



不同加载条件下含瓦斯煤岩强度极限邻域范围研究

王波 马世纪 田志银 任永政 王军 黄万朋 王灵

引用本文:

王波, 马世纪, 田志银, 等. 不同加载条件下含瓦斯煤岩强度极限邻域范围研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 114–125.
WANG Bo, MA Shiji, TIAN Zhiyin. Study on strength limit neighborhood range of gas-bearing coal rock under different loading conditions[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 114–125.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1034>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

蠕变扰动效应下红砂岩强度极限邻域试验研究

Experimental study on range of strength limit neighborhood of red sandstone under effect of creep disturbance
煤炭科学技术. 2021, 49(9): 54–60 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/544f63a9-f785-4657-99d4-035d147fef11>

深部低阶煤瓦斯吸附特性核磁共振试验研究

Nuclear magnetic resonance experimental study on gas adsorption characteristics of deep low rank coal
煤炭科学技术. 2019(9) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ff6a636f-b142-4be8-a270-a994de0950bf>

基于核磁共振技术的煤层含气量评价方法

Evaluating method of gas content of coalbed methane based on nuclear magnetic resonance technology
煤炭科学技术. 2023, 51(11): 158–165 <https://doi.org/10.12438/cst.QN21-011>

循环荷载下含瓦斯煤力学特性及应变场演化规律研究

Study on the mechanical properties and strain field evolution of gas-bearing coal under cyclic loading
煤炭科学技术. 2024, 52(6): 90–101 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0328>

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>

静动组合三轴加载煤岩强度劣化试验研究

Experimental research on coal and rock strength deterioration under combined static and dynamic triaxial loading
煤炭科学技术. 2021, 49(11): 105–111 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d2517fcc-0917-430a-8e01-c54caff5bf2a>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王波, 马世纪, 田志银, 等. 不同加载条件下含瓦斯煤岩强度极限邻域范围研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 114–125.
WANG Bo, MA Shiji, TIAN Zhiyin, *et al.* Study on strength limit neighborhood range of gas-bearing coal rock under different loading conditions[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 114–125.

不同加载条件下含瓦斯煤岩强度极限邻域范围研究

王波¹, 马世纪¹, 田志银¹, 任永政¹, 王军², 黄万朋³, 王灵¹

(1. 华北科技学院 应急管理与技术学院, 河北 三河 101601; 2. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250100;
3. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 煤与瓦斯突出灾害的发生机理尚不清楚, 据流变假说, 含瓦斯煤岩在长期载荷下可能进入“强度极限邻域”, 此时受外部冲击扰动更易破坏。为研究不同加载条件下含瓦斯煤岩的“强度极限邻域”, 以找到进入该状态的影响规律, 并建立相应的微观判别标准, 利用自主研发的岩石流变扰动效应三轴试验系统和煤岩流变扰动效应渗流实验装置, 开展不同围压、不同瓦斯压力、轴压下的含瓦斯煤岩流变扰动实验, 通过核磁共振手段对流变扰动前后煤岩进行分析对比, 得到不同加载条件下的孔隙率、孔径分布、 T_2 谱曲线。试验结果表明: ①不同加载条件下的煤岩流变过程中, 存在一个应力阈值, 可以使得煤岩在受到外部冲击扰动后阈值左右邻域有不同力学性质的表现; 当施加力小于此阈值时, 冲击扰动后, 煤岩的孔隙度减小, 煤样随之被压缩紧密, T_2 谱曲线中代表大孔径的谱峰降低, 谱峰曲线左移; 当施加力大于此阈值时, 冲击扰动后, 煤岩大孔径孔隙增多, T_2 谱曲线出现右移, 所有谱峰高度增大, 说明该应力阈值是用来判断煤岩是否进入“强度极限邻域”关键。②围压和瓦斯压力对煤岩的影响具有相反的力学作用性质, 在抗压能力、损伤程度、长期强度、“强度极限邻域”中有所表现, 其中, 围压越大, 煤岩越晚进入“强度极限邻域”, 瓦斯压力越大, 煤岩则越早进入该邻域。③煤岩的孔径分布、 T_2 谱曲线能直观反映了煤岩“强度极限邻域”内、外微观变化特征。④通过煤岩孔隙率所确定的进入“强度极限邻域”时的轴压与围压、瓦斯压力构建函数方程可判断不同加载条件煤岩进入“强度极限邻域”的时机, 作为进入“强度极限邻域”范围时的判别标准, 其中围压越大, 此时进入“强度极限邻域”范围时的应力阈值越大; 瓦斯压力越大, 进入“强度极限邻域”时的应力阈值越小。

关键词: 含瓦斯煤岩; 流变扰动效应; 强度极限邻域; 核磁共振; T_2 谱曲线

中图分类号: TD315 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2024)07-0114-12

Study on strength limit neighborhood range of gas-bearing coal rock under different loading conditions

WANG Bo¹, MA Shiji¹, TIAN Zhiyin¹, REN Yongzheng¹, WANG Jun², HUANG Wanpeng³, WANG Ling¹

(1. College of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Sanhe 101601, China; 2. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250100, China; 3. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The occurrence mechanism of coal and gas outburst disasters is still unclear. According to the rheological hypothesis, gas-bearing coal and rock may enter the “strength limit neighborhood” under long-term load, and it is more likely to be destroyed by external impact disturbance. The “strength limit neighborhood” of gas-bearing coal rock under different loading conditions is studied to find the influence law of entering this state, and the corresponding micro-discrimination criteria are established, using the self-developed triaxial test

收稿日期: 2023-12-11 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.12438/cst.2023-1034

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274121); 河北省自然科学基金资助项目(E2022508023); 中央引导地方科技发展基金资助项目(226Z4101G)

作者简介: 王波(1981—), 男, 山东阳谷人, 教授, 博士。E-mail: wangbo.94@163.com

通讯作者: 马世纪(1999—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生。E-mail: m19862131402@163.com

system of rock rheological disturbance effect and the seepage experimental device of coal rock rheological disturbance effect, the rheological disturbance experiment of gas-bearing coal rock under different confining pressures, different gas pressures and axial pressures was carried out. The coal rock before and after rheological disturbance was analyzed and compared by means of nuclear magnetic resonance, and the T_2 spectrum curve, porosity and pore size distribution under different loading conditions were obtained. The test results show that: ① In the rheological process of coal rock under different loading conditions, there is a critical value for the sensitivity of external disturbance. When the applied force is less than this critical value, after the impact disturbance, the porosity of coal rock decreases and the specimen is compressed closely. When the force is greater than this critical value, after the impact disturbance, the large pore size of coal rock increases obviously, the T_2 spectrum curve shifts to the right, and the peak height increases, It shows that the stress threshold is the key to determine whether the coal rock enters the “strength limit neighborhood”. ② Confining pressure and gas pressure have opposite mechanical properties to coal rock. It is shown in the compressive capacity, damage degree, long-term strength and “strength limit neighborhood”. Among them, the greater the confining pressure, the earlier the coal rock enters the “strength limit neighborhood,” The greater the gas pressure, The greater the gas pressure, the earlier the coal rock enters the neighborhood. ③ the pore size distribution and T_2 spectrum curve of coal rock can directly reflect the internal and external micro-variation characteristics of rock’s “strength limit neighborhood.” ④ The constitutive equation of axial pressure, confining pressure and gas pressure determined by the porosity of coal rock can be used to judge the timing of coal rock entering the “strength limit neighborhood” under different loading conditions. As a criterion for entering the “strength limit neighborhood,” the greater the confining pressure, the greater the stress threshold when entering the “strength limit neighborhood,” the greater the gas pressure, and the smaller the stress threshold when entering the “strength limit neighborhood.”

