

安全技术及工程

加卸载速率对含瓦斯煤损伤-渗透时效特性影响试验研究

徐超^{1,2,3},王硕²,王-然²,宋桂军⁴,蔡永博²,付强²

(1.中国矿业大学(北京) 伙伴生能源精准开采北京市重点实验室,北京 100083;2.中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院,北京 100083;

3.河南理工大学 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地,河南 焦作 454150;

4.神东煤炭集团有限责任公司 神东煤炭技术研究院,陕西 神木 719315)

摘要:为探索轴压加载速率和围压卸载速率对采动含瓦斯煤损伤-渗透时效特性的影响规律,利用煤岩吸附-渗流-力学耦合特性测定仪开展了不同加卸载速率条件下煤体损伤-渗透试验。研究结果表明,轴压加载速率或围压卸载速率越高,试样损伤破坏的时间响应越快,峰值强度呈小幅度降低,即加卸载速率显著影响着试样损伤破坏的时效特性,但对试样抵抗破坏的能力影响较小;加卸载速率较低时试样呈相对稳态损伤,加卸载速率较高时试样损伤程度较高且呈非稳态损伤特征,易发生突崩式破坏;加卸载速率越高,则试样渗透率的时间响应越快,增幅越大,恒轴压卸围压试样的峰后渗透率可达到原始渗透率的 163.0%~206.3%;围压卸载对采动煤体损伤-渗透的影响作用远大于轴压加载,因此在工程实践中需适当控制煤层开采速度,以有效避免煤岩瓦斯动力灾害。

关键词:含瓦斯煤;加卸载速率;损伤演化;渗透率;时效特性

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)05-0093-09

Experiments study on effects of loading and unloading rates on damage-permeability aging characteristics of gas-bearing coal

XU Chao^{1,2,3}, WANG Shuo², WANG Yiran², SONG Guijun⁴, CAI Yongbo², FU Qiang²

(1.Beijing Key Laboratory for Precise Mining of Intergrown Energy and Resources, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2.Faculty of Resources & Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

3.State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454150, China;

4.Shendong Coal Technology Research Institute, Shendong Coal Group Co., Ltd., Shenmu 719315, China)

Abstract: For exploring the effects of the loading and unloading rates on the damage-permeability aging characteristics of gas-bearing coal, the damage-permeability experiments for gassy coal were performed with the different loading and unloading rates by the experimental equipment for coupling adsorption-seepage-mechanic properties in the paper. The results show that the higher the axial loading rate or confining pressure unloading rate is, the faster the time response of the coal damage is and the slightly lower the peak strength of coal is; that is, the loading and unloading rates significantly affect the aging characteristics of coal damage, but have less effects on the ability of coal to resist failure. The coal samples are damaged steadily with the lower loading and unloading rates while the coal samples are damaged and destroyed acutely with the higher loading and unloading rates. The higher the loading and unloading rates are, the faster the time response to the permeability is and the larger permeability increase is; the post-strength permeability of the coal with the conditions of decreasing confining pressure and fixing axial loads can reach 163.0%~206.3% of the original permeability. The effect of confining pressure unloading on the damage-permeability characteristics of mining coal mass is much greater than that of axial loading and thus the coal mining speed should be properly controlled for avoiding the coal-rock gas dynamic hazards in the engineering practices.

收稿日期:2018-03-08;责任编辑:代艳玲 DOI:10.13199/j.cnki.est.2018.05.015

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51604278);河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地开放基金资助项目(WS2017B04);中国矿业大学(北京)大学生创新训练计划资助项目(C20170162)

作者简介:徐超(1988—),男,山东泰安人,硕士生导师,讲师,博士。E-mail:xuchaocumt@126.com

引用格式:徐超,王硕,王-然,等.加卸载速率对含瓦斯煤损伤-渗透时效特性影响试验研究[J].煤炭科学技术,2018,46(5):93-101.

XU Chao, WANG Shuo, WANG Yiran, et al. Experiments study on effects of loading and unloading rates on damage-permeability aging characteristics of gas-bearing coal[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(5): 93-101.

