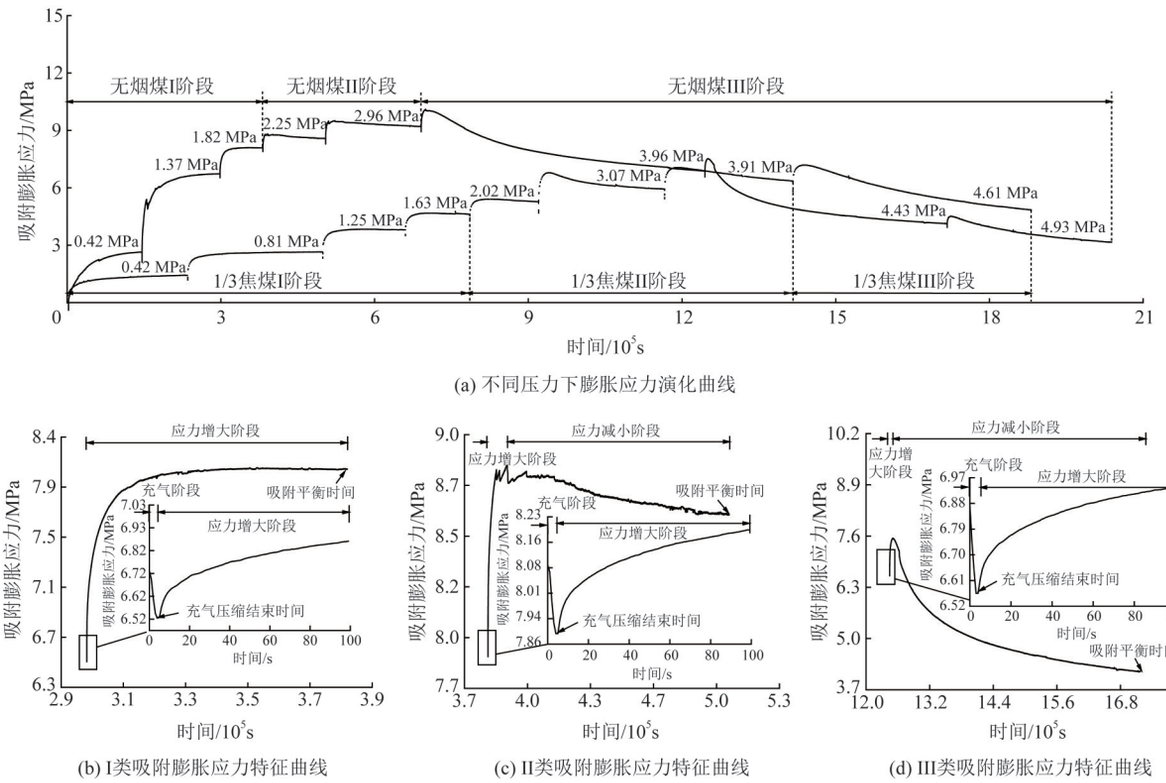
5) CO_2吸附膨胀应力测定

向参照罐充入一定压力的CO_2,待参照罐气体压力稳定后将气体通入轴向限位系统,实时测定试验过程中的气体压力和吸附膨胀应力,直至气体压力和应力均稳定后提高气体压力进行下一压力点的试验.

3 煤体吸附CO_2膨胀应力演化特征

3.1 吸附膨胀应力动态演化规律

由图7的He标定结果可知,气体压力导致的膨胀应力改变值最大仅为0.087 MPa,远小于吸附膨胀应力值,因此本文试验中煤体吸附膨胀应力演化特征研究忽略气体压力对测力计的影响.不同CO_2压力下寺河无烟煤和峻德1/3焦煤的吸附膨胀应力随时间的动态演化曲线如图9所示.



