



采掘工作面孕突过程地应力诱使煤体初始破坏动态响应机制

王超杰 唐泽湘 徐长航 杨洪伟 刘鲁坦

引用本文:

王超杰, 唐泽湘, 徐长航, 等. 采掘工作面孕突过程地应力诱使煤体初始破坏动态响应机制[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 140–154.

WANG Chaojie, TANG Zexiang, XU Changhang. Dynamic response mechanism of initial failure of coal mass induced by in-situ stress in an outburst inoculation process of the working face for coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 140–154.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1713>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于水力割缝卸压的煤岩与瓦斯动力灾害防控技术

Prevention and control technology of coal-rock and gas dynamic disaster based on water jet slotting pressure relief

煤炭科学技术. 2021, 49(4): 133–141 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.016>

煤与瓦斯突出流体多物理参数动态响应试验研究

Experimental study on dynamic response of coal and gas outburst fluid with multiple physical parameters

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 159–168 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/55f1d3b7-b25a-47aa-ba38-253dbac3f024>

低透气性煤层工作面煤与瓦斯突出灾害中心体致灾机理

Mechanism of coal and gas outburst disaster in low permeability coal seam mining face

煤炭科学技术. 2022, 50(10): 76–85 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/39ea06c8-960d-4b85-9678-fc8cf5744b92>

煤矿开采动力灾害事故分析及防治对策研究

Analysis of coal mining dynamic disasters and study on prevention countermeasures

煤炭科学技术. 2020, 48(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e48b793c-beee-462d-a4bd-ecfe70acch56>

淮北煤田煤与瓦斯突出灾害差异性和控制因素研究

Study on difference and control factors of coal and gas outburst disasters in Huaibei Coalfield

煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/bbe45271-5963-42f2-afb1-da8bdb974b4a>

高地应力条件煤与瓦斯突出冲击力演化规律研究

Study on the impact force evolution law of coal and gas outburst under high ground stress

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 116–128 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0503>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王超杰,唐泽湘,徐长航,等. 采掘工作面孕突过程地应力诱使煤体初始破坏动态响应机制[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 140–154.

WANG Chaojie, TANG Zexiang, XU Changhang, *et al.* Dynamic response mechanism of initial failure of coal mass induced by in-situ stress in an outburst inoculation process of the working face for coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 140–154.

采掘工作面孕突过程地应力诱使煤体初始破坏 动态响应机制

王超杰¹, 唐泽湘¹, 徐长航¹, 杨洪伟², 刘鲁坦¹

(1. 中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 河南神火煤电股份有限公司, 河南 永城 476600)

摘要: 工作面采动应力场诱发煤体初始破坏, 作为突出发生的必要条件, 揭示其细宏观动态力学过程依然存在巨大挑战。基于采掘工作面典型突出事故, 构建了采动煤体损伤失稳过程多应力载荷路径。采用 PFC3D 离散元软件开展了多工况多尺度下煤体损伤失稳可视化模拟, 揭示了采动煤体损伤失稳动态响应规律, 阐明了采动煤体裂纹动态演变行为, 并基于采动下地应力诱使煤体初始破坏规律提出了突出防治技术展望。结果表明: 采动煤体随主应力加卸载速率的变化, 其破坏类型和破坏强度差异明显。应力渐进卸载过程, 煤体宏观破断面呈现单斜面或共轭剪切面形式, 且随卸载速率增加, 煤体破坏强度降低。随应力双向同等速率渐进加载, 单向突然卸载或保持一定残余应力状态下呈现宏观破断面与中间主应力方向平行, 且卸载程度增加或残余应力降低引发煤体破坏强度降低。不同应力载荷下, 煤体破坏过程随剪切和张拉裂纹先后出现, 呈现张剪破坏。在采动煤体损伤引发失稳过程中裂纹动态演变过程呈现间歇性、渐进性和阵发性复合特征。裂纹整体发育过程可表征为初期新裂纹出现(间歇性-突增阶段)、裂纹扩展(渐进性-慢增阶段)以及贯通并扩展(阵发性-慢增阶段)、整体撕裂煤体过程(骤增阶段)。煤体力学强度被视为影响突出发生的一主控因素, 地应力诱发采动煤体初始破坏的难易程度关键在于应力加卸载路径。单向主应力突然卸载或双向主应力渐进卸载, 煤体最易发生初始破坏。基于此力学规律, 提出可表征工作面突出煤体最危险状态的“采掘工作面突出预测理想采动模式”。

关键词: 煤与瓦斯突出; 煤岩瓦斯动力灾害; 突出防治; 动态损伤; 裂纹扩展

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)10-0140-15

Dynamic response mechanism of initial failure of coal mass induced by in-situ stress in an outburst inoculation process of the working face for coal mining

WANG Chaojie¹, TANG Zexiang¹, XU Changhang¹, YANG Hongwei², LIU Lutan¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Henan Shenhua Group Co., Ltd., Yongcheng 476600, China)

Abstract: There is still a great challenge to reveal the micro-macro dynamic mechanical behavior of initial coal failure induced by mining stress field in working face as a necessary condition for the outburst occurrence. The multivariate stress loading paths for the damage and instability of mining coal were constructed based on the typical coal and gas outburst accident of mining face. PFC3D discrete software was used to carry out the visual simulation of damage and instability of coal under multiple working conditions and scales. The dynamic response law of damage and instability of mining coal was revealed, the dynamic evolution behavior of cracks in mining coal was clarified, and the prospect of outburst prevention technologies was put forward based on the initial failure process of coal induced by in-situ stress

收稿日期: 2022-10-19

责任编辑: 宫在芹

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1713

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52104236); 中国博士后科学基金资助项目(2020M672177); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(22CX06018A)

作者简介: 王超杰(1992—), 男, 河南商丘人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: superj_wang@163.com

under mining. The results shown that the failure type and strength of the mined coal varied significantly with the loading and unloading rate of the principal stress. In the process of gradual unloading of stress, the macroscopic fracture surface of coal presented the form of single inclined plane or conjugate shear plane, and the failure strength of coal decreased with the increase of unloading rate. With the gradual loading in both directions of stress at the same rate, unidirectional sudden unloading or a certain residual stress maintaining state presented a macro fracture surface parallel to the direction of the intermediate principal stress. And the failure strength of coal decreased with the increase of the unloading degree or the decrease of the residual stress. Under different stress loaded, the tension-shear failure process of coal appeared successively with shear and tension cracks. In the process of instability caused by mining coal damage, the dynamic evolution of cracks presented intermittent, progressive and paroxysmal composite characteristics. The overall development process of cracks can be characterized as the initial appearance of new cracks (intermittent-sudden increase stage), crack expansion (gradual-slow increase stage), penetration and expansion (paroxysmal-slow increase stage), and the overall tearing process of coal (sudden increase stage). The mechanical strength of coal was regarded as one of the main controlling factors affecting the occurrence of outbursts. The difficulty of initial failure of coal induced by in-situ stress depended critically on the stress loading and unloading path. The coal was most prone to initial failure when the unidirectional principal stress was suddenly unloaded or the bidirectional principal stress was gradually unloaded. Based on this mechanical law, the “ideal mining mode of outburst prediction in mining working face” was proposed to represent the most dangerous state of coal in the working face.

Key words: coal and gas outburst; coal/rock-gas dynamic disaster; outburst prevention; dynamic damage; crack propagation

0 引 言

煤岩瓦斯动力灾害以长期性、复杂性和反复性多态势制约煤炭的安全高效开采。学术界开展煤与瓦斯突出(简称“突出”)等灾害防治研究已长达 180 余年,取得了众多重大突破,尤其近年灾害多元动态信息的集成监测、动态预警及分源防控技术工程示范^[1-2]。现有研究指出^[3-4]其灾变本质为:在采动应力与瓦斯压力互馈多变响应载荷下,新裂纹萌生、新旧裂纹贯通与扩展诱发的煤岩体结构损伤变形与断裂失稳现象。采动煤岩体力学响应在方向及数值上呈复杂多变特征,载荷类型不同,煤岩动力灾害类型及强度截然不同^[5-7]。同时因动力灾害孕育受控于复杂的地质结构^[8-9],呈“区域危险,局部灾变”特征。相关机理尚有待进一步揭示,在灾害主控机制及控因间定量化研究依然认识匮乏^[2,10-11]。煤炭工业“十四五”发展方向指出煤矿重大灾害防控基础理论,作为煤炭智能化开采的关键前提,是亟待攻关的重大科学问题^[12]。

鉴于原始含瓦斯煤岩体在井下赋存一般呈三向不等应力载荷状态,采掘扰动使其普遍呈五面加载,单面临空受载模式^[5-7]。研究表明^[4,5,13-16]此类应力模式下,煤体中裂纹萌生与扩展沿中间主应力方向演变,最终形成的宏观层裂面近似平行于临空自由面。同时理论分析指出煤体受地应力作用发生初始破坏过程存在拉伸破坏,在失稳过程中瓦斯进一步加剧煤体碎裂,其破坏形式为拉伸-剪切复合型。文献^[17]也初步证实煤岩体在双围压载荷路径下,其破裂受轴向拉应力的作用沿加载方向扩展。这与常

规认识的采动载荷下含瓦斯煤体受剪切破坏的力学响应有着新的补充。尽管,目前对地应力与瓦斯压力在突出灾变过程中的认识不尽相同,但由于灾变过程地应力与瓦斯压力共存,探究采动煤体结构失稳不能严格区分或定义某主控因素在前,它们呈互馈协作状态。因此,煤体初始破坏同样由地应力和瓦斯压力共同作用逐步演化。然而,已然形成共识的是灾变过程两应力在不同阶段必然存在主控状态。大量研究均指出煤岩体初始破坏为灾变前提,因瓦斯嵌入,改变了含瓦斯煤岩体力学响应特征,是煤岩体损伤失稳的推动力^[18-22]。以地应力主导的采动应力场决定煤岩体初始破坏强度与方向^[23]。

