

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

崔峰^{1,2,3}, 贾冲^{1,2}, 来兴平^{1,2}, 陈建强⁴, 张随林^{1,2}, 何仕凤^{1,2}

(1.西安科技大学能源学院,陕西西安 710054;2.西安科技大学教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室,陕西西安 710054;3.自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室,陕西西安 710021;4.国家能源集团新疆能源有限责任公司,新疆乌鲁木齐 830002)

摘要:工作面推进速度过快易诱发冲击地压等动力灾害,探讨合理的工作面推进速度已成为冲击地压矿井安全高效开采亟待解决的关键。采用数值模拟、岩石力学试验和现场微震监测等方法,通过研究急倾斜巨厚煤层推进速度影响下工作面前方煤体经历的采动应力路径,分析推进速度采动应力路径下的煤样力学行为特征。完成了采动应力路径下煤样加卸载响应比的变化规律研究与急倾斜巨厚煤层工作面推进速度的合理确定,开展了现场工程实践验证。研究表明:急倾斜巨厚煤层工作面推进速度增加使得采动应力峰值增大,同时其采动应力路径的循环加卸载幅度增加,循环次数减小,主要影响区域范围增加,而作用时间减小。不同推进速度应力路径下的煤样强度呈非线性递增趋势,且其递增幅度逐渐增加,煤样破坏程度、声发射累计计数及能量均随应力路径所处推进速度的增加而增大。类比冲击矿压评价指标得到6.4 m/d应力路径下的煤样可视为冲击煤样,同时引入加卸载响应比,提出了基于采动加卸载响应比的冲击地压矿井工作面推进速度合理确定方法,形成了不同推进速度采动应力路径影响的加卸载响应比评价指标,确定了满足+425 m水平工作面的安全高效开采推进速度。现场微震实测结果验证了基于采动加卸载响应比确定工作面推进速度的有效性。

关键词:推进速度;急倾斜巨厚煤层;冲击地压;加卸载效应;响应比

中图分类号:TD324 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2022)02-0745-17

Study on advancing rate of steeply inclined extra-thick coal seam in rock burst mine based on loading-unloading response ratio

CUI Feng^{1,2,3}, JIA Chong^{1,2}, LAI Xingping^{1,2}, CHEN Jianqiang⁴, ZHANG Suilin^{1,2}, HE Shifeng^{1,2}

(1.College of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2.Key Laboratory of Western Mines and Hazard Prevention of China Ministry of Education, Xi'an 710054, China; 3.Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710021, China; 4.Xinjiang Energy Co., Ltd., State Energy Group, Urumqi 830002, China)

Abstract: It is easy for over high advancing rate of working face to induce dynamic disasters such as rock burst. To explore the reasonable advancing rate of working face has become the key to a safe and efficient mining of rock burst mine. Using the methods of numerical simulation, rock mechanics tests and field micro-seismic monitoring, by studying the mining stress path experienced by the coal in front of the working face under the influence of the advan-

收稿日期:2021-11-15 修回日期:2022-01-12 责任编辑:郭晓炜 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.XR21.1759

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874231);陕西省创新能力支撑计划资助项目(2020KJXX-006);陕西省自然科学基金基础研究计划企业联合基金资助项目(2019JLZ-04)

作者简介:崔峰(1986—),男,河南新乡人,教授。E-mail:cuifeng9418@163.com

通讯作者:贾冲(1996—),男,山西运城人,博士研究生。E-mail:21103077014@stu.xust.edu.cn

引用格式: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.



移动阅读

ancing rate of the steeply inclined thick coal seam, the mechanical behavior characteristics of coal samples under the advancing rate mining stress path were analyzed. The study on the change law of loading-unloading response ratio of coal samples under mining stress path and the reasonable determination of advancing rate of steeply inclined super thick coal seam were completed and verified by on-site engineering practice. The results show that the peak value of mining stress increases with the increase of the advancing rate of the working face in steeply inclined thick coal seam. At the same time, with the increase of advancing rate, the cyclic loading-unloading amplitude of mining stress path increases, the cycle times decrease, the main influence area increases, and the action time decreases. The strength of coal samples under different advancing rates stress paths shows a nonlinear increasing trend, and its increasing range increases gradually. The failure degree, cumulative count of acoustic emission and energy of coal samples all increase with the advancing rate of stress paths. The coal sample under the stress path of 6.4 m/d obtained by analogy with the evaluation index of rock burst can be regarded as rock burst. At the same time, the loading-unloading response ratio is introduced, and a reasonable method for determining the advancing rate of rock burst mine face based on the mining loading-unloading response ratio is put forward. The evaluation index of loading-unloading response ratio influenced by different advancing rates mining stress paths is formed, and the safe and efficient mining advancing rate of +425 m level working face is determined. The measured results of micro-seismic field verify the effectiveness of determining the advancing rate of working face based on the response ratio of mining loading-unloading.

Key words: advance speed; steeply inclined extra-thick coal seam; rock burst; loading-unloading effect; response ratio

煤炭资源开采使得工作面前方煤岩经历了从原岩应力、轴向应力升高而围压递减(卸载)到破坏卸荷的采动力学过程,受加载、卸载的扰动影响,煤岩力学行为与灾变过程极其复杂^[1-4]。随着煤炭资源开采深度的增加,矿井冲击地压等动力灾害日益加剧,威胁着煤矿安全、高效开采^[5],因而亟待展开推进速度采动影响下的加卸载效应分析。

现阶段,部分学者将我国综放开采单次采出最大厚度达 20 m 的煤层称为巨厚煤层^[6-7]。急倾斜煤厚为 20 m 以上的矿井充分利用其煤层易垮落、顶板稳固性较好的特点,使得水平分段放顶煤采煤法得到广泛应用^[8-10]。伴随着急倾斜煤层开采深度与强度不断增大,工作面采动影响产生加卸载作用的破坏趋势与冲击效应日趋严重。

近年来,随着冲击地压扰动响应失稳理论^[11]、冲击地压启动理论^[12]等的提出,煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术等的应用^[13],使冲击地压机理及其防治工作逐步向前推进。然而冲击地压影响因素众多,以往推进速度作为众多开采技术客观影响因素之一,对冲击地压的影响易被弱化,近些年来冲击地压研究工作趋于精细,推进速度引起采动加卸载的冲击效应逐渐受到重视。截至 2021 年 1 月,全国 138 处冲击地压矿井中 47 处需核减产能 1 316 万 t/a,显示出降低工作面推进速度已成为控制采动效应的一种重要手段。