(a) 不同压力下膨胀应力演化曲线

(b) I类吸附膨胀应力特征曲线 (c) II类吸附膨胀应力特征曲线 (d) III类吸附膨胀应力特征曲线

图9 吸附膨胀应力动态演化过程

Fig. 9 Dynamical evolution process of adsorption indnced-swelling stress

从图9a可以看出,寺河无烟煤和峻德1/3焦煤的吸附膨胀应力演化规律基本一致.受吸附膨胀导致的膨胀应力增大[25]、吸附"蚀损"作用诱发的煤力学损伤[26]和充气压缩导致的膨胀应力减小[27]综合影响,整个演化过程可分为充气压缩应力减小、吸附膨胀应力增大、力学损伤应力减小3个阶段,各阶段综合作用导致不同气体压力下煤体的吸附膨胀应力演化曲线分为了3种类型(以寺河无烟煤的吸附膨胀应力演化曲线为例):

1) Ⅰ类吸附膨胀应力特征曲线.如图9b所示,煤体吸附膨胀应力演化曲线可以分为充气压缩应力减小和吸附膨胀应力增大2个阶段.当气

体压力较低时(以 1.82 MPa吸附压力为例),吸附气体对煤体的力学损伤不明显,在轴向限位系统快速充入CO_2后(充气时间<4 s),由于原煤孔隙连通性差,气体受压力梯度作用向煤体内部的孔隙、裂隙渗流,只有少量气体进行扩散和吸附[28],煤体内外气体压力无法快速平衡,较高的外部气体压力产生围压作用[29],使煤体在CO_2气体压力的加载瞬间发生压缩变形,监测到吸附膨胀应力值快速减小. 随着吸附过程持续进行,煤中大量CO_2被吸附后吸附膨胀应力快速增大,进入吸附膨胀应力增大阶段. 但持续吸附导致煤体内外压力梯度逐渐减小,气体分子缓慢扩散进入煤中孔隙进行吸附,使吸附量增大幅度逐渐降低直到吸附平衡,相应的吸附膨胀应力增大速率也逐渐降低,最终趋于一个极限值,该阶段煤体吸附膨胀应力演化曲线具有明显的Langmuir曲线特征(拟合精度$R^2>0.99$).

2)Ⅱ类吸附膨胀应力特征曲线. 如图 9c 所示,膨胀应力特征曲线可以划分为充气压缩应力减小、吸附膨胀应力增大、力学损伤应力减小 3 个阶段. 以 2.25 MPa压力下的吸附膨胀应力特征曲线为例,吸附膨胀应力随时间呈先增大后减小的变化趋势,这是由于随着吸附压力增加,煤体开始受到吸附“蚀损”作用诱发的力学损伤[16-17],导致煤体在较高气体压力作用下开始发生压缩变形,并随着吸附过程气体压力逐渐减小,对应的煤体吸附膨胀应力也逐渐减小并趋于平缓. 由于该压力点下煤体的力学损伤有限,吸附膨胀导致的应力增大值大于力学损伤导致的应力减小值,使吸附平衡后的膨胀应力大于该压力点的初始膨胀应力.

3)Ⅲ类吸附膨胀应力特征曲线. 如图 9d 所示,此类曲线演化特征与Ⅱ类曲线大体相同,同样可以划分为充气压缩应力减小、吸附膨胀应力增大和力学损伤应力减小 3 个阶段. 然而,随着吸附压力进一步增加,一方面煤体因吸附“蚀损”作用引发的力学损伤[16-17]更为显著,导致其受高压气体作用产生的压缩变形更明显,吸附膨胀应力进一步减小;另一方面由于煤中的大量吸附空间已经被CO_2气体分子占据,较高吸附压力下煤中CO_2吸附量的增长幅度逐渐降低[30],致使吸附膨胀应力的增长幅度减小,2 个方面因素此消彼长使得该压力下煤体吸附膨胀应力以力学损伤导致的应力减小为主,吸附平衡后的吸附膨胀应力较初始值明显减小,整体表现为吸附膨胀应力随气体压力的增大而减小.

