



## 饱和煤样力学及损伤特征的加载速率微观作用机制研究

杨科 张寨男 华心祝 刘文杰 池小楼 吕鑫 王于

### 引用本文：

杨科, 张寨男, 华心祝, 等. 饱和煤样力学及损伤特征的加载速率微观作用机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 130–142.

YANG Ke, ZHANG Zhinan, HUA Xinzhu. Microscopic mechanism of loading rate of saturated coal sample mechanics and damage characteristics[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 130–142.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1750>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 冲击倾向性煤不同损伤程度声发射分形特征研究

Fractal characteristics of acoustic emission in different damage degrees of impact coal

煤炭科学技术. 2021, 49(9): 38–46 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b137ebb9-3dda-4059-b421-ee1fc0746db3>

##### 冲击倾向性煤岩动静载下破坏机理及声发射特性研究

Study on failure mechanism and acoustic emission characteristics of outburst proneness coal rock under dynamic and static loading

煤炭科学技术. 2021, 49(3): 57–63 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.006>

##### 不同加载速率下煤岩声发射与红外辐射特征研究

Study on coal and rock acoustic emission and infrared radiation characteristics under different loading rates

煤炭科学技术. 2021, 49(7): 79–84 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ea7aa91e-b245-4bb9-b864-e9d98b13f723>

##### 不同尺寸冲击倾向性煤样声发射 b 值特征研究

Study on acoustic emission b-value characteristics of bump-prone coal sample with different sizes

煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6f2bd3ba-8c10-4be9-a7f2-4c3e03a9c24f>

##### 水岩作用下煤岩组合力学特性与损伤特征

Mechanical properties and damage characteristics of coal–rock combined samples under water–rock interaction

煤炭科学技术. 2023, 51(4): 37–46 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2020-1385>

##### 基于针入强度的不同含水率煤样强度弱化特征与微观机制

Strength weakening characteristics and microscopic mechanism of coal samples with different water contents based on penetration strength

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 40–49 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1338>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

杨科, 张寨男, 华心祝, 等. 饱和煤样力学及损伤特征的加载速率微观作用机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 130-142.

YANG Ke, ZHANG Zhinan, HUA Xinzhu, et al. Microscopic mechanism of loading rate of saturated coal sample mechanics and damage characteristics[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 130-142.

## 饱和煤样力学及损伤特征的加载速率微观作用机制研究

杨科<sup>1,2,3</sup>, 张寨男<sup>1,3</sup>, 华心祝<sup>1,3</sup>, 刘文杰<sup>1,3</sup>, 池小楼<sup>1,3</sup>, 吕鑫<sup>1,3</sup>, 王于<sup>1,3</sup>

(1. 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; 2. 合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室), 安徽 合肥 230031; 3. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 为探究煤层注水防冲解危后, 工作面推进速率是否会对煤矿井下安全、高效生产造成二次影响, 开展了不同加载速率下干燥及饱和煤样的单轴压缩试验, 探究了饱和煤样的峰值强度、声发射能量及声发射的  $RA$  值与  $AF$  值、断口形貌、分形维数以及冲击倾向性特征的加载速率效应, 揭示了饱和煤样损伤破坏特征的加载速率微观作用机制。研究表明: 随加载速率增大, 干燥及饱和煤样峰值强度先减小后增大, 加载速率  $0.01\text{ mm/s}$  为导致强度转折的临界加载速率。不同加载速率下饱和煤样宏观破坏模式均为以剪切破坏为主的拉-剪复合破坏, 最大声发射能量值先减小后增大, 在临界加载速率时达到最小值。饱和煤样微观剪切裂隙占比先减小后增大, 在临界加载速率达到极小值。饱和煤样破裂断口形貌由长槽状裂隙向完全不规则裂隙过渡, 临界加载速率是大量不规则裂隙开始出现的转折点。随加载速率增大, 饱和煤样破碎的小粒径煤屑质量占比减小, 大粒径煤屑质量占比增大; 干燥及饱和煤样分形维数均逐渐减小, 拟合曲线满足幂函数规律, 且饱和煤样较干燥煤样分形维数增大。随加载速率增大, 干燥及饱和煤样的  $K_E$  均存在先减小后增大的规律, 在临界加载速率达到极小值。煤层注水对工作面冲击地压的抑制作用要高于加载速率对工作面的诱冲作用。在临界加载速率之前, 随加载速率增大, 饱水煤样微裂隙内部孔隙水压力增幅较小, 贡献刚度小, 竞争力较弱, 而裂纹扩展速率增幅较快, 竞争力较强; 之后孔隙水压力增幅较大, 贡献刚度增大, 竞争力较强, 而裂纹扩展速率相对增幅较慢, 竞争力较弱。不同加载速率饱和煤样在孔隙水压力和裂纹扩展速率 2 个因素的相互竞争下, 导致其力学及损伤特征规律呈现非线性特征。

**关键词:** 岩石力学; 加载速率; 饱和煤样; 声发射能量; 断口形貌; 分形维数; 冲击倾向性; 微观作用机制

**中图分类号:** TD315      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0253-2336(2023)02-0130-13

## Microscopic mechanism of loading rate of saturated coal sample mechanics and damage characteristics

YANG Ke<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Zhinan<sup>1,3</sup>, HUA Xinzhu<sup>1,3</sup>, LIU Wenjie<sup>1,3</sup>, CHI Xiaolou<sup>1,3</sup>, LYU Xin<sup>1,3</sup>, WANG Yu<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230031, China; 3. Key Laboratory of Mining Coal Safety and Efficiently Constructed by Anhui Province and Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** In order to explore whether the advance rate of the working face will have a secondary impact on the safe and efficient production of coal mine after coal seam water injection prevents impact pressure and relieves the danger, uniaxial compression tests of dry and saturated coal samples under different loading rates were carried out, and the loading rate effects of peak intensity, acoustic emission energy,  $RA$  value and  $AF$  value, fracture morphology, fractal dimension and impact tendency characteristics of saturated coal samples are explored, and the microscopic mechanism of loading rate of saturated coal sample damage failure characteristics was revealed. The results

收稿日期: 2022-09-20      责任编辑: 王凡      DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1750

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合资助项目(U21A20110); 山西省科技重大专项揭榜资助项目(20191101016)

作者简介: 杨科(1979—), 男, 四川叙永人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: [yksp2003@163.com](mailto:yksp2003@163.com)

通讯作者: 张寨男(1995—), 男, 安徽阜阳人, 博士研究生。E-mail: [2392614146@qq.com](mailto:2392614146@qq.com)

show that with the increase of loading rate, the peak intensity of dry and saturated coal samples first decreases and then increases, and the loading rate of 0.01mm/s is the critical loading rate leading to the intensity transition. The macroscopic failure mode of saturated coal samples under different loading rates is a tensile-shear composite failure dominated by shear failure, and the maximum acoustic emission energy value first decreases and then increases, and reaches the minimum value at the critical loading rate. The proportion of microscopic shear fractures in saturated coal samples first decreases and then increases, and reaches a minimum value at the critical loading rate. The fracture morphology of saturated coal samples transitions from long trough-like fractures to completely irregular fractures, and the critical loading rate was the turning point at which a large number of irregular fractures begin to appear. With the increase of loading rate, the proportion of small-sized coal chips crushed by saturated coal samples decreased, and the proportion of large-sized coal chips increased. The fractal dimension of dry and saturated coal samples gradually decreased, the fitting curve satisfies the power function law, and the fractal dimension of saturated coal samples increases compared with that of dry coal samples. With the increase of loading rate, the  $K_E$  of dry and saturated coal samples decreased first and then increased, reaching a minimum at the critical loading rate. The inhibition effect of coal seam water injection on the impact pressure of the working face is higher than the inducing effect of the loading rate on the working face. Before the critical loading rate, with the increase of the loading rate, the pore water pressure inside the microfractures of the saturated coal sample increased less, the contribution stiffness was small, and the competitiveness was weak, while the crack growth rate increased faster and the competitiveness was stronger. After that, the pore water pressure increased greatly, the contribution stiffness increased, and the competitiveness was strong, while the crack growth rate increased relatively slowly and the competitiveness was weak. Under the competition of two factors, pore water pressure and crack growth rate, the mechanical and damage characteristics of saturated coal samples with different loading rates showed nonlinear characteristics.