突出孕育与发动过程关键在于突出煤体的适时揭露。因采掘扰动,工作面前方突出煤体在未揭露前必然受到集中应力作用,随应力推移和瞬态平衡,在残余应力作用下引发持续性损伤失稳。因此,地应力在采动下引发煤体损伤失稳作为突出发生的必要条件,煤体损伤失稳程度对突出强度分布具有关键作用。如相对于煤巷或采煤工作面,突出发生在石门揭煤时,突出强度普遍较大。部分原因归结于突出煤体揭露前瓦斯赋存扰动较小,而另外则由于揭煤工艺致使突出煤体残余应力赋存较大,进而引发煤体损伤失稳程度较高,为后续瓦斯做功提供便利。然而,综合考虑采动煤岩体应力演化路径及突出灾害发动的突然性,构建应力加卸载模型,揭示采动煤岩体裂纹动态扩展及损伤失稳规律仍鲜有报道。导致突出灾害孕育阶段,煤体初始破坏力学过程未能系统揭示。因此,基于突出煤体孕突过程应力演化特征,以三向应力渐变或突变为孕灾过程力学再

现背景,旨在揭示采掘工作面孕突过程地应力诱使煤体初始破坏动态响应机制。研究成果为阐明煤岩瓦斯动力灾害孕育过程细-宏观动态力学行为提供理论基础。

1 采掘工作面孕突应力场特征与模型

1.1 采动煤岩体多变力学特征

突出主要发生在煤巷、回采和石门揭煤工作面,根据其触发时间属性分为瞬时突出和延期突出。由掘进特点可归类为掘进时工作面前方发生瞬时/延期突出、掘进后工作面前方/工作面后方煤壁发生延期突出。因此,采动煤岩体应力路径演化过程属突然和渐进加卸载行为。若突出发生在采掘工作面前方,根据突出时间属性,会伴随沿工作面掘进方向煤岩体应力突然或渐进卸载过程,相应简化为最小主应力突然或渐进卸载路径;若突出发生在采掘工作面后方煤壁,根据突出时间属性,会伴随在沿采掘空间方向一定残余应力下,另两方向应力出现应力集中,相应简化为最小主应力以一定应力伺候,最大与中间主应力渐进加载路径。如 2010 年寺河煤矿“9·16”突出事故(掘进后工作面前方发生延期突出)、2021 年山西石港“3·25”突出事故(掘进时工作面前方发生延期突出)、2020 年陕西燎原煤业“6·10”突出事故(掘进时工作面前方发生瞬时突出)、2017 年薛湖煤矿“5·15”突出事故(掘进后工作面后方煤壁发生延期突出)。故而,突出发生伴随着突出煤体在三向受力下突然或渐进加卸载过程,其加卸载方向及速率决然不同。因此,基于上述四类典型突出事故,采动煤岩体孕突出过程残余应力加卸载路径可简化为 4 种力学类型,如图 1 所示, σ_1 为最大主应力; σ_2 为中间主应力; σ_3 为最小主应力。

1.2 采动煤岩体损伤失稳数值模型

采动煤岩体损伤失稳过程属动态行为,基于常规室内试验难以捕捉损伤失稳细观过程。目前,众多研究均已表明利用数值仿真手段不仅可表征实际煤岩体破坏过程,更便于从细宏观角度综合剖析煤岩体损伤直至失稳阶段性特征。因此,本文基于离散元颗粒流软件 PFC^{3D},开展如图 1 所示的不同力学路径下煤岩体损伤失稳过程模拟。PFC^{3D}5.0 软件中模型建立是将实际问题迁移至数值模拟中演算解决的重要步骤。模型建立过程由以下几步组成:设置模型计算区域、设置 clean 命令、创建粒子集、设定边界条件、设置初始条件与接触模型以及给定粒子参数。以多重应力路径加卸载煤样损伤失稳实验为

基础,本文模拟采用平行黏结接触模型,构建了与试验等效的长宽高为 50 mm×50 mm×100 mm 标准煤岩体试件,如图 2 所示。

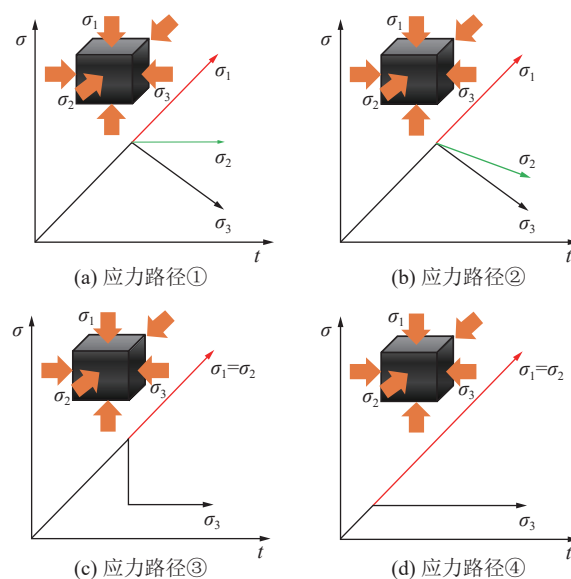


图 1 采动煤岩体孕突过程力学加卸载路径
Fig.1 Mechanical loading or unloading path of mining coal/rock mass during outbursts inoculation process

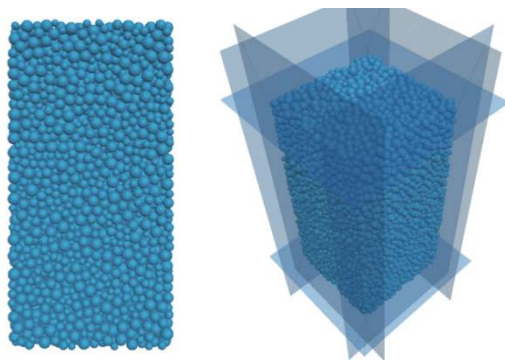


图 2 煤岩体试件颗粒化模型
Fig.2 Granulation model of coalrock mass specimen

因突出煤体在现场采样难以成型,基于文献[24],开展了实际构造煤体的型煤仿制试验,在三轴压缩与巴西劈裂等物理力学性能测试实验后得到实际型煤试样力学参数见表 1。依据型煤试样力学参数与应变特性进行模拟模型试样参数标定,经 100 组参数标定得到模型细观参数见表 2。模型试样与实际试样单轴压缩后应力应变及破坏形态对比如图 3 所示。由图 3 可知,模拟所构建模型与实际型煤抗压强度均为 5.02 MPa。峰值处应变,模拟结果为 1.6%,实验结果为 2.2%,二者相差 0.6%;弹性模量,模拟与实验结果分别为 388、346 MPa,二者误差在 10% 以内。在受压破坏各阶段特性表现均接近,且均在相同部位发生单斜面剪切破坏,二者间具有较好的相似性。

表 1 型煤试样力学参数
Table 1 Mechanical parameters of briquette sample

样品	视密度/(kg·m ⁻³)	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
型煤	1 390	0.74	5.02	140.4	0.41	1.67	39

表 2 数值模拟细观参数
Table 2 Physical parameters of numerical simulation

模型单元	细观参数	数值
颗粒	颗粒数 <i>N</i> /个	11 617
	直径 <i>d</i> /mm	1 ~ 2
	密度 <i>ρ</i> /(kg·m ⁻³)	1 390
	孔隙率 <i>φ</i> /%	10
	弹性模量 <i>E</i> /Pa	2.09×10 ⁸
接触	刚度比 <i>K</i> *	2.5
	法向抗拉强度 <i>σ_c</i> /Pa	9.35×10 ⁶
	黏聚力 <i>c</i> /Pa	5.35×10 ⁶
	摩擦因数 <i>μ_c</i>	0.4
	摩擦角 <i>φ</i> /(°)	30
	胶结间距 <i>g_c</i> /mm	0.1

表 3 应力加卸载模式
Table 3 Stress loading or unloading types

加卸载	加卸载速率		
路径	Z轴(最大主应力 <i>σ₁</i>)	Y轴(中间主应力 <i>σ₂</i>)	X轴(最小主应力 <i>σ₃</i>)
路径①	以8 mm/s进行加载	以3 MPa压力伺服	以1 mm/s进行卸载
			以4 mm/s进行卸载
			以8 mm/s进行卸载
路径②	以8 mm/s进行加载	以1 mm/s进行卸载	以8 mm/s进行卸载
		以8 mm/s进行卸载	以8 mm/s进行卸载
路径③	以8 mm/s进行加载	以8 mm/s进行加载	突然卸载至1 MPa
			突然卸载至0.01 MPa
路径④	以8 mm/s进行加载	以4 mm/s进行加载	以1 mm/s进行加载
			以1 mm/s进行加载
			以1 MPa压力伺服
路径⑤	以8 mm/s进行加载	以8 mm/s进行加载	以1 MPa压力伺服
			以1 MPa压力伺服

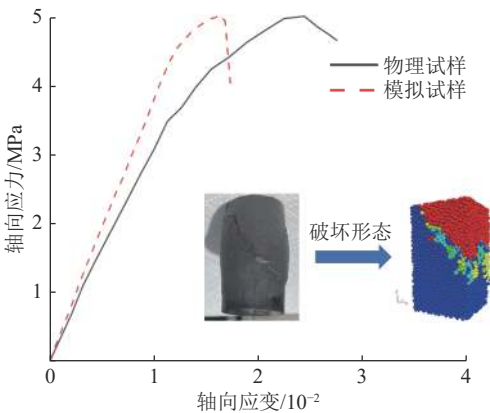


图 3 模型验证
Fig.3 Model validation

1.3 应力加卸载模式

基于图 1, 为综合反应采动煤体诱发突出力学过程, 本文不仅考虑应力加卸载路径, 同时考虑路径下应力加卸载速率的影响。共设计 10 种应力加卸载模式, 见表 3。