工作面过快推进虽在一定时间提高了生产效益,但其防治成本明显增加,复杂地段易诱发冲击地压等

动力灾害问题,使矿井面临减产甚至停止作业。在工作面推进速度的综合分析方面,王家臣等^[14]发现工作面推进速度越快基本顶断裂伴生的初始动能越大,对支架造成的动载冲击明显。冯龙飞等^[15]由微震监测得到坚硬顶板大采高工作面临界回采速度为 4 m/d。刘金海等^[16]由工作面 1.6, 4.0, 6.4 m/d 推进速度得到推进越快其微震响应越明显。赵同彬等^[17]以东滩煤矿分析得到回采速度 4.0 m/d 左右的微震活动有利于顶板弹性能缓慢释放。马海峰等^[18]通过 1.2, 2.0, 3.0 MPa/min 的轴压加载速率代表 2, 4, 6 m/d 推进速度展开力学行为研究,得到不同推进速度条件下煤体破坏时的峰值应力随轴压加载速率的增加基本呈线性增加趋势。崔峰等^[19-20]由微震监测确定了宽沟煤矿 B4-1 煤层最佳推进速度为 4 m/d,得到了上行开采覆岩结构稳定的煤柱剩余尺寸。谭云亮等^[21]通过动能计算公式推演,得到开采进尺越大其产生的动能越高。

采动影响下的循环加卸载试验,有助于深化对煤层变形及其损伤特征的研究,其中王振等^[22]分析了不同应力分布对煤层动力灾害的控制作用。杨继华等^[23]以输入的地震加速度作为加、卸载,以洞室围岩的加速度作为响应,确定了洞室群的加、卸载响应区段。夏冬等^[24]探讨了岩石力学特性、声发射特征、加卸载响应比的变化情况。张浪平等^[25]建立且分析了损伤变量与加卸载响应比之间的联系。

诸多学者的研究成果为工作面不同推进速度采动影响下的煤样力学行为研究奠定了基础,但对采动

应力路径下的煤样力学特性研究较少,且鲜有应用加卸载响应比来进行冲击地压矿井工作面推进速度的研究,鉴于此,笔者以国能乌东煤矿为背景,采用数值模拟与煤样力学试验方法,进行急倾斜巨厚煤层推进速度影响的采动应力路径分析,并由此路径为煤样加卸载循环试验方案设计提供依据,引入加卸载响应比对采动影响下的冲击煤样类型进行表征,旨在为工作面的安全高效开采提供科学指导。

1 急倾斜巨厚煤岩体赋存特征

乌东煤矿主采的南区急倾斜巨厚煤层,力学结构和煤岩体赋存特征如图1所示,矿井现主采B1+2, B3+6煤层的平均倾角均为 87° 平均厚度分别为28.00,40.51 m,矿井采用水平分段综放开采的工作面沿倾向布置、沿走向推进,其煤层厚度即为工作面的宽度。两层煤中间的岩柱自西向东逐渐变窄,厚度在50~110 m。乌东煤矿自2013年7月以来发生过多起冲击地压事故,而被确定为冲击地压矿井。矿井目前开采+425 m水平的B3+6煤层具有弱冲击倾向性,其结构简单,属稳定煤层。

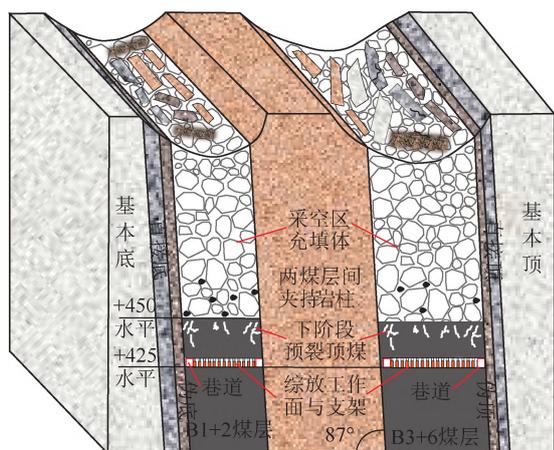


图1 急倾斜巨厚煤层力学结构和煤岩体赋存特征

Fig.1 Mechanical structure and mining state model of steeply inclined extra-thick coal seam

2 推进速度对采动应力路径影响的数值模拟

本次采用具有应力渐变特征的有限元FLAC3D数值计算模拟软件,通过调整单次开采下三维网格中多面体单元长度来拟合实际单次推进距离,进行工作面不同推进速度下的三维结构受力特性模拟与采动应力特征分析。根据乌东煤矿的南区地质资料与钻孔窥视的岩层柱状图,绘制出水平方向的乌东煤矿岩层结构示意如图2所示,除煤层外矿井岩性主要为灰质泥岩、细粒砂岩、粉砂岩、泥岩及炭质泥岩。

业内学者^[14-19]大多采用了4 m/d作为安全或中

等推进速度,因而本文暂采用4.0 m/d以下、4.0~6.0 m/d、6.0 m/d以上,将急倾斜巨厚煤层推进速度划分为低速、中速、高速3个区域范围。结合乌东煤矿南区0.8 m的单次截深,选取3.2,4.8,6.4 m/d作为低速、中速、高速推进速度,并据此展开急倾斜煤层不同推进速度下的采动应力路径研究。

2.1 不同推进速度模拟方案与模型构建

根据地层结构与工程背景,利用FLAC3D有限元数值模拟软件,构建出的三维数值分析模型如图3所示,模型外形尺寸(长×宽×高)为300 m×400 m×500 m。网格划分采用3.2,4.8,6.4 m/d推进速度下的最大公因子1.6 m,对推进速度方向即将y方向的块体进行划分,以此保证了同一模型便可进行方案设计下的3种推进速度的采动应力分析。

由于本次的数值计算模型模拟至地表,因而模型上表面未施加边界应力,初始条件设置的重力为0,重力加速度为 9.8 m/s^2 ,水平方向施加有初始梯度应力,除模型上表面未进行边界限定外,其余5个边界表面均设置允许的变形量为0.2 m,以此限制模型的侧向和底部位移。

表1 急倾斜煤岩体部分岩层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of some strata of steeply inclined coal and rock mass

序号	岩性	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa	抗压强 度/MPa
1	粉砂岩	27.68	3.83	1.30	31.20
2	细粒砂岩	24.45	4.61	1.35	38.20
3	粉砂岩	23.41	1.78	1.19	17.80
4	炭质泥岩	21.31	2.18	1.22	19.70
5	B1+2煤	12.53	1.73	1.69	16.60
6	灰质泥岩	21.20	1.23	1.15	18.40
7	粉砂岩	25.73	4.60	1.28	38.60
8	细粒砂岩	24.83	2.39	1.34	25.30
9	粉砂岩	26.73	4.42	1.30	37.90
10	炭质泥岩	21.23	2.25	1.19	18.76
11	B3+6煤	13.00	1.73	1.69	15.90
12	炭质泥岩	21.27	2.26	1.26	19.60
13	灰质泥岩	24.23	1.46	1.15	18.40

急倾斜煤岩体部分岩层的物理力学参数见表1,表1中的急倾斜煤岩体部分岩层与建模岩层一一对应,根据现场地质调查与岩石力学试验结果综合确定了煤岩力学参数,在FLAC数值模拟赋参时根据开采实践结果进行了适当折减。王金安等^[26]在研究综放工作面推进速度对围岩应力影响时,通过给定单次开

