



循环荷载下含瓦斯煤力学特性及应变场演化规律研究

王磊 钟浩 范浩 邹鹏 商瑞豪 晋康

引用本文：

王磊, 钟浩, 范浩, 等. 循环荷载下含瓦斯煤力学特性及应变场演化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 90–101.
WANG Lei, ZHONG Hao, FAN Hao. Study on the mechanical properties and strain field evolution of gas-bearing coal under cyclic loading[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 90–101.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-0328>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分级循环加卸载煤体变形破坏特征试验研究

Experimental research on deformation and failure characteristics of coal by staged cyclic loading and unloading
煤炭科学技术. 2021, 49(4): 199–205 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.04.024>

冲击荷载下煤的动态力学性质研究

Study on dynamic mechanical properties of coal under impact loading
煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/16c655c5-fe13-4725-afd1-099c1d129a80>

单向卸载条件下组合煤岩力学特性及声发射演化规律

Mechanical properties and acoustic emission evolution of coal–rock combination under unidirectional unloading condition
煤炭科学技术. 2023, 51(11): 71–83 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-2040>

液氮冻融循环作用下饱水煤样力学特性试验研究

Experimental study on mechanical properties of saturated coal samples subjected to freezing–thawing cycles of liquid nitrogen
煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/fade14c1-af3e-41be-952a-41f8f05ab60e>

砂岩循环加卸载下损伤特性及声发射Kaiser效应研究

Study on damage characteristics and acoustic emission Kaiser effect of sandstone under cyclic loading and unloading conditions
煤炭科学技术. 2019(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3f19b3bf-e289-482e-9959-3a9c200dc6fe>

层理煤岩浸水前后力学性质研究

Study on mechanical properties of coal before and after flooding considering bedding direction
煤炭科学技术. 2023, 51(10): 97–108 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-0330>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

安全科学与工程



王磊, 钟浩, 范浩, 等. 循环荷载下含瓦斯煤力学特性及应变场演化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 90–101.

WANG Lei, ZHONG Hao, FAN Hao, et al. Study on the mechanical properties and strain field evolution of gas-bearing coal under cyclic loading[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 90–101.

移动扫码阅读

循环荷载下含瓦斯煤力学特性及应变场演化规律研究

王磊, 钟浩, 范浩, 邹鹏, 商瑞豪, 晋康

(安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽淮南 232001)

摘要: 为研究循环荷载下含瓦斯煤力学特性及应变场演化规律, 利用 MTS816 岩石力学试验系统和自主研制的含瓦斯煤气固耦合装置开展循环加卸载条件下含瓦斯煤力学特性试验, 分析循环加卸载下煤样强度和变形特性, 并结合数字图像相关(DIC)技术探究含瓦斯煤应变场演化规律。结果表明: ①循环加卸载作用下, 加卸载曲线之间不重合, 形成滞回环, 且随着循环次数的增加, 滞回环面积逐渐增大, 并向着应变增大的方向逐渐移动; 不同瓦斯压力的煤样在循环荷载作用下均呈明显的脆性破坏。②循环加卸载作用下, 随瓦斯压力升高, 煤样峰值强度降低, 加载变形模量和卸载变形模量均增大, 且卸载变形模量始终大于加载变形模量; 随着循环次数的增加, 变形模量差值逐渐减小并最终在 0~0.1 GPa。③循环加卸载条件下煤样不可逆应变与循环次数之间呈“初始、稳定、加速扩展”的 3 阶段变化特征, 曲线整体从 L型向 U型趋势发展, 累计不可逆应变与循环次数之间呈快速增加、缓慢增加、快速增加的趋势, 不可逆应变与累积不可逆应变均随瓦斯压力增大而增加。④在低瓦斯压力下, 煤样应变集中区主要为单一竖向应变集中带, 随瓦斯压力增大, 局部应变集中带逐渐由竖向单一向无序复杂转变; 瓦斯压力越大, 应变场波动程度越剧烈且剧烈程度主要集中在中部区域; 高瓦斯压力下, 随瓦斯压力升高, 峰值点的个数越多, 应变越大。

关键词: 循环加卸载; 含瓦斯煤; 力学特性; 数字图像相关(DIC); 应变场演化

中图分类号: TD713 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)06-0090-12

Study on the mechanical properties and strain field evolution of gas-bearing coal under cyclic loading

WANG Lei, ZHONG Hao, FAN Hao, ZOU Peng, SHANG Ruihao, JIN Kang

(State Key Laboratory of Mine Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mine, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties and strain field evolution of gas-bearing coal under cyclic loading, the mechanical properties of gas-bearing coal under cyclic loading and unloading conditions were tested with the Rock Mechanics Test (MTS816) system and the independently developed gas-bearing coal gas-solid coupling device. The strength and deformation characteristics of coal samples under cyclic loading and unloading were analyzed, and the strain field evolution of gas-bearing coal was investigated with digital image correlation (DIC) technology. The results indicated that: ① Under the action of cyclic loading and unloading, the loading and unloading curves did not coincide with each other, forming a hysteresis loops. With the increase in the number of cycles, the area of the hysteresis loops gradually increased, and gradually moved towards the direction of increasing strain. Coal samples with varying gas pressures exhibited significant brittle failure under cyclic loading. ② Under the action of cyclic loading and unloading, the peak strength of coal samples decreased, and the loading and unloading deformation modulus increased with the increasing gas pressure. The unloading deformation modulus was always greater than the loading deformation modulus. As the number of cycles increased, the difference in deformation mod-

收稿日期: 2024-03-18 责任编辑: 宫在萍 DOI: 10.12438/cst.2024-0328

基金项目: 安徽省科技重大专项资助项目(202203a07020010); 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室开放课题资助项目(SKLMRDPC21KF09)

作者简介: 王磊(1980—), 男, 山东济宁人, 教授, 博士生导师。E-mail: leiwang723@126.com

通讯作者: 范浩(1992—), 男, 安徽淮北人, 讲师, 工学博士。E-mail: fanhao2014@126.com

ulus gradually decreased and eventually fell within the range of 0 to 0.1 GPa. ③ Under cyclic loading and unloading conditions, the trend between the irreversible strain of coal samples and the number of cycles was a three-stage pattern of “initial, stable and accelerated expansion”, and the overall curve progressed from an L-shape to a U-shape. The trend between the cumulative irreversible strain and the number of cycles was rapidly increasing, slowly increasing and rapidly increasing, and both irreversible strain and cumulative irreversible strain increased with increasing gas pressure. ④ Under low gas pressure, the strain concentration area of coal samples was mainly a single vertical strain concentration zone. As the gas pressure increased, the local strain concentration zone gradually transitioned from vertical single to disordered and complex. The higher the gas pressure, the more pronounced the strain field fluctuation and the intensity was concentrated in the central region. At high gas pressures, the greater the number of peak points, the greater the strain with increasing gas pressure.

Key words: cyclic loading and unloading; gas-bearing coal; mechanical properties; digital image correlation(DIC); strain field evolution

0 引 言

由巷道开挖、采煤、爆破等状态产生的扰动作用使煤体处于反复加卸载过程^[1-3], 易引起煤岩失稳进而给煤矿安全生产带来极大威胁^[4-6]。此外, 随着煤矿开采深度不断增加, 煤层瓦斯压力及含量不断增大, 在瓦斯作用下, 煤岩力学响应特征发生显著变化^[7-8], 因此, 研究循环荷载下含瓦斯煤力学特性及应变场演化规律对深部煤矿开采灾害防控具有重要意义。国内外相关学者针对煤岩循环加卸载试验开展了诸多研究。李欣慰等^[9]通过对砂岩进行单轴加载和单轴循环加载试验, 得到循环加卸载下砂岩变形破坏特征与能量演变规律, 并提出能反映各个循环损伤发展的损伤变量。杨小彬等^[10]通过对比不同加载方式下砂岩变形, 发现循环加卸载产生变形略小于单向加载, 且裂隙发育形式较单向加载也更为复杂。刘忠玉等^[11]探讨了不同层理方向的煤岩在循环荷载条件下的损伤破坏机制, 得到不同层理煤岩的变形在循环荷载作用下表现出各向异性。王天佐等^[12]对红砂岩开展不同循环加卸载路径下的试验研究, 得到恒下限循环加卸载下岩石平均抗压强度较单轴压缩试验有所提高。赵宏刚等^[13]对砂岩开展不同循环加卸载速率的试验研究, 得到加载变形模量和卸载变形模量均增大, 且随循环次数增加, 变形模量增加速度逐渐变缓。HU 等^[14]研究了孔隙压力下循环加卸载过程中应力下限对砂岩变形特性的影响, 得到循环荷载作用下, 应力下限的增加会降低峰值强度和累计不可逆应变, 加速砂岩破坏。LIU 等^[15]建立了一种新的基于能量耗散的损伤本构模型来描述岩石在循环荷载下的行为, 首次提出并定义了压实系数。大量研究表明, 瓦斯含量及压力对煤体力学特性有着不可忽视的影响^[16-18]。赵洪宝等^[19-20]通过对含瓦斯煤开展单轴及三轴压缩试验, 得到瓦斯的存在增加了煤样的脆性, 降低了煤样的强度。高保彬等^[21-22]对含瓦斯煤力学性质做了大量的研究, 试验结果表明, 瓦斯压力对煤的力学性质具有明显