2 采动煤体损伤失稳动态响应规律

2.1 煤体损伤失稳特征

4 种力学路径载荷下煤体发生损伤直至失稳破坏过程细宏观形态如图 4—图 7 所示。由图 4 可知, 在最小主应力渐进卸载过程, 采掘面煤体在卸载方

向发生明显扩容现象。随卸载速率增加, 煤体初始损伤位置由端部转变为中部。同时煤体破断面扩展范围逐步增大, 破坏类型由单斜面剪切破坏转变为共轭剪切面破坏。图 5 表明在最小主应力和中间主应力均渐进卸载过程, 采掘面煤体在卸载方向发生明显扩容现象, 初始损伤在煤体端部及中部均会发生。随中间主应力卸载速率增加, 煤体破断面扩展范围逐步增大, 破坏类型呈现由单斜面剪切破坏转变为共轭剪切面破坏趋势。从图 6 可看出, 在最小主应力突然卸载过程, 采掘面煤体在卸载方向发生明显扩容现象, 初始损伤在煤体端部及中部均会发生。随最小主应力残余应力值降低, 煤体破断面扩展范围逐步增大, 宏观破断面由与最小主应力方向成一定夹角逐步发展成其法向方向, 与中间主应力方向平行, 表明煤体呈现张拉破坏过程。图 7 表明在最小主应力保持一定残余应力过程, 采掘面煤体在最小主应力方向发生明显扩容现象, 初始损伤发生在煤体端部及中部。最大主应力与中间主应力加载速率相同, 类似于文献 [17] 双围压加载状态, 宏观破断面与中间主应力方向平行, 煤体呈现张拉破坏。同时可得出围压一旦满足煤体破坏力学强度, 围压应力载荷大小对煤体破坏形式无影响。最大主应力与中间主应力加载速率不同, 煤体呈现共轭剪切破

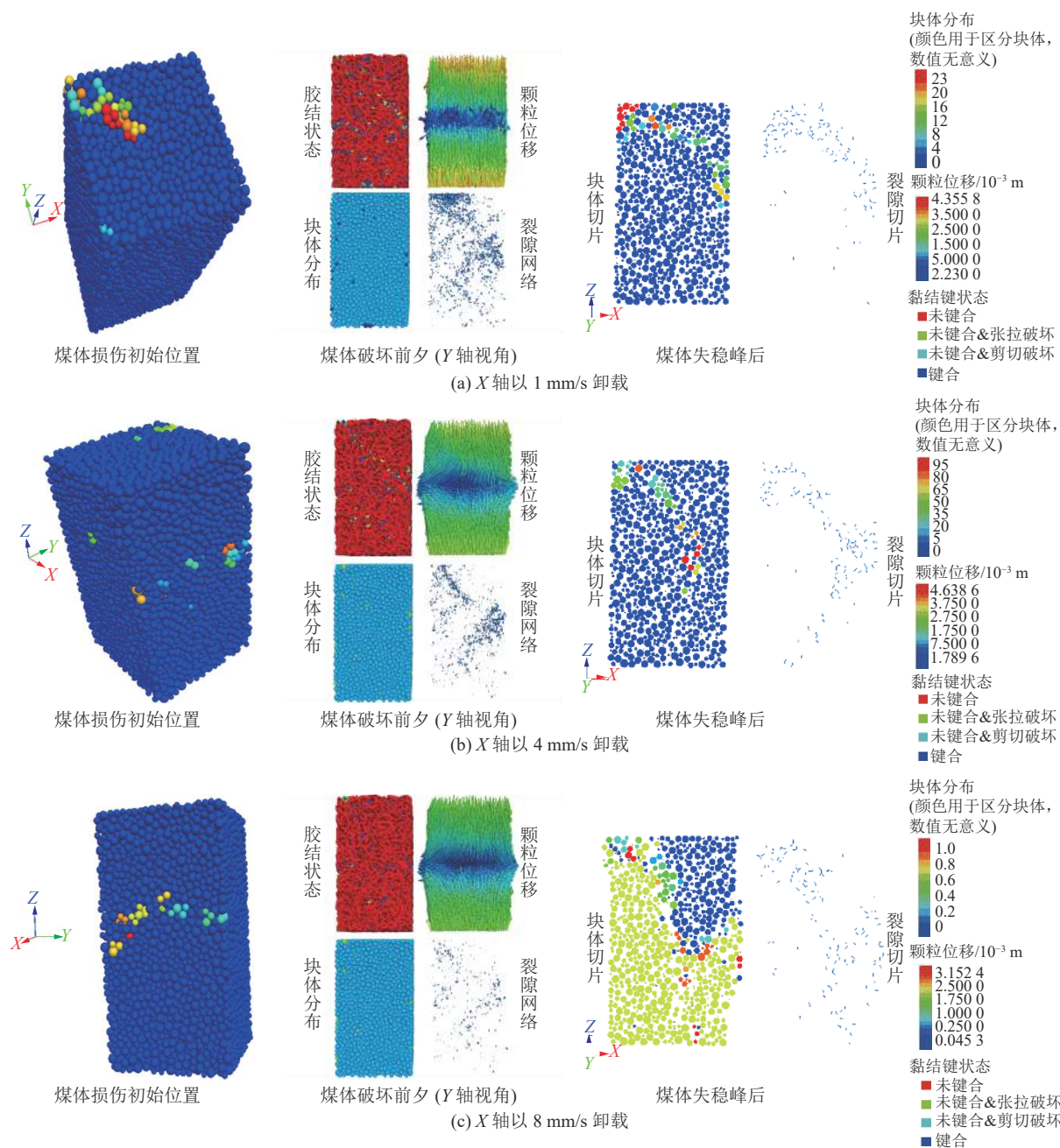


图 4 应力路径①下煤体损伤失稳特征

Fig.4 Damage and failure characteristics under stress path ①

坏过程。

2.2 声发射响应特征

煤岩体受力破坏过程伴随声发射事件的产生,即存在瞬态弹性应力波释放现象,这与其内部微小裂纹的出现有直接联系。在 PFC 数值仿真中颗粒间的胶结破坏同样存在应变能的释放,即每个微裂纹的出现表征着一次声发射事件的发生。通过实时监测微裂纹出现的数量即可模拟得到煤岩体破坏过程中的声发射特性。通过煤体在不同应力加卸载模式下声发射 AE 事件计数,分析煤体损伤失稳过程阶段性特征已成为揭示采动煤体动态响应规律的主要手

段。图 8 为 4 种应力路径下煤体损伤失稳过程最大主应力与声发射 AE 事件计数时域特征。图中反映了采动煤体在弹性阶段,并无声发射信号激发,随煤体进入塑性破坏阶段,声发射 AE 事件响应逐步增强。应力峰值附近,声发射 AE 事件计数达到最高峰,且 AE 事件计数峰值出现时刻稍滞后于应力峰值出现时刻。此现象可归结于煤体发生瞬间破坏后,煤体内部在残余应力下仍会出现持续性损伤的结果。同时可看出在最小主应力渐进卸载过程,随卸载速率增加,声发射 AE 事件计数峰值出现时刻越早,也表明煤体越易发生失稳破坏。同理,在最小主应力和