**Key words:** rock mechanics; loading rate; saturated coal sample; acoustic emission energy; fracture morphology; fractal dimension; impact tendency; microscopic mechanisms

## 0 引言

煤炭开采的三大主题是安全、高效、绿色<sup>[1]</sup>。煤矿冲击地压是指井巷或工作面周围煤岩体,由于弹性变形能的瞬时释放而产生突然剧烈破坏的动力现象,常伴有煤岩体抛出、巨响及气浪等,具有很强的破坏性,对煤矿安全生产产生极大的影响<sup>[2-3]</sup>。煤岩冲击倾向性与煤矿冲击地压的发生关系密切,绝大多数冲击地压矿井煤层均具有冲击倾向性<sup>[4]</sup>。目前,煤层注水是一种成本较低且较为有效的防治冲击地压的区域性措施。它通过利用高压注水泵对开采具有冲击危险性的煤层注水,使高应力区域煤体孔隙增加与发育,释放或转移煤层应力,以期对冲击地压进行解危<sup>[5]</sup>。同时,工作面推进速率对煤矿井下工作面安全(冲击地压灾害防控)、高效(煤炭产量要求)生产至关重要<sup>[6-8]</sup>。综上所述,在煤层注水防冲解危之后,现场正常施工情况下的工作面推进速率对煤体力学、损伤特征及冲击倾向性的影响研究对于揭示矿井灾害的发生机理具有重要的理论指导意义。

许多学者对含水煤样的力学及损伤破坏特征进行了大量研究<sup>[9-11]</sup>。在动载方面,基于已有研究表明<sup>[12]</sup>,冲击载荷作用下,煤样内部水体来不及排出,在孔隙裂隙中产生较高的孔隙压力,与冲击力相互叠加,整体的应力集中现象减弱,需要消耗更多的能量用于损伤破坏。与此同时,煤、岩材料的静态加载

速率作用机制一直是研究的重点。李彦伟等<sup>[13]</sup>对不同加载速率下煤样的峰值强度、弹性模量和轴向应变等变化规律进行研究,并对煤样的能量演化规律进行分析。李海涛等<sup>[14-15]</sup>对不同加载速率煤样峰值强度特征进行研究发现随加载速率增大,峰值强度存在先升高后降低的规律,同时建立“骨架”模型并分析其机理,将转折点定义为临界加载速率,并验证了临界加载速率存在的必然性。但加载速率研究范围较小,无法较全面获得加载速率对煤样力学行为的影响规律。黄达等<sup>[16]</sup>对大理岩进行单轴压缩试验,对不同加载速率下岩样的力学性能、变形破坏特征、应变能耗散及释放规律进行研究,探讨了岩石损伤演化的能量机制,确定各应变速率下岩石起裂和临界扩容应力。孟庆彬等<sup>[17]</sup>分析了不同应变速率下岩样峰值强度、弹性模量、峰值应变、声发射特性及破坏形态的变化规律。曹安业等<sup>[18]</sup>对不同加载速率下砂质泥岩的损伤演化规律与声发射参量特征进行了试验研究,基于声发射累计振铃计数,建立了加载速率相关的应力-应变损伤模型。王斌等<sup>[19]</sup>对饱和岩石的动、静力学特征进行细观机理研究,对比分析了动、静态下,孔隙水对饱和岩石的裂纹扩展影响规律。但并未对具体的静态加载速率作用规律进行分析。滕腾等<sup>[20]</sup>对不同加载速率下干燥和饱和岩样进行单轴压缩试验,得到了岩样力学特性的变形率和水理效应和水理效应,建立并验证了考虑砂岩变形率效

应和水理效应的一维损伤本构模型。上述研究表明,煤样的加载速率效应与岩样相比存在差异,因此进行煤样的加载速率效应研究具有一定的意义。

综上所述,煤体单轴抗压强度在准静态加载阶段存在临界加载速率(峰值),在中、高等应变率阶段存在单调递增关系,那么煤体在准静态加载与接近中等应变率之间必然存在临界加载速率(峰谷)。因此,基于声发射监测系统、扫描电镜和分形理论,对干燥及饱和煤样的峰值强度特征、声发射能量及裂纹演化特征、*RA*与*AF*、断口形貌特征以及宏观破碎分形规律的加载速率效应进行分析,探讨了饱和煤样力学及损伤特征的加载速率微观作用机制。研究成果对相关工程条件下冲击地压灾害的发生机理及防控具有一定的指导意义。

## 1 试验描述

### 1.1 试样制备

将取自同一工作面的煤样,经实验室钻孔、取芯制备成50 mm×100 mm的标准圆柱形试样,煤岩材料的制备尺寸满足ISRM的相关规定,即应满足直径为48~55 mm,高径比为1.8~2.2。选取宏观无明显裂纹且密度和波速接近的试样制备干燥及饱和煤样如图1所示。制备流程:煤样经烘干机低温烘干过程中,每隔1 h 测定煤样质量,直至前后质量差异小于0.1 g,即认为此时煤样为干燥煤样,并记录质量为*m*。随后将剩余煤样放入水中,通过自然浸泡法制备饱和试样,同理直至煤样前后质量差异小于0.1 g,即认为此时煤样为饱和煤样,并记录质量为*M*。煤样的含水率*ω*计算公式为

$$\omega = \frac{M - m}{m} \times 100\% \quad (1)$$



图1 部分干燥及饱和煤样

Fig.1 Partial dry and saturated coal samples

对不同加载速率饱和煤样进行X射线衍射分析,结果如图2所示,在同一检测条件下发现各加载速率下饱和煤样的峰形相似度极高,衍射图谱类似于陡峭状的山峰,且衍射强度相近。煤样中存在非晶质区,煤样成分差异较小,试验结果可靠。

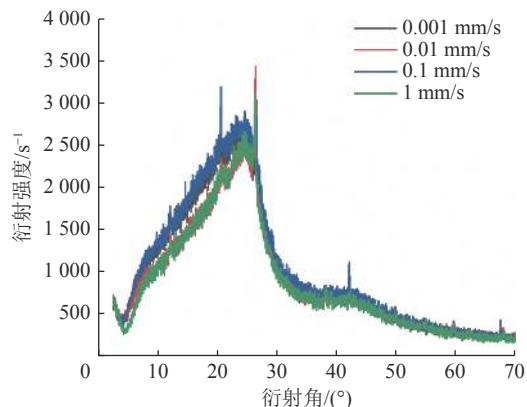


图2 不同加载速率饱和煤样的X射线衍射分析  
Fig.2 X-ray diffraction analysis of saturated coal samples with different loading rates

### 1.2 试验方案设计

干燥及饱和煤样的单轴压缩试验在岩石力学试验机上进行。试验所用煤样共计24个,其中干燥和饱和煤样各12个。试验加载速率设置4个梯度,分别为0.001、0.01、0.1和1 mm/s,干燥及饱和状态下的每1梯度加载速率设置3个煤样。试验基本物性参数见表1,密度与波速筛选较为接近的煤样进行试验,以最大可能确保试样孔隙结构的相近,减小试验误差,确保试验的可靠性。煤样在进行单轴压缩过程中采用声发射监测煤样内部微观破裂规律。采用Nikon摄像机记录煤样在受压各个阶段的宏观变形破裂特征。试验相关设备及仪器如图3所示。

## 2 试验结果分析

### 2.1 峰值强度特征分析

图4所示为不同加载速率下典型干燥及饱和煤样应力-应变曲线。干燥及饱和煤样峰值强度与加载速率的关系如图5所示。随加载速率增大,干燥及饱和煤样峰值强度存在先减小(0.001~0.01 mm/s)后增大(0.01~1 mm/s)的规律,加载速率0.01 mm/s为导致强度转折的“临界加载速率”(谷值)(说明:由于试验设计时设置的加载速率梯度有限,将0.01 mm/s认定为临界加载速率可能存在一定误差,但为方便后续分析仍以临界加载速率命名)。这与张连英等<sup>[21]</sup>对煤系泥岩进行不同加载速率试验研究发现,在0.03 mm/s存在脆延性转变的临界加载速率这一结论相类似。

根据李海涛等<sup>[14]</sup>研究,当加载速率处于0.500~1.330 μm/s时,煤样峰值强度逐渐增大;当加载速率处于1.330~1.830 μm/s时,煤样峰值抗压强度逐渐减小,加载速率1.330 μm/s为导致峰值强度转折的