的弱化作用。王登科等^[23]对含瓦斯煤开展了动态压缩试验, 得到瓦斯气体的存在促进受载含瓦斯煤的裂隙扩展和贯通, 且裂隙数量及网络复杂程度随瓦斯压力升高均增大。蒋长宝等^[24]基于加卸载速度影响下的含瓦斯煤及渗透特性进行试验研究, 与无瓦斯煤样相比, 有瓦斯煤样在加卸载条件下强度更低、破坏瞬间变形模量变化率更大、扩容现象更明显。陈结等^[25]开展了 6 种应力路径下含瓦斯煤轴向加卸载试验, 得到其不同应力路径下含瓦斯煤的力学特性表现各异。LIU 等^[26]研究了含瓦斯煤动态力学特性, 并结合 CT 扫描系统, 定量表征不同初始瓦斯压力下煤样的裂隙扩展规律, 揭示了煤样在动静组合加载条件下瓦斯对力学参数和裂纹扩展的劣化机理。

以往研究大多都是将煤样置于密闭空间吸附并进行试验, 无法实时观测含瓦斯煤裂纹扩展演化规律。鉴于此, 笔者利用 MTS816 岩石力学试验系统和自主研制的具有可视化功能的气固耦合装置开展含瓦斯煤循环加卸载试验, 分析不同瓦斯压力下煤样力学性质和变形特性, 并基于数字图像相关(DIC)技术获取循环加卸载条件下含瓦斯煤表观变形场演化信息, 分析含瓦斯煤变形场演化规律。研究结果可为井下瓦斯灾害预警及防控提供重要的理论依据。

1 试样制备及试验方案

1.1 试样制备

试验采用 50 mm×50 mm×100 mm(长×宽×高)的长方体煤样, 要求其两端平整度小于 0.5%, 并通过非金属超声波检测仪, 剔除有明显损伤和波速偏差范围超过 10% 的煤样, 并利用 X 射线衍射对其进行分析, 试验结果如图 1 所示, 煤样的矿物成分主要是高岭石、石英石和方解石, 其质量分数分别为 55.3%、36.1% 和 8.6%。最后, 于符合要求的煤样表面制作人工散斑场, 如图 2 所示。

1.2 试验设备

试验自主研制的可视化气固耦合装置, 其结构如图 3a 所示, 罐体采用高强度表面镀铬合金, 压力

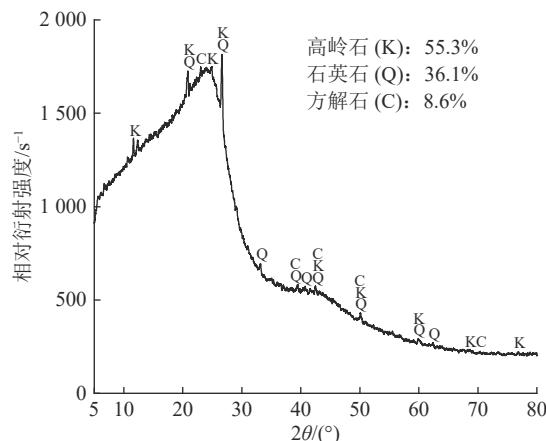


图 1 煤样的 X 射线衍射图谱

Fig.1 X-ray diffraction pattern of coal sample



图 2 散斑试样

Fig.2 Speckle sample

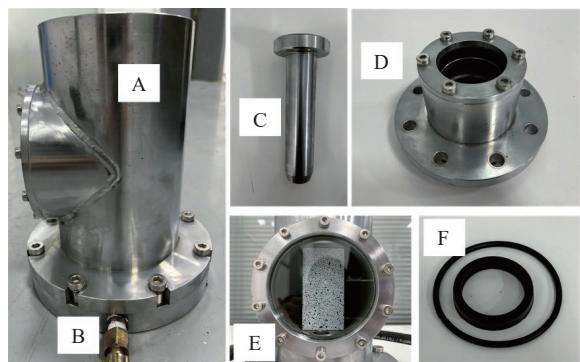
密封盖与罐体之间采用螺栓与密封圈双重密封方式, 增强了系统的密封性; 可视界面选用耐高压硼硅玻璃, 可承受最大压力为 6 MPa。该装置可以与 MTS816 岩石力学实验系统^[27]配合实现对标准煤岩试件在气体环境下的轴向加载, 如图 3b 所示, 并配合高清摄像机采集受载含瓦斯煤破裂过程的图像信息, 考虑到实际安全问题, 本试验气压最高为 4 MPa。

1.3 试验方案

受巷道掘进、工作面回采及覆岩运移的影响, 巷道围岩通常处于反复加卸载的应力状态^[28], 故本试验针对不同瓦斯压力(0, 1, 2, 3, 4 MPa)煤样开展循环加卸载试验。试验划分了 5 组不同瓦斯梯度, 每组包括 3 个平行试样, 其中, 所使用的瓦斯气体为纯度 99.99% 的 CH₄(下文统称瓦斯), 试验方案如下:

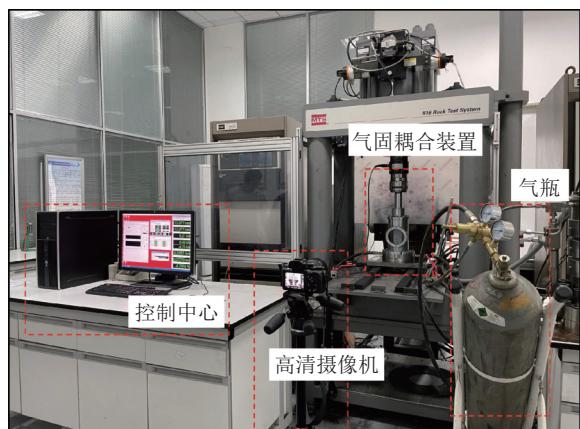
1) 将待测煤样置于气固耦合装置内进行瓦斯吸附, 充分吸附保压 24 h 后开展试验^[29-30]。

2) 首次以 2 MPa 为目标值, 加载到目标值后进行卸载, 为避免试样端面与试验机压头分离对试验结果产生影响, 当轴向荷载降低至 1 MPa 时, 停止卸载, 进行下一阶段的循环试验, 之后每次循环上限增加 1 MPa, 直至试样破坏。具体加卸载应力路径如下: 0→2 MPa→1 MPa→3 MPa→1 MPa→4 MPa→1 MPa→5 MPa→1 MPa→……, 试验过程中采用位移控制, 加卸载速率均为 0.005 mm/s, 其应力路径如图 4 所示。