需要注意的是,由于寺河无烟煤的总孔容、总比表面积及孔隙率均明显大于峻德 1/3 焦煤,导致其具有更强的吸附能力[31],吸附膨胀应力也更大. 同时还能发现,由于峻德 1/3 焦煤的坚固性系数大于寺河无烟煤,力学强度更高,加之其吸附能力相对较弱,使得吸附“蚀损”作用及高压气体压缩作用对煤体的影响减弱,峻德 1/3 焦煤较寺河无烟煤需要更高的吸附平衡压力才能产生Ⅲ类吸附膨胀应力特征曲线.

综上所述,吸附膨胀应力演化规律受煤体吸附特性与力学性能的共同控制,并随气体压力变化呈现阶段性特征. 试验结果表明,寺河无烟煤由于具有更高的微孔发育程度,其吸附膨胀应力最大值达 10.03 MPa,而坚固性系数更高的峻德 1/3 焦煤则相对较低,为 7.20 MPa. 显然,气体吸附行为在煤体流固耦合过程中具有显著影响,吸附引起的膨胀应变与煤基质力学属性共同决定了吸附膨胀应力的最终表现. 从工程实践角度看,吸附膨胀应力对煤体的渗透性演化及吸附变形具有显著影响[9-10]. 在煤层气开采过程中,吸附/解吸引起的应力变化可能影响储层渗透率,进而制约产气效率[5];在煤与瓦斯动力学灾害防控中,吸附膨胀应力的存在加剧了煤体应力集中和能量积聚的潜在风险[32];而在煤层CO_2封存技术中,注入气体引发的吸附膨胀及吸附膨胀应力效应直接影响煤层CO_2可注性及封存安全性[33]. 因此,不论是煤层气高效开采,还是煤与瓦斯动力学灾害,亦或者是煤层CO_2封存技术的研究,都应考虑吸附膨胀应力的显著影响.

3.2　吸附膨胀应力动态演化模型

基于连续介质损伤力学理论和Hooke定律,考虑吸附过程煤体损伤得到单轴限位条件下吸附膨胀应力σ_s与应变ε之间的关系[34]为

$$\sigma_s = E\varepsilon(1-D), \tag{4}$$

式中:E为煤体初始弹性模量,MPa;D为损伤变量,无量纲.

对应的损伤变量D[35]可以表示为

$$D = 1-\frac{\overline{E}}{E}, \tag{5}$$

式中　$\overline{E}$为吸附损伤后煤体弹性模量,MPa.

联立式(4)与式(5)得到限位条件下吸附膨胀应力与应变关系为

$$\sigma_s=\overline{E}\varepsilon=E\varepsilon-E'\varepsilon, \tag{6}$$

式中 E'为试验中煤体已损伤的弹性模量,MPa.

进而得到吸附过程煤的吸附膨胀应力演化模型为

$$\sigma_s(t)=\sigma_p(t)-\sigma'_s(t), \tag{7}$$

式中:$\sigma_s(t)$为煤的实测吸附膨胀应力与时间的函数;$\sigma_p(t)$为不考虑吸附损伤条件下吸附膨胀应力的理论值与时间的函数;$\sigma'_s(t)$为吸附膨胀应力试验中损伤值与时间的函数.

不考虑吸附损伤时,煤体吸附膨胀应力为

$$\sigma_p(t)=E\varepsilon(t)=E\frac{\varepsilon_r b_\varepsilon t}{1+b_\varepsilon t}=\sigma_r\frac{b_\varepsilon t}{1+b_\varepsilon t}, \tag{8}$$

式中:$\varepsilon(t)$为吸附膨胀应变与时间的函数;ε_r为最大吸附膨胀应变,无量纲;b_ε为反映煤体应变值随时间变化快慢的参数,s^{-1};σ_r为最大吸附膨胀应力,MPa;t为吸附时间,s.