Key words: gas-bearing coal rock; rheological perturbation effect; strength limit neighborhood; nuclear magnetic resonance; T_2 spectrum curve

0 引 言

由于煤岩瓦斯动力灾害的突发性和复杂性^[1-2],人们还没有真正掌握煤与瓦斯突出机理,随着煤矿开挖不断向深部延伸,深部煤岩的流变现象越发明显且更接近自身强度极限,受到扰动影响问题也更加突出,容易引起重大事故,但事故发生前夕宏观现象并不明显,因此,进行不同深度煤岩受到外界流变扰动效应的微观损伤研究有重要意义。目前对于煤与瓦斯突出机理存在很多假说和理论研究^[3-5],其中何学秋^[6-7]认为煤与瓦斯突出本质上属于含瓦斯煤体的流变行为,提出了流变假说,通过在恒定围压、轴压和瓦斯压力条件下含瓦斯煤体的流变试验,得出了其流变的基本规律并建立了含瓦斯煤样蠕变行为的数学模型。基于此,煤与瓦斯突出可以被视为含瓦斯煤体受采动影响后地应力与孔隙瓦斯气体耦合的一种流变过程,在长期载荷的作用下,含瓦斯煤岩会进入“强度极限邻域”^[8],此邻域为流变过程中一个应力状态范围,煤岩所受应力在此范围内时,煤岩对外界扰动敏感,反之迟钝。

诸多学者对含瓦斯煤岩力学性质及流变进行了一系列研究,并取得了重要的进展。胡千庭等^[9]以“煤与瓦斯突出是一个力学破坏过程”为前提,对煤与瓦斯突出过程的力学作用机理进行了深入研究;聂百胜等^[10]进一步研究煤孔隙结构对煤与瓦斯突出的影响,提出煤与瓦斯突出发生的微观机制,并阐述

了突出过程的4个阶段;陈绍杰等^[11]进行短时流变试验,得出煤岩流变破坏呈现空间不均匀性,整体以塑性破坏为主,但存在剪切主导破坏面;王家臣等^[12]发现瓦斯对煤样力学性质的影响随着围压的增大而减小;程春晖等^[13]对相同加载率不同围压下煤体开展三轴动态压缩试验研究。试验结果表明,随着围压增加,煤体的峰值强度呈线性增长;李祥春等^[14-15]观察到煤岩的蠕变变形会随着瓦斯压力的提高而增大,提出了蠕变拐点的观点,且煤岩发生失稳破坏时应同时具备2个条件:应力超过长期强度,应变大于应变阈值。刘玉龙等^[16]利用核磁共振信号强度的变化,探究了不同围压下煤岩的孔裂隙特点,结果表明随着孔径增大岩孔裂隙应力伤害率非线性增大的特点;李胜^[17]对不同冲击载荷作用下的煤岩孔隙与裂隙的演化特征进行试验研究,提出冲击载荷增强了孔隙与裂隙的连通性,瓦斯的吸附/解吸平衡被打破,瓦斯压力升高,煤体中产生了应力集中和能量积聚,使得煤与瓦斯突出发生的可能大大增加。

基于上述分析,煤岩三轴压缩流变试验已经有所发展,但缺乏含瓦斯煤岩在外部冲击载荷作用下不同加载条件对“强度极限邻域”影响规律,以及通过微观损伤角度判断煤岩进入“强度极限邻域”范围研究。基于上述分析,在前人研究的基础上采用自主研发的岩石流变扰动效应试验系统及煤岩流变扰动效应渗流实验装置开展不同围压、不同瓦斯压力、轴压下含瓦斯煤岩流变扰动实验,得出煤岩流变行

为下的长期强度,经扰动作用后,确定不同状态下含瓦斯煤岩的“强度极限邻域”范围,利用 T_2 谱曲线、孔隙结构变化特征分析对比,总结出不同围压,不同瓦斯压力对“强度极限邻域”的影响规律,从微观损伤角度判断含瓦斯煤岩进入“强度极限邻域”的准则。

1 核磁共振与流变扰动试验系统

1.1 RRTS-IV型岩石流变扰动效应试验系统

RRTS-IV型岩石流变扰动效应试验系统^[18](图1):系统主要包括试验仪主机、扰动加载装置、逐级加载辅助装置及测试分析系统4部分。其中,试验仪主机应用杠杆原理,采用两级杠杆扩力,扩力比为1:100,相对于传统的三轴试验装置,规避了摩擦力大和液压波动等问题,可为试验提供长期而稳定的轴压;扰动加载装置采用自由落体方式,并在下落过程中施加了回弹动力装置,大幅度减少了冲击砧码冲击产生的随机往复振荡,为获得更加准确的试验数据分析提供了便利条件;逐级加载辅助装置应用定滑轮与吊桶的组合设计,帮助试验仪实现低等级连续缓慢的逐级加载功能,克服了无低等级的连续缓慢轴压加载功能,导致试件意外提前破坏问题,为试验提供必要条件;测试分析系统由动测试信号分析系统和各类型传感器组成,可对应力、应变、冲击扰动进行动态监测。

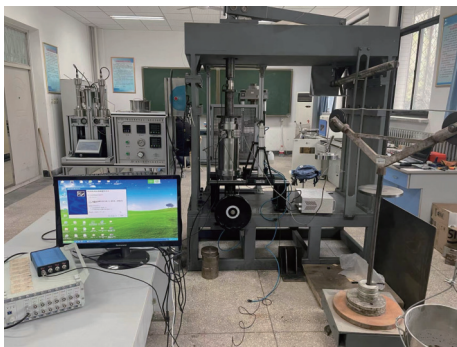


图1 岩石流变扰动效应试验系统

Fig.1 Rock rheological disturbance effect test system

1.2 煤岩流变扰动效应渗流实验装置

装置主要由围压加载系统和瓦斯渗流系统组成(图2)。围压加载界面配有液晶显示器,可以实现对围压的动态调节,同时围压加载系统设有自动补压功能,能够实现对围压稳定性的有效控制;瓦斯渗流系统配备瓦斯监控界面,可以实现对瓦斯气体的长期监控。

1.3 核磁共振系统

可用于煤岩的孔隙度、孔径分布测试、自由水/

束缚水饱和度测试、渗透率评价、水润湿性评价、裂缝演化成像分析等。核磁共振如图3所示。



图2 煤岩流变扰动效应渗流实验装置

Fig.2 Coal rock rheological disturbance effect seepage experimental device

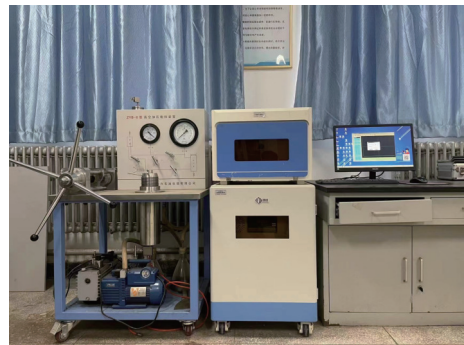


图3 核磁共振系统

Fig.3 Nuclear magnetic resonance system

2 试验原理与方案

2.1 含瓦斯煤岩三轴常规压缩实验

对现场原煤切割、打磨制成直径25 mm、高度50 mm的圆柱型试件进行试验,以便进行核磁共振信号的采集。经核磁共振分析后,选取外表完好、孔隙率相近的煤样试件,使得选取煤样具有相同的力学性质,保证结果具有可靠性。取3组煤样试件,编号A-1~A-3,每组3块试件,对3组煤样试件在存在瓦斯压力的条件下进行常规三轴压缩试验。采用相对小围压,大瓦斯压力的试验设计,围压分别加载至3、3、5 MPa,待围压稳定后,随即瓦斯吸附24 h,保证试件有充分的吸附时间,期间保持瓦斯压力分别维持在2、1、1 MPa,瓦斯压力值稳定后对其轴压加载,直至试件破坏,测得每组试验数据中值见表1,该试验可为含瓦斯煤三轴压缩流变试验长期强度的确定提供轴压分级加载依据。

从表1可以看出,在瓦斯压力不变的条件下,煤样的强度极限和应变极限会随着围压的增大而增大,呈正相关趋势。围压不变的条件下,试件的强度极

限和应变极限会随着瓦斯压力的增大而减小,呈负相关趋势。可知围压和瓦斯压力的改变影响了煤的力学性质,且对煤的力学性质^[19-22]具有相反的作用效果。

表 1 煤岩三轴压缩试验数据
Table 1 Triaxial compression experimental data of coal rock

| 试件 编号 | 高度/ mm | 直径/ mm | 围压/ MPa | 瓦斯压力/ MPa | 强度 极限/MPa | 应变 极限/ 10^{-2} |
|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------|---------------------|
| A-1 | 49.93 | 25.51 | 3 | 2 | 29.51 | 1.34 |
| A-2 | 50.00 | 25.50 | 3 | 1 | 34.82 | 1.46 |
| A-3 | 49.93 | 25.66 | 5 | 1 | 47.37 | 1.70 |