地界				序号	累计厚度/m	岩性	柱状	岩层厚度/m	地界				序号	累计厚度/m	岩性	柱状	岩层厚度/m
界	系	群	组						界	系	群	组					
中生界	侏罗系	西山沟群	西窑组	1	18.50	细粒砂岩	[Symbol]	18.50	中生界	侏罗系	西山沟群	西窑组	38	322.87	粉砂岩	[Symbol]	18.69
				2	28.19	B30+31煤	[Symbol]	9.69					39	327.56	炭质泥岩	[Symbol]	4.69
				3	30.32	细粒砂岩	[Symbol]	2.13					40	342.71	粉砂岩	[Symbol]	18.69
				4	44.95	B26+29煤	[Symbol]	14.63					41	344.83	灰质泥岩	[Symbol]	2.12
				5	51.60	细粒砂岩	[Symbol]	6.65					42	348.66	炭质泥岩	[Symbol]	3.83
				6	82.70	B21+25煤	[Symbol]	31.10					43	389.17	B3+6煤	[Symbol]	40.51
				7	98.98	粉砂岩	[Symbol]	16.28					44	395.52	炭质泥岩	[Symbol]	6.35
				8	109.37	B20煤	[Symbol]	10.39					45	404.17	粉砂岩	[Symbol]	8.65
				9	110.39	粉砂岩	[Symbol]	1.02					46	448.68	细粒砂岩	[Symbol]	44.51
				10	118.39	B19煤	[Symbol]	8.00									
				11	120.94	粉砂岩	[Symbol]	2.55					47	461.03	粉砂岩	[Symbol]	12.35
				12	126.26	B18煤	[Symbol]	5.32									
				13	131.57	粉砂岩	[Symbol]	5.31					48	467.53	灰质泥岩	[Symbol]	6.35
				14	139.12	B17煤	[Symbol]	7.55									
				15	141.68	粉砂岩	[Symbol]	2.56					49	495.53	B1+2煤	[Symbol]	28.00
				16	146.25	B16煤	[Symbol]	4.57									
				17	150.75	粉砂岩	[Symbol]	4.50					50	499.93	炭质泥岩	[Symbol]	4.40
				18	154.23	B15煤	[Symbol]	3.48									
				19	164.25	炭质泥岩	[Symbol]	10.02					51	508.93	粉砂岩	[Symbol]	9.00
				20	166.48	B14煤	[Symbol]	2.23									
				21	177.49	炭质泥岩	[Symbol]	11.01					52	533.76	细粒砂岩	[Symbol]	24.83
				22	183.18	B13煤	[Symbol]	5.69									
				23	199.60	炭质泥岩	[Symbol]	16.42					53	574.79	粉砂岩	[Symbol]	41.03
				24	206.04	B12煤	[Symbol]	6.44									
				25	222.44	粉砂岩	[Symbol]	16.40					54	608.46	细粒砂岩	[Symbol]	33.67
				26	225.23	B11煤	[Symbol]	2.79									
				27	237.43	炭质泥岩	[Symbol]	12.20									
				28	241.22	B10煤	[Symbol]	3.79									
				29	245.90	粉砂岩	[Symbol]	4.68									
				30	249.57	B9煤	[Symbol]	3.67									
				31	254.07	粉砂岩	[Symbol]	4.50									
				32	255.67	B8煤	[Symbol]	1.60									
				33	269.17	粉砂岩	[Symbol]	13.50									
				34	270.50	B7煤	[Symbol]	1.33									
				35	281.84	粉砂岩	[Symbol]	11.34									
				36	294.10	泥岩	[Symbol]	12.26									
				37	304.18	炭质泥岩	[Symbol]	10.08									

图 2 乌东煤矿煤岩层柱状结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of columnar structure of coal strata in Wudong Coal Mine

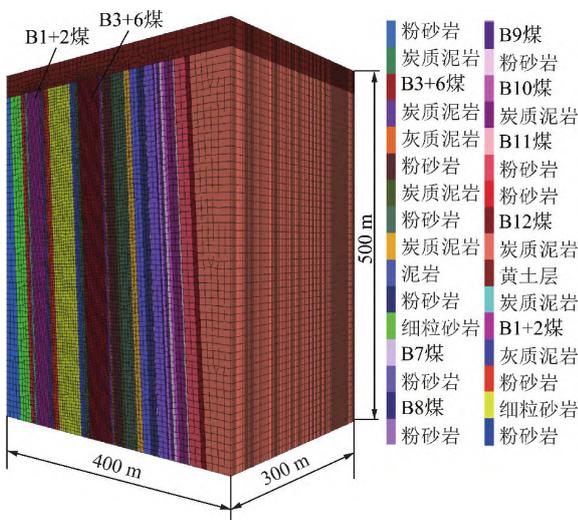


图 3 数值计算模型构建

Fig.3 Construction of numerical calculation model

采计算步时,并由单次开挖块体长度的不同,达到不同推进速度的模拟效果。本次数值模拟实验研究将其思路加以应用,由多次开采至平衡的平均步时作为给定的单次开采计算步时,并由单次开挖的块体长度分别为 3.2, 4.8, 6.4 m,尽可能的达到 3.2, 4.8, 6.4 m/d 的不同推进速度模拟效果。由不同推进速度过程中工作面前方、模型中部 150 m 处块体垂直应力的平均值作为综放工作面推进过程中的采动应力。

2.2 不同推进速度下的采动应力路径

在模型边界留设 32 m 进行开切眼,在工作面推进方向的 147.2 m 处布置应力测线,采用 3.2, 4.8, 6.4 m/d 的推进速度至 +425 m 水平开采结束。以 3.2 m/d 推进速度为例,结合开切眼前方 115.2 m 测线处第 6 个测点的采动应力变化,其+425 m 水平覆岩应力分布及其采动应力路径如图 4 所示。随着工

作面的持续推进其采动应力呈循环加卸载式的逐级递增趋势,且随着循环次数的增加,其加卸载幅度逐步增加,接近测点的最后一次推进时其应力卸载幅度较大,明显降低,但其应力大小依旧明显高于煤层开采前的初始应力。

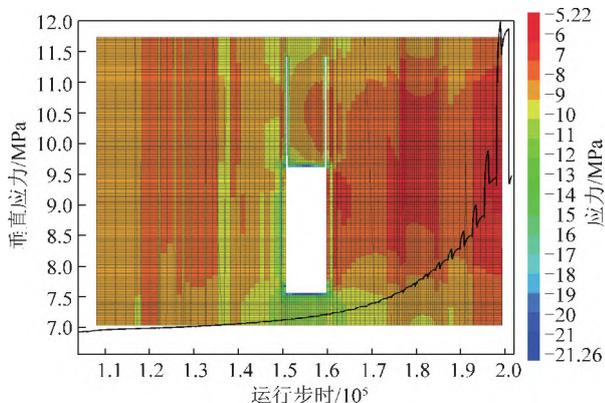


图 4 +425 m 水平覆岩应力分布及其采动应力路径

Fig.4 +425 m horizontal overlying rock stress distribution and mining stress distribution

由于工作面初始推进 57.6 m(3 种不同推进速度的公倍数)过程中,测线处的应力变化差异性较小,因而对工作面再次推进 57.6 m 过程中较为明显的应力变化加以监测,其工作面推进 57.6 m 的煤层与顶底板应力变化特征如图 5 所示,以此对 3 种推进速度方案下的采动应力路径进行分析。