表 1 试验煤样基本物性参数  
Table 1 Basic physical parameters of test coal samples

试样状态	加载速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	试样编号	干燥质量/g	饱和质量/g	含水率	平均含水率	直径/mm	高度/mm	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	波速/(km·s <sup>-1</sup> )	峰值强度/MPa
干燥	0.001	D-1	219.3	—	—	0	51.10	101.62	1.053	1.324	10.610
		D-2	220.7	—	—	0	50.24	101.30	1.070	1.330	9.550
		D-3	215.6	—	—	0	49.44	98.40	1.077	1.375	11.390
	0.01	D-4	212.9	—	—	0	48.36	97.24	1.075	1.342	10.730
		D-5	223.1	—	—	0	51.86	101.34	1.082	1.328	8.100
		D-6	229.0	—	—	0	50.42	102.58	1.089	1.312	9.330
	0.1	D-7	225.6	—	—	0	50.22	100.28	1.105	1.354	9.730
		D-8	220.4	—	—	0	50.88	99.12	1.090	1.316	10.960
		D-9	224.4	—	—	0	51.72	100.10	1.099	1.312	7.880
饱和	1	D-10	228.7	—	—	0	51.10	100.82	1.109	1.348	13.610
		D-11	219.2	—	—	0	49.40	100.44	1.074	1.321	13.150
		D-12	220.2	—	—	0	51.30	102.60	1.047	1.319	14.040
	0.001	D-13	218.6	265.5	0.215		50.38	102.82	1.039	1.316	6.140
		D-14	217.0	264.3	0.218	0.2137	49.64	101.12	1.052	1.302	6.060
		D-15	230.6	267.7	0.208		50.24	102.54	1.097	1.318	5.660
	0.01	D-16	218.9	265.3	0.161		52.62	103.66	1.031	1.294	3.890
		D-17	225.5	270.8	0.212	0.1913	50.42	100.18	1.104	1.322	4.240
		D-18	221.2	259.9	0.201		51.56	101.92	1.062	1.316	3.140
饱和	0.1	D-19	215.2	264.5	0.229		51.14	100.24	1.054	1.332	4.770
		D-20	220.9	269.6	0.220	0.2230	48.40	101.36	1.071	1.318	5.630
		D-21	204.1	238.7	0.220		47.46	98.42	1.020	1.344	5.280
	1	D-22	226.4	273.6	0.201		50.74	103.70	1.066	1.345	7.110
		D-23	225.2	270.5	0.175	0.1820	49.28	101.40	1.092	1.356	6.170
		D-24	214.1	261.1	0.170		50.16	100.26	1.049	1.312	6.690

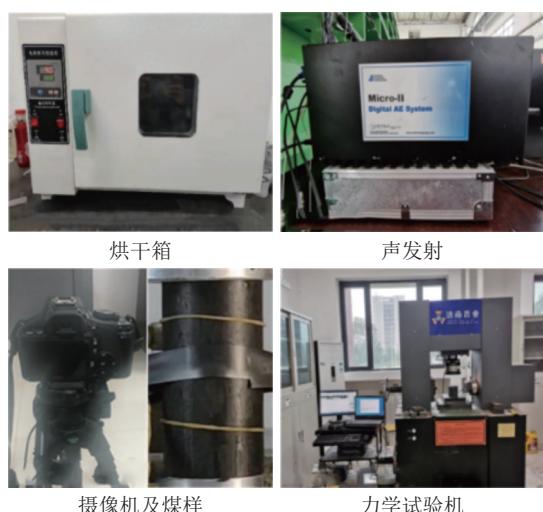


图 3 试验相关仪器及设备  
Fig.3 Test related instruments and equipment

临界加载速率(峰值),对临界加载速率的存在性也进行了深入分析。以及李彦伟等<sup>[13]</sup>研究得到  $8.3 \times 10^{-4}$  mm/s 为煤岩样峰值强度转折的临界加载速率

(峰值)。以上研究说明临界加载速率的峰值点在 0.001 mm/s 附近,与试验规律一致,而且后续并未对加载速率在 0.01 mm/s 附近的煤样开展研究。

王登科等<sup>[22]</sup>研究发现煤体是一种典型的应变率相关材料,随应变率增大,煤体抗压强度和弹性模量均增大。由此可得,在由准静态加载速率(0.001 mm/s)向中等及高应变率过渡时,必然存在一个临界加载速率(谷值),使得加载速率与煤样力学性能转化为正相关关系。

对试验结果分析原因可知:在加载速率由 0.001 mm/s 向 0.01 mm/s 过渡时,饱和煤样受到外力挤压逐渐趋于充分,原生微裂隙中存在的孔隙水压力提供给原生微裂隙尖端一个致使其劈裂的挤压力,使得尖端裂纹充分发育、扩展。同时,原生微裂隙中的自由水流出并浸润新生微裂隙,使得裂纹发育充分,结构较破碎,表现为煤样峰值强度降低。在加载速率由 0.01 mm/s 向 1 mm/s 过渡时,饱和煤样破坏时间短,裂纹发育迅速,导致裂隙尖端还未充分发育,

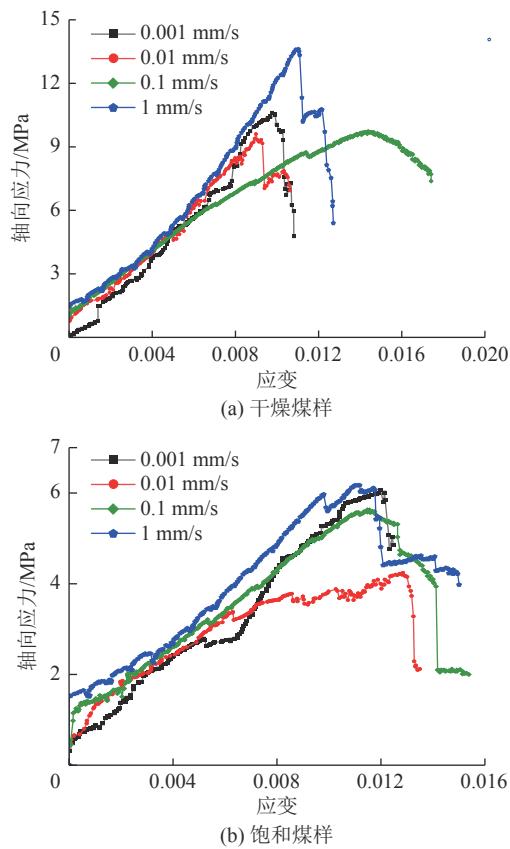


图4 不同加载速率下干燥和饱和煤样应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of dry and saturated coal samples under different loading rates

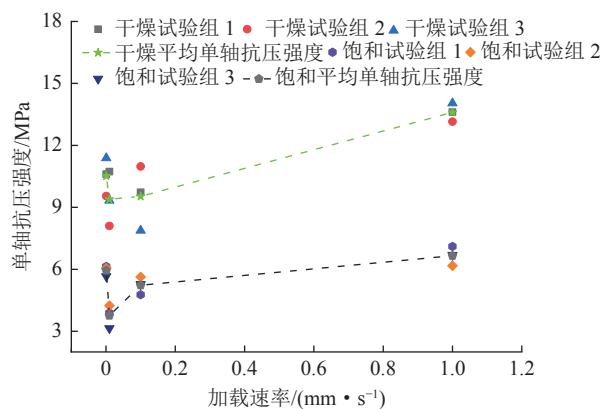


图5 干燥和饱和煤样单轴抗压强度与加载速率关系

Fig.5 Relationship between uniaxial compressive strength and loading rate of dry and saturated coal samples

煤样就已经失稳破坏,破坏时裂隙发育被抑制,煤样破碎不完全,同时孔隙水压力明显,需要更大的外力才能使煤样破坏,表现为煤样单轴抗压强度增大。

综上所述,干燥与饱和煤样最终破坏的峰值强度值随加载速率增大先减小后增大,且均在加载速率为0.01 mm/s附近达到临界值。但临界加载速率的大小是否受饱水条件的影响,还需细化临界加载

速率附近的加载速率来具体分析才能确定,这也是后续研究的一个方向。

## 2.2 声发射特征

煤样损伤破坏过程中的能量释放与裂纹扩展规律受饱水与加载速率的影响较大。因此,基于声发射监测系统,对煤体内部微裂纹的破裂特征进行描述,同时,基于试验录像系统,获得试验过程中煤样的典型宏观变形破坏特征,包括宏观裂纹的起裂、扩展及煤样的峰后破坏特征,并绘制出如图6所示的4种加载速率下饱和煤样的声发射应力-声发射能量-声发射累计能量与时间关系曲线及裂纹演化图。