Key words: gas-bearing coal; loading and unloading rates; damage evolution; permeability; aging characteristic

0 引言

近年来,随着煤炭开采规模和速度的不断增大,采动煤体承受了愈加复杂的力学状态变化^[1-2]。工作面前方煤体的受力过程主要表现为与开挖方向一致的水平应力逐渐卸除,而垂直应力陡增,并由三维受力状态逐渐过渡为二维受力状态,即垂直应力增加、水平应力卸除的综合作用^[3]。工作面推进速度不同,则采动煤体的垂直应力增加速率和水平应力卸除速率也具有较大差异性。实践表明,采动煤体的强度、变形、渗流等特征均具有较强的时效特性,会随着加卸载速率的变化而发生显著改变,并深刻影响着煤岩瓦斯动力灾害的演化过程^[4]。因此,研究不同加卸载速率条件下采动煤体损伤-渗透时效特性是非常有必要的。

国内外学者针对采动煤体的损伤-渗透特性开展了大量工作。在常规加载试验方面,贾炳等^[5]探究了非均质煤样在加载过程中声发射响应规律,王家臣等^[6]研究了瓦斯对突出煤力学特性的影响。在卸围压试验方面,程远平等^[7]提出了煤体卸荷渗透率演化概念模型,发现原生裂隙扩展与新生裂隙综合作用是导致卸荷煤体渗透率骤增的主因。潘荣琨等^[8]研究了不同卸载状态时甲烷在煤体中的渗透行为及引起煤体微观结构的应力效应。在同时加轴压卸围压试验方面,尹光志等^[9]发现不同加卸载条件下含瓦斯煤的承载强度、弹性模量、泊松比等力学特性表现各异。许江等^[10]分析了加卸载条件下煤岩变形特性和渗透特征的演化规律,将煤岩全应力应变与渗透率变化特征分为初始压密和屈服、屈服后、破坏失稳等3个阶段。徐超等^[11]试验发现不同的力学路径对试样造成不同程度的损伤扩容和渗透率变化,且具有明显的时效特性。在循环荷载试验方面,刘刚等^[12]发现随着循环峰值应力的增加,循环峰值轴向应变、径向应变和塑性变形均呈线性增长。李晓泉等^[13]发现循环荷载作用使煤样产生塑性变形,随着循环次数增加弹性模量和渗透率逐渐下降。分析上述文献可知,目前研究人员大多基于不同的力学路径研究全应力应变过程中煤体损伤-渗透演化规律。也有部分学者分析了加卸载速率对煤体损伤与渗透特性的影响^[14-16],但较少研究加

卸载速率对采动煤体损伤-渗透时效特性的影响。因此,笔者根据采动煤体实际受力状态设定合适的力学路径,开展不同加卸载速率条件下含瓦斯煤体损伤-渗透试验,分析加卸载速率对采动煤体损伤-渗透时效特性的影响,以期掌握煤岩瓦斯动力灾害机理及其防治提供借鉴。

1 试验

1.1 试验样品

试验煤样取自埋深610 m处的淮北矿区杨柳煤矿104采区10号煤层。由于杨柳煤矿地质构造复杂、岩浆侵蚀严重,10号煤层煤体原生结构已遭到破坏,强度和硬度较低,导致无法在井下取得完整的大块煤样,难以制得原煤试样,因此采用型煤试样开展相关的研究。在试验室将从现场取回的煤样进行磨碎并筛分为0.20~0.25 mm粒度的煤粒,向煤粒中喷入少量雾化水并搅拌均匀,然后将煤样放入特制的型煤制作模具,在刚性压力机中施加200 kN的稳定压力并保持3 h。将试样从模具中取出后放入真空干燥箱,保持60℃恒温真空干燥24 h,用切割机将试样加工为 $\phi 50$ mm \times 100 mm的标准型煤试样。

1.2 试验装置

试验采用煤岩吸附-渗流-力学耦合特性测定仪(图1),该试验系统包含载荷模块、渗流模块和声发射(AE)模块,详细介绍参见文献[17-18]。在加卸载试验的同时,采用瞬态法测定煤体的渗透率,同时采用CTA-1声发射信号采集系统实时监测采集AE信号。

1.3 试验方案与步骤

根据采动煤体的实际受力状态并将其进行适当简化,设计了3种力学路径共11组试验,分别是恒定围压增加轴压、恒定轴压卸除围压和同时增加轴压卸除围压。首先以静水压力方式同时施加轴压和围压至预定值;然后通瓦斯气体,并保持1 MPa的吸附平衡压力;然后按照表1的加卸载方案(轴压加载速率分别为40、80、120 N/s,围压卸载速率分别为10、15、20 N/s)开展加卸载试验,直至煤样破坏。随后继续以位移控制方式进行加卸载,直到煤样的残余强度趋于稳定。