A—罐体；B—气孔；C—压杆；D—压力密封盖；E—钢化玻璃；F—密封圈

(a) 气固耦合装置结构



(b) 岩石力学实验系统

图 3 实验系统

Fig.3 Test system

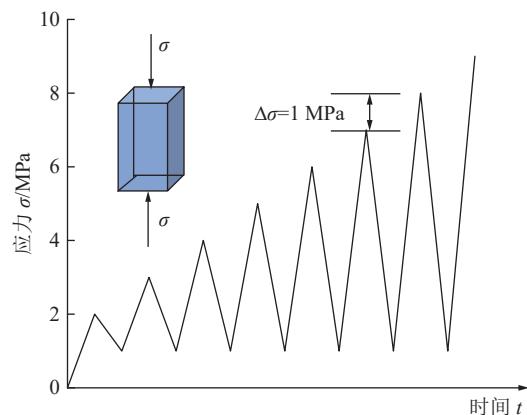


图 4 循环加卸载应力路径示意

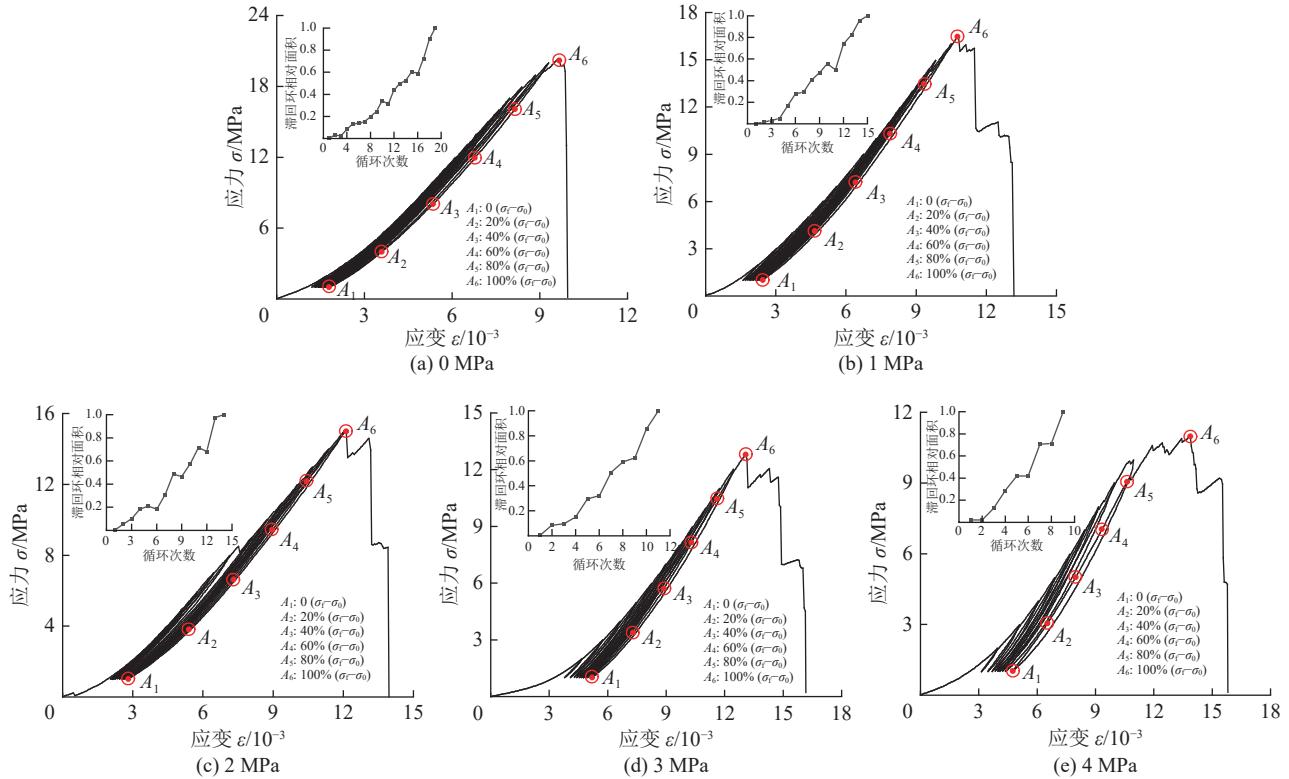
Fig.4 Schematic diagram of cyclic loading and unloading stress paths

2 强度及变形特征

2.1 应力-应变曲线

不同瓦斯压力煤样在循环加卸载条件下的应力-应变曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 循环加卸载下不同瓦斯压力



注: 对最后一次加载曲线的最大值(σ_f)减去卸载的最小值(σ_0), 将中间部分均匀分成5等份, 得到6个监测点位置。

图5 循环加卸载下不同瓦斯压力煤样应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of coal samples under different gas pressures under cyclic loading and unloading

煤样的应力-应变曲线发展趋势基本一致, 加载曲线与卸载曲线并未完全重合, 而是略低于前一个加载曲线, 其曲线之间存在明显滞后性, 表明加卸载过程中产生了塑性变形。相邻加卸载曲线相交重合处围成的区域形成塑性滞回环, 随着循环次数的增加, 塑性滞回环会向着应变增大的方向不断移动, 其原因是煤体裂隙结构面逐级被压密与啮合所致。对滞回环面积进行归一化处理, 如图5所示, 随循环次数增加, 滞回环面积逐渐增大, 呈正相关, 表明含瓦斯煤在循环加卸载过程中的能量损耗也随之增大。峰值应力后, 曲线急剧下降, 表现出明显的脆性破坏。此外, 随瓦斯压力升高, 煤样总循环次数减少, 结果如图6所示。不同瓦斯压力下煤样力学参数见表1。

2.2 峰值强度

循环加卸载条件下煤样峰值强度随不同瓦斯压力的变化关系如图7所示, 煤样在无瓦斯条件下的峰值强度平均值为20.90 MPa, 当瓦斯压力增加至1、2、3、4 MPa时, 煤样的平均峰值强度分别减小至16.62、14.60、12.04、10.23 MPa, 较无瓦斯吸附条件下分别下降21.14%、45.12%、52.13%、64.15%。可见, 煤样的峰值强度随瓦斯压力增加呈下降趋势, 表明瓦斯对煤样的强度劣化作用明显, 这也与文献

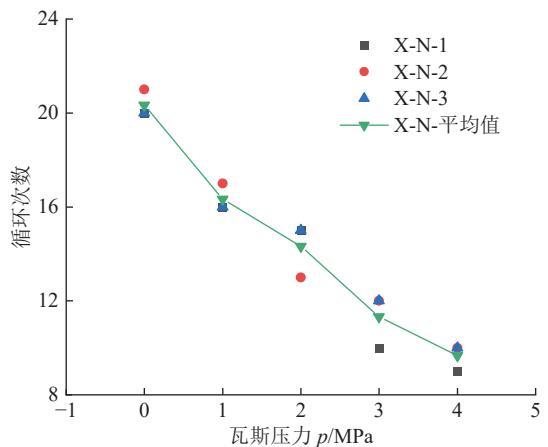


图6 循环次数与瓦斯压力的关系

Fig.6 Relationship between number of cycles and gas pressure

[20,22]的试验结果一致。究其原因, 随着瓦斯压力增大, 煤体内部游离态的瓦斯会对微裂隙产生压力作用越大, 其分子越易楔开并进入大于或相当于瓦斯气体分子尺度的裂隙^[31], 促进煤体内部孔裂隙发育, 进而导致煤体承载能力减弱。

2.3 变形模量

变形模量是反映岩石抵抗变形能力的重要指标。由上述试验结果可知, 循环加卸载试验的应力-应变曲线中加载段与卸载段不重合, 认为煤样在此过程

表1 含瓦斯煤循环加卸载试验结果
Table 1 Test results of cyclic loading and unloading of gas-containing coal

瓦斯压力/MPa	试样编号	峰值强度/MPa	峰值强度均值/MPa	峰值应变/ 10^{-3}	峰值应变均值/ 10^{-3}	循环次数
0	X-0-1	20.79	20.90	9.4	9.9	20
	X-0-2	21.57		9.7		21
	X-0-3	20.33		10.6		20
1	X-1-1	16.47	16.62	11.8	11.4	16
	X-1-2	17.32		13.5		17
	X-1-3	16.07		8.9		16
2	X-2-1	15.08	14.60	13.5	12.4	15
	X-2-2	13.68		10.9		13
	X-2-3	15.05		12.9		15
3	X-3-1	10.98	11.97	11.9	13.3	10
	X-3-2	12.92		13.1		12
	X-3-3	12.10		14.8		12
4	X-4-1	9.66	10.23	14.3	13.9	9
	X-4-2	10.55		15.0		10
	X-4-3	10.48		12.5		10

注: X-0-1表示循环加卸载试验瓦斯压力为0 MPa编号为1的煤样,以此类推。

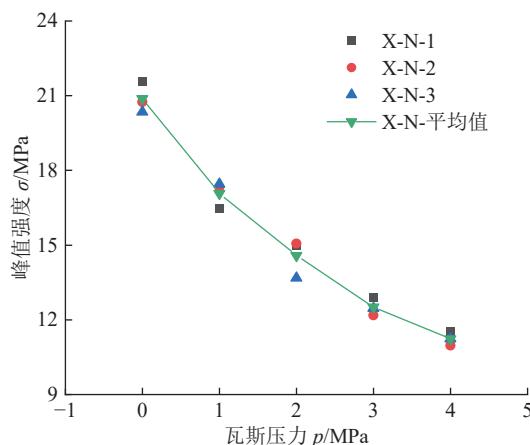


图7 循环加卸载条件下煤样峰值强度与瓦斯压力关系
Fig.7 Relationship between peak intensity and gas pressure of coal samples for cyclic loading and unloading