如图6a所示应力-应变曲线存在间歇性起伏,期间存在少量“噼啪”的清脆声。在初始压密阶段(214 s)存在少量声发射信号,宏观裂纹起裂(1 211 s)以及裂纹发育、贯通均以倾斜裂纹为主(1 215 s),此时声发射能量为 $1.89 \times 10^4$  mV·μs,最终裂纹呈现为剪切为主的拉-剪复合破坏特征(1 256 s)。这是由于饱和煤样内部绝大多数微裂纹是以一定倾角存在的,在较低的加载速率作用下,裂纹尖端充分发育,微裂隙的交汇、贯通,最终宏观上表现为剪切为主的拉剪复合破坏特征。如图6b所示,饱和煤样在初始压密阶段,存在少量声发射信号,在初始宏观裂纹起裂时(83 s)以竖向裂纹为主,随后裂纹发育,出现横向裂纹(86 s),存在局部的鼓起与脱落,此时声发射能量为 $4.17 \times 10^3$  mV·μs,最终裂纹呈现为拉-剪复合破坏特征(88 s)。如图6c所示,饱和煤样在初始压密阶段基本无声发射信号。在初始宏观裂纹起裂时(8.1 s),以大量竖向裂纹为主,随后裂纹发育,竖向裂纹之间出现倾向、横向裂纹(11.3 s),最终煤样裂纹呈现为拉-剪复合破坏特征且整体破坏剧烈(11.6 s),此时声发射能量为 $4.58 \times 10^3$  mV·μs。如图6d所示,饱和煤样整个试验过程仅存在约1.4 s,煤样在受压时很快便失稳破坏。在初始宏观裂纹起裂时(0.92 s),以大量竖向和横向裂纹复合为主,随后裂纹发育,竖向和横向裂纹交汇、贯通(1.1 s),破坏表面鼓起并脱落,最终煤样宏观破碎剧烈,裂纹呈现为拉-剪复合破坏特征(1.24 s),此时声发射能量为 $4.94 \times 10^3$  mV·μs。

分析原因可知,低加载速率(0.001 mm/s)时,饱和煤样达到破坏强度耗时较长,孔隙水压力作用弱,微裂隙发育较充分,长时间受压,使得内部积聚大量弹性应变能,故在破坏时最大声发射能量较大。在临界加载速率(0.01 mm/s)时,饱和煤样受压时间显著减少,积聚能量较之前降低,同时内部孔隙水压力较弱,故在临界加载速率时最大声发射能量减小。

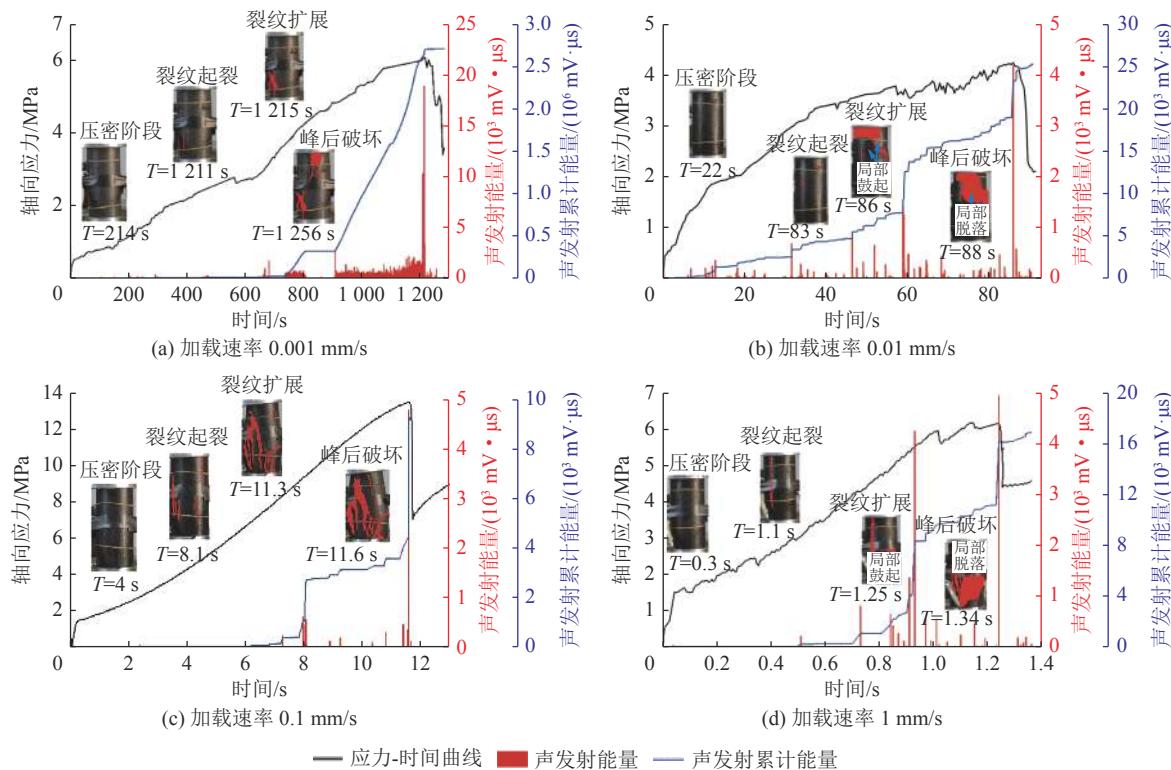


图 6 饱和煤样应力-声发射能量-声发射累计能量与时间关系

Fig.6 Relationship between stress acoustic emission energy cumulative acoustic emission energy and time of saturated coal samples

之后, 随加载速率增大, 虽然饱和煤样峰前段耗时越来越短, 但孔隙水压力形成的整体刚性承载力逐渐占据主导地位, 最大声发射能量逐渐增大。

为从微观角度定量表征煤样破坏过程中的微裂隙类型及其占比, 选择反映上升角度的声发射  $R_A$  值(声发射信号波上升时间与对应信号波的最大振幅的比值)和反映平均频率的  $A_F$  值(声发射信号振铃计数与对应信号持续时间的比值)对其微裂隙破坏类型及占比进行统计分析<sup>[23-25]</sup>。不同加载速率饱和煤样拉伸与剪切微裂隙分布特征如图 7 所示。

由图 7 可知, 饱和煤样破坏过程中均以剪切裂隙为主, 且随加载速率增大, 剪切主裂隙占比呈现先减小后增大的规律, 在临界加载速率附近达到最小值, 剪切微裂纹依次占比为 86.2%、78%、84.1% 和 87.5%。饱和煤样内部剪切微裂隙的先减小再增大是由于饱水煤样在不同加载速率作用下各因素的微观竞争作用机制导致的。具体来说, 在饱水条件下, 水的作用使得煤岩内部以剪切裂纹为主, 不做赘述。由于加载速率增大, 煤岩材料内部的孔隙水压力和裂纹扩展速率相互竞争, 使得剪切微裂纹的占比呈现先减小再增大的规律。

### 2.3 断口细观破裂机制分析

基于扫描电镜观测结果, 选取放大倍数为 1 000

倍的图像, 对不同加载速率下的饱和煤样断口形貌特征进行分析。如图 8a 所示断口形貌主要以长槽状裂隙为主, 表面偶见不规则状碎屑。如图 8b 所示断口形貌由少量长槽状裂纹和不规则破碎结构组成, 存在新旧裂纹的交汇贯通裂隙, 断口形貌由规则长槽状裂纹逐渐向不规则过渡。如图 8c 所示断口为不规则破碎结构, 局部存在部分层片状结构。如图 8d 所示断口形貌呈现完全的不规则状, 表面凹凸不平, 煤样破碎显著。不同加载速率下饱和煤样的宏-细观破坏特征对比见表 2。

分析原因可知, 饱和煤样微裂隙中充满自由水, 在加载速率(0.001 mm/s)作用下, 自由水会随着裂纹尖端的充分贯通而充分流动, 充分浸润新生裂隙, 微裂隙尖端充分发育, 最终形成大量的长槽状裂纹。饱和煤样在临界加载速率作用下, 内部裂纹破坏逐渐向不规则、不充分过渡, 在微观断口处存在少量长槽状裂隙和大量的不规则破碎结构。饱和煤样出现层片状不规则结构, 可能是在较快的加载速率(0.1 mm/s)作用下, 煤样沿着较大层理结构面滑移破坏而形成的, 此时断口形貌仍以大量不规则破碎结构为主。饱和煤样在加载速率(1 mm/s)作用下, 煤样不到 2 s 就发生了破坏, 此时微裂隙的自由水来不及流动, 煤样就已经破坏失稳, 微观断口形貌表现为完全