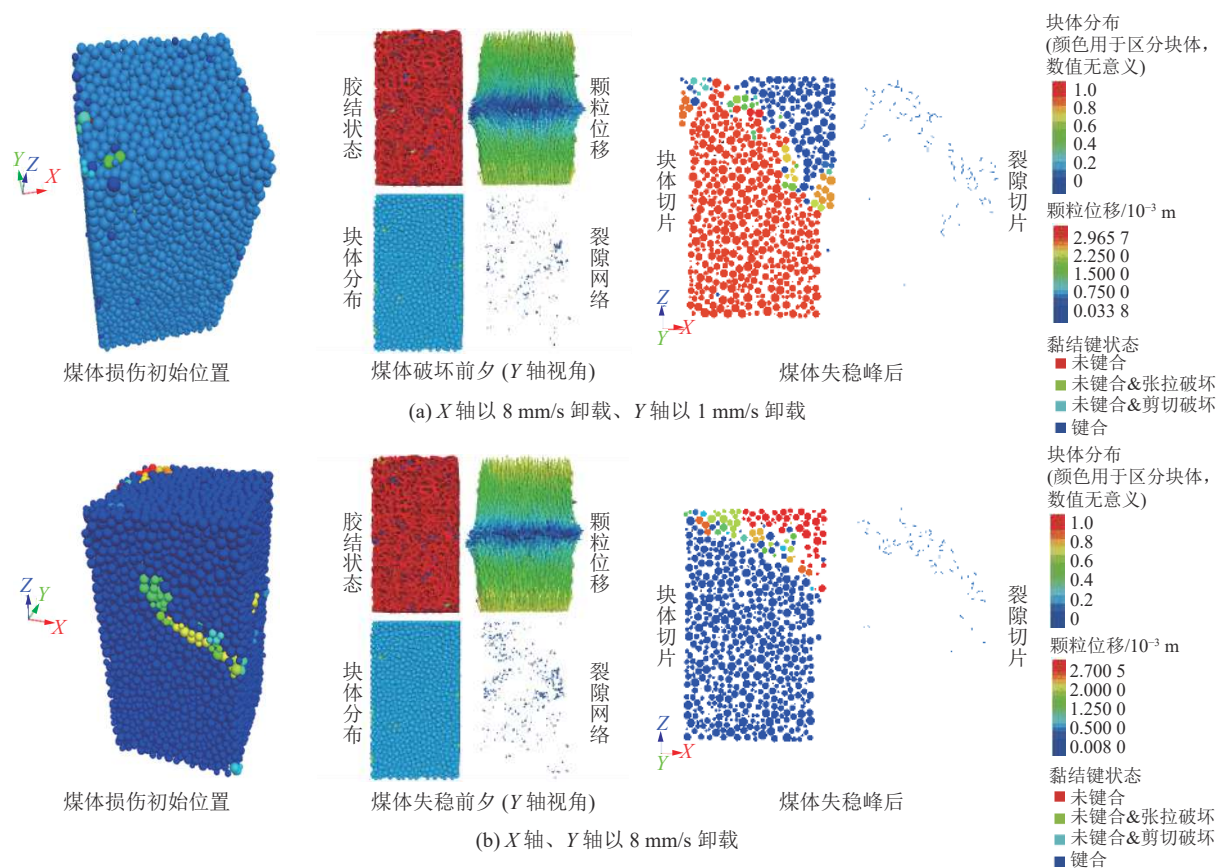


图 5 应力路径②下煤体损伤失稳特征

Fig.5 Damage and failure characteristics under stress path ②

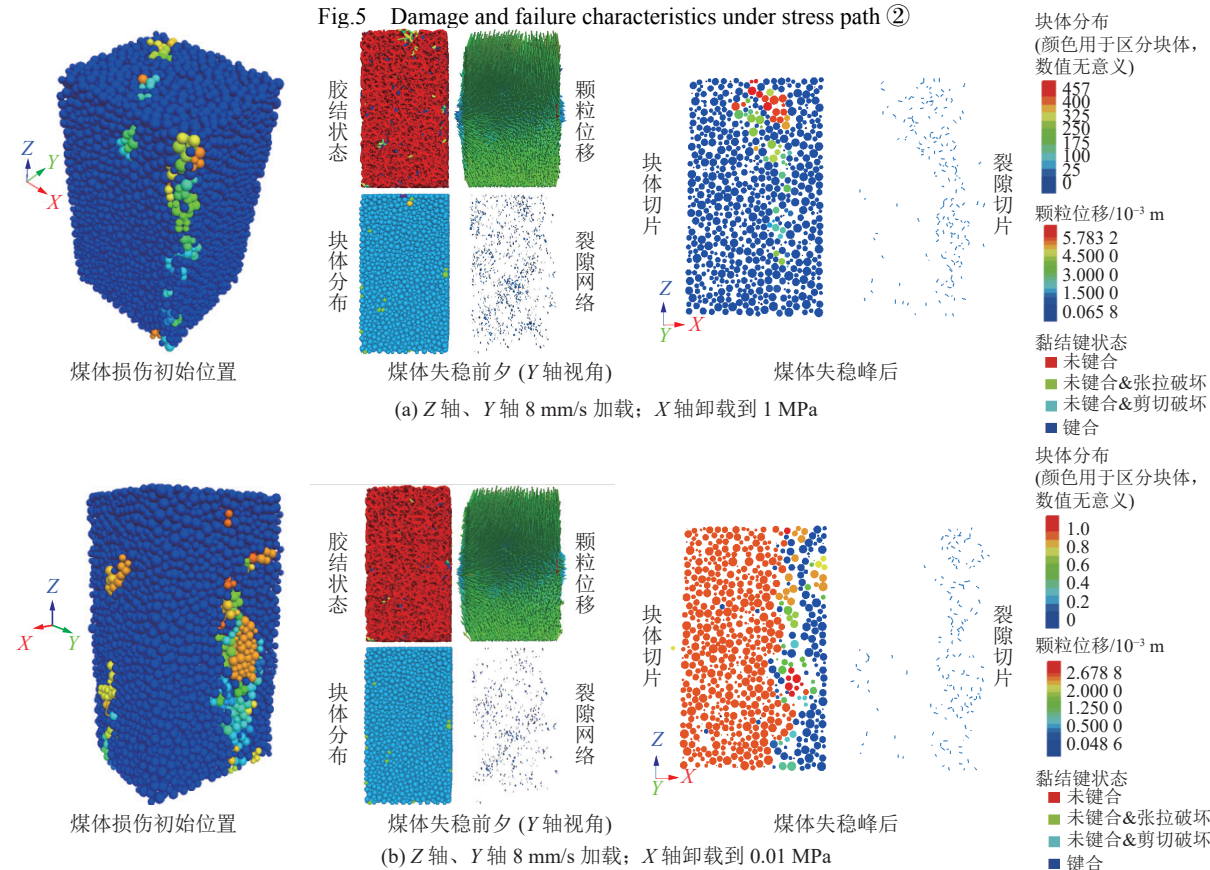


图 6 应力路径③下煤体损伤失稳特征

Fig.6 Damage and failure characteristics under stress path ③

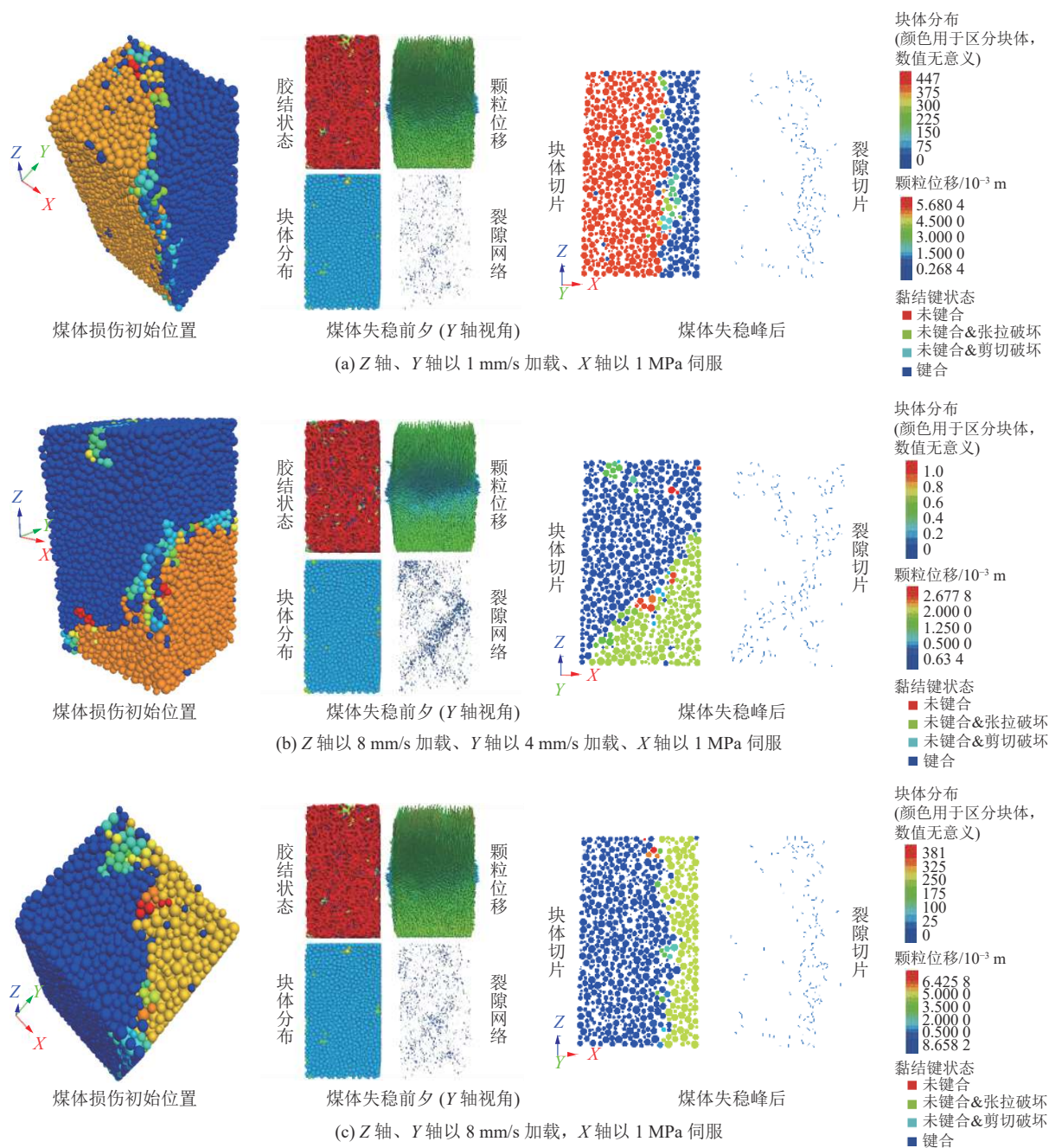


图 7 应力路径④下煤体损伤失稳特征

Fig.7 Damage and failure characteristics under stress path ④

中间主应力均渐进卸载过程, 声发射 AE 事件计数随中间主应力卸载速率的增加, 峰值出现时刻越靠前。在最小主应力突然卸载过程, 随最小主应力残余应力值降低, 声发射 AE 事件计数峰值出现时刻越早。而最小主应力保持一定残余应力过程, 随中间主应力加载速率增加, 声发射 AE 事件计数峰值出现时刻越提前。针对 4 种应力路径下声发射 AE 事件计数峰值出现时刻, 满足如下关系: 应力路径③(0.15 ~ 0.2 s) < 应力路径②(0.28 ~ 0.3 s) < 应力路径①(0.3 ~ 0.5 s) < 应力路径④(0.2 ~ 1.5 s)。

不同应力加卸载模式下煤体最大主应力与声发射 AE 事件累积计数之间的规律, 如图 9 所示。由图可得随煤体破坏强度提高, 声发射 AE 事件累积计数整体呈增大趋势。如应力路径①和②, 随最小主应力和中间主应力卸载速率增加, 煤体破坏强度降低, 声发射 AE 事件累积计数减小。应力路径③下, 随最小主应力残余应力值减小, 煤体破坏强度降低, 声发射 AE 事件累积计数减小。而针对应力路径④时, 随中间主应力加载速率增加, 煤体破坏强度增大, 声发射 AE 事件累积计数略微下降。