中存在2种变形模量^[32],即加载变形模量 E_L 和卸载变形模量 E_{UL} ,计算方法如下:

$$E_L = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{L,\min}}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{L,\min}} \quad (1)$$

$$E_{UL} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{UL,\min}}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{UL,\min}} \quad (2)$$

式中: E_L 为加载变形模量, GPa; E_{UL} 为卸载变形模量, GPa; σ_{\max} 为每次循环的最大轴向应力, MPa; $\sigma_{L,\min}$ 为每次循环加载段最小轴向应力, MPa; $\sigma_{UL,\min}$ 为每次循环卸载段最小轴向应力, MPa; ε_{\max} 为 σ_{\max} 对应的轴向应变;

轴向应变; ε_{\max} 为 σ_{\max} 对应的轴向应变; $\varepsilon_{L,\min}$ 为 $\sigma_{L,\min}$ 对应的轴向应变; $\varepsilon_{UL,\min}$ 为 $\sigma_{UL,\min}$ 对应的轴向应变。

图8是不同瓦斯压力下 E_L 和 E_{UL} 随循环次数的变化关系,由图8可知, E_L 和 E_{UL} 均随循环次数的增加而增大,其中 E_L 先陡增后平稳增加, E_{UL} 初始以较大值持续平稳增加。不同瓦斯压力下的 E_L 和 E_{UL} 变化趋势基本一致,均随瓦斯压力增加而降低,其中瓦斯压力为1 MPa煤样较无吸附煤样的变形模量下降程度最为显著,其末次循环过程的 E_L 和 E_{UL} 分别从2.53 GPa和2.59 GPa降至1.89 GPa和1.95 GPa,可见,瓦斯的存在大大削弱了煤体抵抗变形的能力,分析可知,煤体吸附瓦斯后,瓦斯分子进入煤样的孔隙中,形成孔隙压力,对煤样的力学结构产生一定程度的“蚀损”,使得煤体骨架产生变形,进而引起煤体孔隙裂隙变形膨胀,最终降低煤体抵抗变形的能力。

引入变形模量差值 ΔE 对 E_L 和 E_{UL} 之间的变化关系进行描述^[13],其计算公式为

$$\Delta E = E_{UL} - E_L \quad (3)$$

ΔE 与循环次数之间的变化关系如图9所示。可以看出, ΔE 均大于0,即卸载变形模量大于加载变形模量,且随着循环次数的增加差值逐渐减小。具体来看,前2~3次循环过程中 ΔE 发生骤降,从第4次循环后曲线逐渐趋于平稳,其 ΔE 基本位于0~0.1 GPa。分析其原因,前期随着轴向载荷的增加,其内部孔隙

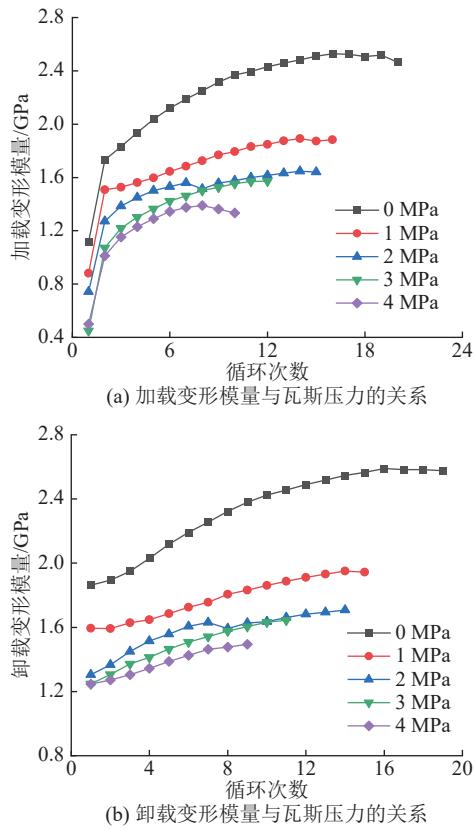


图 8 循环加卸载条件下煤样变形模量与瓦斯压力的关系

Fig.8 Relationship between deformation modulus and gas pressure of coal samples under cyclic loading and unloading conditions

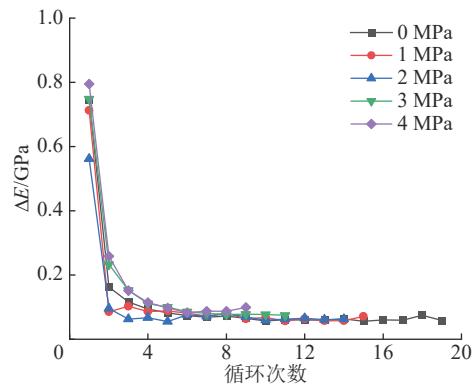


图 9 变形模量差值随循环次数的关系

Fig.9 Difference in deformation modulus function of number of cycles

和微裂隙被压密, 抵抗变形能力增强; 随后进入卸载阶段, 由于产生塑性变形, 使得煤样无法回到初始状态, 部分孔隙和裂缝无法完全重新打开, 试样更为密实, 变形模量显著增大, 此时 ΔE 较大。随着循环次数的增加, 试样内部闭合裂隙逐渐增多, 试样刚度增大, 进入到弹性变形阶段后, 轴向应力的变化对变形模量的影响逐渐减弱。因此, 此阶段的变形模量曲线逐渐平缓, ΔE 逐渐偏小。

2.4 不可逆应变和累积不可逆应变

2.4.1 不可逆应变

煤样受到外力作用会产生变形, 撤去外力后物体逐渐从变形中恢复, 表现出弹性特征。由于煤样的材料属性, 其内部微孔隙或微裂隙产生的应变以及次生裂纹的扩展在卸载后不可恢复的, 称为塑性应变(即不可逆应变)^[14,33], 如图 10 所示, 计算方法如下:

$$\Delta\epsilon_{(i)}^p = \epsilon_{(i)}^{\text{end}} - \epsilon_{(i)}^{\text{beg}} \quad (4)$$

$$\epsilon_{(i)}^p = \sum_{i=1}^n \Delta\epsilon_{(i)}^p \quad (5)$$

式中: $\Delta\epsilon_{(i)}^p$ 为单个循环过程中轴向塑性应变的增量(即不可逆应变), i 为该循环的次数; $\epsilon_{(i)}^p$ 为累积不可逆应变; $\epsilon_{(i)}^{\text{end}}$ 为第 i 个循环加载段终点对应的轴向应变; $\epsilon_{(i)}^{\text{beg}}$ 为第 i 个循环加载段起始点对应的轴向应变。

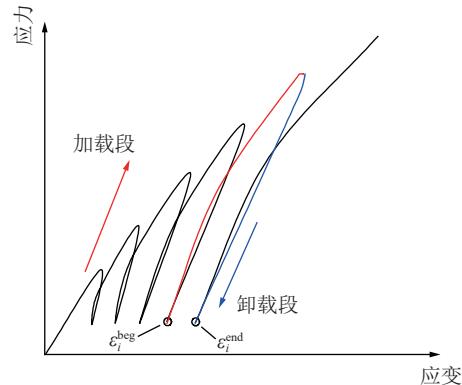


图 10 不可逆应变示意

Fig.10 Schematic diagram of irreversible deformation calculation

通过上述处理, 得到轴向不可逆应变与循环次数之间的关系, 如图 11 所示。整体上看, 不可逆应变与循环次数的变化曲线大致可以分为 3 个阶段: ① 初始阶段: 此阶段的煤体内部原生微裂纹处于张开状态, 随着轴向应力增加, 裂隙逐渐闭合, 此时不可逆应变较大; ② 稳定阶段: 煤体新裂纹开始萌生, 逐渐扩展和贯通, 在此阶段内循环作用产生的不可逆应变在逐渐下降后趋于稳定, 且均在 0~0.2 区间内浮动, 其中稳定阶段循环次数占总循环比例最大, 约为 70%; ③ 加速扩展阶段: 上限荷载接近峰值强度时, 裂纹迅速扩展并相互连接, 不可逆应变陡增。