2.2 不同加载条件下含瓦斯煤岩三轴压缩流变试验

选取与上述试验相同力学性质的三块煤样试件,编号 B-1 ~ B-3, 围压分别加载至 3、3、5 MPa, 待围压值稳定后通入瓦斯, 瓦斯吸附 24 h, 保持瓦斯压力 2、1、1 MPa, 稳定后对试件分级施加轴压, 根据常规三轴压缩试验确定轴压逐级加载等级, 试件 B-1 轴压分级为 8、16、20、24、26 MPa, 试件 B-2 分级为 14、20、24、26、28、32 MPa, 试件 B-3 为 10、25、30、35、40、42、45 MPa^[23], 每施加下一级荷载后记录该试件的瞬时应变值, 每级荷载持续时间依据流变过程中应变变化值趋于稳定时为止, 期间每级应变数据记录间隔为 5 min。在上述整个试验过程中, 利用围压加载系统和测试分析系统记录整个加载过程中围压值的变化以及煤岩的全程应力应变曲线, 用来确定煤样的长期强度, 并为后续试验提供合适的扰动区间。

2.3 流变试验结果分析

1)含瓦斯煤岩宏观破坏分析。含瓦斯煤岩在不同围压, 不同瓦斯压力下的流变破坏形态如图 4 所示, 从左到右依次为试件 B-1、B-2、B-3, 试件的破坏类型基本呈现出剪切的破坏类型, 破坏程度依次增大, 剪切破坏形态越发明显, 说明破坏形式从脆性破坏到延性破坏发展。相对于试件 B-2, 试件 B-1 瓦斯压力增加 1 MPa, 宏观表现为断裂面变得粗糙, 破坏程度低, 说明瓦斯使得煤体颗粒内部之间的摩擦力减小, 煤的力学性质产生弱化^[24]; 对比试件 B-2、B-3, 发现当瓦斯压力相同时, 围压的增大, 剪切破坏时的断裂角减小, 断裂面光滑程度变高, 最终破坏程度增大, 说明断裂处的摩擦力变大, 试件的抵抗能力得到提升^[25]。图 5—图 7 表示煤岩的全程应力应变曲线, 流变变形量见表 2。

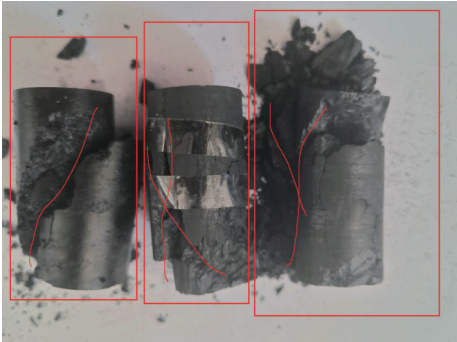


图 4 煤岩破坏形态
Fig.4 Coal rock failure pattern

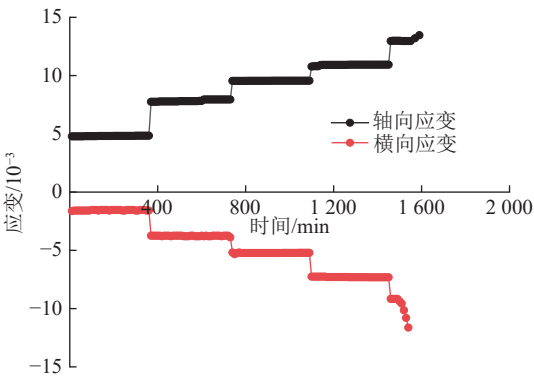


图 5 围压 3 MPa、瓦斯压力 2 MPa 流变曲线
Fig.5 Rheological curve of confining pressure 3 MPa and gas pressure 2 MPa

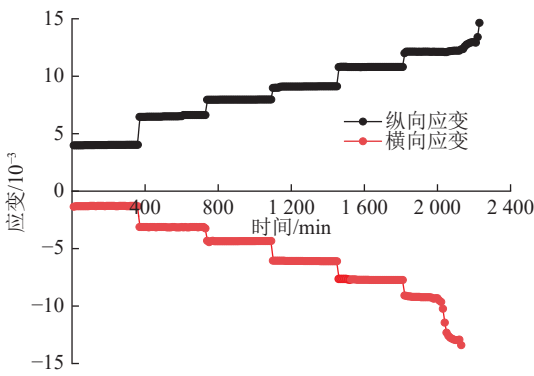


图 6 围压 3 MPa、瓦斯压力 1 MPa 流变曲线
Fig.6 Rheological curve of confining pressure 3 MPa and gas pressure 1 MPa

2)应变变形分析。从表 2 可以看出, 试件 B-1 在前三级轴向荷载的作用下, 轴向应变和横向应变的增长速率基本保持不变, 试件处于稳定蠕变状态, 但当施加第四级荷载之后, 试件的应变速率出现了提升, 试件开始从稳定蠕变状态开始向加速蠕变状态过渡, 随着流变的持续, 第四级荷载还不足以使试件发生破坏, 当最后一级荷载的施加后, 试件应变的增长速率进一步增大, 试件正式进入加速蠕变阶段, 在没有达到预期的荷载持续时间, 试件即发生了破

表 2 煤岩三轴压缩流变应变变量
Table 2 Triaxial compression rheological strain of coal rock

| 轴压级别 | 轴向初应变/ 10^{-6} | | | 横向初应变/ 10^{-6} | | | 轴向末应变/ 10^{-6} | | | 横向末应变/ 10^{-6} | | |
|------|------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| | B-1 | B-2 | B-3 | B-1 | B-2 | B-3 | B-1 | B-2 | B-3 | B-1 | B-2 | B-3 |
| 一级 | 4 776 | 3 982 | 2 869 | 1 536 | 3 982 | 906 | 4 836 | 4 033 | 2 887 | 1 610 | 1 369 | 956 |
| 二级 | 7 852 | 6 562 | 4 664 | 3 744 | 6 562 | 2 286 | 7 944 | 6 633 | 4 680 | 3 843 | 3 243 | 2 341 |
| 三级 | 9 543 | 7 953 | 7 487 | 5 184 | 7 953 | 3 886 | 9 661 | 8 057 | 7 559 | 5 328 | 4 447 | 4 062 |
| 四级 | 10 652 | 8 964 | 9 351 | 7 260 | 8 964 | 5 351 | 10 968 | 9 166 | 9 496 | 7 490 | 6 103 | 5 507 |
| 五级 | 12 960 | 10 809 | 12 086 | 9 168 | 10 809 | 7 122 | 13 466 | 11 023 | 12 467 | 12 483 | 78 36 | 7 350 |
| 六级 | — | 12 007 | 13 740 | — | 12 007 | 9 047 | — | 14 641 | 14 301 | — | 12 966 | 9 366 |
| 七级 | — | — | 15 681 | — | — | 11 938 | — | — | 17 020 | — | — | 14 448 |

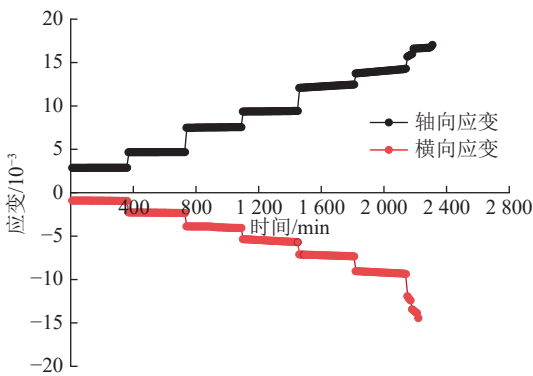


图 7 围压 5 MPa、瓦斯压力 1 MPa 流变曲线

Fig.7 Rheological curve of confining pressure 5 MPa and gas pressure 1 MPa

坏;通过观察图 5 斜率,在最后一级加载过程中横向应变的斜率大于轴向应变的斜率,且提前结束,横向流变破坏比轴向流变破坏来的更早一些^[26],所以横向破坏对危险有更好的预测,因此选取横向破坏时的长期强度作为试件整体的长期强度更为合理且安全。所以,试件 B-1 的长期强度为 24~26 MPa,选取中间值 25 MPa 作为 B-1 的长期强度,并以 24、26 MPa 作为试件在 3 MPa 围压,2 MPa 瓦斯压力下煤岩进入强度极限邻域的判断。