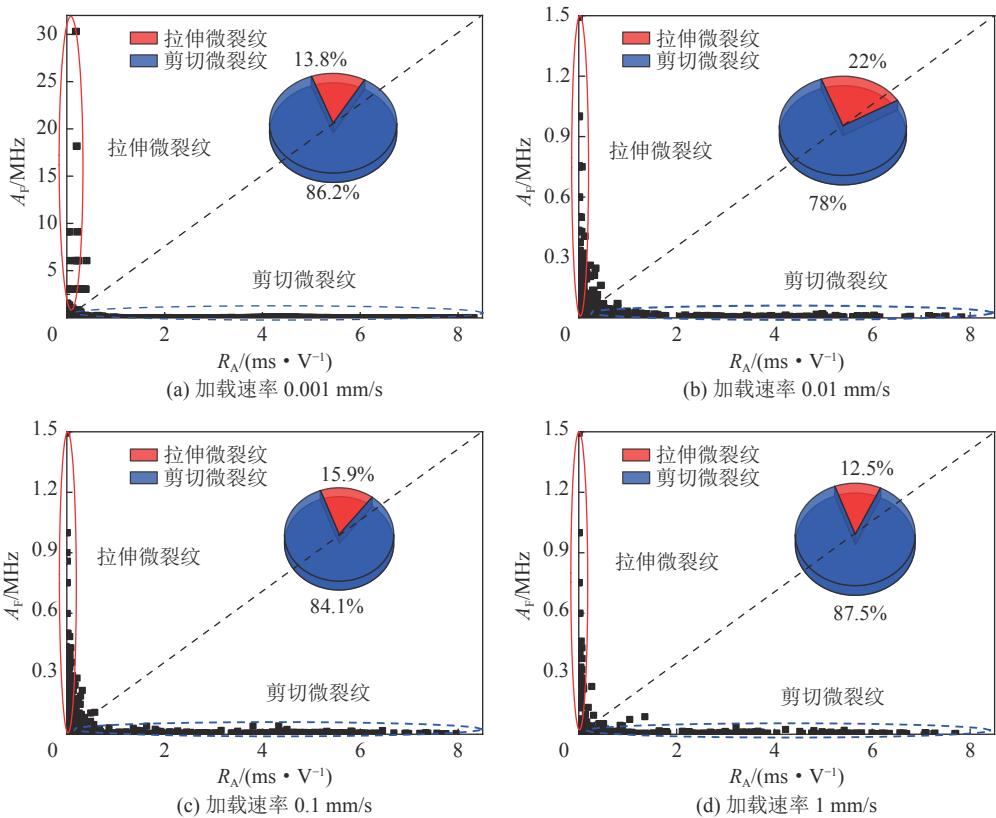


图 7 不同加载速率饱和煤样拉伸与剪切微裂隙分布特征

Fig.7 Distribution characteristics of tensile and shear microcracks of saturated coal samples at different loading rates

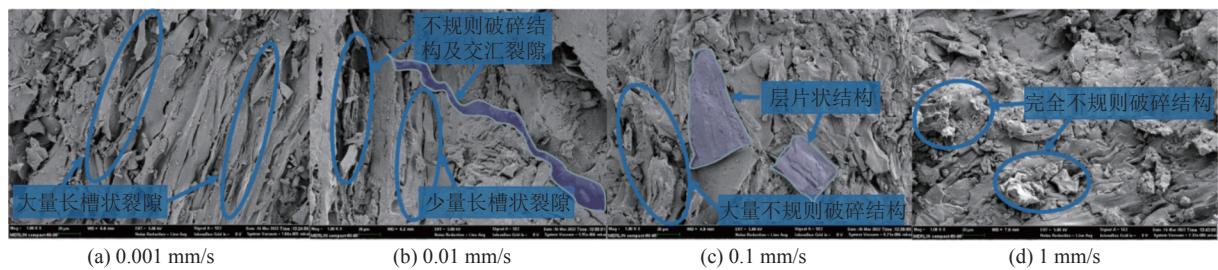


图 8 不同加载速率下饱和煤样的断口形貌特征

Fig.8 Fracture morphology characteristics of saturated coal samples under different loading rates

表 2 不同加载速率下饱和煤样的宏观-细观破坏特征

Table 2 Macro meso failure characteristics of saturated coal samples under different loading rates

加载速率/( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	破坏机理	宏观破坏特征		细观破坏断口特征		微裂纹类型及占比/%	
		破坏形态	破坏方式	长槽状裂隙	不规则裂隙	拉伸微裂纹占比	剪切微裂纹占比
0.001	拉剪-复合破坏	劈裂+剪切	突发失稳	+++	—	13.8	86.2
0.01	拉剪-复合破坏	劈裂+剪切	突发失稳	交汇裂隙	++	22.0	78.0
0.1	拉剪-复合破坏	劈裂+剪切	突发失稳	层片状结构	+++	15.9	84.1
1	拉剪-复合破坏	劈裂+剪切	突发失稳	—	+++	12.5	87.5

注: +为占比份额; —为不存在。

的不规则软弱破碎结构。

可以这样理解,把饱和煤样微裂隙的发育、贯通至失稳破坏的难易程度或者说先后性划分为不同的

等级,较慢的加载速率下,煤样微裂隙的发育、贯通至失稳破坏逐渐发生,但在加载速率较快的时候,可以近似理解许多不同等级的微裂隙同时发育、贯通

至失稳破坏,微裂隙之间相互竞争,从而导致破裂面呈现不规则结构。综上可知,随着加载速率增大,饱和煤样微观断口形貌逐渐由以长槽状结构为主向完全不规则破碎结构过渡,临界加载速率是大量不规则裂隙出现的转折点。

#### 2.4 分形特征

煤样作为一种非均质材料,在受力发生破坏时,表现为非均质性、非连续性、非线性和各向异性等复杂力学行为。引入分形维数来描述煤样受载破碎特征是应用较为成熟的手段之一。试样分形维数越大,破碎越多,体积越小,破碎程度越高<sup>[26]</sup>。对于不同加载速率下的干燥及饱和煤样,其分形维数的研究是探讨各因素对煤样破碎程度影响大小的重要判据。选取煤屑质量-等效边长计算分形维数,计算式为

$$\alpha = \frac{\lg(M_{\text{Leq}}/M)}{\lg L_{\text{eq}}} \quad (2)$$

$$D = 3 - \alpha \quad (3)$$

其中:  $\alpha$  为  $M_{\text{Leq}}/M - L_{\text{eq}}$  在双对数坐标下的斜率值;  $M_{\text{Leq}}$  为等效边长为  $L_{\text{eq}}$  时对应煤屑质量;  $M$  为计算尺寸内煤屑质量;  $M_{\text{Leq}}/M$  为等效边长小于  $L_{\text{eq}}$  的碎屑百分含量;  $D$  为煤屑分形维数。根据煤样试验过后的

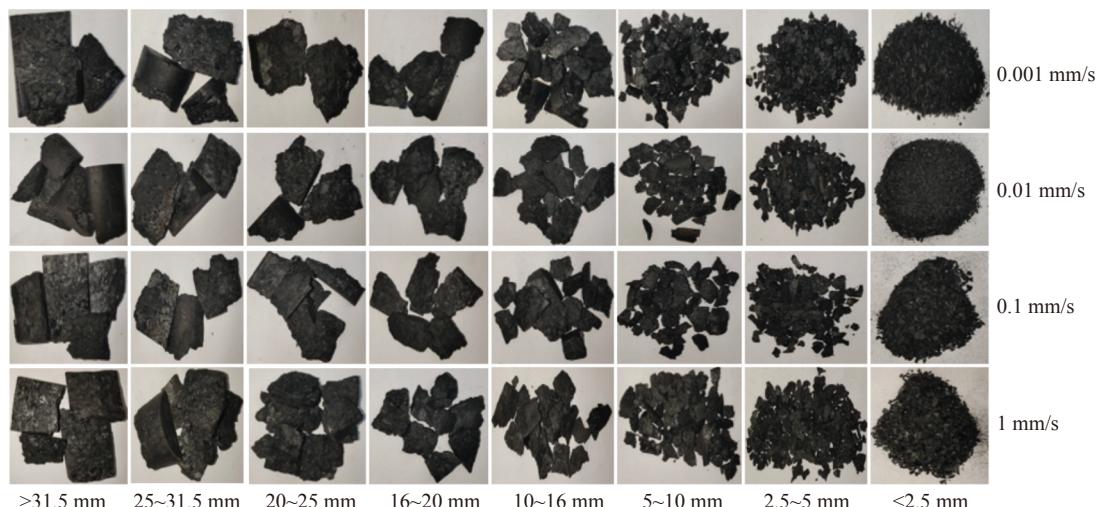


图 10 不同加载速率下饱和煤样粒径-质量分布特征

Fig.10 Particle size mass distribution characteristics of saturated coal samples under different loading rates