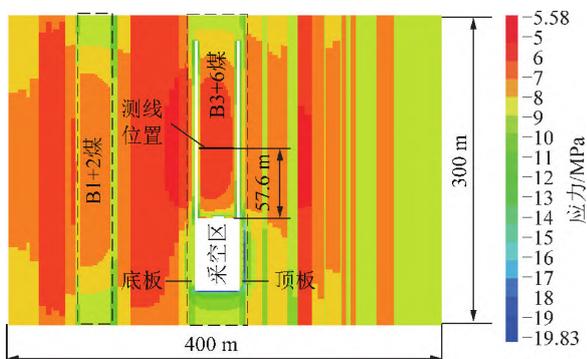
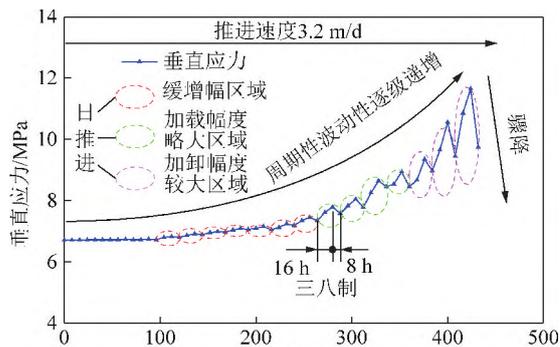


图 5 工作面推进 57.6 m 的煤层与顶底板应力变化特征

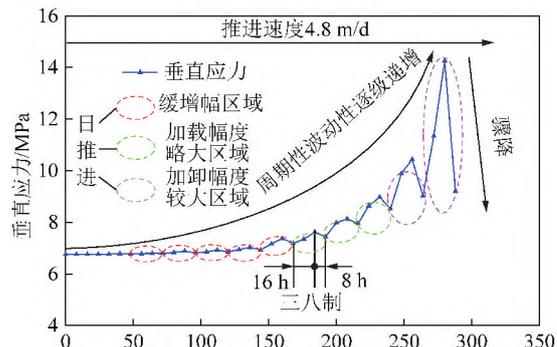
Fig.5 Stress variation characteristics of coal seam and roof and floor advancing 57.6 m in working face

根据数值模拟计算不用推进速度下的采动力学行为,得到工作面开采过程中的采动应力分布特征,由于初始推进过程中的采动应力相对平稳,因而结合推进速度、开采时间、垂直应力变化以及峰值位置,绘制出 57.6 m 范围内的不同推进速度下采动应力演化特征如图 6 所示,其低速、中速、高速分别以 3.2,4.8,6.4 m/d 推进 18,12,9 d。

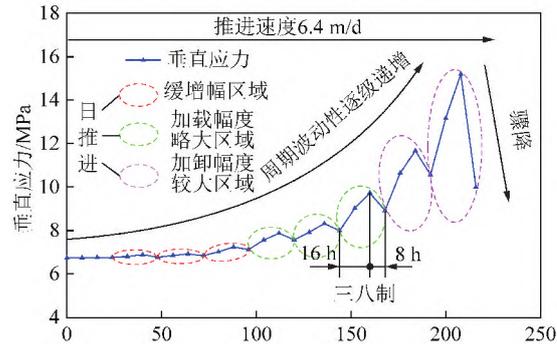
由图 6(a)可知,3.2 m/d 采动应力共经历 14 个明显的加卸载循环,应力明显区域范围为 44.8 m,其



(a) 3.2 m/d 推进速度



(b) 4.8 m/d 推进速度



(c) 6.4 m/d 推进速度

图 6 不同推进速度下采动应力演化特征

Fig.6 Evolution characteristics of mining stress under different advancing speeds

中 7 处加载幅度略大与加卸载幅度较大区域范围为 22.4 m。由图 6(b)可知,4.8 m/d 采动应力共经历 10 个明显的加卸载循环,采动应力明显区域范围为 48.0 m,其中 5 处为加载幅度略大区域与加卸载幅度较大区域,区域范围为 24.0 m。由图 6(c)可知,6.4 m/d 采动应力共经历 8 个明显的加卸载循环,采动应力明显区域范围为 51.2 m,其中 5 处为加载幅度略大区域与加卸载幅度较大区域,区域范围为 32.0 m。

由图 6 可知,3.2,4.8,6.4 m/d 推进下的采动应力分别经历 14,10,8 个明显加卸载循环,明显应力区域范围分别为 44.8,48.0,51.2 m。低速、中速、高速加卸载路径下的峰值应力分别为 11.66,14.26,

15.20 MPa,其中中速、高速推进下的应力峰值较低速分别增加 22.3%,30.4%。且随着推进速度增加其采动应力路径的循环加卸载幅度增加,次数减小,主要影响区域范围增加,作用时间减小。

3 采动应力路径下煤样力学行为分析

3.1 采动应力路径下煤样加卸试验方案

按照我国国标 GB/T 25217.2—2010《冲击地压测定、监测与防治方法》中“试验机以 0.5~1.0 MPa/s 的速率加载直至煤样破坏”的规定,先采用 0.50 MPa/s 的加载速率进行常规加载试验,因循环加卸载阶段的应力变化幅度较小,0.5 MPa/s 加载速率过快,因而再采用 0.05 MPa/s 加载速率进行煤样常规加载及其采动影响的循环加卸载试验。

煤样力学试验方案汇总见表 2,不同推进速度应力路径的加卸载参数见表 3,其中, σ_{\max} , σ_{\min} 分别为某一循环加卸载过程中加载应力的最大值与卸载应力的最小值。

表 2 煤样力学试验方案汇总

Table 2 Summary of mechanical test scheme of coal sample

编号	应力路径	加载速率/ (MPa·s ⁻¹)	所需试件 数量/个	累计试件 数量/个
CD	常规加载	0.50	3	
CD	常规加载	0.05	3	
DX	低速路径	0.05	3	15
ZX	中速路径	0.05	3	
GX	高速路径	0.05	3	

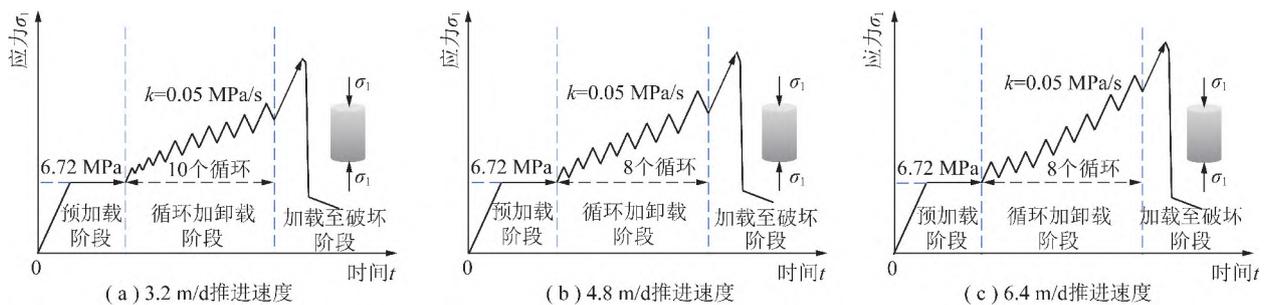


图 7 煤样力学试验循环加卸载应力路径

Fig.7 Cyclic loading-unloading stress path of coal sample mechanical test

3.2 采动应力路径下的煤样力学特性

通过 B3+6 煤层+425 m 水平现场取样后将其加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准圆柱体煤样,其煤样的制备严格控制其取样精度,2 个端面的最大平整度不超过 0.1 mm,端面垂直于试样轴线,煤岩高度误差不超过 0.3 mm。煤样制备后将其密封,以隔绝空气,防止风化,为满足试验所需充足的煤样每种试验方案共制备 4 个煤样,以供筛选。