试件 B-2 与 B-1 相比降低了 1 MPa 的瓦斯压力,对比图 5、图 6,试件 B-2 能承受更高的荷载等级,表 2 可以看出破坏前 B-2 承受了更大的应变,内部势能积累更多,因此破坏时的破裂程度更加明显;对比常规三轴压缩试验和试件 B-2、B-1 的三轴压缩流变试验,展现出了瓦斯对煤岩力学性质的影响作用,根据分析,瓦斯压力升高使得煤岩内部的孔隙压力增加,孔隙更容易破坏,且当施加轴压时,瓦斯的解吸作用也会使裂隙的扩展和连接更容易发生^[27],从而降低煤岩的有效应力,有效应力的降低导致煤岩在相同外部的作用力下的强度降低。因此,瓦斯压

力对煤岩的力学性质的消极影响,导致试件 B-1 所展现的强度、应变等力学性质劣于试件 B-2;图 6 可知,试件 B-2 反应的横轴向应变规律和 B-1 基本一致,横向破坏早于轴向,因此以横向破坏时的长期强度作为试件的长期强度,B-2 的横向长期强度在 28~32 MPa,考虑安全性,以 30 MPa 作为试件 B-2 的长期强度,以 28、32 MPa 作为试件在 3 MPa 围压,1 MPa 瓦斯压力煤岩下进入强度极限邻域的判断。

试件 B-2 与 B-3 试件相比围压增加至 5 MPa,表 2 中试件 B-3 破坏时应变为 $17\,020\times10^{-6}$,高于其余两试件的 $14\,641\times10^{-6}$ 、 $12\,960\times10^{-6}$,试件更不容易被破坏,随着围压增加,煤岩内部的孔隙和裂隙受到更大的约束,使得裂隙扩展和连接变得更加困难,煤岩内部的有效应力增加,这有助于增强煤岩的强度和抗裂能力,这使得煤岩在承受更高的应力时仍能保持其完整性,因此,煤岩在破坏前会经历更多的变形,从而导致延性破坏,最终破裂现象明显;图 7 可知,B-3 试件的横向流变破坏也是早于轴向流变破坏,因此以横向流变破坏的 43 MPa 作为试件的长期强度,以 42、45 MPa 作为试件在 5 MPa 围压,1 MPa 瓦斯压力下煤岩进入强度极限邻域的判断。

2.4 不同加载条件下含瓦斯煤岩三轴压缩流变扰动试验

1)同一批煤样试件,选取与上述试验外表完好且力学性质相近的 26 块煤样分为 4 组,分别记为 I、C、D、E 组;对照组 I 两块,其余每组 8 块试件,根据上述不同加载条件下流变实验中分析的结果,其中对照组 I 不施加任何外力及扰动处理,对其余三组试件进行扰动试验,C 组在 3 MPa 围压,2 MPa 瓦斯压力下,对轴压 24、26 MPa 进行流变扰动试验,同样 D 组在 3 MPa 围压,2 MPa 瓦斯压力,对轴压 28、32 MPa 进行流变扰动试验,E 组在 5 MPa 围压,

1 MPa 瓦斯压力下,对轴压 42、45 MPa 进行流变扰动试验。扰动方式为冲击砧码自由下落,为了控制扰动能量这一变量,扰动过程中砧码高度保持一致,保证冲击能量相同,期间扰动 2 次,用来模拟现场情况,也防止过多扰动造成下一级孔隙率误差的累积。

2)对煤样试件进行饱和处理,真空抽取时间为 4 h,真空压力阈值为 0.1 MPa,真空抽取完毕后向真空罐内加入适量的液体,持续浸泡 4 h,使试件快速吸收^[28]。在浸泡过程中,对岩芯罐施加 5 MPa 的围压。依次将饱和后的试件放入核磁共振装置中测量,得出扰动前后煤岩末孔隙率、孔径分布图、T2 谱曲线变化图,然后进行分析对比,确定不同加载条件下煤岩的“强度极限邻域”范围以及进入“强度极限邻域”的判断依据。

2.4.1 流变扰动试验结果分析

1)煤岩孔隙度及孔径分布。由表 3 可知,围压 3 MPa,瓦斯压力 2 MPa 时,24 MPa 轴压下扰动后孔隙率均减小,煤岩的孔隙率相对初始煤岩孔隙率减小了 0.9%,受到扰动作用后,孔隙率进一步减少了 0.65%,改变荷载条件,围压 3 MPa,瓦斯压力 1 MPa 和围压 5 MPa,瓦斯压力 1 MPa 时,处在 28、42 MPa 下的煤岩末孔隙率分别减少了 1.1%、0.56%,扰动后,煤岩的孔隙率进一步减少了 0.31% 和 0.2%,说明此时各组的加载条件还没有因为扰动作用使煤岩产生弱化作用,也就是未进入“强度极限邻域”内,试件在轴压的作用下会被压密;各组扰动后的孔隙率小于扰动前的孔隙率,小于初始孔隙率,试件内部损伤不明显。

三组分别在 26、32、45 MPa 轴压下,扰动前与扰动后试件的末孔隙率都大于未扰动时的孔隙率,扰动后没有使孔隙率降低,反而变化更大,试件变得容易破坏,说明试件进入了“强度极限邻域”内,扰动对试件产生了不利影响,扰动进一步使得试件内部损伤程度增大;表 3 可知,围压及瓦斯压力的不同,导致进入“强度极限邻域”的轴压不同,围压不变时,瓦斯压力的升高使得煤岩进入“强度极限邻域”内时的轴压越小;瓦斯压力不变,围压越大,进入“强度极限邻域”内时的轴压越大。原本“强度极限邻域”外,受到相对大围压、小瓦斯压力应力作用下的煤岩,这些应力条件使煤岩孔隙减小,并向有利于煤岩的强度方向发展,却在煤岩进入“强度极限邻域”内后,大围压、小瓦斯压力变成了煤岩孔隙率、破坏程度变化的主要原因^[14];围压越大、瓦斯压力越小,煤岩进入“强度极限邻域”时的敏感程度越高,此时力学性质发生质的改变,且这种改变不利于煤岩的强度。

| 表 3 末孔隙率变化特征 | | | | | | |
|---|------------|--------------|------------|----------|------------|---------------|
| Table 3 Porosity variation characteristics at the end | | | | | | |
| 试件 | 围压/ MPa | 瓦斯压力/ MPa | 轴压/ MPa | 扰动 次数 | 末孔隙 率/% | 末孔隙率 平均值/% |
| 1-1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.62 | 6.61 |
| 1-2 | | | 0 | 0 | 6.60 | |
| C-1 | 3 | 2 | 24 | 0 | 5.79 | 5.71 |
| C-2 | | | 24 | 0 | 5.62 | |
| C-3 | | | 24 | 2 | 5.10 | 5.06 |
| C-4 | | | 24 | 2 | 5.02 | |
| C-5 | | | 26 | 0 | 7.29 | 7.33 |
| C-6 | | | 26 | 0 | 7.37 | |
| C-7 | | | 26 | 2 | 8.38 | 8.36 |
| C-8 | | | 26 | 2 | 8.34 | |
| D-1 | 3 | 1 | 28 | 0 | 5.53 | 5.51 |
| D-2 | | | 28 | 0 | 5.49 | |
| D-3 | | | 28 | 2 | 5.23 | 5.20 |
| D-4 | | | 28 | 2 | 5.18 | |
| D-5 | | | 32 | 0 | 7.56 | 7.60 |
| D-6 | | | 32 | 0 | 7.64 | |
| D-7 | | | 32 | 2 | 8.61 | 8.58 |
| D-8 | | | 32 | 2 | 8.55 | |
| E-1 | 5 | 1 | 42 | 0 | 6.03 | 6.09 |
| E-2 | | | 42 | 0 | 6.14 | |
| E-3 | | | 42 | 2 | 5.84 | 5.89 |
| E-4 | | | 42 | 2 | 5.93 | |
| E-5 | | | 45 | 0 | 8.03 | 8.08 |
| E-6 | | | 45 | 0 | 8.12 | |
| E-7 | | | 45 | 2 | 9.04 | 9.09 |
| E-8 | | | 45 | 2 | 9.13 | |