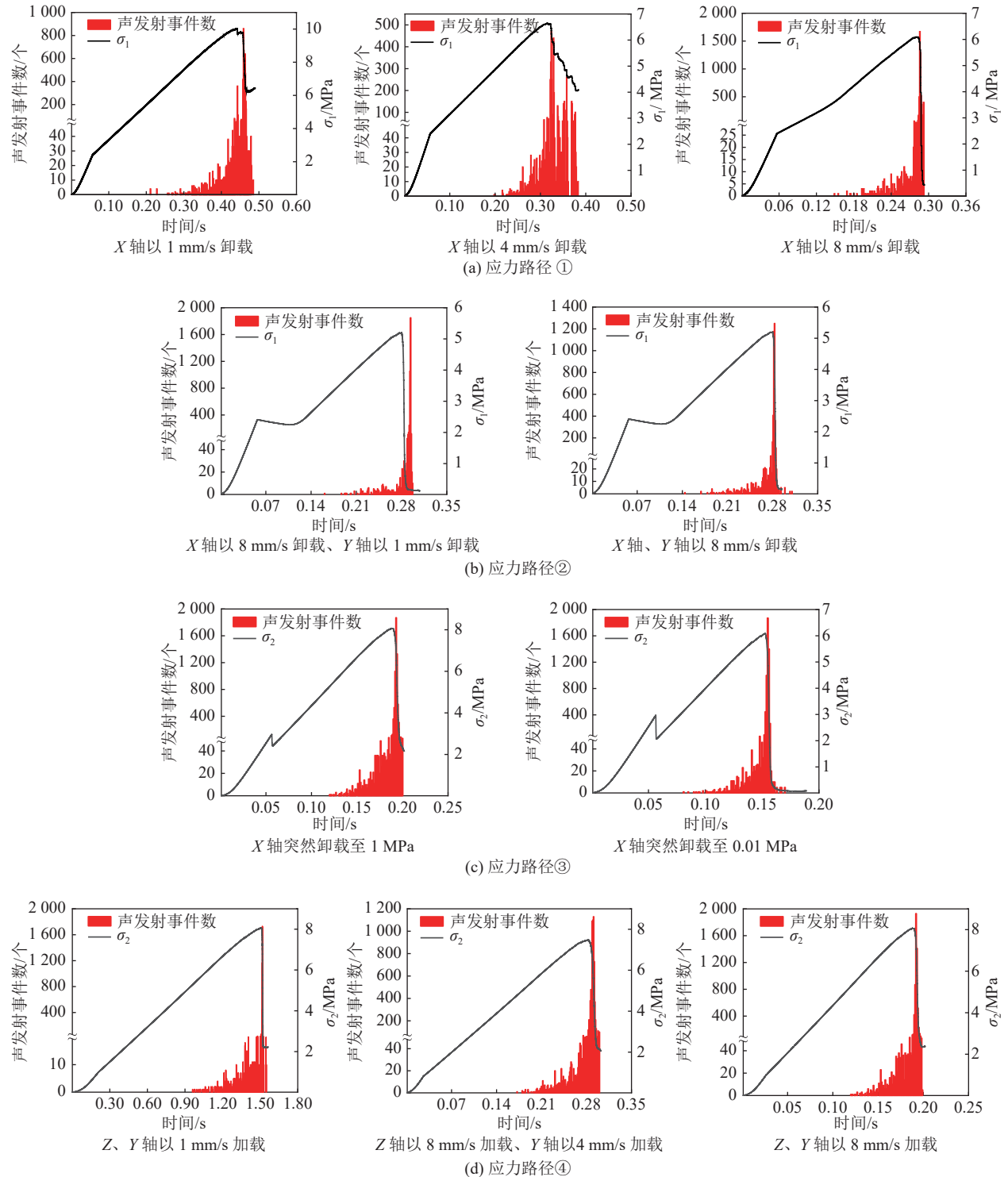


图8 不同应力路径下煤体应力与声发射 AE 事件数时域特征

Fig.8 Time domain characteristics of stress and AE event number of coals under different stress paths

这极有可能由破坏类型的差异引起煤体内部损伤点发育量差别所致,图12—图13裂隙分布形态特点对此有所体现。整体而言,表明不同应力加载卸载模式下煤体抗压强度越大,煤体在失稳破坏前所积蓄应变能越大,进而引发煤体失稳破坏时转变成声发射能量越高,煤体内部产生损伤破裂点越密集,图4—图7中煤体失稳前夕(Y轴视角)破裂点分布

图对此亦有所表征。

3 采动煤体裂纹动态演变行为

3.1 裂纹动态演变时域特征

采动煤岩体产生局部损伤演变为失稳破坏过程,伴随着煤岩体颗粒的位错、断裂进而发育微裂纹,以及裂纹的扩展、贯通并撕裂煤岩体形成宏观破断面。

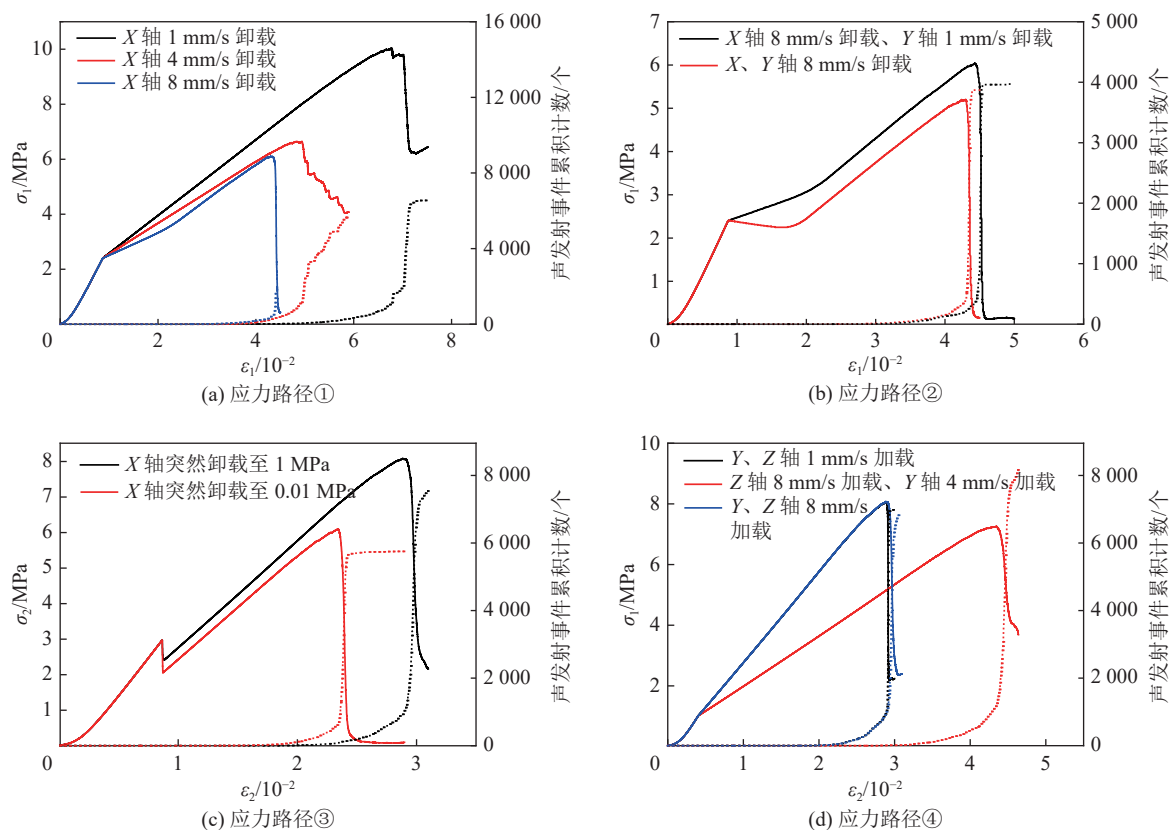


图 9 不同应力路径下煤体应力与声发射累积事件数演化特点

Fig.9 Evolution characteristics of stress and cumulative AE event number of coals under different stress paths

因此, 裂纹动态演变过程不仅可量化分析煤岩体损伤程度, 同时可供剖析失稳破坏过程力学作用机制。图 10 为不同应力加卸载模式下, 煤体损伤过程张拉裂纹和剪切裂纹量化特征与演化规律。由图可知, 煤体破坏过程最初发生剪切损伤, 而后伴随张拉裂纹出现产生张拉损伤。且裂纹整体扩展趋势呈现间歇性、渐进性和阵发性复合特征。裂纹整体发育过程分为 4 个阶段: 1 个突增阶段、2 个慢增阶段、1 个骤增阶段。这相应体现了采动下煤岩体发生局部损伤、大面积破坏、整体性失稳过程。也表征煤体初期新裂纹的出现(间歇性-突增阶段)、裂纹的扩展(渐进性-慢增阶段)以及贯通并扩展(阵发性-慢增阶段)、整体撕裂煤体过程(骤增阶段)。为简洁解读, 上述特征标注仅在图 10a 中的 X 轴以 1 mm/s 卸载应力模式下展示。应力路径①下, 随最小主应力卸载速率增加, 煤体抗压强度降低, 煤体内部率先出现损伤, 呈现裂纹出现时刻越早。同理, 针对应力路径②, 随中间主应力卸载速率增加, 呈现裂纹出现时刻越早。应力路径③, 随最小主应力残余应力值降低, 裂纹出现时刻越早。针对应力路径④, 随中间主应力加载速率增加, 即使煤体抗压强度无变化, 呈现裂纹出现时刻相应越早。裂纹出现时刻和声发射 AE 事