此外, 随瓦斯压力增大, 曲线整体从 L 型向 U 型趋势发展, 分析其原因可能是, 含瓦斯煤体由于其孔隙内部吸附大量的瓦斯气体, 孔隙结构发生改变, 且随瓦斯压力升高, 微裂纹的扩展使瓦斯气体运移通道增加^[34-35], 临近破坏时, 煤样内部微裂纹迅速扩展、贯穿, 瓦斯分子进入煤样内部增多, 造成能量积聚,

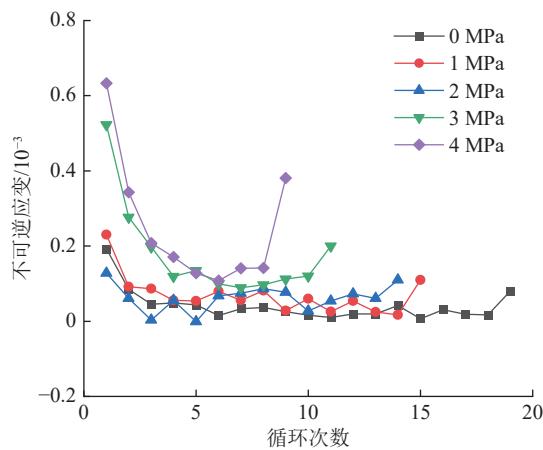


图 11 不可逆应变与循环次数的关系

Fig.11 Relationship between irreversible strain and number of cycles

进一步降低煤骨架支撑能力,导致破坏时不可逆应变增大,且瓦斯压力越大,破坏时产生的不可逆应变增幅越明显。

2.4.2 累积不可逆应变

循环加卸载条件下的含瓦斯煤累计不可逆应变与循环次数之间关系如图 12 所示。不同瓦斯压力下煤体累积不可逆应变的变化规律基本一致,均呈先快速增加、再缓慢增加最后快速增加的趋势。早期试样内部孔隙或裂隙被压密,累积不可逆应变快速增长;随着应力的增加,试样逐渐压实,变形趋于稳定,累积不可逆变形进入稳定增长阶段;随着荷载持续增加,试样中的损伤逐渐累积,其内部裂纹快速扩展,导致不可逆应变陡增。此外,在瓦斯压力的影响下,随瓦斯压力的升高,累积不可逆应变越大。无瓦斯煤样经历 8 次循环后,累积不可逆应变为 0.49×10^{-3} ,而瓦斯压力为 1、2、3、4 MPa 的煤样累积不可逆应变分别为 0.73×10^{-3} 、 0.94×10^{-3} 、 1.44×10^{-3} 、

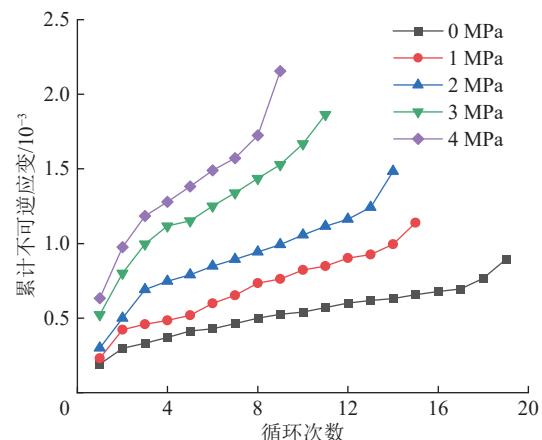


图 12 累计不可逆应变与循环次数的关系

Fig.12 Relationship between cumulative irreversible strain and number of cycles

1.72×10^{-3} ,较无瓦斯煤样分别增加了 47.2%、88.8%、188.4%、244.5%。表明瓦斯对煤样内部产生了损伤,加速了裂隙扩展,且瓦斯压力越大,损伤程度越大。

3 应变场演化规律

3.1 应变场演化规律

基于数字图像相关(DIC)技术对含瓦斯煤循环加卸载下的应变场演化进行分析,该技术相较于传统的辅助光学测量技术,具有试验方法简单、非接触、精度高、测量范围广、不易受外界影响等优点^[36-37]。因此,利用高清摄像机对试验全过程进行拍摄,选取加卸载阶段关键时刻相对应的图像通过 DIC 技术进行处理,得到其不同瓦斯压力下煤样应变场演化过程如图 13 所示。

以循环下限应力为 σ_0 ,峰值应力为 σ_f ,循环下限应力至峰值应力差的 20% 为增量设置监测点 A^* ,值得注意的是,监测点位于最后一次循环应力-应变曲线上,其具体位置已于图 5 中标注。

无瓦斯吸附时,煤样在第 19 次循环过程中到达监测点 A_1 时刻,所对应的应变场无明显波动。随着荷载的增加,在监测点 A_2 时刻煤样中部出现应变集中区域,随着煤样内部裂隙扩展发育,到达监测点 A_4 时刻,应变集中区域沿轴向加载方向逐渐延伸形成条状的应变带,随着裂纹不断发育,试样到达峰值强度(监测点 A_6),应变带进一步深化,上下两端沿加载方向快速扩展,形成一条竖向高应变带。在瓦斯压力为 1、2 MPa 时,监测点 A_1 时刻,应变场无明显波动,随着轴向应力增加,到达监测点 A_2 时刻,在煤样底部率先出现应变集中区域,随着荷载增加,到达监测点 A_4 时刻,应变集中区域增多,且煤样右侧出现高应变集中区域,可见,应力集中区域发生转移,说明该处的裂隙发育扩展阈值比上下两侧裂纹扩展所需应力值小,导致煤样内部应力分布发生变化,形成新的受力平衡状态。随着轴向应力持续增大,应变带不断扩展延伸,到达峰值强度(监测点 A_6),局部应变带依次连接贯通并合并成贯通的高应变集中带。瓦斯压力为 3 MPa 时,煤样在第 11 次循环 A_3 时刻试样表面连续出现 2 处竖向应变集中带,随着轴向应力增加,到达监测点 A_5 时刻,局部集中应变带持续增加,且逐渐发展为高应变带,轴向应力达到峰值(监测点 A_6)时,垂直高应变带与相邻应变带合并成倾斜应变集中带,最终形成贯穿高应变带。瓦斯压力为 4 MPa 时,在到达监测点 A_3 时刻,可以明显观察到,其局部应变带在同一时刻较其他瓦斯压力下明显增多,且呈无规则分布。随着荷载的增加,应变集中区