不同加载速率下干燥及饱和煤样的  $\lg(M_{\text{Leq}}/M)$  与  $\lg L_{\text{eq}}$  关系曲线如图 11 所示。煤样的粒径-质量分形特征变化规律明显。干燥及饱和煤样的曲线斜率  $\alpha$  随加载速率增大均逐渐增大,近似表明,随加载速率增大,低等效边长下对应煤屑质量百分比逐渐减小,高等效边长下对应煤屑质量百分比逐渐增大。在曲线两端,煤屑质量百分比离散性较大。与干燥煤样相比,饱和煤样曲线斜率  $\alpha$  在对应加载速率下

实际破碎尺寸特征,选取孔径为 2.5、5.0、10.0、16.0、20.0、25.0、31.5 mm 的标准筛进行分形维数计算。标准筛及电子秤称量仪器等如图 9 所示。



图 9 煤屑筛分及称量仪器

Fig.9 Coal chip screening and weighing instrument

不同加载速率下饱和煤样粒径-质量分布特征如图 10 所示。在较小加载速率时,饱和煤样内部自由水沿裂纹尖端流动,致使煤样内部破碎较为充分,宏观表现为煤样碎块较小。随加载速率增大,饱和煤样受力时间缩短,部分裂纹来不及充分发育,煤样沿着较大的裂隙弱面失稳破坏,宏观表现为煤样碎块较大。随加载速率增大,饱和煤样破碎碎块分布特征表现为:小粒径煤屑质量逐渐减小,大粒径煤屑质量逐渐增大。

减小,表明饱和条件下,煤样破碎更剧烈。

干燥及饱和煤样分形维数随加载速率变化规律如图 12 所示。干燥及饱和煤样随加载速率增大分形维数均逐渐减小,拟合曲线满足幂函数曲线规律,煤样分形维数降低,说明煤样破碎程度减小。较低的加载速率使得煤样内部裂隙逐渐发育,破碎较为充分,破碎程度大。随加载速率增大,煤样破碎较快,不足以贯通更多的裂隙面,仅沿着软弱结构面破裂,

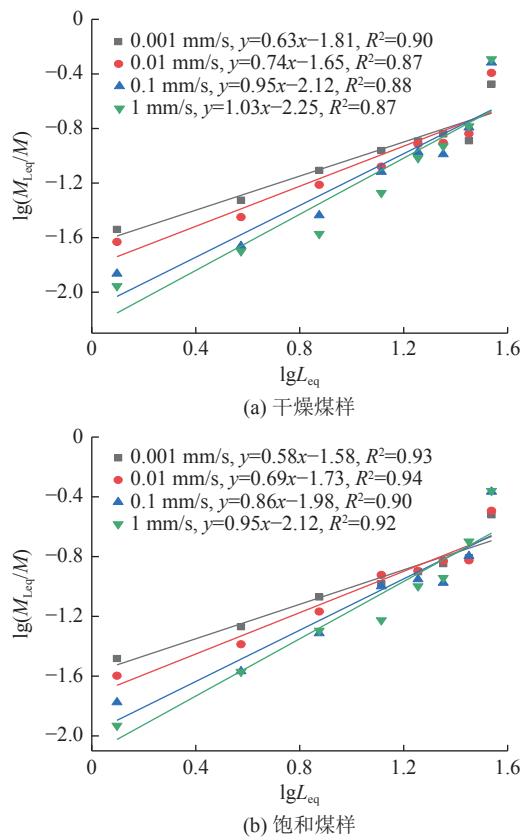


图 11 不同加载速率下干燥及饱和煤样  $\lg(M_{L_{eq}}/M)$  与  $\lg L_{eq}$  曲线

Fig.11  $\lg(M_{L_{eq}}/M)$  and  $\lg L_{eq}$  curves of dry and saturated coal samples under different loading rates

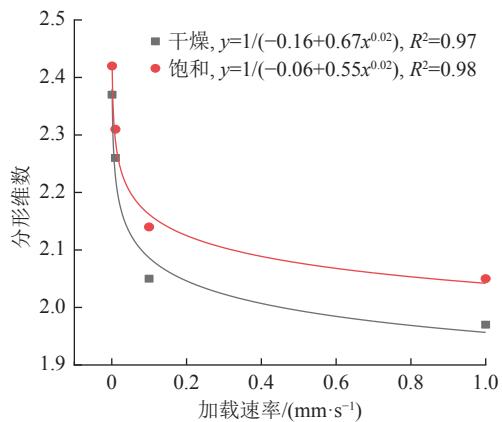


图 12 干燥及饱和煤样分形维数与加载速率关系

Fig.12 Relationship between fractal dimension of dry and saturated coal samples and loading rate

煤样整体破碎程度较小。这与陈光波等<sup>[27]</sup>对煤岩组合体加载速率与粒度-质量分形维数的研究结论一致。与干燥煤样相比,饱和煤样分形维数略大,这说明水弱化了煤样微裂隙结构的完整性和稳定性,在外力作用下,微裂隙更容易破碎,宏观上表现为含水煤样的强度降低和破碎程度增大。

标准圆柱形煤样在 1 mm/s 的加载速率作用下,对应应变率为 0.01 s<sup>-1</sup>, 处于准静态加载范畴。结合已有研究<sup>[12]</sup>, 当加载速率持续增大至中、高应变率范畴, 煤样在冲击载荷作用下出现粉碎性破坏, 分形维数将会出现转折点, 变为逐渐增大, 但具体临界应变率有待进一步确定, 这将是后续研究的重点。

## 2.5 饱和煤样冲击倾向性的加载速率效应

煤的冲击倾向性是指煤体具有积聚变形能并产生冲击破坏的性质, 其受含水率、应变率、围压、煤体尺寸、温度、波速和岩石成分等多种因素的影响, 各因素对煤体冲击倾向性影响程度也不同。分析饱水和应变率对煤体冲击倾向性的影响对于现场煤层注水防冲解危后是否需要考虑工作面推进速率诱导冲击地压灾害具有一定的意义。因此, 在单轴压缩试验下, 选择冲击能量指数  $K_E$  (煤样应力应变曲线峰前积聚能量与峰后积聚能量的比值) 和单轴抗压强度来初步评价煤体冲击倾向性。

不同加载速率下干燥及饱和煤体的  $K_E$  分布规律如图 13 所示。饱水状态下的煤体  $K_E$  值较干燥状态降低, 降幅依次为 55.9%、24.9%、43.2%、36.7%, 与肖晓春等<sup>[28-29]</sup>、梁冰等<sup>[30]</sup>研究得出的规律一致, 不再赘述。随加载速率增大, 干燥及饱和煤样的  $K_E$  均存在先减小后增大的规律, 在临界加载速率附近达到谷值。加载速率增大导致的  $K_E$  增幅小于饱水条件造成的  $K_E$  的降幅。干燥及饱和煤样的冲击倾向性均为弱冲击倾向性, 且干燥煤样整体接近强冲击倾向性, 而饱和煤样接近无冲击倾向性。分析 2.1 节部分干燥及饱和煤样的单轴抗压强度对应冲击倾向性划分范围, 也处于弱冲击倾向性。这种对应关系与李宝富等<sup>[31]</sup>研究结论一致, 即单轴抗压强度与冲击能量指数变化规律的对应关系一致。

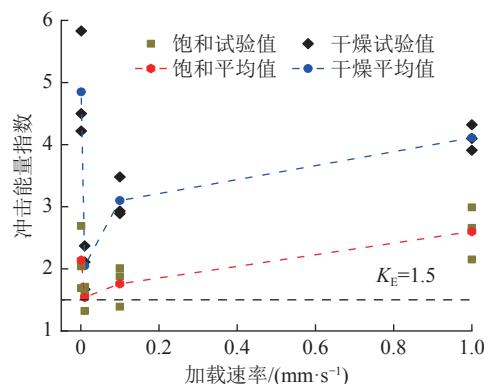


图 13 不同加载速率下干燥及饱水煤体的  $K_E$  分布

Fig.13  $K_E$  Distribution of dry and saturated coal mass under different loading rates

根据李海涛等<sup>[32]</sup>研究得出的工作面推进速率与实验室试件加载速率的转化拟合关系式, 将文中加载速率代入拟合关系式, 得出工作面推进速率已完全满足现场工作面推进的最大速率。因此, 现场煤层注水防冲解危后, 工作面推进速率诱导冲击地压二次灾害的可能性较低, 这是因为煤层注水防冲后, 煤体已经完全处于弱冲击倾向性, 而且接近无冲击倾向性, 这说明煤层注水对工作面冲击地压的抑制作用要高于加载速率对工作面的诱冲作用。当然也要考虑煤层注水防冲的效果检验与评价、煤层饱水时间及下次工作面推进的时间间隔等现场因素, 这也将是后续研究的重点。