CO_2的吸附作用导致煤体强度降低[36],这个作用过程并不是瞬间完成的,因此试验过程中煤体的弹性模量E'是时刻变化的.根据文献[37]研究数据显示,煤在吸附中的弹性模量与时间关系曲线同样具有Langmuir方程形式.因此,可以认为煤体吸附膨胀应力试验中损伤值与时间关系$\sigma'_s(t)$同样具有Langmuir方程形式,即可用下式描述:

$$\sigma'_s(t)=\frac{a'b't}{1+b't}, \tag{9}$$

式中:a'为一定时间下应力损伤的最大值,MPa;b'为反映煤体应力损伤随时间变化快慢的参数,s^{-1}.

将式(7)扩展可得各个压力点下吸附膨胀应力的双Langmuir演化模型为

$$\sigma_{s,i}(t)=\sigma_{p,i}(t)-\sigma'_{s,i}(t)+\sigma_{s,i-1}=\sigma_{r,i}\frac{b_{\varepsilon,i}t}{1+b_{\varepsilon,i}t}-\frac{a'_i b'_i t}{1+b'_i t}+\sigma_{s,i-1},\ (i\geqslant 1,\sigma_{s,0}=0), \tag{10}$$

式中:$\sigma_{s,i}(t)$为第i个压力点下吸附膨胀应力与时间的函数;$\sigma_{p,i}(t)$为第i个压力点下吸附膨胀应力理论值与时间的函数;$\sigma'_{s,i}(t)$为第i个压力点下吸附膨胀应力试验中其损伤值与时间的函数;$\sigma_{s,i-1}$为第$i-1$个压力点吸附平衡时的吸附膨胀应力值,MPa;a'_i为第i个压力点一定时间下损伤值的最大值,MPa;b'_i为第i个压力点下反映煤体损伤值随时间变化快慢的参数,s^{-1};$\sigma_{r,i}$为第i个压力点下的最大吸附膨胀应力,MPa;$b_{\varepsilon,i}$为第i个压力点下煤体应变值随时间变化快慢的参数,s^{-1}.

3.3 模型可靠性验证

现有研究多聚焦于吸附膨胀应力与气体压力之间的关系研究,并建立相应的理论模型[13-15],而关于吸附膨胀应力随时间的动态演化规律及模型研究则相对匮乏,文献[19]提出了吸附膨胀应力动态演化模型,如式(11)所示.

$$\sigma^s=\frac{wRTn_L}{n_m(n_L-n_m)}\cdot\frac{\partial n_m}{\partial t}, \tag{11}$$

式中:σ^s为t时刻的吸附膨胀应力,MPa;w为膨胀耦合系数,mol/m^3;R为理想气体常数,其值为8.314 J/(mol·K);T为试验温度,K;n_L为Langmuir参数,mol/m^3;n_m为煤体实时吸附量,mol/m^3.

采用式(11)得到吸附膨胀应力模型预测值与试验值的对比结果,如图10所示.