件峰值出现时刻有相似规律, 即满足如下关系: 应力路径③(0.075 ~ 0.12 s) < 应力路径②(0.14 ~ 0.15 s) < 应力路径①(0.15 ~ 0.21 s) < 应力路径④(0.12 ~ 0.9 s)。

不同应力路径下煤体剪切和张拉裂纹发育平均速率如图 11 所示。图中表明裂纹发育速率分为缓慢增加阶段、快速增加阶段、快速衰减阶段。整体而言, 缓慢增加阶段所耗时间最长, 快速衰减阶段次之, 快速增加阶段最短。这相应表明采动煤岩体损伤具有时效性, 但其失稳破坏过程属快速行为。由突出灾变的阶段性特征可知, 裂纹发育速率缓慢增加和快速增加阶段对应着突出的准备阶段, 而快速衰减阶段则预示着若瓦斯作用条件满足可发动突出。同时, 阶段的时效差异性也体现了灾害在准备阶段可预先监测。如上文分析, 同理得出表征煤体抗压强度越低的应力加卸载模式, 其引发煤体裂纹发育速率相应率先达到峰值。表明煤体即将产生宏观破断面, 诱发失稳破坏。然而, 在应力路径④下, 随应力加载速率增加, 裂纹发育速率与煤体强度无明显关系, 与中间主应力加载速率呈显著正相关。

3.2 裂纹动态演化规律

图 12 为采动煤体不同损伤阶段裂纹玫瑰云图, 云图法向坐标为(0,0,1)。由图 12a 可知, 应力路径

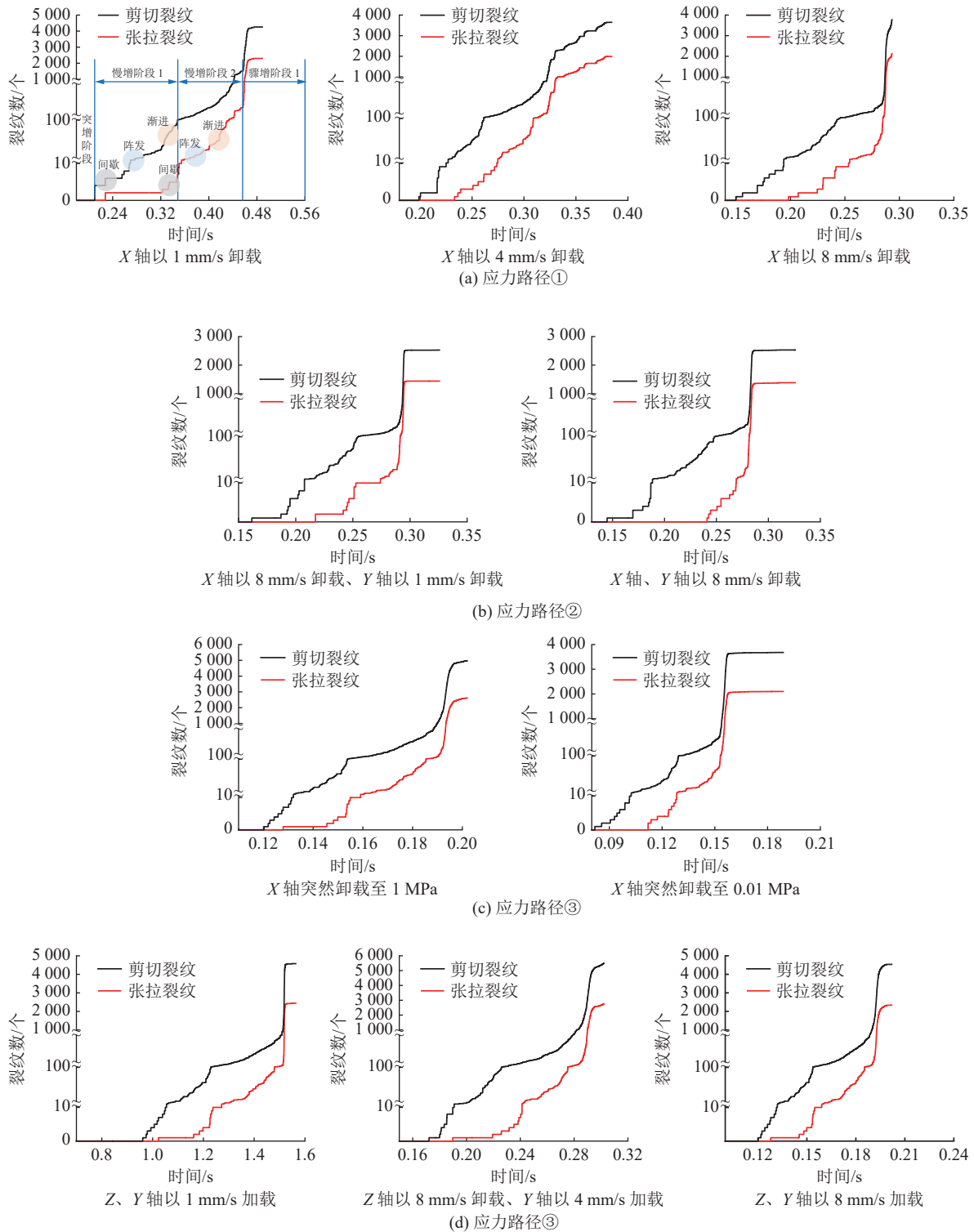


图 10 不同应力加载卸载模式下煤体裂纹发育量分布

Fig.10 Distribution of crack generation under different stress loading or unloading modes

①下,随最小主应力卸载速率增加,煤体裂纹扩展方向较为集中。裂纹扩展过程呈现由沿中间主应力方向逐步向最小主应力方向扩展。图 12b 表明随中间主应力卸载速率增加,煤体裂纹扩展方向较为分散,沿中间主应力方向与最小主应力方向同步扩展。从图 12c 可看出,针对应力路径③,煤体裂纹主要由沿

中间主应力方向逐步向最小主应力方向扩展。最小主应力残余应力值的变化对裂纹扩展方向影响不大。图 12d 表明不同中间主应力加载速率下,煤体裂纹主要由沿中间主应力方向逐步向最小主应力方向扩展。最大主应力和中间主应力加载速率不同时,裂纹扩展方向相对分散。同时,结合图 4—图 7 采动煤

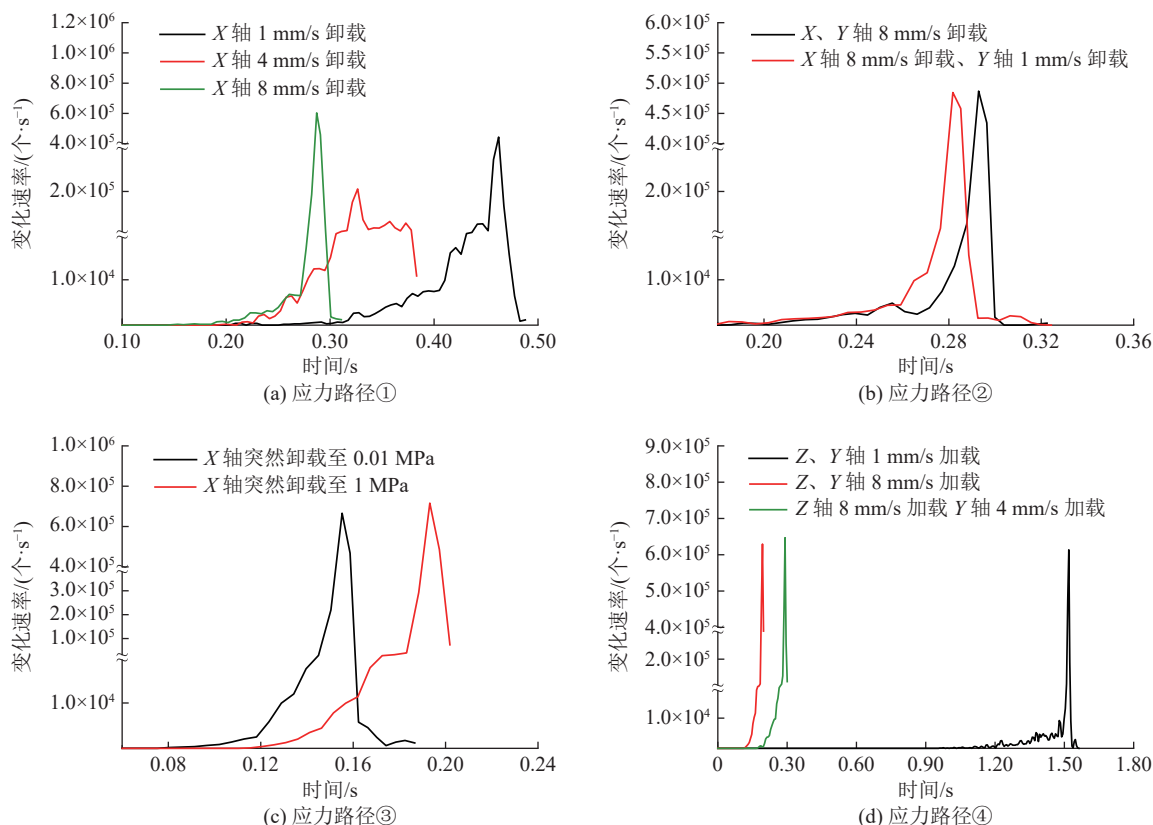


图 11 不同应力路径下煤体裂纹发育变化速率

Fig.11 Crack development rate of coals under different stress paths

体损伤失稳特征分析,可得出应力路径①和②下的采动煤体主要发生单斜面和共轭面剪切破坏。观察图 12 可知,煤体损伤失稳后裂纹分布形态较为分散。而应力路径③和④下的采动煤体主要呈现近似平行于中间主应力方向的破断面,煤体损伤失稳后裂纹分布形态分散程度弱。