表 3 不同推进速度应力路径的加卸载参数

Table 3 Loading-unloading parameters of stress paths at different propulsion speeds

序号	3.2 m/d		4.8 m/d		6.4 m/d	
	$\sigma_{\max}/$ MPa	$\sigma_{\min}/$ MPa	$\sigma_{\max}/$ MPa	$\sigma_{\min}/$ MPa	$\sigma_{\max}/$ MPa	$\sigma_{\min}/$ MPa
1	7.15	7.05	6.93	6.86	6.89	6.77
2	7.24	7.19	7.03	6.93	6.92	6.84
3	7.45	7.34	7.37	7.18	7.24	7.13
4	7.80	7.58	7.62	7.44	7.87	7.57
5	8.05	7.78	8.13	7.95	8.32	7.98
6	8.65	8.46	9.27	8.52	9.72	8.92
7	8.94	8.43	10.95	9.53	11.67	10.56
8	9.35	8.98	14.26	9.21	15.20	10.03
9	10.57	9.46	—	—	—	—
10	11.66	9.75	—	—	—	—

根据数值模拟计算的采动应力变化进行煤样的试验方案设计,因应力路径中初始若干次的加卸载幅度较小,为确保足够的加卸载时长,因而剔除加卸载幅度小于 0.05 MPa 的循环加卸载路径,并将循环加卸载前的阶段视为 0.05 MPa/s 等速加载。

加卸载路径如图 7 所示,不同推进速度下预加载阶段应力路径相同,3 种推进速度均以 0.05 MPa/s 加载速率持续加载至+425 m 水平采前煤层处原岩应力 6.72 MPa,而后等应力保载,以原岩应力状态持续 30 s,再进行循环加卸载阶段,至循环结束后加载至破坏阶段,采用 0.05 MPa/s 的加载速率直至煤样破坏。

压力试验机系统及其试验流程如图 8 所示,经由 RSM-SY5(T) 非金属声波检测设备的煤样波速测量后,剔除波速差异明显的煤样,选取剩余煤样进行既定方案下的力学试验研究。运用 WANCE 万能试验机的微机控制电液伺服压力试验机系统、MISTRAS 声发射测试装置的联合监测,由煤样应力-应变曲线、抗压强度、声发射能量与计数等关系变化,分析常规加载与不同推进

速度采动应力路径下的煤样力学特性与破坏特征。



图 8 压力试验机系统及其试验流程

Fig.8 Pressure testing machine system and its test flow

图 9 为煤样声发射传感器布设方式,通过环境噪音测试,将声发射系统阈值设为 40 dB,模拟滤波器下限为 1 kHz,模拟滤波器上限为 1 MHz,采样频率设为 1 MHz。试验采用共 4 个通道,每个通道对应独立的声发射探头和前置放大器,信号放大倍数为 40 倍,采集系统严格按照上述要求设置参数后连接实验设备^[27]。煤样受力过程中,使声发射监测与加载系统保持同步。

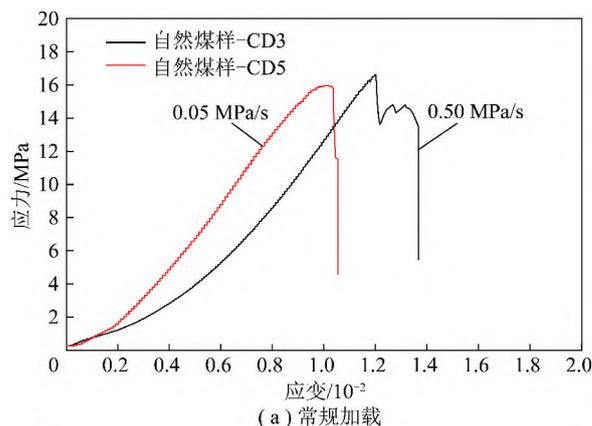


图 9 煤样声发射传感器布设方式

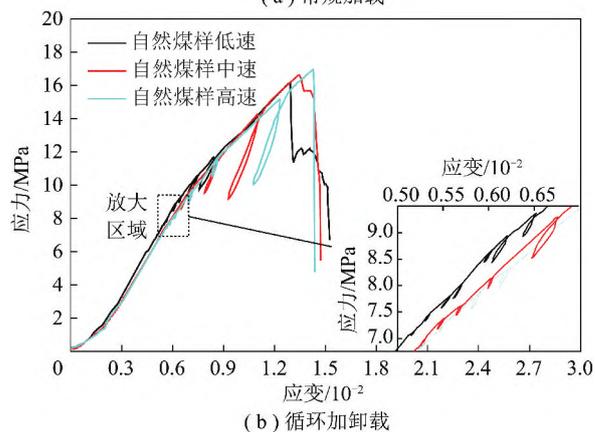
Fig.9 Layout method of coal sample acoustic emission sensor

根据试验结果,绘制出不同方案下的煤样应力-应变曲线,如图 10 所示。加载速率增加,煤样强度增大,0.05 MPa/s 加载速率下,不同路径循环加卸载的应力-应变曲线存在明显的滞回环效应,且随着应力路径所处推进速度的增加,滞回环效应越明显,同时高速推进应力路径下的煤样应力峰值普遍大于低速。

循环加卸载煤样力学特征参数见表 4。由图 10、表 4 可知,低速推进速度下的煤样强度低,发生破坏所释放的能量低,造成的破坏效应较弱;高速加载路径下,煤样破坏前的应变程度高,煤样内部结构调整,促使煤样的压密程度更高,其煤样抗压强度较高于低速应力路径。



(a) 常规加载



(b) 循环加卸载

图 10 煤样应力-应变曲线

Fig.10 Stress-strain curves of coal sample

表 4 循环加卸载煤样力学特征参数

Table 4 Mechanical characteristic parameters of coal samples under cyclic loading-unloading

模式	编号	时间/s	抗压强度/MPa	峰值应变/ 10^{-2}
低速循环加卸载	DX1	537.4	15.69	1.31
	DX2	548.0	16.22	1.30
	DX3	552.8	16.46	1.22
	均值	546.1	16.12	1.26
中速循环加卸载	ZX1	684.2	16.83	1.24
	ZX2	664.8	15.86	1.38
	ZX3	680.0	16.62	1.35
	均值	676.3	16.44	1.32
高速循环加卸载	GX1	707.8	17.83	1.31
	GX2	683.2	16.66	1.45
	GX3	690.4	16.96	1.43
	均值	693.8	17.15	1.40