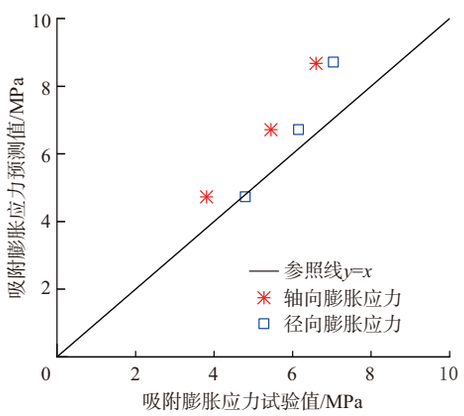


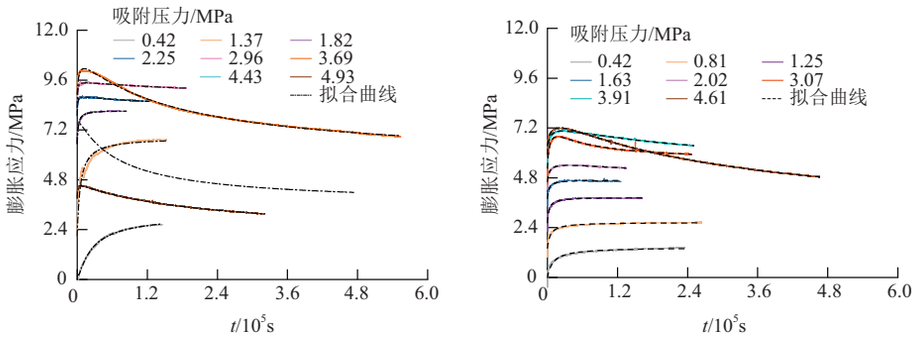
图10 吸附膨胀应力试验结果与模型预测结果的比较[19]

Fig. 10 Comparison of adsorption-induced swelling stress test results with model predictions

由图10可知,式(11)计算的预测值与试验值存在一定误差,且误差随吸附膨胀应力增加逐渐增大,其中轴向吸附膨胀应力预测值与试验值的误差为23%~31%,径向吸附膨胀应力预测值与试验值的误差为1.49%~23.66%.这是因为式(11)将膨胀耦合系数w视为定值,而煤的力学参数在整个吸附过程中并非常量,导致理论计算结果与实际情况存在一定差异[5].

同时,为验证本文模型的准确性,分别对寺河无烟煤和峻德1/3焦煤8个吸附压力下吸附膨胀应力与时间的关系曲线进行拟合,拟合曲线见图11,拟合数据见表3(表中P_{CO_2}为CO_2气体压力,MPa).

由图11和表3可以看出,本文所建的吸附膨胀应力动态演化模型能够较好拟合吸附膨胀应力随时间的演化关系,拟合曲线与实测数据基本吻合,吸附膨胀应力拟合值与试验实测值间的误差最大不超过1.14%,模型拟合精度较高,R^2达到0.93以上.



(a) 无烟煤拟合结果　　(b) 1/3焦煤拟合结果

图 11　吸附膨胀应力模型拟合结果

Fig. 11　Fitting results of adsorption-induced swelling stress model

表 3　模型拟合结果

Table 3　Model fitting results

煤体	P_{CO_2}/MPa	$\sigma_{r,i}$/MPa	b_ε/$10^{-4}s^{-1}$	a'/MPa	b'/$10^{-6}s^{-1}$	$\sigma_{s,i-1}$/MPa	R^2
无烟煤	0.42	3.14	0.40	0	0	0	0.999
	1.37	4.26	1.41	0	0	2.63	0.958
	1.82	1.50	3.88	0.14	16.30	6.72	0.994
	2.25	1.00	6.65	0.60	31.60	8.09	0.947
	2.96	1.26	5.88	0.71	26.20	8.57	0.934
	3.69	2.60	0.91	5.87	8.00	9.19	0.998
	4.43	1.90	2.55	5.02	19.80	6.87	0.994
	4.93	1.26	1.59	2.90	9.64	4.54	0.993
1/3焦煤	0.42	1.45	1.01	0	0	0	0.966
	0.81	1.23	1.90	0	0	1.42	0.968
	1.25	1.21	3.33	0	0	2.65	0.975
	1.63	0.88	4.09	0	0	3.81	0.936
	2.02	0.95	2.77	2.32	1.00	4.62	0.988
	3.07	2.64	2.26	2.33	19.70	5.27	0.993
	3.91	1.43	3.01	2.61	2.51	5.94	0.998
	4.61	1.54	1.48	5.22	2.96	6.35	0.999

4　结　论

1)研发了具有良好的气密性和轴向限位能力的煤体吸附膨胀应力试验装置，能够满足 95% 以上的有效限位，实现 10 MPa 以内的煤体吸附膨胀应力动态测试功能.