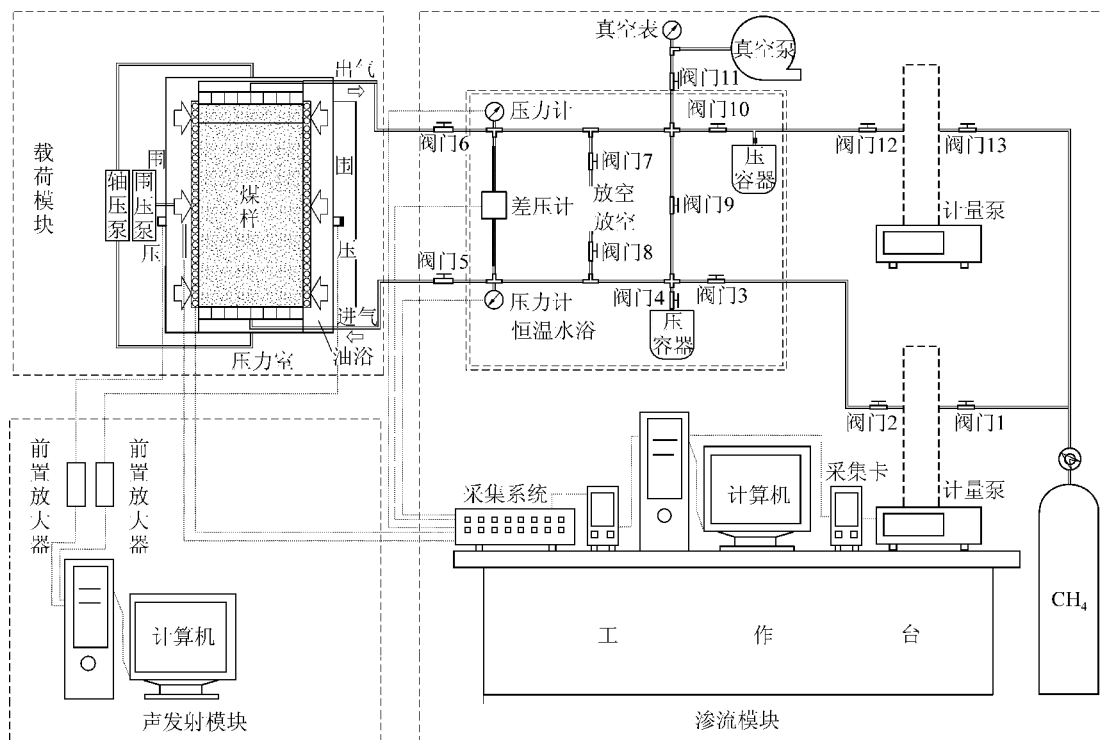


图1 煤岩吸附-渗流-力学耦合特性测定仪原理

Fig.1 Schematic map of experimental equipment for coupling adsorption-seepage-mechanic properties

表1 含瓦斯煤损伤-渗透试验方案参数

Table 1 Program parameters of gas-bearing coal damage and permeability experiments

力学 路径	试样 编号	瓦斯 压力/ MPa	初始 围压/ MPa	初始 轴压 加载 力/kN	轴压 加载 速率/ (N·s ⁻¹)	围压 卸载 速率/ (N·s ⁻¹)
恒围压 加轴压	1-1	1	7	—	40	0
	1-2	1	7	—	80	0
	1-3	1	7	—	120	0
恒轴压 卸围压	2-1	1	7	25	0	10
	2-2	1	7	25	0	15
	2-3	1	7	25	0	20
同时加轴 压卸围压	3-1	1	7	10	40	10
	3-2	1	7	10	80	10
	3-3	1	7	10	120	10
	3-4	1	7	10	80	15
	3-5	1	7	10	80	20

2 含瓦斯煤损伤-渗透试验结果分析

2.1 轴压加载速率对煤体损伤-渗透时效特性的影响

煤层开采过程中,受采空区悬顶和顶板岩层破断动载荷影响,工作面前方采动煤体的应力集中程

度明显增加,深刻影响着采动煤体的力学、损伤、渗透特性。本节以不同的轴压加载速率代表不同程度的垂向载荷速率,分别选取恒围压加轴压(样品 1-1、1-2、1-3)、同时加轴压卸围压(样品 3-1、3-2、3-3)为研究对象,分析垂向载荷速率对煤体损伤-渗透时效特性的影响。