总的来说,“强度极限邻域”内外扰动后孔隙率变化有不同的表现,“强度极限邻域”外孔隙率的变化对扰动敏感程度低,扰动后,孔隙率整体降低,煤岩的强度提升,煤岩内部损伤可以忽略;但当试件进入“强度极限邻域”内后,孔隙率有着对扰动很强的敏感度,此时,在受到外界扰动后,试件内部的孔隙率变化速率快,孔径扩展迅速,煤岩内部损伤加快,导致煤岩很容易发生破坏。

图 8—10 反映了不同围压、不同瓦斯压力下煤岩体中孔径大小的分布情况。各组在“强度极限邻域”内外不同孔径之间的变化,邻域外时,大部分孔径的孔隙率降低,扰动后煤岩内部损伤小,最终表现为总孔隙的下降;邻域内时,大部分孔径孔隙率增大,扰动后煤岩内部损伤变大,表现为总孔隙的升高;能够清晰地反映出不同孔径孔隙的变化情况。

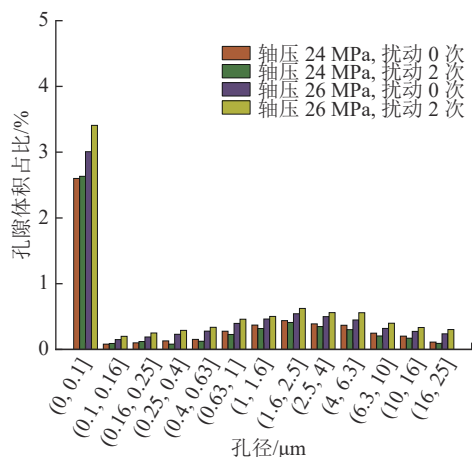


图8 围压3 MPa、瓦斯压力2 MPa 孔径分布

Fig.8 Pore size distribution of confining pressure 3 MPa and gas pressure 2 MPa

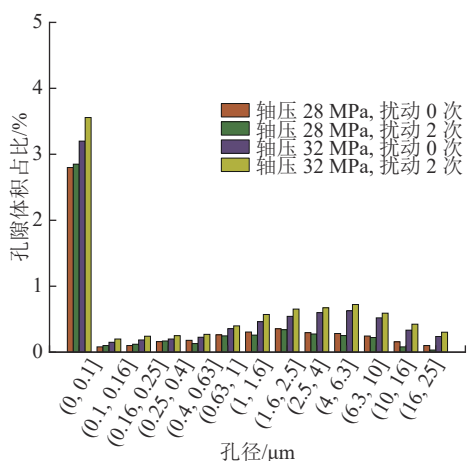


图9 围压3 MPa、瓦斯压力1 MPa 孔径分布

Fig.9 Pore size distribution of confining pressure 3 MPa and gas pressure 1 MPa

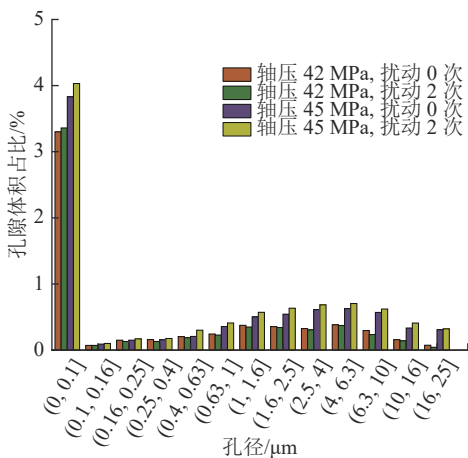
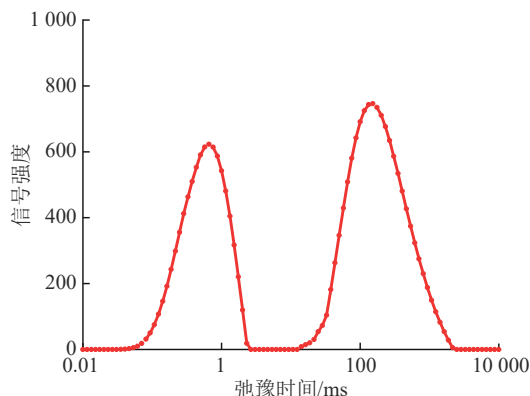


图10 围压5 MPa、瓦斯压力1 MPa 孔径分布

Fig.10 Pore size distribution of confining pressure of 5 MPa and gas pressure of 1 MPa

2)核磁共振 T_2 谱曲线分布。通过初始试件的 T_2 谱曲线(图11)可知,煤岩内部存有缺陷,初始试件

由2个谱峰曲线组成^[28],根据弛豫时间和信号强度关系,首个谱峰曲线为煤岩内部的小孔隙,第二个谱峰代表煤岩内部中的大孔隙,第一谱峰与第二谱峰都较为明显,且两个谱峰之间存在零点,说明试件的连通性比较差,孔隙裂隙之间少有沟通,试件大小孔隙独立且集中分布。

图11 初始试件 T_2 图谱Fig.11 T_2 atlas of initial specimen

如图12所示,当围压为3 MPa,瓦斯压力2 MPa时,在轴压为24 MPa施加扰动后,第1谱峰曲线的高度有变化,但不明显,第2谱峰曲线的高度出现显著下降,且曲线有左侧偏移的趋势,说明在此轴压下,煤岩即产生了新的小孔隙,又有原本存在的小孔隙被压密,最终表现为小孔隙变化不明显,大孔隙孔径的减小是由于轴压的增大而被压密,大孔隙开始向中孔径、小孔径转化,表现在 T_2 图谱中现象显著。因此,在轴压为24 MPa时扰动作用使得煤岩内部的总孔隙减小,没有产生明显缺陷,甚至改善了煤岩的内部结构,使得煤岩在抵抗外力的作用中表现出更好的性质。当轴压达到26 MPa时,扰动后,煤岩的2个谱峰曲线高度都有显著的提升,且谱峰曲线出现向右偏移现象,说明此轴压下煤岩体内的不同孔径的孔隙向上一级孔径发展,即第一谱峰的提高说明新的小孔隙大量形成,不同小孔隙孔径之间通道被贯通,形成了新的大孔隙孔径,而大孔隙孔径继续向外延伸形成较大孔隙孔径,煤岩内部损伤的增大;表明煤岩在轴压26 MPa时进入扰动敏感邻域,即“强度极限邻域”。因此,在围压为3 MPa,瓦斯压力2 MPa时,轴压24~26 MPa是含瓦斯煤岩的“强度极限邻域”范围。如图13—14所示,处在围压3 MPa,瓦斯压力1 MPa;围压5 MPa,瓦斯压力1 MPa的含瓦斯煤岩的 T_2 图谱和图12有着相同的趋势,因此它们的“强度极限邻域”范围分别为28~32 MPa、42~45 MPa。

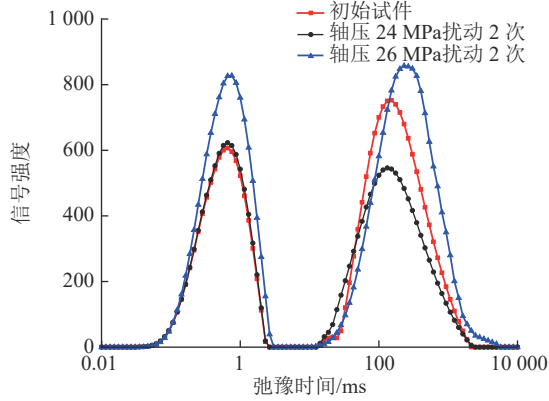


图 12 围压 3 MPa、瓦斯压力 2 MPa 时 T_2 图谱
Fig.12 T_2 map of confining pressure 3 MPa and gas pressure 2 MPa