4 基于采动下地应力诱使煤体初始破坏规律突出防治技术展望

4.1 突出煤体扰动方式

本文基于采掘工作面发生的典型突出灾害类型,构建了采动煤体损伤失稳过程中不同应力载荷路径。不同载荷路径下煤体破坏强度对比如图 13 所示。由图可知,采掘工作面煤体破坏强度和力学加卸载路径密切相关。针对四种应力路径,应力路径②下煤体抗压强度最低。然而据 2.2 节分析,煤体失稳破坏的时效性表明应力路径③下煤体最先发生失稳破坏。这表明承受荷载下的煤体,其抗压强度并不能决定是否容易发生突出,关键在于应力载荷路径。因此,煤体力学强度被视为影响突出发生的一主控因素,采动煤体能否引发突出,或引发瞬时还是延期突出,关键在于应力加卸载路径。因此,文献 [25] 提

出基于不同作业类型,突出灾害诱发过程应具分类研究构想与此相呼应。基于四种应力路径表征的突出灾害类型,也表明了突出更易发生在采掘工作面前方,尤其正处于采掘扰动作业过程。同时,也表明应力路径③下载荷突然卸载的采掘工作面最危险,因此,尤其高瓦斯压力赋存煤层,更应避免使用炮掘等诱使应力载荷突变的作业行为。对于综掘过程,应力路径②下采掘工作面最危险。因此,实际采掘过程应避免如双煤巷同步交叉掘进,或两煤巷、煤与岩巷贯通前必须在一定范围内加固煤体或提高消除瓦斯赋存程度。这为《防治煤与瓦斯突出细则》第二十七条中第六款对突出煤层中巷道贯通作业规定提供了直观的解释依据。

4.2 突出预测技术

突出预测作为突出防治关键的一步,预测指标选择及临界值判定准确性及有效性决定突出预测结果的可靠性与可信性。目前,预测指标临界值的判定,一般是基于现场测定数据和瓦斯动力现象,根据数理统计方法大致划定一个数值。只需确保该临界值回判结果达到一定准确度即可,或者根据已有预测指标临界值去反判推算其他预测指标临界值^[26-27]。然而,依据数理统计方法判定预测指标临界值虽具

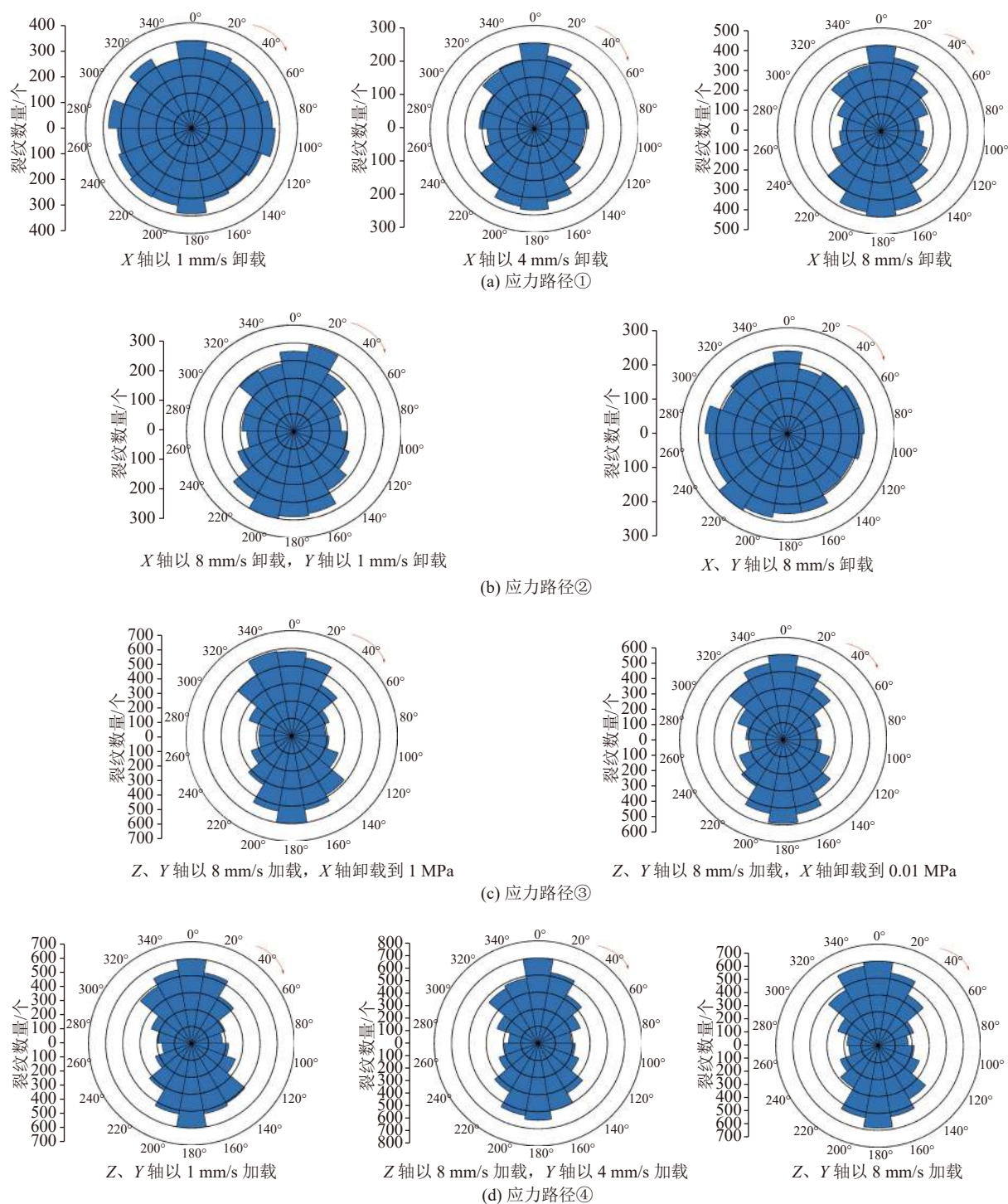


图 12 不同应力路径下煤体裂纹玫瑰云图

Fig.12 Rose cloud diagram of cracks in coals under different stress paths

有较高准确性,但它依赖于测定数据样本的多寡,易产生误判,导致“低指标突出”事故发生。因此,预测指标临界值的准确判定依然存在巨大挑战。基于实验室再现实际煤巷掘进工作面突出预测指标测定过程仍缺乏研究,这是预测指标临界值判定缺乏准确性的关键原因。开展实验室再现突出预测工作,关键在于工作面掘进模型的建立。文献[28]中提到构

建突出预测模型时,应能表征工作面煤体最危险状态。若在此模型下煤体不会发生突出,则在实际采掘过程中更不会发生突出。基于前文分析可知,在同等瓦斯压力水平下,当最小主应力突然卸载时,煤体出现失稳时刻早,最易引发突出。文献[28]中构建的突出预测模型及平台即符合此工况。然而当中间主应力和最小主应力均处卸载过程,煤体因破坏

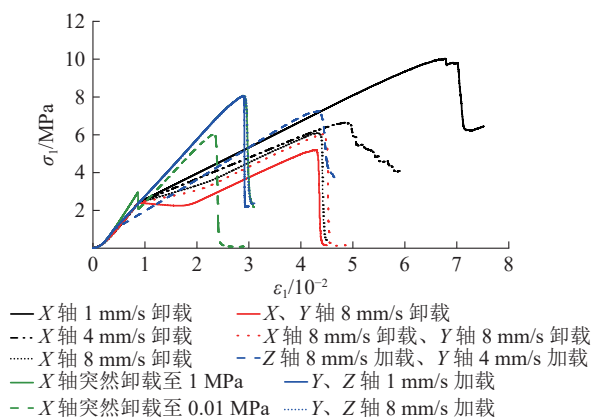


图 13 不同应力加载卸载模式下最大主应力-应变曲线
Fig.13 Maximum principal stress-strain curve under different stress loading or unloading modes

强度低,其一旦失稳,相应破坏程度高,由此赋存状态危险程度最高。因此,本文提出采用最小主应力突然卸载、中间主应力渐进卸载的力学模式来模拟采掘工作面实际突出预测指标测定过程。该模式可称为“采掘工作面突出预测理想采动模式”。煤体初始破坏仅是突出发生的必要条件,而突出危险程度在一定意义上由瓦斯压力水平决定。因此,同等采掘应力条件下,突出预测前煤体中瓦斯无泄露,煤体所具突出危险性水平最高。文献[28]中采用钻头对软煤体的突然钻进来实现此工况。而突然破煤即体现最小主应力突然卸载力学行为,因此,实际构建突出预测指标测定模式时,可采取此钻进过程实现最小主应力与瓦斯水平双重理想状态。而中间主应力渐进卸载则需要应力加载卸载设备予以调控。

卸除高荷载采动应力、消除高赋存瓦斯压力是治灾的主要手段。基于不同采动应力行为,应能体现灾害防治分源、分强度及分时空精准布控,正如《防治煤与瓦斯突出细则》修订了煤层突出鉴定指标临界值,实现突出鉴定分源而定理念。因此,针对不同应力路径,因煤体破坏强度差别较大,实际采掘过程应将采动应力场区块化。不同区块应力场应体现差异化的瓦斯治理措施,即满足《防治煤与瓦斯突出细则》相关规定的同时,如应力路径③和②下区域煤体应强化瓦斯抽采效果,进一步降低瓦斯赋存水平。此外,也可通过调整作业进度和顺序管控煤体应力载荷量与方向分布。