2)受吸附膨胀、“蚀损”作用和充气压缩作用综合影响，不同 CO_2 压力下煤体的吸附膨胀应力随时间的动态演化曲线表现出 3 类曲线形式.

3)建立了考虑煤体力学损伤的煤体吸附膨胀应力动态演化双 Langmuir 模型，能够精确拟合吸附膨胀应力随时间的演化关系.

参考文献：

[1] 唐　朝，张遵国，陈　毅，等.基于三重耦合效应的煤体吸附 CO_2 变形解耦分析方法[J].岩石力学与工程学报，2025，44(9)：2432-2443.
TANG Chao，ZHANG Zunguo，CHEN Yi，et al. Decoupling analysis method for deformation of coal adsorption CO_2 based on triple coupling effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2025，44(9)：2432-2443.

[2] 李树刚，李泽帆，刘　鹏，等.煤对 $N_2/CH_4/CO_2$ 混合气体竞争吸附特征与机理研究[J].中国矿业大学学报，2023，52(3)：446-456.
LI Shugang，LI Zefan，LIU Peng，et al. Experimental study of competitive adsorption characteristics and mechanism of $N_2/CH_4/CO_2$ mixture on coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2023，52(3)：446-456.

[3] 刘辉辉，林柏泉，蒋长宝，等.煤体渗透率对多重应力敏感性研究[J].采矿与安全工程学报，2023，40(4)：818-825.
LIU Huihui，LIN Baiquan，JIANG Changbao，et al. Sensitivity of coal permeability to multiple stresses[J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2023，40(4)：818-825.

[4] 祝　捷，姜耀东，赵毅鑫，等.考虑吸附作用的各向异性煤体有效应力[J].中国矿业大学学报，2010，39(5)：699-704.
ZHU Jie，JIANG Yaodong，ZHAO Yixin，et al. Effective stress of anisotropic coal considering adsorption[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2010，39(5)：699-704.

[5] 刘辉辉，于　斌，林柏泉，等.原位煤层抽采多重应力演化规律及对渗透率控制机制[J].岩石力学与工程学报，2023，42(4)：906-917.
LIU Huihui，YU Bin，LIN Baiquan，et al. Evolution of

multiple stresses during in-situ coal seam extraction and its controlling mechanism on permeability[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023,42(4):906-917.

[6] BIOT M A.Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid[J].Journal of Applied Physics,1955,26(2):182-185.

[7] 刘清泉,程远平,李 伟,等.深部低透气性首采层煤与瓦斯气固耦合模型[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增1):2749-2758.
LIU Qingquan, CHENG Yuanping, LI Wei, et al. Mathematical model of coupled gas flow and coal deformation process in low-permeability and first mined coal seam[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(Sup 1):2749-2758.

[8] 李祥春,郭勇义,吴世跃,等.考虑吸附膨胀应力影响的煤层瓦斯流-固耦合渗流数学模型及数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增1):2743-2748.
LI Xiangchun, GUO Yongyi, WU Shiyue, et al.Mathematical model and numerical simulation of fluid-solid coupled flow of coal-bed gas considering swelling stress of adsorption[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(Sup 1):2743-2748.

[9] FAN C J, ELSWORTH D, LI S, et al.Thermo-hydro-mechanical-chemical couplings controlling CH_4 production and CO_2 sequestration in enhanced coalbed methane recovery [J].Energy, 2019, 173(15): 1054-1077.

[10] ZHANG L S, SHAN Y F.Quantitative analysis of fracture roughness and multi-field effects for CO_2-ECBM projects[J].Energies, 2024, 17(12): 2851-2851.

[11] ÉTTINGER I L.Swelling stress in the gas-coal system as an energy source in the development of gas bursts[J].Soviet Mining Science, 1979, 15(5): 494-501.