### 3 饱和煤样加载速率微观作用机制探讨

#### 3.1 饱和煤样“临界加载速率”存在性的多因素分析

饱和煤样在不同的加载速率作用下, 主要受到3个因素影响: ①加载速率的差异, 使得饱和煤样微裂隙内部孔隙水压力不同, 导致煤样破坏时微裂隙的发育程度及破碎程度不同, 继而导致峰值强度的非单调变化。②较快的加载速率会导致煤样破坏失稳较快, 大量裂隙来不及发育、贯通, 有利于煤样峰值强度增大。③较快的加载速率使得微元体承载部分的变形能储量增大, 增加了局部丧失承载能力的可能性, 使得有效承载面积减小, 不利于试件强度的提高<sup>[14]</sup>。综合分析以上3个因素, 发现三者存在2种相反规律的影响, 那么必然在加载速率范围内存在1个临界加载速率。

#### 3.2 饱和煤样加载速率微观作用机制

饱和煤样微裂隙中充满自由水, 在不同加载速率的受压条件下, 内部裂纹扩展速率不同, 裂纹发育的程度也不同; 同时加载速率不同, 孔隙水压力也不同, 对煤岩材料的贡献刚度也不同。因此, 笔者考虑从饱和煤样微裂隙扩展速率和微裂隙内部孔隙水压力2个角度来分析饱和煤样的加载速率作用机制。

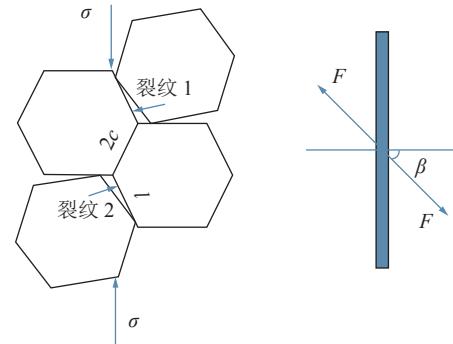
煤岩材料内部损伤累积直至宏观破坏的根本原因是煤岩材料自身内部原生裂隙在外力作用下的发育、扩展、贯通而形成新的破坏性主裂纹的过程。在外力作用下, 裂纹扩展准则<sup>[33]</sup>为可表示

$$K_l(t) = k(v) K_l \quad (4)$$

式中:  $K_l(t)$  为煤岩材料的动态应力强度因子;  $v$  为裂纹扩展速率;  $k(v)$  为裂纹扩展速率的函数;  $K_l$  为裂纹尖端的静态应力强度值。

加载速率越大, 裂纹扩展速率越快。式(4)表明

裂纹扩展速率与煤岩材料的断裂韧度呈正相关关系, 煤岩材料强度受裂纹扩展速率和煤岩材料断裂韧性影响。在单轴压缩试验中, 多采用翼型裂纹来描述煤岩材料损伤破坏的抗压强度特征, 如图14所示。



β—斜裂纹受外部压力  $F$  与水平方向的夹角;  $\sigma$ —煤样在轴向加载条件下受到压力机的外部应力

图14 单个翼型裂纹受力示意

Fig.14 Stress of single airfoil crack

考虑饱和煤岩材料翼型裂纹及孔隙水压力的影响时, 裂纹尖端的静态应力强度<sup>[34]</sup>为

$$K_l = \frac{F \cos \beta}{\sqrt{\omega \sin(\pi l / \omega)}} + p_1 \sqrt{2 \omega \tan(\pi l / 2 \omega)} \quad (5)$$

式中:  $F = 2c\tau_{\text{eff}}$ ;  $\tau_{\text{eff}} = \sigma \cos \beta \sin \beta - \mu(\sigma \cos 2\beta - p_1)$ ;  $\mu$  为裂纹间的摩擦因数;  $l$  为翼型裂纹长度;  $2c$  为斜裂纹长度;  $2\omega$  为2个翼型裂纹之间的竖直距离;  $p_1 = a_1 \sigma$ , ( $a_1 > 0$ ),  $a_1$  为孔隙水压力与外界压应力之间的关系系数, 说明孔隙水压力的大小影响  $K_l$  的大小, 孔隙水压力越大, 裂纹尖端的静态应力强度越大。

煤岩材料内部裂隙是复杂多样的, 难以统一度量。孔晓璇<sup>[35]</sup>将含裂隙煤岩材料认定为等效介质, 选用双重介质模型分析, 利用饱和/干燥裂隙空间的受压体积变化的HM耦合方程来描述材料裂隙刚度特征。

综上分析, 饱和煤岩材料内部含水裂隙中充满自由水, 受压时水不可被压缩, 存在孔隙水压力, 受压所导致的部分变形被阻碍, 故使得煤岩材料表现出刚度增大。由于孔隙水压力存在而导致的刚度变化与加载速率作用密切相关, 在临界加载速率之前, 随加载速率增大, 饱水煤样微裂隙内部孔隙水压力效应增幅较小, 贡献刚度小, 竞争力较弱, 而裂纹扩展速率增幅较快, 竞争力较强; 之后孔隙水压力增幅较大, 贡献刚度增大, 竞争力较强, 而裂纹扩展速率相对增幅较慢, 竞争力较弱。在微裂隙扩展速率和内部孔隙水压力2个因素的相互竞争下, 导致煤样

的力学及损伤特征规律呈现非线性特征。

## 4 结 论

1) 干燥及饱和煤样单轴抗压强度先减小( $0.001 \sim 0.01 \text{ mm/s}$ )后增大( $0.01 \sim 1 \text{ mm/s}$ ), 加载速率 $0.01 \text{ mm/s}$ 为导致强度转折的临界加载速率。随加载速率增大, 干燥及饱和煤样的冲击能量指数 $K_E$ 均存在先减小后增大的规律, 在临界加载速率附近达到谷值, 煤层注水对工作面冲击地压的抑制作用要高于加载速率对工作面的诱冲作用。

2) 基于声发射 $R_A$ 和 $A_f$ 对饱和煤样微裂隙破坏类型及占比进行统计分析发现, 剪切主裂隙占比呈现先减小后增大的规律, 在临界加载速率达到最小值, 这与最大声发射能量值变化规律相一致。随加载速率增大, 饱和煤样微观断口形貌逐渐由以长槽状结构为主向完全不规则破碎结构过渡, 临界加载速率是大量不规则裂纹出现的转折点。

3) 随加载速率增大, 煤样破碎碎块分布特征表现为: 小粒径煤屑质量占比减小, 大粒径煤屑质量占比增大。干燥及饱和煤样的曲线斜率 $\alpha$ 均逐渐增大。干燥及饱和煤样分形维数均逐渐减小, 拟合曲线满足幂函数曲线规律。与干燥煤样相比, 饱和煤样曲线斜率 $\alpha$ 在对应加载速率下逐渐减小, 分形维数增大。

4) 饱和煤样加载速率微观作用机制由微裂隙扩展速率及其内部孔隙水压力共同决定, 2个因素相互竞争, 导致煤样的力学及损伤特征规律呈现非线性特征。

## 参考文献(References):

- [1] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 547-556.  
XIE He-ping, GAO Feng, JU Yang, et al. Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 547-556.
- [2] 姜耀东, 赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状: 机制、预警与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2188-2204.  
JIANG Yaodong, ZHAO Yixin. State of the art: investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in china[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2188-2204.
- [3] 齐庆新, 欧阳振华, 赵善坤, 等. 我国冲击地压矿井类型及防治方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(10): 1-5.  
QI Qingxin, OUYANG Zhenhua, ZHAO Shankun, et al. Study on types of rock burst mine and prevention methods in china[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(10): 1-5.
- [4] 潘一山. 煤与瓦斯突出、冲击地压复合动力灾害一体化研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 105-112.  
PAN Yishan. Integrated study on compound dynamic disaster of coal-gas outburst and rockburst[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 105-112.
- [5] 王岗, 潘一山, 肖晓春. 电荷感应法检测煤层注水防冲效果研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 311-319.  
WANG Gang, PAN Yishan, XIAO Xiaochun. Detection of effects of rock burst prevention by water injection into coal seam using charge induction method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 311-319.
- [6] 谢广祥, 常聚才, 华心祝. 开采速度对综放面围岩力学特征影响研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 963-967.  
XIE Guangxiang, CHANG Jucai, HUA Xinzhu. Influence of mining velocity on mechanical characteristics of surrounding rock in fully mechanized top-coal caving face[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 963-967.
- [7] 王磊, 谢广祥. 综采面推进速度对煤岩动力灾害的影响研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 70-74.  
WANG Lei, XIE Guangxiang. Influence of mining velocity on dynamic disasters in the coal and rock mass at a fully mechanized mining face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 70-74.
- [8] 崔峰, 贾冲, 来兴平, 等. 基于加卸载响应比的冲击地压矿井急倾斜巨厚煤层推进速度研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 745-761.  
CUI Feng, JIA Chong, LAI Xingping, et al. Study on advancing rate of steeply inclined extra-thick coal seam in rock burst mine based on loading-unloading response ratio[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 745-761.
- [9] 王凯, 蒋一峰, 徐超. 不同含水率煤体单轴压缩力学特性及损伤统计模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1070-1079.  
WANG Kai, JIANG Yifeng, XU Chao. Mechanical properties and statistical damage model of coal with different moisture contents under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1070-1079.
- [10] 秦虎, 黄滚, 王维忠. 不同含水率煤岩受压变形破坏全过程声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1115-1120.  
QIN Hu, HUANG Gun, WANG Weizhong. Experimental study of acoustic emission characteristics of coal samples with different moisture contents in process of compression deformation and failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1115-1120.
- [11] 冯国瑞, 文晓泽, 郭军, 等. 含水率对煤样声发射特征和碎块分布特征影响的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2910-2918.  
FENG Guorui, WEN Xiaoze, GUO Jun, et al. Study on influence of moisture content on coal sample AE properties and fragment distribution characteristics[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(8): 2910-2918.
- [12] 杨科, 魏祯, 窦礼同, 等. 含水煤样动态拉伸能量演化与破