2.1.1 加载煤体的变形与强度特征

测定试样加卸载过程中的应力-应变、应力-时间的关系,结果如图2所示。由图2可以看出,在恒围压加轴压试验中,随着轴压加载速率的提高,3组试样发生损伤破坏时的轴向应变分别为0.038 0、0.032 6、0.042 5,径向应变分别为-0.021 4、-0.017 3、-0.022 8,峰值强度分别为17.6、17.2、17.1 MPa。由此可知,随着轴压加载速率的增大,试样破坏时的轴向应变和径向应变先减小后增大,而试样的峰值强度逐渐降低但降幅较小。可以认为,当围压恒定时准静态载荷下的轴压加载速率主要影响了试样损伤破坏过程,但对试样抵抗破坏的能力影响相对较小。与此不同的是,在同时加轴压卸围压试验中,随着轴压加载速率的提高,3组试样的峰值强度由11.5 MPa增至16.8 MPa,这是因为轴压加载速率越高,试样破坏时对应的围压越大,导致试样峰值强度越大。

在恒围压加轴压试验中,随着轴压加载速率的提

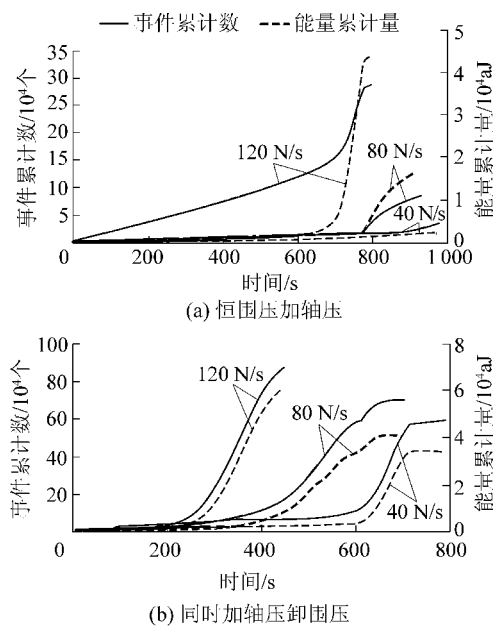


图3 不同轴压加载速率下AE信号随时间的变化关系

Fig.3 AE variation against time with different loading rates

2.1.3 加载煤体的渗透特征

采用瞬态法测定试样加卸载过程中的渗透率,结果如图4所示。由图4可以看出,试样渗透率在初始阶段逐渐减小,进入损伤扩容阶段后开始恢复反弹;不同加卸载条件下,试样渗透率的时间响应与变化幅值均具有较大差异性。恒围压加轴压试验过程中,随着轴压加载速率的提高,3组试样从初始加载至渗透率降至最小值所耗时间由492 s降至401 s,渗透率最小值分别为原始渗透率的66.5%、74.7%、72.2%;同时加轴压卸围压试验中,从初始加卸载至渗透率降至最小值所耗时间由237 s降至139 s,渗透率最小值分别为原始渗透率的73.4%、57.4%、69.3%。

试样的损伤扩容导致孔隙率的增加,孔隙率增加又会促进渗透率的提高,因此渗透率与损伤扩容是协同变化的。

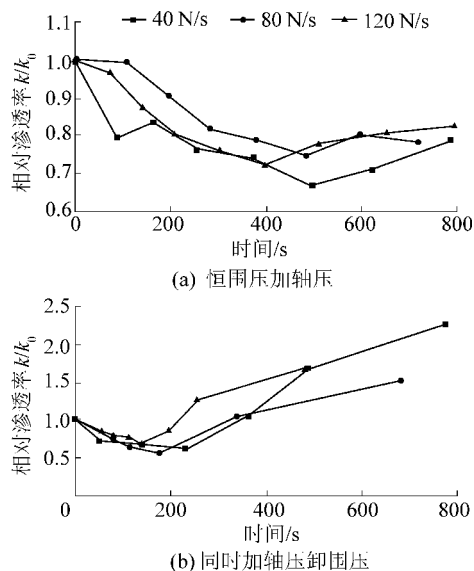


图4 不同轴压加载速率下渗透率随时间的变化关系

Fig.4 Permeability variation against time with different loading rates

恒围压加轴压试验中,围压始终恒定为7 MPa,由前文AE试验结果可知,试样的损伤程度整体较轻且随轴压加载速率的提高而增大,由此导致3组试样的峰后渗透率仅恢复为原始渗透率的78.6%、78.4%、82.3%,渗透率恢复程度较小且基本随轴压加载速率的提高而增大。而在同时加轴压卸围压试验中,随轴压加载速率的提高,试样损伤程度增大,渗透率也相应增大;但轴压加载速率越高,试样破坏时对应的围压越大,在高围压作用下试样孔隙率减小,渗透率也相应减小。因此,轴压加载速率与围压对渗透率的作用是相反的,导致同时加轴压卸围压试验中3组试样的峰后渗透率最终恢复至原始渗透率的227.6%、151.6%、167.1%,这也表明了围压卸载对渗透率的影响远大于轴压加载。拟合发现,自扩容点时刻 t_0 起,试样相对渗透率 k/k_0 随时间变化符合幂函数关系(表2)。