[12] 王佑安,陶玉梅,王魁军,等.煤的吸附变形与吸附变形力[J].煤矿安全,1993(6):19-26.
WANG Youan, TAO Yumei, WANG Kuijun, et al. Adsorption deformation and adsorption deformation force of coal[J].Safety in Coal Mines, 1993(6): 19-26.

[13] 吴世跃,赵 文.含吸附煤层气煤的有效应力分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(10):1674-1678.
WU Shiyue, ZHAO Wen.Analysis of effective stress in adsorbed methane-coal system[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1674-1678.

[14] DU Q H, LIU X L, WANG E Z, et al.Strength reduction of coal pillar after CO_2 sequestration in abandoned coal mines[J].Minerals, 2017, 7(2): 26.

[15] ZHANG L, LI X C, GAO J X, et al.Creep characteristics and constitutive model of coal under triaxial stress and gas pressure[J].Energy Science & Engineering, 2020, 8(2): 501-514.

[16] 王 磊,陈礼鹏,刘怀谦,等.不同初始瓦斯压力下煤体动力学特性及其劣化特征[J].岩土力学,2023,44(1):144-158.
WANG Lei, CHEN Lipeng, LIU Huaiqian, et al.Dynamic behaviors and deterioration characteristics of coal under different initial gas pressures[J].Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(1): 144-158.

[17] 吴学海,李波波,王 新,等.基于塑性变形的煤体损伤本构关系及渗透率模型研究[J].煤田地质与勘探,2021,49(6):131-141.
WU Xuehai, LI Bobo, WANG Xin, et al.Plastic deformation-based constitutive relation of coal damage and permeability model[J].Coal Geology & Exploration, 2021, 49(6): 131-141.

[18] LIU H H, LIN B Q, MOU J H, et al, Experimental study and modelling of coal stress induced by gas adsorption[J].Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2019, 74: 103092.

[19] ADELINA L, MOHAMMAD A, HOSSEIN M, et al.On swelling stress-strain of coal and their interaction with external stress[J].Fuel, 2022, 311: 122534.

[20] 李杨杨,张搏明,张士川,等.循环荷载下初始损伤煤岩宏-细观破坏特征及劣化机制研究[J].采矿与安全工程学报,2025,42(1):60-72.
LI Yangyang, ZHANG Boming, ZHANG Shichuan, et al.Study on macro-mesoscopic failure characteristics and deterioration mechanism of initial damaged coal rock under cyclic loading[J].Journal of Mining & Safety Engineering, 2025, 42(1): 60-72.

[21] HOOKE R. Lectures de potentia restitutiva, or of spring explaining the power of springing bodies[M]. John Martyn, 2016.

[22] 陈 毅.3种烟煤CO_2吸附/解吸及变形特征对比研究[D].葫芦岛:辽宁工程技术大学,2022.
CHEN Yi.Comparative research on adsorption/ desorption and deformation characteristics of three kinds of bituminous coals under CO_2[D].Huludao: Liaoning Technical University, 2022.

[23] 张遵国,陈 毅,唐 朝,等.煤体CO_2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 characteristies and model of coal adsorp-

tion /desorption on CO_2[J].Journal of China Coal Society,2022,47(8):3128-3137.

[24] 孙训方,方孝淑,关来泰.材料力学(I)(第五版)[M].北京:高等教育出版社,2009:20-21.
SUN Xunfang,FANG Xiaoshu,GUAN Laitai.Materials mechanics (I) (Fifth edition) [M]. Beijing: Higher Education Press,2009:20-21.

[25] 李祥春,郭勇义,吴世跃,等.煤体有效应力与膨胀应力之间关系的分析[J].辽宁工程技术大学学报,2007,26(4):535-537.
LI Xiangchun,GUO Yongyi,WU Shiyue,et al.Relation between effective stress and swelling stress of coal body[J].Journal of Liaoning Technical University,2007,26(4):535-537.