- 坏特征试验研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(2): 398–411.  
YANG Ke, WEI Zhen, DOU Litong, et al. Research on dynamic tensile energy evolution and fractal characteristics of water-bearing coal samples[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(2): 398–411.
- [13] 李彦伟, 姜耀东, 杨英明, 等. 煤单轴抗压强度特性的加载速率效应研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(4): 754–760.  
LI Yanwei, JIANG Yaodong, YANG Yingming, et al. Research on loading rate effect of uniaxial compressive strength of coal[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(4): 754–760.
- [14] 李海涛, 蒋春祥, 姜耀东, 等. 加载速率对煤样力学行为影响的试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(3): 430–436.  
LI Haitao, JIANG Chunxiang, JIANG Yaodong, et al. Mechanical behavior and mechanism analysis of coal samples based on loading rate effect[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(3): 430–436.
- [15] 李海涛, 宋力, 周宏伟, 等. 多加载速率影响下煤强度的非线性演化机制试验研究及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(S1): 2978–2989.  
LI Haitao, SONG Li, ZHOU Hongwei, et al. Experimental study of nonlinear evolution mechanism of coal strength under multi-loading rates and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(S1): 2978–2989.
- [16] 黄达, 黄润秋, 张永兴. 粗晶大理岩单轴压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(2): 245–255.  
HUANG Da, HUANG Runqiu, ZHANG Yongxing. Experimental investigations on static loading rate effects on mechanical properties and energy mechanism of coarse crystal grain marble under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(2): 245–255.
- [17] 孟庆彬, 韩立军, 浦海, 等. 尺寸效应和应变速率对岩石力学特性影响的试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(2): 233–243.  
MENG Qingbin, HAN Lijun, PU Hai, et al. Effect of size effect and strain rate on the mechanical behavior of rock specimens[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(2): 233–243.
- [18] 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, 935.  
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, 935.
- [19] 王斌, 李夕兵. 单轴荷载下饱水岩石静态和动态抗压强度的细观力学分析[J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(4): 423–431.  
WANG Bin, LI Xibing. Micromechanical analysis of static and dynamic compressive strength of water saturated rock under uniaxial load[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(4): 423–431.
- [20] 滕腾, 杜玉冰, 陈朋飞, 等. 砂岩变形率与水理效应的力学特性研究[J]. *矿业科学学报*, 2020, 5(3): 342–352.  
TENG Teng, DU Yubing, CHEN Pengfei, et al. Effects of deformation rate and hydrated condition on the mechanical property of sandstone[J]. *Journal of mining science and technology*, 2020, 5(3): 342–352.
- [21] 张连英, 张树娟, 茅献彪, 等. 加载速率对煤系泥岩脆-延性转变影响的试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(2): 391–396, 401.  
ZHANG Lianying, ZHANG Shujuan, MAO Xianbiao, et al. Experimental research of influence of loading rate on brittle-ductile transition of mudstone in coal rock strata[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(2): 391–396, 401.
- [22] 王登科, 刘淑敏, 魏建平, 等. 冲击破坏条件下煤的强度型统计损伤本构模型与分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(12): 3024–3031.  
WANG Dengke, LIU Shumin, WEI Jianping, et al. Analysis and strength statistical damage constitutive model of coal under impacting failure[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(12): 3024–3031.
- [23] OHTSU M., ISODA T, TOMODA Y. Acoustic emission techniques standardized for concrete structures[J]. *Journal of Acoustic Emission*, 2007, 25: 21–32.
- [24] 王云飞, 刘晓, 王立平, 等. 加载速率和饱水对砂岩力学行为和微观损伤特征的影响[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(2): 421–428.  
WANG Yunfei, LIU Xiao, WANG Liping, et al. Coupling effect of loading rate and saturated water on mechanical behavior and micro damage property of sandstone. [J] *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(2): 421–428.
- [25] 朱星, 唐垚, 范杰, 等. 基于临界慢化理论的细砂岩破坏前兆试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(1): 53–61.  
ZHU Xing, TANG Yao, FAN Jie, et al. Experimental study on failure precursors of fine sandstone based on critical slowing down theory[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(1): 53–61.
- [26] LIU Wenjie, YANG Ke, WEI Zhen, et al. Energy dissipation and failure characteristics of layered composite rocks under impact load. *Shock and Vibration*, 2021, Article ID8775338, [Https://doi.org/10.1155/2021/8775338](https://doi.org/10.1155/2021/8775338).
- [27] 陈光波, 滕鹏程, 张国华, 等. 不同加载速率下煤岩组合体碎块分形特征与能量传递机制[J]. *重庆大学学报*, 2022, 45(8): 115–129.  
CHEN Guangbo, TENG Pengcheng, ZHANG Guohua, et al. Fractal characteristics and energy transfer mechanism of coal-rock combined body fragments under different loading rates[J]. *Journal of Chongqing University*, 2022, 45(8): 115–129.
- [28] 肖晓春, 金晨, 丁鑫, 等. 基于声发射时频特征的不同含水煤样冲击倾向试验研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(4): 931–938.  
XIAO Xiaochun, JIN Chen, DING Xin, et al. Experimental study on rock burst tendency of coal with different moisture content based on acoustic emission time-frequency signals[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(4): 931–938.
- [29] 肖晓春, 金晨, 吴迪, 等. 含水煤体冲击倾向及声-电荷时频

- 特征试验[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(11): 103–108.
- XIAO Xiaochun, JIN Chen, WU Di, *et al.* Experimental study on burst tendency of water-bearing coal and its acoustic emission-charge time frequency domain signal characteristics[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(11): 103–108.
- [30] 梁冰, 田蜜, 王俊光. 不同含水状态对坚硬煤层冲击倾向性影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 100–102.
- LIANG Bing, TIAN Mi, WANG Junguang. Effect of different water contents on bursting potential of hard coal seam[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(1): 100–102.
- [31] 李宝富, 齐利伟, 任永康, 等. 千秋煤矿煤的单轴抗压强度与冲击能量指数关系[J]. 煤炭工程, 2011(12): 68–70.
- LI Baofu, QI Liwei, REN Yongkang, *et al.* Relationship between uniaxial compressive strength and impact energy index of coal in qianqiu mine[J]. Coal Engineering, 2011(12): 68–70.
- [32] 李海涛, 宋力, 周宏伟, 等. 率效应影响下煤的冲击特性评价方法及应用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(12): 2763–2771.
- LI Haitao, SONG Li, ZHOU Hongwei, *et al.* Evaluation method and application of coal burst performance under the effect of loading rate[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12): 2763–2771.
- [33] LI H B, ZHAO J, LI T J. Micromechanical modelling of the mechanical properties of a granite under dynamic uniaxial compressive loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(6): 923–935.
- [34] 王海龙, 李庆斌. 饱和混凝土静动力抗压强度变化的细观力学机理[J]. 水力学报, 2006, 37(8): 958–962.
- WANG Hailong, LI Qingbin. Micro-mechanism of static and dynamic strengths for saturated concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(8): 958–962.
- [35] 孔晓璇. 单裂隙水流对岩体裂隙法向刚度的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(6): 1491–1496.
- KONG Xiaoxuan. Influence of single fracture flow on the rock fissures normal stiffness[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(6): 1491–1496.