表2 不同轴压加载速率下AE信号、渗透率随时间的拟合关系

Table 2 Fitting relationship of AE and permeability and time with different loading rates

试验 编号	扩容点 时刻 t_0/s	事件累计数/ 10^4 个		能量累计量 $E/10^4$ aJ		相对渗透率 k/k_0	
		拟合公式	拟合系数	拟合公式	拟合系数	拟合公式	拟合系数
1-1	475	$N = 0.749 1e^{0.002 4(t-t_0)}$	0.869 9	$E = 0.061 0e^{0.001 7(t-t_0)}$	0.941 9	$k/k_0 = 0.539 0 (t - t_0)^{0.066 4}$	0.850 3
1-2	341	$N = 0.388 7e^{0.005 0(t-t_0)}$	0.859 5	$E = 0.039 7e^{0.006 1(t-t_0)}$	0.775 9	$k/k_0 = 0.509 6 (t - t_0)^{0.077 7}$	0.820 8
1-3	380	$N = 8.212 8e^{0.002 6(t-t_0)}$	0.922 9	$E = 0.022 4e^{0.010 3(t-t_0)}$	0.879 6	$k/k_0 = 0.630 3 (t - t_0)^{0.044 0}$	0.998 3
3-1	191	$N = 2.333 8e^{0.005 0(t-t_0)}$	0.802 8	$E = 0.077 4e^{0.005 7(t-t_0)}$	0.700 7	$k/k_0 = 0.089 2 (t - t_0)^{0.503 5}$	0.979 5
3-2	126	$N = 1.608 6e^{0.005 2(t-t_0)}$	0.984 1	$E = 0.059 3e^{0.009 1(t-t_0)}$	0.974 4	$k/k_0 = 0.116 2 (t - t_0)^{0.403 9}$	0.983 2
3-3	91	$N = 1.024 5e^{0.013 6(t-t_0)}$	0.978 9	$E = 0.038 9e^{0.015 3(t-t_0)}$	0.964 5	$k/k_0 = 0.124 3 (t - t_0)^{0.435 9}$	0.968 5

2.2.2 卸载煤体的损伤特征

不同围压卸载速率下 AE 信号随时间的变化关系如图 6 所示。从图 6 可以看出,在恒轴压卸围压试验中,随着围压卸载速率的提高,3 组试样自初始卸载围压至 AE 信号陡增所需时间由 918 s 降至 668 s,能量累计量由 79 100 aJ 增至 590 400 aJ,事件累计数由 9.90 万个增至 46.25 万个;同时加轴压卸围压试验中,3 组试样自初始卸载围压至 AE 信号陡增所需时间由 296 s 降至 152 s,能量累计量由 41 200 aJ 增至 62 800 aJ,事件累计数由 70.06 万个增至 92.40 万个。可以发现,随着轴压加载速率的提高,AE 信号陡增所需时间逐渐减少,事件计数和能量计数均逐渐增多,且当试样发生损伤破坏时 AE 信号的变化斜率增大,这与前文所述的试样变形和强度特征规律相符。究其原因,与轴压加载试验一致的是,在试样受载损伤过程中,试样需要一定的时间来产生颗粒界面滑移与微裂纹静态扩展,当围压卸载速率较低时试样内部的颗粒界面滑移和微裂纹扩展得到了充分发育,试样发生连续均匀损伤;而当围压卸载速率较高时试样由连续均匀损伤转变为局部化损伤,损伤扩容主要发生在应力峰值前后。因此,随着围压卸载速率的提高,试样自身的储能释放速率加快,损伤程度越高且呈非稳态特征,最终越容

易发生突崩式破坏。由此可知,卸载速率影响采动煤体的损伤时效特性,为避免采动煤体急剧失稳,应尽量控制煤层开采速度。拟合发现,围压卸载过程中自扩容点时刻 t_0 起,AE 事件累计数 N 和能量累计量 E 随时间变化符合指数函数关系(表 3)。