不同循环加卸载应力路径下,煤样峰值强度与不同推进速度应力路径的关系如图 11 所示。3.2, 4.8, 6.4 m/d 应力路径下煤样的平均抗压强度分别为 16.12, 16.44, 17.15 MPa, 中速、高速路径下的强度比低速分别增加约 1.98%, 6.39%。煤样强度随

着应力路径所处推进速度的增加呈明显的非线性递增趋势,且其增幅逐渐增加,其非线性表达式为 $\sigma = 15.857 44 + 0.053 34e^{0.498 09v}$ 。

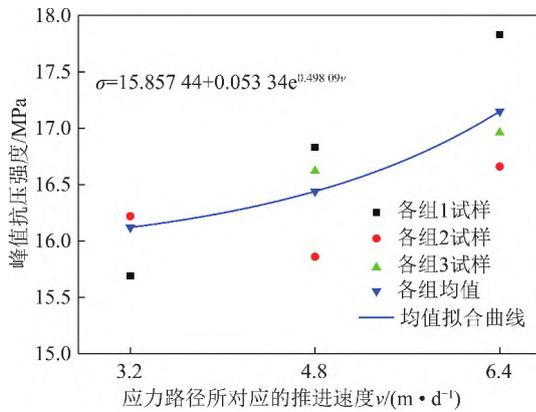


图 11 煤样峰值强度与不同推进速度应力路径的关系
Fig.11 Relationship between peak strength of coal samples and stress paths at different advancing speeds

3.3 采动应力路径下的煤样声发射特征

通过采动应力路径下煤样的声发射计数与能量变化,绘制了不同加载速率下煤样声发射事件及其能量分布特征如图 12 所示,其中图 12(a),(b)分别为 0.50,0.05 MPa/s 常规加载的煤样声发射事件及其能量分布特征。0.50 MPa/s 加载速率下,煤样在 25 s 附近的能量计数明显增加,并伴有大量能量产生,至煤样破坏后,声发射累计能量 3 867 mV·μs,计数 1 767 个,单位时间的声发射能量约为 103.1 mV·μs/s。0.05 MPa/s 常规加载速率下,煤样 0~250 s 内的声发射累计计数呈指数型增长趋势,250 s 后的声发射累计计数呈线性递增,至煤样破坏,煤样所受累计声发射计数为 3 126 个,累计能量 6 640 mV·μs,单位时间声发射能量约为 19.6 mV·μs/s。常规加载的不同加载速率下,煤样的加载速率越低,其声发射累计计数越多,加载速率越高其每秒产生的声发射能量越大。

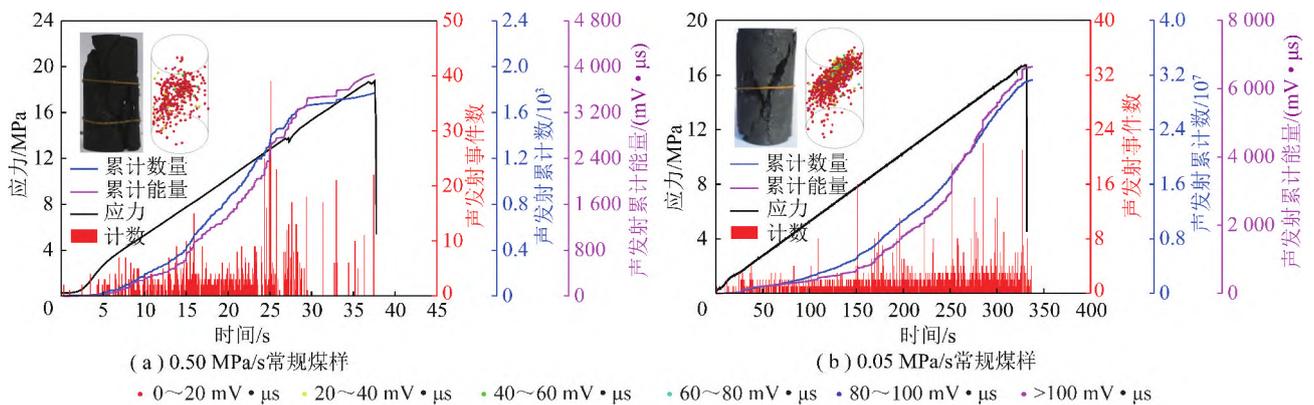


图 12 不同加载速率下煤样声发射事件及其能量分布特征

Fig.12 Acoustic emission events and energy distribution characteristics of coal samples under different loading rates

循环加卸载的煤样声发射能量分布云图如图 13 所示,低速推进应力路径下,煤样裂隙产生所伴随的声发射能量主要为 38~72 mm 高度内的煤样左前方,多处高能量区域集中分布在煤样中下部;中速推进应力路径下,煤样裂隙产生所伴随的声发射能量主要为 32~58 mm 高度内的煤样中部,高能量区域分布相对较为集中分布在煤样中部;高速推进应力路径下,煤样裂隙产生所伴随的声发射能量主要为 28~60 mm 高度内,高能量区域较为集中分布在煤样中部。

不同推进速度应力路径下,煤样声发射能量大小呈现出高速应力路径明显大于中速、大于低速的特征,且不同应力路径下的声发射高能量区域分布相对较为集中分布在煤样的中部及下部区域内。

不同采动应力路径下的煤样声发射能量分布及其破坏特征如图 14 所示。由图 14 左部的煤样应力-

事件-能量关系可知,煤样低速、中速、高速推进的不同路径循环加卸载阶段,能量与计数递增趋势均以最后两次循环阶段最为明显,其循环加卸载结束后声发射累计计数分别为 1 998,2 428,2 535 个,累计能量分别为 3 686,5 309,7 423 mV·μs。至煤样破坏,煤样所受累计声发射计数分别为 3 268,3 480,3 733 个,累计能量分别为 7 668,8 536,12 411 mV·μs。

不同应力路径下的煤样力学试验过程中,预加载阶段的声发射累计计数与能量均呈现为明显的线性增长趋势,循环加卸载阶段的声发射累计计数与能量均呈现为明显的阶梯型递增趋势,低速与中速路径下煤样加载至破坏阶段的声发射累计计数与能量均呈现为明显的指数型递增趋势,而高速路径下呈现为明显的线性递增趋势。高速应力路径下循环加卸载造成的损伤较大,其声发射计数与能量增幅在加载至破坏的末段出现计数与能量的大幅增加。