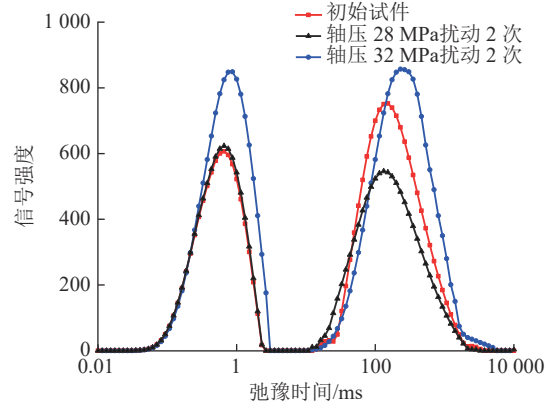


图 13 围压 3 MPa、瓦斯压力 1 MPa 时 T_2 图谱
Fig.13 T_2 map of confining pressure 3 MPa and gas pressure 1 MPa

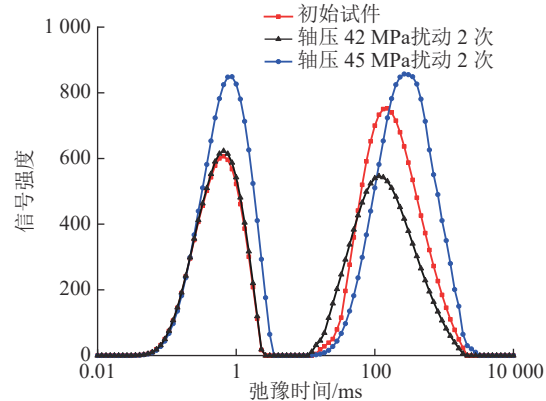


图 14 围压 5 MPa、瓦斯压力 1 MPa 时 T_2 图谱
Fig.14 T_2 map of confining pressure 5 MPa and gas pressure 1 MPa

通过 T_2 图谱中谱峰的移动,以及高度的变化,可以清楚的判断煤岩是否进入了“强度极限邻域”,即当未进入“强度极限邻域”时,小孔径谱峰高度基本不变,大孔径谱峰高度下降且左移;进入邻域后,小孔径及大孔径谱峰高度均提升,且谱峰右移。

3) 流变扰动方程确立。经过分析对比,以孔隙率来判断煤岩是否进入“强度极限邻域”是合理可行的,围压及瓦斯压力均改变了煤岩进入“强度极限邻域”的时机;随着轴压的施加,孔隙率在不断变化,存在对应关系;因此可以通过孔隙率的变化,分析轴压,来明确围压、瓦斯压力对“强度极限邻域”的影响,找到一个判断进入“强度极限邻域”范围合适的方程。

针对上述所有扰动试验的结果分析,对数据整合处理总结,得到图 15。

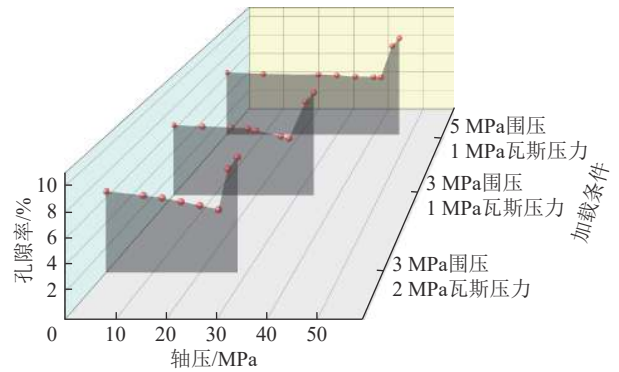


图 15 不同加载条件下轴压孔隙率关系
Fig.15 Relationship of axial compression porosity under different loading conditions

不同条件下的煤岩孔隙率先减小后快速增大,存在一个孔隙率突变的临界点,临界点的出现意味着煤岩对外界的扰动敏感程度突变,外界的扰动作用开始对煤岩产生消极作用,此临界点是判断煤岩“强度极限邻域”内外的关键;随着围压的增大,临界点出现右移的现象,即进入“强度极限邻域”所需的轴压变大,煤岩更晚地进入“强度极限邻域”;随着瓦斯压力的增大,临界点出现左移的现象,煤岩更早进入“强度极限邻域”。

由于进入“强度极限邻域”的影响因素很多,煤岩离散性大,临界点难以准确确定,且临界点在所求“强度极限邻域”范围的左右端点之间,因此,相比确定一个难以确定固定值,确定其范围更加实际,将下列进入“强度极限邻域”时的临界值设为所求“强度极限邻域”范围的左端点,即对本试验数据曲线拟合,如图 16—18 所示。

图 16 表示围压 3 MPa、瓦斯压力 2 MPa 下的轴压与孔隙率的关系,其函数关系为:

$$f(x) = \begin{cases} 6.5 - 0.03x - 0.013x^2, & x < 24 \\ -218 + 16x - 0.29x^2, & x \geq 24 \end{cases}$$

图 17 为 3 MPa 围压、1 MPa 瓦斯压力下的轴压

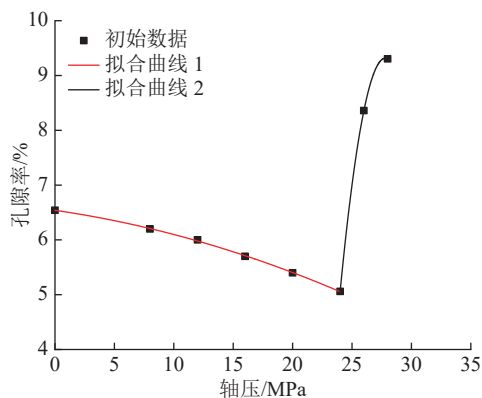


图 16 轴压、孔隙率拟合曲线 a

Fig.16 Axial compression, porosity fitting curve a

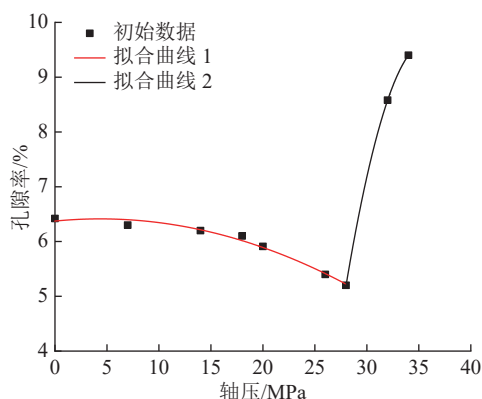


图 17 轴压、孔隙率拟合曲线 b

Fig.17 Axial compression, porosity fitting curve b

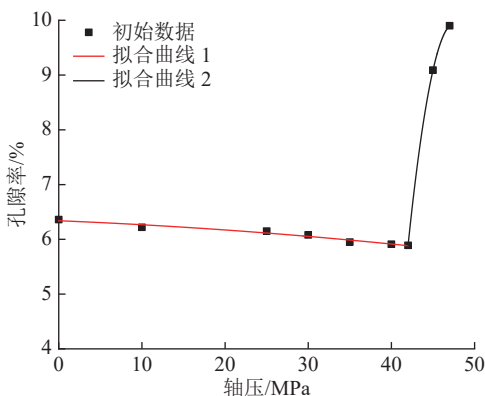


图 18 轴压、孔隙率拟合曲线 c

Fig.18 Axial compression, porosity fitting curve c

与孔隙率的关系,其函数关系为:

$$f(x) = \begin{cases} 6.37 - 0.018x - 0.002x^2, & x < 28 \\ -83.42 + 5.2x - 0.07x^2, & x \geq 28 \end{cases}$$

图 18 为 5 MPa 围压、1 MPa 瓦斯压力下的轴压与孔隙率的关系,其函数关系为:

$$f(x) = \begin{cases} 6.34 - 0.006x - 1.1 \times 10^{-4}x^2, & x < 42 \\ -83.42 + 12.6x - 0.13x^2, & x \geq 42 \end{cases}$$