[26] 刘力源,朱万成,魏晨慧,等.气体吸附诱发煤强度劣化的力学模型与数值分析[J].岩土力学,2018,39(4):1500-1508.
LIU Liyuan, ZHU Wancheng, WEI Chenhui, et al. Mechanical model and numerical analysis of mechanical property alterations of coal induced by gas adsorption[J].Rock and Soil Mechanics,2018,39(4):1500-1508.

[27] 张宏虎.煤岩轴向限位吸附膨胀应力演化特征实验研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2024.
ZHANG Honghu. Experimental study on evolution characteristics of axial confined adsorption swelling stress of coal rock [D]. Fuxin: Liaoning Technical University,2024.

[28] 刘延保,曹树刚,李　勇,等.煤体吸附瓦斯膨胀变形效应的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(12):2484-2491.
LIU Yanbao,CAO Shugang,LI Yong,et al.Experimental study of swelling deformation effect of coal induced by gas adsorption[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (12) : 2484-2491.

[29] 张遵国,曹树刚,郭　平,等.原煤和型煤吸附-解吸瓦斯变形特性对比研究[J].中国矿业大学学报,2014,43(3):388-394.
ZHANG Zunguo,CAO Shugang,GUO Ping,et al. Comparison of the deformation characteristics of coal in gas adsorption-desorption process for raw and briquette coals[J].Journal of China University of Mining & Technology,2014,43(3):388-394.

[30] 张遵国,李丹丹,陈　毅,等.气体压力与粒径对煤CO_2动态扩散-吸附特征影响研究[J].矿业科学学报,2024,9(4):493-503.
ZHANG Zunguo,LI Dandan,CHEN Yi,et al.Effect of gas pressure and particle size on dynamic adsorption- diffusion characteristics of CO_2 in coal[J].Journal of Mining Science and Technology,2024,9(4):493-503.

[31] 陈　毅,张遵国,唐　朝,等.煤体孔隙结构与高压CO_2吸附的相互作用试验研究[J/OL].安全与环境学报,1-11[2025-10-01].https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2025.0276.
ZHANG Zunguo,CHEN Yi,TANG Chao,et al. Research on the interaction between pore structure and adsorption characteristics of high-pressure CO_2 in coal [J/OL].China Safety Science Journal,1-11[2025-10-01].https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2025.0276.

[32] XU L J, FAN C J, LUO M K, et al. Elimination mechanism of coal and gas outburst based on geo-dynamic system with stress-damage-seepage interactions [J]. International Journal of Coal Science & Technology,2023,10(1):74.

[33] 桑树勋.二氧化碳地质存储与煤层气强化开发有效性研究述评[J].煤田地质与勘探,2018,4(5):1-9.
SANG Shuxun. Research review on technical effectiveness of CO_2 geological storage and enhanced coalbed methane recovery[J].Coal Geology & Exploration,2018,4(5):1-9.

[34] 徐吉钊.液态CO_2循环冲击致裂煤体孔隙结构及损伤力学特征研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
XU Jizhao.Study of pore evolution and damage mechanical characteristics of coals under the effect of liquid CO_2, cyclic shock fracturing[D].Xuzhou: China University of Mining and Technology,2020.

[35] 荣腾龙,刘克柳,关　灿,等.采动应力-吸附/解吸耦合作用下煤体损伤本构模型[J].中国矿业大学学报,2023,52(4):727-738.
RONG Tenglong, LIU Keliu, GUAN Can, et al. Damage constitutive model of coal under the combined effect of mining stress and sorption/desorption [J].Journal of China University of Mining & Technology,2023,52(4):727-738.

[36] NIU Q H,CAO L W,SANG S X,et al.Experimental study on the softening effect and mechanism of anthracite with CO_2 injection[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138: 104614.

[37] 贺　伟.不同煤阶煤体吸附储存CO_2膨胀变形特性试验研究[D].太原:太原理工大学,2018.
HE Wei.Experimental study on swelling characteristics of CO_2 adsorption and storage in different coal rank [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2018.

(责任编辑　宋　爽)