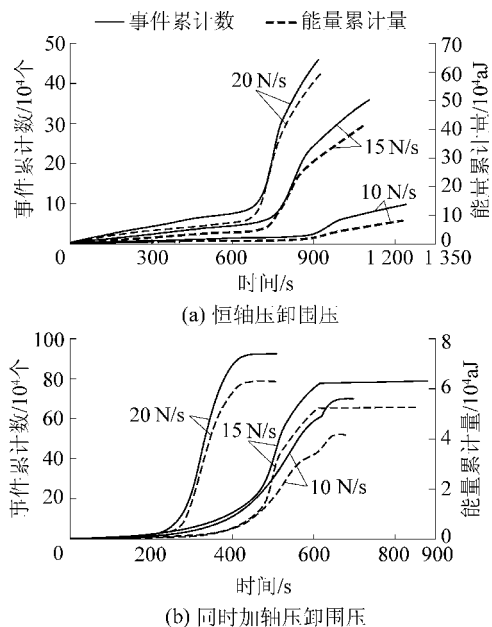


图 6 不同围压卸载速率下 AE 信号随时间的变化关系
Fig.6 AE variation against time with different unloading rates

表 3 不同围压卸载速率下 AE 信号、渗透率随时间的拟合关系

Table 3 Fitting relationship of AE and permeability and time with different unloading rates

试验 编号	扩容点 时刻 t_0/s	事件累计数 $N/10^4$ 个		能量累计量 $E/10^4$ aJ		相对渗透率 k/k_0	
		拟合公式	拟合系数	拟合公式	拟合系数	拟合公式	拟合系数
2-1	426	$N = 0.666 6e^{0.003 4(t-t_0)}$	0.903 8	$E = 0.581 e^{0.003 2(t-t_0)}$	0.905 0	$k/k_0 = 0.093 7 (t - t_0)^{0.421 4}$	0.965 3
2-2	489	$N = 5.116 1e^{0.004 5(t-t_0)}$	0.932 1	$E = 4.613 5e^{0.005 1(t-t_0)}$	0.921 6	$k/k_0 = 0.103 3 (t - t_0)^{0.435 3}$	0.993 9
2-3	515	$N = 5.259 1e^{0.005 8(t-t_0)}$	0.933 0	$E = 4.800 7e^{0.006 8(t-t_0)}$	0.927 1	$k/k_0 = 0.073 7 (t - t_0)^{0.541 8}$	0.995 7
3-2	126	$N = 1.608 6e^{0.005 2(t-t_0)}$	0.984 1	$E = 0.059 3e^{0.009 1(t-t_0)}$	0.974 4	$k/k_0 = 0.116 2 (t - t_0)^{0.403 9}$	0.983 2
3-4	115	$N = 0.751 7e^{0.009 8(t-t_0)}$	0.984 6	$E = 0.020 1e^{0.010 0(t-t_0)}$	0.979 4	$k/k_0 = 0.107 6 (t - t_0)^{0.422 9}$	0.809 5
3-5	100	$N = 1.421 6e^{0.006 0(t-t_0)}$	0.981 4	$E = 0.034 5e^{0.006 0(t-t_0)}$	0.977 1	$k/k_0 = 0.143 0 (t - t_0)^{0.456 2}$	0.889 3

2.2.3 卸载煤体的渗透特征

恒轴压卸围压试验中,随着围压卸载速率的提高,3 组试样从初始卸载围压至渗透率降至最小值所耗时间由 531 s 降至 520 s;同时加轴压卸围压试验中,3 组试样从初始加卸载至渗透率降至最小值所耗时间由 174 s 降至 108 s(图 7)。这是因为,围压卸载速率越高,试样在同一时刻所受的围压越小、差应力越大。在较低围压和较高差应力影响下,试

样在弹性阶段的渗透率衰减速率越快。

当试样发生损伤扩容之后孔隙率相应增大,导致渗透率进而增大。由前面分析可知,试样损伤程度随围压卸载速率的提高而增大,孔隙率也相应增大,因此渗透率恢复程度随围压卸载速率的提高而提高。特别是对于同时加轴压卸围压试验过程,试样损伤程度在较高围压卸载速率和较低围压的共同作用下显著增大,进而导致渗透率发生陡增。因此,

恒轴压卸围压试验中,随着围压卸载速率的提高,3组试样的峰后渗透率增幅由原始渗透率的163.0%增至206.3%;而同时加轴压卸围压试验中,3组试样的峰后渗透率增幅由原始渗透率的151.6%增至249.5%,显著大于恒轴压卸围压试验结果。卸围压过程中自扩容点时刻 t_0 起,试样的相对渗透率 k/k_0 随时间变化符合幂函数关系(表3)。