由此可知,在邻域内外的煤岩拟合过程中,分段拟合更加贴近试验数据,邻域内外有着不同的函数关系,反映出两侧煤岩对扰动不同的敏感程度;围压、瓦斯压力对煤岩进入“强度极限邻域”时的轴压产生影响可以通过煤岩的孔隙率得到反映。因此,对上述“强度极限邻域”范围的左端点所对应的轴压与围压、瓦斯压力数据进行拟合,得图 19。

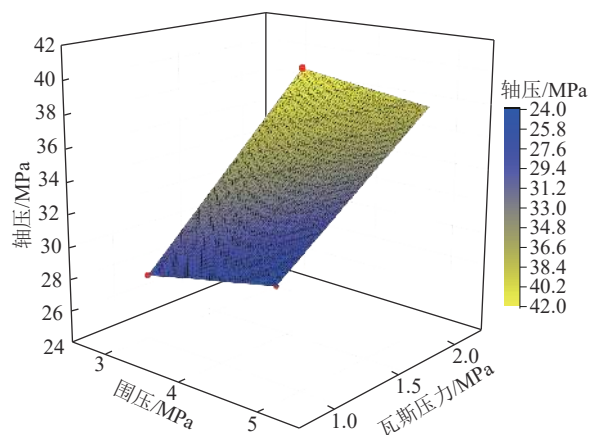


图 19 临界轴压、围压、瓦斯压力拟合

Fig.19 Fitting of critical axial pressure, confining pressure and gas pressure

构建函数方程为:

$$\sigma_1 = 7\sigma_2 - 4\sigma_3 + 11$$

式中: σ_1 为煤岩进入“强度极限邻域”范围时孔隙率所对应轴压; σ_2 为煤岩所受围压; σ_3 为煤岩所受瓦斯压力。

所求 σ_1 为实际“强度极限邻域”范围的左端点,根据上述试验发现,右端点的往往是在左端点不远处,维持在 $1.08\sigma_1 \sim 1.17\sigma_1$ 之间,并大于其长期强度,因此确定“强度极限邻域”范围为 $[\sigma_1, 1.08\sigma_1 \sim 1.17\sigma_1]$ 。可以求出不同加载条件下的含瓦斯煤岩强度极限邻域范围;此时的煤岩对外界扰动敏感程度变化的临界阈值在该范围之间;当所施加的轴压小于等于范围左端点,说明该煤岩此时在“强度极限邻域”之外,煤岩对外界扰动敏感程度低,且扰动对煤岩产生有利作用;当施加的轴压在此范围的右端点之间及以右时,此时处在“强度极限邻域”内,煤岩对外界扰动敏感程度高,孔隙率变化快,产生消极作用。

4) 流变方程的验证。根据拟合结果,发现轴压孔隙率的关系为分段函数,且两段函数均为二次函数形式 $f(x) = ax^2 + bx + c$ 的形式,因此为了验证函数的正确性与适用性,设计一组流变扰动试验来加以验证。

选取围压 5 MPa、瓦斯压力 2 MPa 状态下的煤样进行试验,首先测得抗压强度为 45.66 MPa,将此状态下的煤样轴压分级加载为:12、20、26、30、34、38、39、41 MPa 每级扰动两次,每一级结束后拿出测得孔隙率。其扰动能量造成的损失是不可逆的,对下一级轴压应力下的孔隙率产生一定影响,本次试验对该影响因素忽略不计,孔隙率与分级轴压对应关系如见表 4。

表 4 末孔隙率与分级轴压对应关系

Table 4 The corresponding relationship between the final porosity and the graded axial compression

| 轴压/MPa | 12 | 20 | 26 | 30 | 34 | 38 | 39 | 41 |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 孔隙率/% | 6.23 | 5.92 | 5.74 | 5.58 | 5.43 | 5.37 | 7.22 | 9.07 |

对表格数据进行分段拟合,两段函数均为二次函数形式 $f(x) = ax^2 + bx + c$ 的形式,拟合结果如图 20 所示。

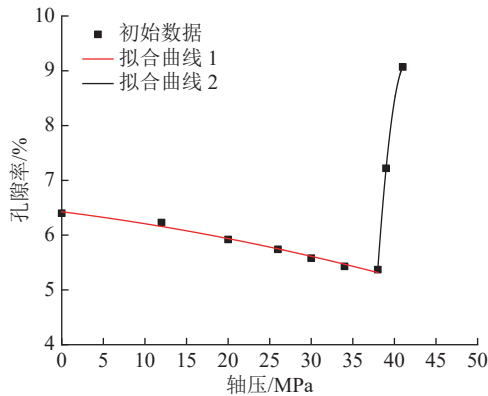


图 20 轴压、孔隙率拟合曲线

Fig.20 Axial compression, porosity fitting curve

图 20 为围压 5 MPa、瓦斯压力 2 MPa 下的轴压与孔隙率的关系,其函数关系为:

$$f(x) = \begin{cases} 6.43 - 0.019x - 0.0003x^2, & x < 38 \\ -521.88 + 25.59x - 0.3x^2, & x \geq 38 \end{cases}$$

经过拟合发现,两段 R^2 均在 0.98 之上,有很好的拟合效果,分别将围压 5 MPa、瓦斯压力 2 MPa 代入公式 $\sigma_1 = 7\sigma_2 - 4\sigma_3 + 11$ 中,得到 σ_1 即为 38 MPa,因此“强度极限邻域”范围为 [38, 41.04 ~ 44.46],显然轴压 38 MPa 时为孔隙率最低点,超过 38 MPa 之后开始进入“强度极限邻域范围”,孔隙率开始受外界扰动后发生质的改变,展现出了很好的适用性。

3 结 论

1) 通过试验分析,瓦斯与围压对煤岩进入“强度

极限邻域”有相反的作用效果,在围压不变的情况下,施加扰动时的瓦斯压力越大,煤岩此时对扰动越敏感,煤岩内部损伤越明显,煤岩越早进入“强度极限邻域”范围;瓦斯压力不变的情况下,扰动时围压越大,煤岩对扰动的敏感程度越低,抑制其内部损伤,煤岩越晚进入“强度极限邻域”范围。

2) 不同加载条件下的煤岩流变过程中,存在一个应力阈值可以使得煤岩受到外部冲击扰动后,阈值左右邻域之间有不同的力学性质表现;当施加力小于此阈值时,冲击扰动后,煤岩的孔隙度减小,煤样随之被压缩紧密, T_2 谱曲线中代表大孔径的谱峰降低,曲线左移;当施加力大于此阈值时,冲击扰动后,煤岩大孔径孔隙增多, T_2 谱曲线出现右移,所有谱峰高度增大;说明该应力阈值是煤岩进入“强度极限邻域”的关键。

3) 围压、瓦斯压力会对进入“强度极限邻域”时刻的轴压产生影响,轴压的变化又反映在煤岩的孔隙率,因此通过煤岩孔隙率所确定的进入“强度极限邻域”时的轴压与围压、瓦斯压力构建函数方程: $\sigma_1 = 7\sigma_2 - 4\sigma_3 + 11$,进而判断煤岩进入“强度极限邻域”的范围在 $[\sigma_1, 1.08\sigma_1 \sim 1.17\sigma_1]$,经过试验验证,该函数方程在不同围压、瓦斯压力下有很好的适用性。

参考文献(References):

- [1] 张超林,王培仲,王恩元,等.我国煤与瓦斯突出机理 70 年发展历程与展望[J].煤田地质与勘探,2023,51(2):59-94.
ZHANG Chaolin, WANG Peizhong, WANG Enyuan, et al. Coal and gas outburst mechanism: Research progress and prospect in China over the past 70 years[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(2): 59-94.
- [2] 张建国,王满,张国川,等.平顶山矿区深部动力灾害防治与资源绿色开采[J].煤炭科学技术,2023,51(1):295-303.
ZHANG Jianguo, WANG Man, ZHANG Guochuan, et al. Prevention and control of deep dynamic disasters and resources green exploitation in Pingdingshan Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 295-303.
- [3] 杨雪林,文光才,孙海涛,等.煤与瓦斯突出冲击动力效应及致灾特征模拟实验系统研制与应用[J].煤炭学报,2023,48(10):3731-3749.
YANG Xuelin, WEN Guangcai, SUN Haitao, et al. Development and application of simulation experimental system for impact dynamic effect and disaster-causing characteristics of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(10): 3731-3749.
- [4] 郝忠,蹇开林,彭守建,等.煤与瓦斯突出过程中瓦斯流动规律的理论模型及数值解法[J].煤炭学报,2020,45(S2):833-840.
HAO Zhong, JIAN Kailin, PENG Shoujian, et al. Theoretical model and numerical method on the law of gas flow in coal and gas