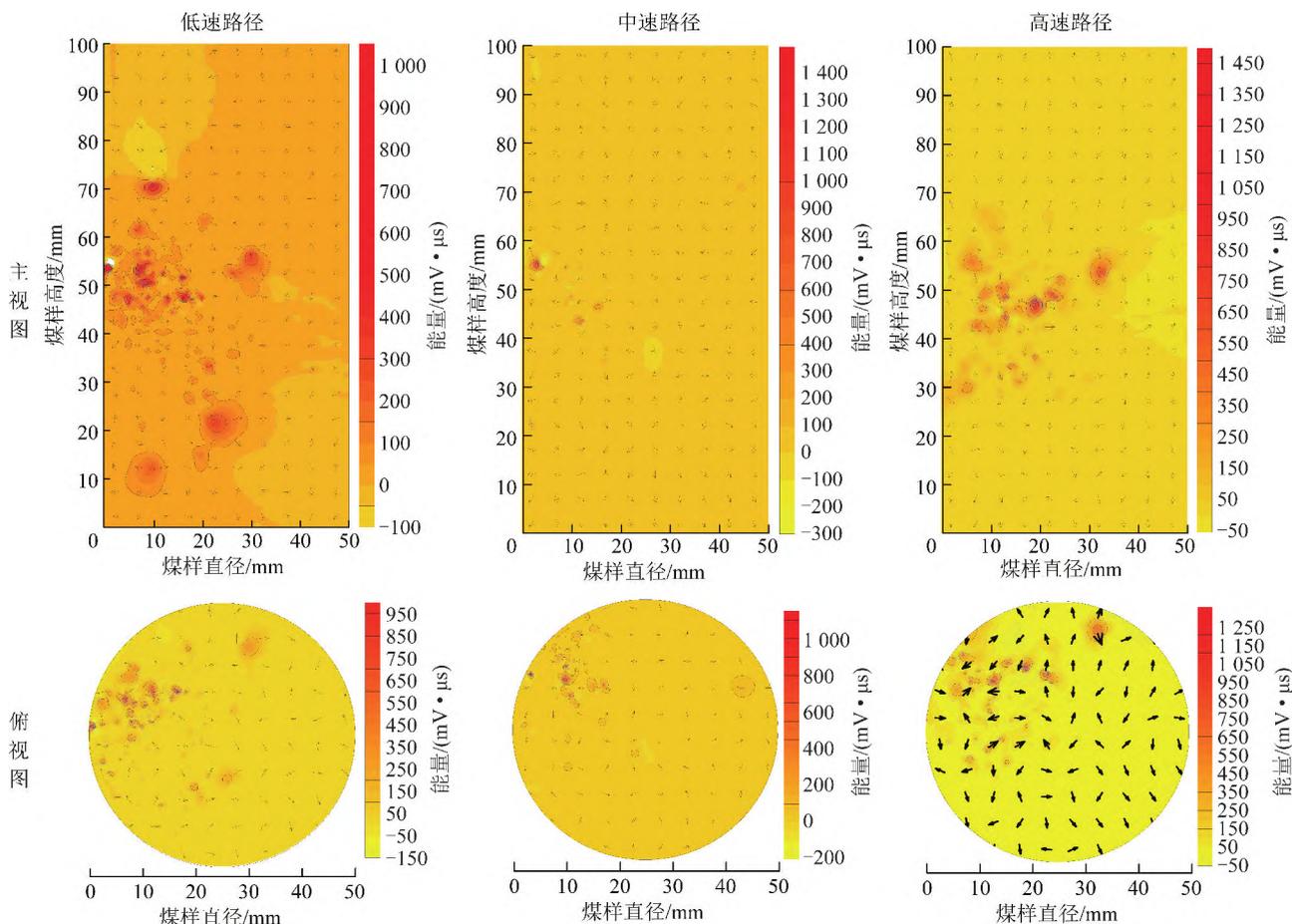


图13 循环加卸载的煤样声发射能量分布云图

Fig.13 Cloud chart of acoustic emission energy distribution of coal samples under cyclic loading-unloading

主裂隙发育使得声发射能量事件分布较广,其中低速应力路径下的煤样呈现为明显的剪切破坏形式,煤样变形破坏的起裂、终止位置以及破坏剪切面均与声发射定位保持高度一致;中速应力路径下的破坏煤样主要为5个较大破碎块体;高速应力路径下的破坏煤样为2处明显的较大破碎块体与较多小的破碎块体,其破碎程度较中速应力路径更高。低速、中速、高速不同应力路径下,煤样的破坏程度呈现逐步增加的趋势。

4 煤样冲击类型及其加卸载响应规律

通过类比煤矿冲击矿压的评价方法,将不同速度应力路径下的煤样冲击类型进行划分,并引入加卸载响应比理论,形成采动应力路径下的煤样循环加卸载响应比评价指标,对急倾斜巨厚煤层不同推进速度开采扰动诱发煤层的破坏规律加以表征,为乌东煤矿B3+6煤层+425 m水平工作面推进达到安全高效开采提供依据,从而指导矿井生产实际。

4.1 类比冲击矿压的煤样冲击类型评价分析

关于室内煤样冲击地压类型的定义,沈威等^[28]

通过类比煤矿冲击矿压,对实体煤掘进加卸载路径下的冲击煤样与非冲击煤样加以定义,将煤样满足以下条件定义为冲击煤样:①煤样破裂声响巨大并存在震动;②声发射监测到破裂事件能量大于 $10^4 \text{ mV} \cdot \mu\text{s}$;③应力应变曲线产生突然应力降,释放弹性能。

煤样 0.05 MPa/s 的循环加卸载速率下, 3.2 m/d 推进速度采动应力路径下的煤样破裂声音较小,无明显震动,破裂事件能量为 $7\,668 \text{ mV} \cdot \mu\text{s}$,应力-应变曲线未产生突然的应力降低; 4.8 m/d 推进速度的采动应力路径下,煤样破裂发出“砰”的声音,震动较弱,破裂事件能量为 $8\,536 \text{ mV} \cdot \mu\text{s}$,应力应变曲线未产生突然的应力降低; 6.4 m/d 推进速度的采动应力路径下,煤样破裂发出“嘣”的声音,震动较强,破裂事件能量为 $12\,411 \text{ mV} \cdot \mu\text{s}$,应力应变曲线产生突然的应力降低。对室内煤样冲击地压类型的判定指标加以应用得出: 6.4 m/d 高速推进路径下的煤样破坏可视为冲击煤样, 3.2 m/d 低速、 4.8 m/d 中速推进路径下的煤样可视为非冲击煤样。