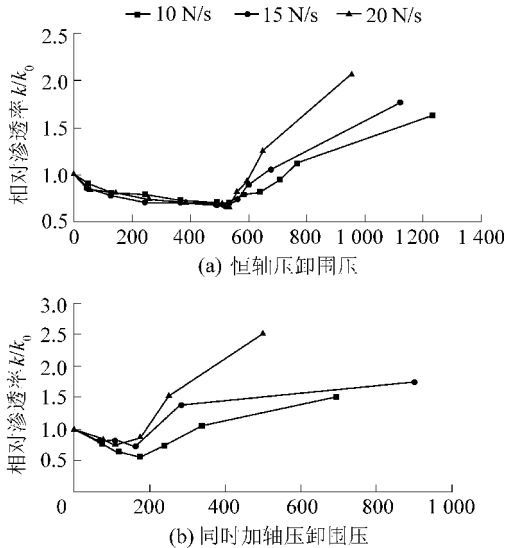


图7 不同围压卸载速率下渗透率随时间的变化关系

Fig.7 Permeability variation against time with different unloading rates

2.3 加卸载速率对煤体损伤-渗透时效特性影响对比分析

将前文分析结果进一步对比分析,探讨轴压加载速率和围压卸载速率对含瓦斯煤损伤-渗透时效特性的影响。在恒围压加轴压试验中,随着轴压加载速率的提高,试样发生损伤破坏所需的时间由810 s降至652 s,峰值强度由17.6 MPa微降至17.1 MPa;在恒轴压卸围压试验中,随着围压卸载速率的提高,试样发生损伤破坏所耗时间由770 s降至648 s,峰值强度由14.74 MPa微降至14.49 MPa。这表明当其他条件不变时,轴压加载速率和围压卸载速率显著影响着试样损伤破坏的时效特性,并改变了试样损伤破坏过程,但对试样抵抗破坏的能力影响较小。为避免采动煤体的加速失稳破坏,应尽可能地减小垂向载荷速率或围压卸载速率。

在恒围压加轴压试验中,随着轴压加载速率的提高,试样的能量累计量由1 600 aJ增至43 200 aJ,事件累计数由3.0万个增至28.86万个;在恒轴压卸围压试验中,随着围压卸载速率的提高,试样的能量累计量由79 100 aJ增至590 400 aJ,事件累计数由

9.90万个增至46.25万个。与此相应地,恒围压加轴压试样的峰后渗透率仅恢复为原始渗透率的78.4%~82.3%,而恒轴压卸围压试样的峰后渗透率恢复为原始渗透率的163.0%~206.3%。这表明围压卸载对采动煤体损伤-渗透的影响作用远大于轴压加载。因此在工程实践中,既要尽量避免采动应力集中,更要适当控制煤层开采速度,减缓围压卸载量与卸载速率对采动煤体损伤-渗透时效特性的影响,从而有效避免煤岩瓦斯动力灾害。

3 结 论

1) 当其他条件不变时,轴压加载速率或围压卸载速率越高,则试样损伤破坏的时间响应越快,峰值强度逐渐降低但降幅较小。当加卸载速率增大时,恒围压加轴压试样破坏时的轴向应变和径向应变均先减小后增大,而恒轴压卸围压试样破坏时的轴向应变和径向应变均逐渐减小。可以认为,加卸载速率显著影响着试样损伤破坏的时效特性,并改变了试样损伤破坏过程,但对试样抵抗破坏的能力影响较小。

2) 轴压加载速率或围压卸载速率较低时,试样呈相对稳态损伤;轴压加载速率或围压卸载速率较高时,试样损伤程度较高且呈非稳态损伤特征,易发生突崩式破坏。加卸载过程中AE事件累计数和能量累计量随时间变化符合指数函数关系。

3) 煤样渗透率与损伤扩容是协同变化的。当其他条件不变时,轴压加载速率或围压卸载速率越高,则试样损伤程度越大,导致试样渗透率的时间响应越快,渗透率增幅越大。恒围压加轴压试样的峰后渗透率仅恢复为原始渗透率的78.4%~82.3%,而恒轴压卸围压试样的峰后渗透率恢复为原始渗透率的163.0%~206.3%。试样损伤扩容后的相对渗透率随时间变化符合幂函数关系。

4) 围压卸载对采动煤体损伤-渗透的影响作用远大于轴压加载。在工程实践中,既要尽量避免采动应力集中,更要适当控制煤层开采速度,减缓围压卸载量与卸载速率对采动煤体损伤-渗透时效特性的影响,从而有效避免煤岩瓦斯动力灾害。

参考文献(References):

[1] 袁 亮.煤炭精准开采科学构想[J].煤炭学报,2017,42(1):1-7.

YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J].

- Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1-7.
- [2] 谢和平,周宏伟,刘建锋,等.不同开采条件下采动力学行为研究[J].煤炭学报, 2011, 36(7): 1067-1074.
XIE Heping, ZHOU Hongwei, LIU Jianfeng, *et al.* Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1067-1074.
- [3] ZHAO X G, WANG J, CAI M, *et al.* Influence of unloading rate on the strainburst characteristics of Beishan granite under true-triaxial unloading conditions [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(2): 467-483.
- [4] XUE Yi, GAO Feng, LIU Xingguang. Effect of damage evolution of coal on permeability variation and analysis of gas outburst hazard with coal mining [J]. Natural Hazards, 2015, 79(2): 999-1013.
- [5] 贾炳,倪小明,苏承东.煤样加载过程声发射响应特征试验研究[J].煤炭科学技术, 2014, 42(7): 33-36.
JIA Bing, NI Xiaoming, SU Chengdong. Experimental study on response features of acoustic emission to coal samples during loading process [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(7): 33-36.
- [6] 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.
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.
- [7] 程远平,刘洪永,郭品坤,等.深部含瓦斯煤体渗透率演化及卸荷增透理论模型[J].煤炭学报, 2014, 39(8): 1650-1658.
CHENG Yuanping, LIU Hongyong, GUO Pinkun, *et al.* A theoretical model and evolution characteristic of mining-enhanced permeability in deeper gassy coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1650-1658.
- [8] 潘荣锬,王力,陈向军,等.卸载煤体渗透特性及微观结构应力效应研究[J].煤炭科学技术, 2013, 41(7): 75-78.
PAN Rongkun, WANG Li, CHEN Xiangjun, *et al.* Study on permeability characteristics of unloading coal body and stress effect of microstructure [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(7): 75-78.
- [9] 尹光志,李文璞,李铭辉,等.不同加卸载条件下含瓦斯煤力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 891-901.
YIN Guangzhi, LI Wenpu, LI Minghui, *et al.* Experimental study of mechanical properties of coal containing methane under different loading-unloading conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 891-901.
- [10] 许江,李波波,周婷,等.加卸载条件下煤岩变形特性与渗透特征的试验研究[J].煤炭学报, 2012, 37(9): 1493-1498.
XU Jiang, LI Bobo, ZHOU Ting, *et al.* Experimental study of coal deformation and permeability characteristics under loading-unloading conditions [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1493-1498.
- [11] 徐超,付强,王凯,等.载荷方式对深部采动煤体损伤-渗透时效特性影响试验研究[J].中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 197-205.
XU Chao, FU Qiang, WANG Kai, *et al.* Effects of the loading methods on the damage-permeability aging characteristics of deep mining coal [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2018, 47(1): 197-205.
- [12] 刘刚,肖福坤,秦涛,等.循环载荷下煤样力学特性和损伤演化规律试验研究[J].煤炭科学技术, 2018, 46(2): 131-137.
LIU Gang, XIAO Fukun, QIN Tao, *et al.* Experimental study on mechanical characteristics and damage evolution law of coal samples under cyclic load [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 131-137.
- [13] 李晓泉,尹光志,蔡波.循环载荷下突出煤样的变形和渗透特性试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3498-3504.
LI Xiaquan, YIN Guangzhi, CAI Bo. Experimental study on deformation and seepage properties of outburst coal samples under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3498-3504.
- [14] 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试验研究[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.
- [15] 薛东杰,周宏伟,王子辉,等.不同加载速率下煤岩采动力学响应及破坏机制[J].煤炭学报, 2016, 41(3): 595-602.
XUE Dongjie, ZHOU Hongwei, WANG Zihui, *et al.* Failure mechanism and mining-induced mechanical properties of coal under different loading rates [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 595-602.
- [16] 曹安业,井广成,窦林名,等.不同加载速率下岩样损伤演化的声发射特征研究[J].采矿与安全工程学报, 2015, 32(6): 923-928.
CAO Anye, JING Guangcheng, DOU Linming, *et al.* Damage evolution law based on acoustic emission of sandy mudstone under different uniaxial loading rate [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(6): 923-928.
- [17] 陈海栋.保护层开采过程中卸载煤体损伤及渗透性演化特征研究[D].徐州:中国矿业大学, 2013.
- [18] 徐超.岩浆岩床下伏含瓦斯煤体损伤渗透演化特性及致灾机制研究[D].徐州:中国矿业大学, 2015.