- outburst[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2): 833–840.
- [5] 李海涛, 齐庆新, 赵善坤, 等. 煤矿动力灾害广义“三因素”机理探讨[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(6): 42–52.
LI Haitao, QI Qingxin, ZHAO Shankun, *et al.* Discussion on generalized “Three Factors” mechanism of coal mine dynamic disaster[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(6): 42–52.
- [6] 何学秋, 周世宁. 煤和瓦斯突出机理的流变假说[J]. *煤矿安全*, 1991, 22(10): 1–7.
HE Xueqiu, ZHOU Shining. Rheological hypothesis of coal and methane outburst mechanism[J]. *Safety In Coal Mines*, 1991, 22(10): 1–7.
- [7] 高延法. 岩石流变及其扰动效应试验研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [8] 何学秋, 薛二龙, 聂百胜, 等. 含瓦斯煤岩流变特性研究[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2007, 26(2): 201–203.
HE Xueqiu, XUE Erlong, NIE Baisheng, *et al.* Research on rheology characteristics of coal or rock containing gas[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2007, 26(2): 201–203.
- [9] 胡千庭, 周世宁, 周心权. 煤与瓦斯突出过程的力学作用机理[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(12): 1368–1372.
HU Qianting, ZHOU Shining, ZHOU Xinquan. Mechanical mechanism of coal and gas outburst process[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(12): 1368–1372.
- [10] 聂百胜, 马延崑, 何学秋, 等. 煤与瓦斯突出微观机理探索研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(2): 207–220.
NIE Baisheng, MA Yankun, HE Xueqiu, *et al.* Micro-scale mechanism of coal and gas outburst: a preliminary study[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(2): 207–220.
- [11] 陈绍杰, 郭惟嘉, 杨永杰. 煤岩蠕变模型与破坏特征试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(9): 2595–2598, 2622.
CHEN Shaojie, GUO Weijia, YANG Yongjie. Experimental study of creep model and failure characteristics of coal[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(9): 2595–2598, 2622.
- [12] 王家臣, 邵太升, 赵洪宝. 瓦斯对突出煤力学特性影响试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2011, 28(3): 391–394, 400.
WANG Jiachen, SHAO Taisheng, ZHAO Hongbao. Experimental study of effect of gas on mechanical properties of outburst coal[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(3): 391–394, 400.
- [13] 程春晖, 薛生, 韩一丹. 煤体三轴不同围压下的动态压缩特性[J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(11): 101–106.
CHENG Chunhui, XUE Sheng, HAN Yidan. Dynamic compression characteristics of coal mass triaxial under different confining pressures[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(11): 101–106.
- [14] 李祥春, 张良, 李忠备, 等. 不同瓦斯压力下煤岩三轴加载时蠕变规律及模型[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 473–482.
LI Xiangchun, ZHANG Liang, LI Zhongbei, *et al.* Creep law and model of coal under triaxial loading at different gas pressures[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 473–482.
- [15] 李祥春, 张良, 赵艺良. 常规三轴压力下含瓦斯煤蠕变–渗流演化规律[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(4): 55–62.
LI Xiangchun, ZHANG Liang, ZHAO Yiliang. Evolution of gas-filled coal creep-seepage under conventional triaxial compression[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(4): 55–62.
- [16] 刘玉龙, 汤达祯, 许浩, 等. 不同围压下中煤阶煤岩孔裂隙核磁共振响应特征[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(S1): 149–153.
LIU Yulong, TANG Dazhen, XU Hao, *et al.* Characteristics of medium rank coal pore-fracture nuclear magnetic resonance under different pressures[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(S1): 149–153.
- [17] 李胜, 王箫鹤, 范超军, 等. 冲击载荷作用下煤岩孔隙演化特征试验研究[J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(10): 91–97.
LI Sheng, WANG Xiaohe, FAN Chaojun, *et al.* Experimental study on evolution characteristics of coal pores under impact loadings[J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(10): 91–97.
- [18] 王波, 刘重阳, 陈学习, 等. RRTS-IV型岩石流变扰动效应试验系统[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(S2): 484–491.
WANG Bo, LIU (Chong) (Zhong) (Yang), CHEN Xuexi, *et al.* Experimental system of rheological disturbance effect of RRTS-IV rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S2): 484–491.
- [19] 李回贵, 王军, 李晓龙, 等. 瓦斯压力对突出煤层煤样力学特征影响规律的研究[J]. *矿业安全与环保*, 2022, 49(4): 129–134.
LI Huigui, WANG Jun, LI Xiaolong, *et al.* Study on influence law of gas pressure on mechanical characteristic of coal samples in outburst coal seam[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2022, 49(4): 129–134.
- [20] 杜伟乾. 冲击动载下含瓦斯煤体破裂机制模拟研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
DU Weiqian. Simulation study on the fracture mechanism of gas-bearing coal under dynamic load[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022. Gas-Bearing Coal under Dynamic Load [D]. China University of Mining and Technology, 2022.
- [21] 王广宏, 李文. 基于尺度效应的含瓦斯煤体力学性质研究[J]. *能源与环保*, 2021, 43(8): 19–24.
WANG Guanghong, LI Wen. Research on mechanical properties of gas-bearing coal body based on scale effect[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2021, 43(8): 19–24.
- [22] 王波, 高昌炎, 陈学习, 等. 岩石流变扰动特性单轴压缩试验研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(6): 1443–1450.
WANG Bo, GAO Changyan, CHEN Xuexi, *et al.* Axial load test study on the perturbation properties of rock rheology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(6): 1443–1450.
- [23] 崔希海, 付志亮. 岩石流变特性及长期强度的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(5): 1021–1024.
CUI Xihai, FU Zhiliang. Experimental study on rheology properties and long-term strength of rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 1021–1024.
- [24] 王磊, 张帅, 刘怀谦, 等. 冲击载荷下含瓦斯煤力学特性与破坏特征[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(6): 1323–1334.
WANG Lei, ZHANG Shuai, LIU Huaiqian, *et al.* Mechanical properties and damage characteristics of gas-bearing coal under impact loading[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023,

- 40(6): 1323–1334.
- [25] 郝宪杰, 袁亮, 王飞, 等. 三轴压缩煤样破坏规律及剪切强度参数的反演[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(4): 730–738.
HAO Xianjie, YUAN Liang, WANG Fei, *et al.* Analysis of failure of coal under tri-axial compression and inversion of its shear strength parameters[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(4): 730–738.
- [26] 赵方钰, 邓泽, 王海超, 等. 煤体结构与宏观煤岩类型对煤体吸附/解吸瓦斯的影响[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 170–184.
ZHAO Fangyu, DENG Ze, WANG Haichao, *et al.* Influence of coal structure and macrolithotype of coal on coal adsorption and desorption of gas[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(12): 170–184.
- [27] 王波, 陆长亮, 黄子康, 等. 岩石三轴流变扰动效应损伤演化特征试验研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(4): 5–14.
WANG Bo, LU Changliang, HUANG Zikang, *et al.* Experimental study on damage evolution characteristics of rock under triaxial rheological disturbance[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2021, 3(4): 5–14.
- [28] 张超谟, 陈振标, 张占松, 等. 基于核磁共振 T_2 谱分布的储层岩石孔隙分形结构研究[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(4): 80–86, 166–167.
ZHANG Chaomo, CHEN Zhenbiao, ZHANG Zhansong, *et al.* Fractal characteristics of reservoir rock pore structure based on NMR T_2 distribution[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007, 29(4): 80–86, 166–167.