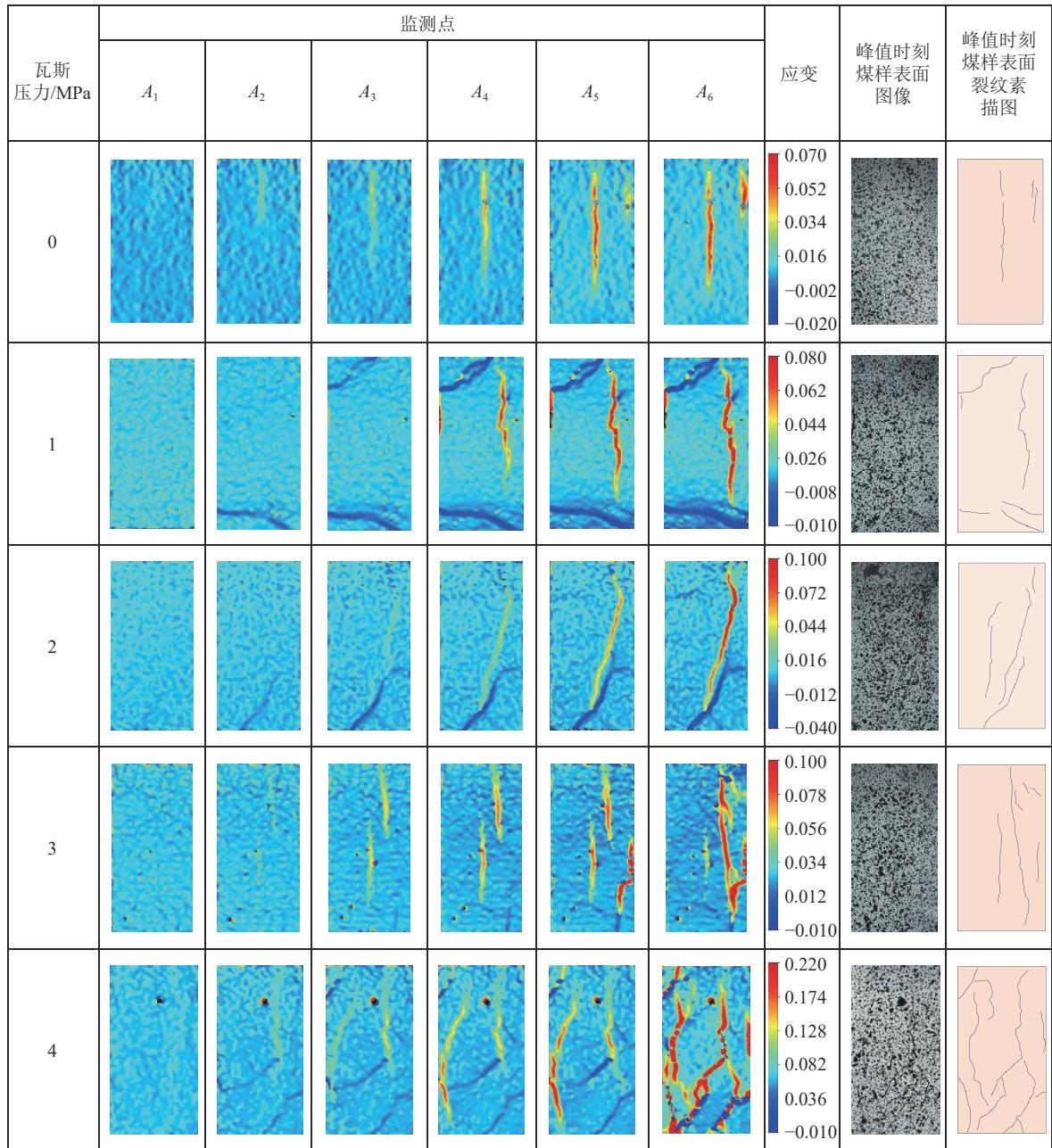


图 13 不同瓦斯压力下煤样应变场演化分布

Fig.13 Evolution distribution of strain field of coal samples under different initial gas pressures

进一步深化,应变带之间不断连接贯通,形成多条高应变集中带。轴向应力达到峰值(监测点 A_6)时,试样表面应变场急速膨胀,试样沿高应变集中区域发生剪切破坏。分析其原因,一方面,煤样吸附瓦斯气体后,在压力梯度的驱动下瓦斯气体流入较大宏观裂隙,对裂隙产生撕裂和扩展的作用,使煤体内部产生微变形和不可逆的损伤;另一方面,吸附瓦斯气体的煤颗粒降低了其表面能,减小煤体内部裂隙表面张力,煤分子之间的黏结力降低,距离增大,产生膨胀变形,从而在应力作用下加速了裂隙发育、扩展以及破坏,在2种因素综合作用下,导致含瓦斯煤样出现多个应变集中区,使得最终破坏时的变形更加复

杂,破坏程度更加剧烈。

3.2 应变场波动程度

图14是通过对应变场表面进行网格划分,将其划分成200个矩形区域,并利用式(6)对其应变场波动程度进行量化处理,其中重点对峰值时刻(监测点 A_6 时刻)的应变场进行分析。

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N} \quad (6)$$

式中: S^2 为应变场波动程度; X_i 为第*i*个局部区域应变的平均值; \bar{X} 为峰值时刻应变场对应的应变平均值;

N 为划分的总区域数。

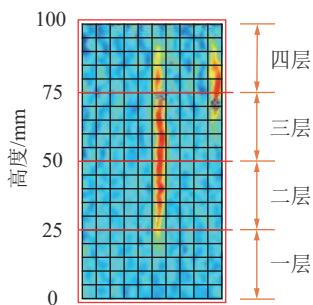


图 14 煤样横向应变场网格划分示意

Fig.14 Schematic diagram of meshing of transverse strain field of coal sample

不同瓦斯压力下煤样峰值时刻(A_6 监测点)对应应变场波动程度如图 15 所示,无瓦斯吸附下煤样达到峰值强度时刻对应的应变场波动程度最小,当瓦斯压力增加至 1、2、3、4 MPa 时,煤样达到峰值强度时刻对应的应变场波动程度较无瓦斯吸附条件下分别增大 161.6%、178.8%、336.6%、523.8%。对二者进行拟合,如图 15 所示,可见,应变场波动程度随瓦斯压力增加近似呈二次函数递增,可见,随瓦斯压力升高,含瓦斯煤在峰值时刻对应的应变场波动程度越大。

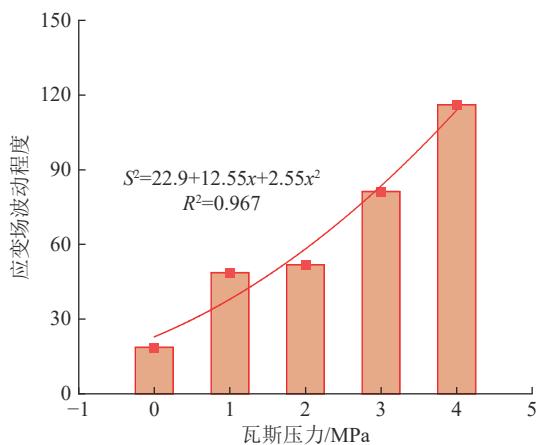


图 15 不同瓦斯压力下监测点 A_6 时刻应变场波动程度

Fig.15 Variance of strain field at monitoring point A_6 under different gas pressures

此外,如图 14 所示,将峰值时刻对应的应变场等比例划分为 4 块区域,分别对该 4 块区域分析其应变场波动程度,得到其局部应变场波动程度,结果如图 16 所示,其中折线部分分别对应这 4 块区域的波动程度,柱状图部分分别是不同区域对应应变场波动程度占比。如折线部分所示,整体上看,随瓦斯压力升高,各层波动程度大致呈增大趋势,其中,瓦斯压力为 4 MPa 时,一、二、三、四层波动程度较无

瓦斯吸附下分别增长 36.4%、23.9%、15.6%、7.0%,可见,瓦斯压力对不同区域应变场波动程度均具有显著影响。从柱状图部分可以看出,不同瓦斯压力下二层和三层应变场波动程度占比最大,均超过 28%,其之和均大于 65%。表明不同瓦斯压力下,煤样第二、三层应变场波动程度最大,裂隙发育最明显。

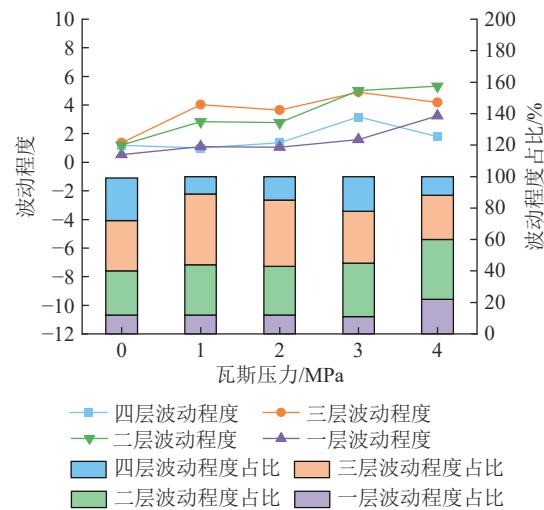


图 16 不同区域对应应变场波动程度

Fig.16 Different regions correspond to degree of fluctuation of strain field

3.3 局部横向应变变化规律

为了探究含瓦斯煤在不同水平方向的应变分布情况,对试样 25、50、75 mm 处作 3 条水平线获取其局部横向应变,如图 14 所示。

图 17 是不同水平方向上横向应变分布结果,从峰值点数量上看:瓦斯压力为 0、1、2 MPa 时,上中下 3 段均出现 4 个峰值点,瓦斯压力为 3、4 MPa 时,分别共计出现 6 个和 10 个峰值点,较 0、1、2 MPa 下分别增加 2 个和 6 个峰值点。其中,瓦斯压力为 0、1 MPa 时,位于 75 mm 处峰值点最多,表明 75 mm 处出现应变集中区域最多,瓦斯压力为 2、3、4 MPa 时,峰值点分别在 25、50、75 mm 处出现最多,可见,应变集中区域发生转移,表明高瓦斯压力下,随瓦斯压力升高,峰值点的个数越多,应变集中区域分布越复杂。从应变大小上看:无瓦斯吸附时,横向应变于 75 mm 达到最大,为 0.477;当瓦斯压力增加至 1、2、3、4 MPa 时,最大应变分别为 0.073、0.093、0.079、0.176,且分布位置不一,分别位于 75、75、25、25 mm 处,可见高瓦斯压力下,最大应变位置发生转移,且随瓦斯压力增大,应变越大。游离瓦斯在轴向应力的作用下进入裂隙、孔隙内部,对微裂隙尖端产生气