5 结 论

1)采动煤体在应力卸载方向发生显著扩容现象,初始损伤发生在煤体端部或中部。最小主应力和中间主应力渐进卸载速率增加,煤体破坏类型呈现由

单斜面剪切破坏转变为共轭剪切面破坏。最小主应力突然卸载或残余应力状态下,煤体呈现宏观破断面与中间主应力方向平行,而中间主应力加载速率变化可引发煤体出现共轭剪切面破坏。

2)煤体声发射应力峰值出现时刻滞后于最大主应力峰值出现时刻。不同应力路径下声发射 AE 事件计数峰值出现时刻之间的关系为:最小主应力突然卸载<最小主应力和中间主应力均渐进卸载<最小主应力渐进卸载<最小主应力保持一定残余应力。这相应表征了不同应力路径下煤体破坏过程的快慢。最小主应力与中间主应力卸载速率增加、最小主应力残余应力减小、中间主应力加载速率降低,均会诱使煤体破坏强度降低。

3)采动下煤体破坏过程随剪切和张拉裂纹先后出现,呈现张剪破坏。裂纹整体发育趋势呈现间歇性、渐进性和阵发性复合特征。裂纹发育整体过程分为 4 个阶段:1 个突增阶段、2 个慢增阶段、1 个骤增阶段。裂纹发育速率演化过程分为缓慢增加阶段、快速增加阶段、快速衰减阶段。采动煤体裂纹演化行为可表征为初期新裂纹出现(间歇性-突增阶段)、裂纹扩展(渐进性-慢增阶段)以及贯通并扩展(阵发性-慢增阶段)、整体撕裂煤体过程(骤增阶段)。

4)采掘工作面煤体破坏强度和力学加载卸载路径密切相关,煤体力学强度被视为影响突出发生的一主控因素,地应力诱发采动煤体初始破坏的难易程度关键在于应力加载卸载路径。最小主应力突然卸载路径,或当中间主应力和最小主应力均处卸载路径,煤体赋存状态危险程度最高。基于此力学行为,提出“采掘工作面突出预测理想采动模式”。

参考文献(References):

- [1] 袁 亮. 煤矿典型动力灾害风险判识及监控预警技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1557-1566.
YUAN Liang. Research progress of risk identification, assessment, monitoring and early warning technologies of typical dynamic hazards in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1557-1566.
- [2] 齐庆新, 潘一山, 李海涛, 等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1567-1584.
QIN Qingxin, PAN Yishan, LI Haitao, et al. Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1567-1584.
- [3] 谢广祥, 胡祖祥, 王 磊. 工作面煤层瓦斯压力与采动应力的耦合效应[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1089-1093.
XIE Guangxiang, HU Zuxiang, WANG Lei. The coupling effect of the coal seam gas pressure and mining stress in working face[J].

- Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1089–1093.
- [4] 胡祖祥, 谢广祥. 煤层瓦斯压力受控于采动应力的“异步-同步”特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(6): 1037–1042.
HU Zuxiang, XIE Guangxiang. A research of asynchronous and synchronous characteristics of coal seam gas pressure controlled by the mining-induced stress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(6): 1037–1042.
- [5] 尹光志, 李星, 鲁俊, 等. 深部开采动静载荷作用下复合动力灾害致灾机理研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2316–2326.
YIN Guangzhi, LI Xing, LU Jun, *et al.* Disaster-causing mechanism of compound dynamic disaster in deep mining under static and dynamic load conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2316–2326.
- [6] 周宏伟, 荣腾龙, 牟瑞勇, 等. 采动应力下煤体渗透率模型构建及研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 221–235.
ZHOU Hongwei, RONG Tenglong, MOU Ruiyong, *et al.* Development in modeling approaches to mining-induced permeability of coals[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 221–235.
- [7] 王刚, 刘志远, 王鹏飞, 等. 考虑瓦斯吸附作用的真三轴煤体剪切渗流特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(5): 1061–1070.
WANG Gang, LIU Zhiyuan, WANG Pengfei, *et al.* Experimental study on shear seepage characteristics of true triaxial coal body under the consideration of gas adsorption[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(5): 1061–1070.
- [8] 舒龙勇, 朱南南, 陈结, 等. 煤与瓦斯突出危险精准辨识理论与方法与技术探索[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1614–1625.
SHU Longyong, ZHU Nannan, CHEN Jie, *et al.* Theoretical method and technology of precision identification for coal and gas outburst hazard[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1614–1625.
- [9] 曹代勇, 占文锋, 李焕同, 等. 中国煤矿动力地质灾害的构造背景与风险区带划分[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2376–2388.
CAO Daiyong, ZHAN Wenfeng, LI Huantong, *et al.* Tectonic setting and risk zoning of dynamic geological disasters in coal mines in China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2376–2388.
- [10] 袁亮, 姜耀东, 何学秋, 等. 煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 306–318.
YUAN Liang, JIANG Yaodong, HE Xueqiu, *et al.* Research progress of precise risk accurate identification and monitoring early warning on typical dynamic disasters in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 306–318.
- [11] 程远平, 雷杨. 构造煤和煤与瓦斯突出关系的研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 180–198.
CHEN Yuanping, LEI Yang. Causality between tectonic coal and coal and gas outbursts[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 180–198.
- [12] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1–15.
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, *et al.* Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1–15.
- [13] 尹光志, 刘玉冰, 李铭辉, 等. 真三轴加卸载应力路径对原煤力学特性及渗透率影响[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 131–136.
YIN Guangzhi, LIU Yubing, LI Minghui, *et al.* Influence of true triaxial loading-unloading stress paths on mechanical property and permeability of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 131–136.
- [14] 鲁俊, 尹光志, 高恒, 等. 真三轴加载条件下含瓦斯煤体复合动力灾害及钻孔卸压试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1812–1823.
LU Jun, YIN Guangzhi, GAO Heng, *et al.* Experimental study on compound dynamic disaster and drilling pressure relief of gas-bearing coal under true triaxial loading[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1812–1823.
- [15] 赵延林, 曹平, 万文, 等. 随机卸荷岩体裂纹流变断裂模型与数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(12): 4647–4656.
ZHAO Yanlin, CAO Ping, WAN Wen, *et al.* Model and numerical simulation of rheological fracture of random unloading rock mass cracks[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(12): 4647–4656.
- [16] 左建平, 陈岩. 卸载条件下煤岩组合体的裂纹张开效应研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3142–3148.
ZUO Jianping, CHEN Yan. Investigation on crack recovery effect of coal-rock combined body under the influence of unloading[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 3142–3148.
- [17] WANG Chaojie, YANG Shengqiang, LI Xiaowei, *et al.* Study on the failure characteristics of concrete specimen under confining pressure[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44(5): 4119–4129.
- [18] 许江, 杨孝波, 周斌, 等. 突出过程中煤层瓦斯压力与温度演化规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(6): 1177–1187.
XU Jiang, YANG Xiaobo, ZHOU Bin, *et al.* Study of evolution law of gas pressure and temperature in coal seam during outburst[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(6): 1177–1187.
- [19] 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.
- [20] 李清川, 王汉鹏, 袁亮, 等. 吸附气体量对煤岩力学特性损伤劣化的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(5): 955–965.
LI Qingchun, WANG Hanpeng, YUAN Liang, *et al.* Experimental study of damage and degradation of coal by adsorbed gas amount[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(5): 955–965.
- [21] 张遵国, 齐庆杰, 曹树刚, 等. 煤层吸附He, CH₄和CO₂过程中的变形特性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2484–2490.
ZHANG Zuiguo, QI Qingjie, CAO Shuguang, *et al.* Characterist-

- ics of coal deformation during its adsorption of He, CH₄ and CO₂[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(9): 2484–2490.
- [22] 刘力源, 朱万成, 魏晨慧, 等. 气体吸附诱发煤强度劣化的力学模型与数值分析[J]. *岩土力学*, 2018, 39(4): 1500–1508.
- LIU Liyuan, ZHU Wancheng, WEI Chenhui, *et al.* Mechanical model and numerical analysis of mechanical property alterations of coal induced by gas adsorption[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(4): 1500–1508.
- [23] 杨威. 煤层采场力学行为演化特征及瓦斯治理技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013: 10–36.
- YANG Wei. Mechanical behavior evolution of mining stope and gas control Technology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013: 10–36.
- [24] 余大洋, 唐一博, 王俊峰, 等. 用于煤与瓦斯突出模拟的型煤胶结材料配比实验研究[J]. *煤矿安全*, 2016, 47(4): 11–14, 19.
- YU Dayang, TANG Yibo, WANG Junfeng, *et al.* Experimental study on cementing materials ratio of briquette coal using in coal and gas simulation[J]. *Safety in coal mines*, 2016, 47(4): 11–14, 19.
- [25] 高魁, 乔国栋, 刘泽功, 等. 煤与瓦斯突出机理分类研究构想及其应用探讨[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(5): 1043–1051.
- GAO Kui, QIAO Guoliang, LIU Zegong, *et al.* On classification conception of coal and gas outburst mechanism and its application[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(5): 1043–1051.
- [26] 崔鸿伟. 煤巷掘进工作面突出预测指标及其临界值研究[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(5): 808–811.
- CUI Hongwei. Research on the prediction indexes of coal roadway heading face outburst and its critical value[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(5): 808–811.
- [27] 杨丁丁. 煤巷突出危险性预测方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018: 4–30.
- YANG DingDing. Study on the prediction methods of outburst danger on coal roadway[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018: 4–30.
- [28] 王超杰. 煤巷工作面突出危险性预测模型构建及辨识体系研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019: 16–42.
- WANG Chaojie. Study on establishment of prediction model and identification system for outburst risk of coal roadway working face[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019: 16–42.