楔作用, 加速微裂隙向深部扩展, 吸附瓦斯会对煤基质产生膨胀应力, 降低孔裂隙表面能与煤基质间的黏结力, 煤体内部微裂隙尖端由于几何结构的不连

续性势必会造成该区域易开裂并产生应力集中, 从而出现多个应变集中区, 且随瓦斯压力越大, 应变值越大, 分布更加复杂。

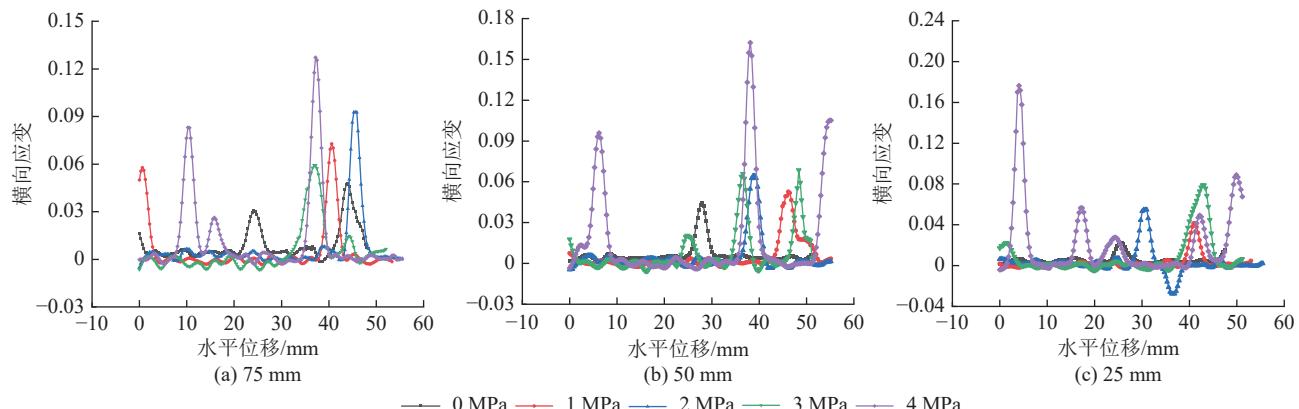


图 17 局部横向应变随煤样水平范围的变化规律

Fig.17 Variation of local transverse strain with horizontal range of coal samples

4 讨 论

研究表明, 煤中绝大多数瓦斯以吸附态存在于煤的孔隙表面, 占瓦斯总量的 80%~90%, 煤吸附瓦斯主要是煤的大分子结构和瓦斯气体分子之间相互作用的结果。何学秋等^[31]认为, 煤的表面能是煤能够吸附瓦斯气体的重要因素, 其大小决定了瓦斯吸附量和煤体破裂的难易程度。

煤体吸附气体后, 其表面自由能^[31]为

$$\gamma = \gamma_0 - \frac{RT}{V_0 S} \int_0^p \frac{V}{p} dp \quad (7)$$

式中: γ 和 γ_0 分别为吸附气体和真空状态下的表面自由能, N/m; V_0 为摩尔体积, 取 22.4 L/mol; S 为煤的比表面积, m^2/t ; V 为吸附平衡时吸附瓦斯量, m^3/t ; p 为动态平衡时孔裂隙瓦斯压力, Pa。

瓦斯吸附符合 Langmuir 方程, 将式(7)结合 Langmuir 方程得到表面自由能变化量为

$$\Delta\gamma = \gamma_0 - \gamma = \frac{RT}{V_0 S} \int_0^p \frac{ab}{1+bp} dp = \frac{aRT}{V_0 S} \ln(1+bp) \quad (8)$$

根据 Griffith 公式^[30], 吸附态瓦斯可使孔裂隙产生拉应力为

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l}} \quad (9)$$

将式(7)代入式(9)中可得

$$\sigma_t = \left(\frac{2E\gamma_0}{\pi l} - \frac{2ERT}{SV_0\pi l} \int_0^p \frac{V}{p} dp \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

结合式(8)、式(10)可知, 煤体裂隙尖端抗拉强度、煤体表面自由能均受瓦斯压力影响, 随瓦斯压力

增大, 煤体裂隙尖端抗拉强度降低, 对循环荷载下含瓦斯煤力学性质产生劣化作用, 随瓦斯压力增大, 含瓦斯煤体表面自由能下降, 促进裂隙扩展, 从第 3 节所述应变场演化规律来看, 其试验结果与理论保持一致。

5 结 论

1) 循环加卸载作用下, 加卸载曲线之间不重合, 形成滞回环, 且随着循环次数的增加, 滞回环面积逐渐增大, 并向着应变增大的方向逐渐移动; 不同瓦斯压力的煤样在循环荷载作用下均呈明显的脆性破坏。

2) 循环加卸载作用下, 随瓦斯压力升高, 煤样峰值强度降低; 加载变形模量和卸载变形模量均增大, 且卸载变形模量始终大于加载变形模量; 随着循环次数的增加变形模量差值逐渐减小并最终在 0~0.1 GPa 之间浮动。

3) 循环加卸载条件下煤样不可逆应变与循环次数之间呈“初始、稳定、加速扩展”的 3 阶段变化特征, 曲线整体从 L 型向 U 型趋势发展, 累计不可逆应变与循环次数之间呈快速增加、缓慢增加、快速增加的趋势, 不可逆应变与累积不可逆应变均随瓦斯压力增大而增加。

4) 在低瓦斯压力下, 煤样应变集中区主要为单一竖向应变集中带, 随瓦斯压力增大, 应变集中带逐渐由竖向单一向无序复杂转变; 瓦斯压力越大, 应变场波动程度越剧烈且剧烈程度主要集中在中部区域; 高瓦斯压力下, 随瓦斯压力升高, 峰值点的个数越多, 应变越大。

参考文献(References):

- [1] 杨小彬, 韩心星, 刘恩来, 等. 循环加卸载下花岗岩非均匀变形演化的声发射特征试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2732–2739.
YANG Xiaobin, HAN Xinxing, LIU Enlai, et al. Experimental study on the acoustic emission characteristics of non-uniform deformation evolution of granite under cyclic loading and unloading test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2732–2739.
- [2] 刘向御, 柴肇云, 刘绪, 等. 循环荷载下粉砂岩孔裂隙扩展及卸载破坏特征[J]. 煤炭学报, 2022, 47(S1): 77–89.
LIU Xiangyu, CHAI Zhaoyun, LIU Xu, et al. Pore fracture propagation and unloading failure characteristics of siltite under cyclic loads[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 77–89.
- [3] 汪泓, 杨天鸿, 刘洪磊, 等. 循环荷载下干燥与饱和砂岩力学特性及能量演化[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1600–1608.
WANG Hong, YANG Tianhong, LIU Honglei, et al. Mechanical properties and energy evolution of dry and saturated sandstone under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1600–1608.
- [4] 苗胜军, 王辉, 黄正均, 等. 不同循环上限荷载下泥质石英粉砂岩力学特性试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(7): 75–85.
MIAO Shengjun, WANG Hui, HUANG Zhengjun, et al. Experimental study on the mechanical properties of argillaceous quartz siltstone under different upper limit cyclic loadings[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(7): 75–85.
- [5] SONG Z Y, KONIETZKY H, WU Y F, et al. Mechanical behaviour of medium-grained sandstones exposed to differential cyclic loading with distinct loading and unloading rates[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(6): 1849–1871.
- [6] 蒋长宝, 付银兰, 王光淇. 水力压裂煤裂隙网络表征与造缝性能评估试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 62–71.
JIANG Changbao, FU Yinlan, WANG Guangqi. Experimental study on characterization hydraulic fracturing coal fracture network and evolution of fracture forming performance[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 62–71.
- [7] 高明忠, 宋杰, 崔鹏飞, 等. 深部煤层原位保压保瓦斯取心技术装备及初步应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 143–154.
GAO Mingzhong, SONG Jie, CUI Pengfei, et al. Technology and application of *in situ* pressure and gas maintaining coring for deep coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 143–154.
- [8] 翟成, 丛钰洲, 陈爱坤, 等. 中国煤矿瓦斯突出灾害治理的若干思考及展望[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6): 1146–1161.
ZHAI Cheng, CONG Yuzhou, CHEN Aikun, et al. Reflection and prospect on the prevention of gas outburst disasters in China's coal mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6): 1146–1161.
- [9] 李欣慰, 姚直书, 黄献文, 等. 循环加卸载下砂岩变形破坏特征与能量演化研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1693–1704.
LI Xinwei, YAO Zhishu, HUANG Xianwen, et al. Investigation of deformation and failure characteristics and energy evolution of sandstone under cyclic loading and unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1693–1704.
- [10] 杨小彬, 程虹铭, 裴艳宇. 不同加载方式下岩石变形及峰后能量演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S2): 3229–3236.
YANG Xiaobin, CHENG Hongming, PEI Yanyu. Study on the evolution characteristics of rock deformation and post-peak energy under different loading methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S2): 3229–3236.
- [11] 刘忠玉, 董旭, 张旭阳. 分级循环荷载下层理煤岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S1): 2593–2602.
LIU Zhongyu, DONG Xu, ZHANG Xuyang. Experimental study on mechanical properties of bedding coal and rock under graded cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S1): 2593–2602.
- [12] 王天佐, 王春力, 薛飞, 等. 不同循环加卸载路径下红砂岩声发射与应变场演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S1): 2881–2891.
WANG Tianzuo, WANG Chunli, XUE Fei, et al. Study on acoustic emission and strain field evolution of red sandstone under different cyclic loading and unloading paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S1): 2881–2891.
- [13] 赵宏刚, 张东明, 边光, 等. 循环加、卸载速率对砂岩变形和渗透特性的影响[J]. 工程科学学报, 2017, 39(1): 133–140.
ZHAO Honggang, ZHANG Dongming, BIAN Guang, et al. Deformation and permeability of sandstone at different cycling loading-unloading rates[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(1): 133–140.
- [14] HU M T, XU W Y, WANG H L, et al. Deformation characteristics of muddy sandstones during cyclic loading and unloading with different stress lower limits under pore pressure[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 172: 107606.
- [15] LIU X S, NING J G, TAN Y L, et al. Damage constitutive model based on energy dissipation for intact rock subjected to cyclic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 85: 27–32.
- [16] 刘恺德. 高应力下含瓦斯原煤三轴压缩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 380–393.
LIU Kaide. Mechanical properties of raw coal containing gas under high triaxial stress compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(2): 380–393.
- [17] 孙四清, 杨帆, 郑玉岐, 等. 煤层瓦斯含量测定技术及装备研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 164–176.
SUN Siqing, YANG Fan, ZHENG Yuqi, et al. Research progress of coal seam gas content determination technology and equipment[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 164–176.
- [18] 王登科, 庞晓非, 魏建平, 等. 气体性质和孔隙压力对煤体微裂隙扩展的影响[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 183–192.
WANG Dengke, PANG Xiaofei, WEI Jianping, et al. Effect of gas properties and pore pressure on the microcrack propagation in coal[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 183–192.
- [19] 赵洪宝, 张红兵, 尹光志. 含瓦斯软弱煤三轴力学特性试验[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(1): 103–109.
ZHAO Hongbao, ZHANG Hongbing, YIN Guangzhi. Experiments on triaxial mechanical properties of soft coal containing gas[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(1): 103–109.
- [20] 赵洪宝, 李振华, 仲淑娟, 等. 单轴压缩状态下含瓦斯煤岩力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1):

- 131–134.
- ZHAO Hongbao, LI Zhenhua, ZHONG Shuheng, et al. Experimental study of mechanical properties of coal rock containing gas under uniaxial compression[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 131–134.
- [21] 高保彬, 钱亚楠, 陈立伟, 等. 瓦斯压力对煤样冲击倾向性影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(10): 58–64.
- GAO Baobin, QIAN Yanan, CHEN Liwei, et al. Study on gas pressure affected to bump potential of coal sample[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 58–64.
- [22] 高保彬, 吕蓬勃, 郭放. 不同瓦斯压力下煤岩力学性质及声发射特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 112–119, 149.
- GAO Baobin, LYU Pengbo, GUO Fang. Study on mechanical properties and acoustic emission characteristics of coal at different gas pressure[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 112–119, 149.
- [23] 王登科, 张航, 魏建平, 等. 基于工业 CT 扫描的瓦斯压力影响下含瓦斯煤裂隙动态演化特征[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3550–3564.
- WANG Dengke, ZHANG Hang, WEI Jianping, et al. Dynamic evolution characteristics of fractures in gas-bearing coal under the influence of gas pressure using industrial CT scanning technology[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3550–3564.
- [24] 蒋长宝, 俞欢, 段敏克, 等. 基于加卸载速度影响下的含瓦斯煤力学及渗透特性实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(6): 1216–1222.
- JIANG Changbao, YU Huan, DUAN Minke, et al. Experimental study of mechanical and permeability characteristics of coal with methane containing due to different loading-unloading speeds[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(6): 1216–1222.
- [25] 陈结, 张允瑞, 蒲源源, 等. 不同应力路径下含瓦斯煤的声发射特性与能量演化规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(6): 2323–2337.
- CHEN Jie, ZHANG Yunrui, PU Yuanyuan, et al. Acoustic emission characteristics and energy evolution of coal containing gas under different stress paths[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(6): 2323–2337.
- [26] LIU H Q, WANG L, ZHAO H B, et al. Dynamic characteristics and deterioration mechanism of coal under distinct initial gas pressure[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2023, 9(1): 111.
- [27] 朱传奇, 谢广祥, 王磊. 松软煤体波速演化规律与破坏程度量化指标[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2609–2622.
- ZHU Chuanqi, XIE Guangxiang, WANG Lei. Wave velocity evolution law and quantitative index of damage degree of soft coal[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2609–2622.
- [28] ZOU Q L, CHEN Z H, ZHAN J F, et al. Morphological evolution and flow conduction characteristics of fracture channels in fractured sandstone under cyclic loading and unloading[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, 33(12): 1527–1540.
- [29] 李清森, 梁运培, 邹全乐. 循环加载路径下不同含瓦斯煤渗流及损伤演化特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2803–2815.
- LI Qingmiao, LIANG Yunpei, ZOU Quanle. Seepage and damage evolution characteristics of different gas-bearing coal under cyclic loading-unloading conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2803–2815.
- [30] 王磊, 刘怀谦, 谢广祥, 等. 含瓦斯煤孔裂隙结构精细表征及强度劣化机制[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3203–3216.
- WANG Lei, LIU Huaiqian, XIE Guangxiang, et al. Fine characterization of the pore and fracture structure and strength degradation mechanism of gas bearing coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(12): 3203–3216.
- [31] 何学秋, 王恩元, 林海燕. 孔隙气体对煤体变形及蚀损作用机理[J]. 中国矿业大学学报, 1996, 25(1): 6–11.
- HE Xueqiu, WANG Enyuan, LIN Haiyan. Coal deformation and fracture mechanism under pore gas action[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1996, 25(1): 6–11.
- [32] ZHAO Y L, LIU J H, ZHANG C S, et al. Mechanical behavior of sandstone during post-peak cyclic loading and unloading under hydromechanical coupling[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, 33(8): 927–947.
- [33] 张强, 王军保, 宋战平, 等. 循环荷载作用下盐岩微观结构变化及经验疲劳模型[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 995–1008.
- ZHANG Qiang, WANG Junbao, SONG Zhanping, et al. Microstructure variation and empirical fatigue model of salt rock under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 995–1008.
- [34] 冉启灿, 梁运培, 邹全乐, 等. 倾斜煤层群覆岩“三场”非对称特征及靶向抽采机制[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 177–192.
- RAN Qican, LIANG Yunpei, ZOU Quanle, et al. Asymmetric characteristics of “three-field” in overburden of inclined coal seam groups and target extraction mechanism[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 177–192.
- [35] 李伟, 杨世龙, 周红星, 等. 重复注气压降法煤层渗透率模型与原位测试研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 193–202.
- LI Wei, YANG Shilong, ZHOU Hongxing, et al. Study on the permeability model and *in situ* testing of coal seams using repeated injection pressure drop method[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 193–202.
- [36] 余力, 罗家成, 姚迪, 等. 数字图像相关方法在力学特性试验中的应用研究[J]. 核动力工程, 2022, 43(S1): 146–151.
- YU Li, LUO Jiacheng, YAO Di, et al. Research on application of digital image correlation method in mechanical property test[J]. Nuclear Power Engineering, 2022, 43(S1): 146–151.
- [37] LU Y L, LI W S, WANG L G, et al. *In-situ* microscale visualization experiments on microcracking and microdeformation behaviour around a pre-crack tip in a three-point bending sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 114: 175–185.