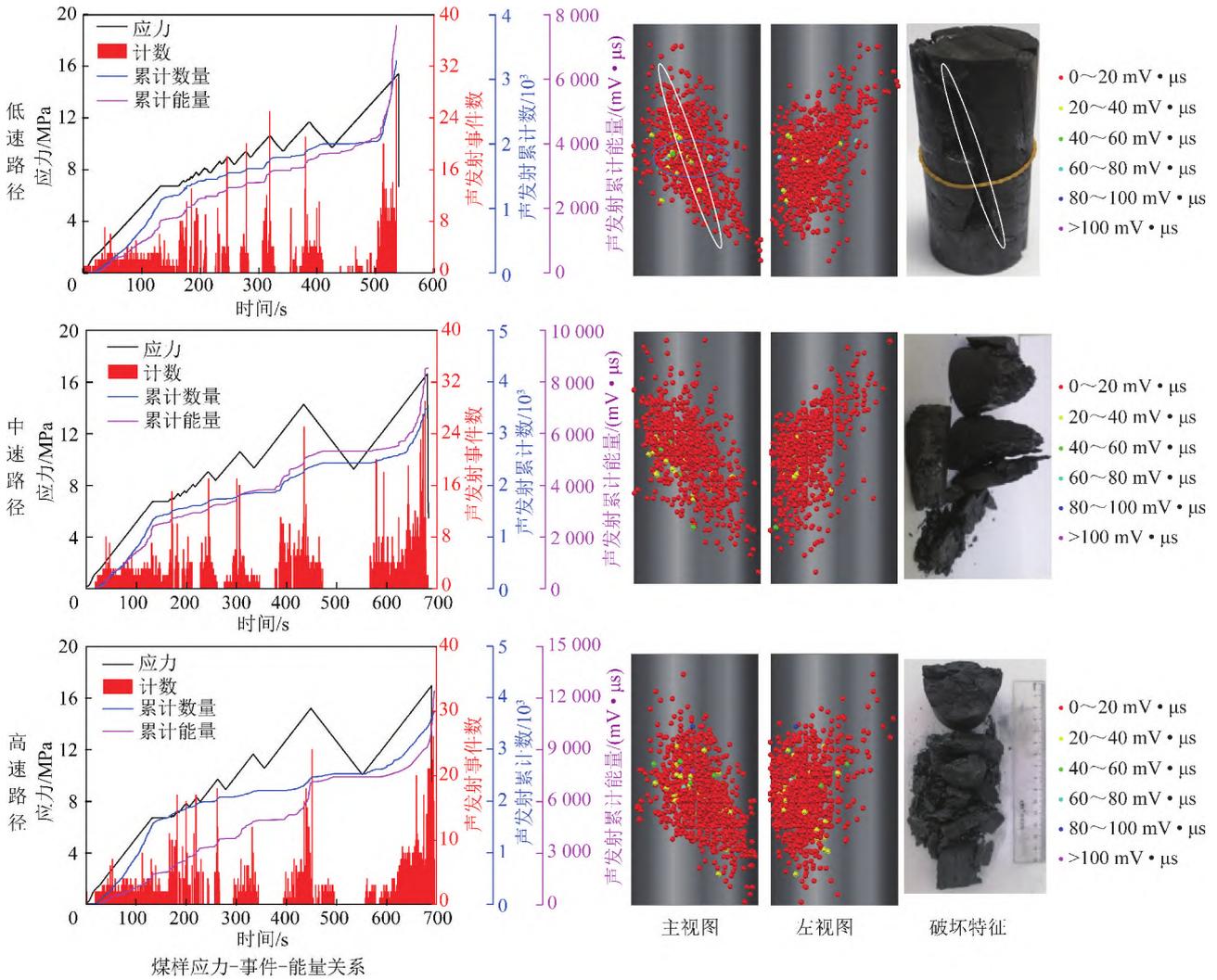


图 14 不同采动应力路径下的煤样声发射能量分布及其破坏特征

Fig.14 Acoustic emission energy distribution and failure characteristics of coal samples under different mining stress paths

4.2 采动应力路径下的煤样加卸载响应规律

在地震力学、断裂力学等学科基础上,尹祥础等^[29-30]首先提出新的地震预测方法——加卸载响应比理论,探讨了加卸载响应比的岩石破坏前兆特性。

为了定量刻画加载响应与卸载响应的差别,将响应率 X 定义为

$$X = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta P} \quad (1)$$

式中, ΔP 和 ΔR 分别为载荷 P 和响应 R 对应的增量。

令 X_+ 及 X_- 分别代表加载与卸载时的响应率,把应力当作荷载,把应变当作响应^[31],通过加载与卸载阶段响应率的比值,将弹性模量加卸载响应比 Y_a 定义为

$$Y_a = \frac{X_+}{X_-} = \frac{d\varepsilon_+}{d\sigma_+} / \frac{d\varepsilon_-}{d\sigma_-} = \frac{E_-}{E_+} \quad (2)$$

式中, X 为响应率;下标“+”,“-”分别为加、卸载阶段; E 为弹性模量。

结合加卸载过程中的损伤变化率以及声发射数和式(2)可得声发射数加卸载响应比 Y_b ^[32-33] 为

$$Y_b = \frac{E_-}{E_+} = \frac{\Delta D_+}{\Delta D_-} = \frac{N_+}{N_-} \quad (3)$$

式中, ΔD 为损伤变量变化率; N 为声发射数。

通过煤样加卸载力学试验结果,借助加卸载响应比的理论,分析煤样不同应力路径加卸载扰动影响下的力学响应特征,对矿井实际工作面推进速度影响的开采扰动加以表征。跟据以往经验和文献[34]研究结果,采用加载阶段的弹性模量取应力-应变曲线直线段的斜率,卸载阶段的应力-应变曲线峰值与谷值斜率分别作为加载、卸载阶段的弹性模量。将加载与卸载阶段的弹性模量分别记为 E_+ , E_- ,同时结合煤样加载与卸载阶段的声发射数量分别记为 N_+ , N_- ,其煤样循环加卸载下的弹性模量比与声发射数量比见表5,表5中比号左右的数值分别为加载与卸载阶段的弹性模量与声发射数量。

表 5 煤样循环加卸载的弹性模量比与声发射数量比

Table 5 Elastic modulus ratio and acoustic emission quantity ratio of coal cyclic loading and unloading

循环次数	Y_a			Y_b		
	低速路径	中速路径	高速路径	低速路径	中速路径	高速路径
1	1.93 : 1.58	1.88 : 1.46	1.96 : 1.54	5 : 6	16 : 8	15 : 7
2	2.03 : 1.56	1.93 : 1.44	2.12 : 1.63	23 : 6	20 : 9	27 : 12
3	2.38 : 1.62	2.13 : 1.51	2.31 : 1.65	25 : 9	33 : 12	50 : 13
4	2.68 : 1.78	2.12 : 1.51	2.26 : 1.56	28 : 12	51 : 18	57 : 20
5	2.49 : 1.66	2.19 : 1.51	2.49 : 1.58	27 : 14	91 : 20	64 : 24
6	2.41 : 1.59	2.44 : 1.57	2.74 : 1.61	79 : 15	83 : 36	75 : 27
7	2.49 : 1.57	2.94 : 1.67	3.12 : 1.63	45 : 30	78 : 32	131 : 35
8	2.64 : 1.61	3.09 : 1.65	3.36 : 1.65	55 : 16	337 : 186	248 : 105
9	2.64 : 1.68	—	—	94 : 44	—	—
10	2.56 : 1.52	—	—	137 : 70	—	—

由于低速下的加载阶段弹性模量明显大于中速与高速的加载阶段;而在不同推进速度下的卸载阶段,高速路径明显大于低速与中速。这使得高速推进速度应力路径下的弹性模量比(E_-/E_+)明显大于中速和低速。低速、中速、高速不同推进速度的循环加卸载应力路径下,由于循环加卸载过程中的应力变化量随着循环次数的增加普遍增大,在相同加载速率下使得煤样加载与卸载时间随循环次数增加而不断增多,从而造成了加载与卸载阶段的声发射数量均随循环次数的增加而增多。

根据式(2),(3)响应比的定义绘制出 0.05 MPa/s 加卸载速率下,煤样循环加卸载的弹性模量及声发射数量的加卸载响应比如图 15 所示。由图 15(a)可知,在低速路径下煤样的弹性模量加卸载响应比 Y_a 基本在 1.22~1.68 内波动;中速路径第 1~6 次循环下的 Y_a 基本在 1.29~1.55 内呈缓增趋势,第 7,8 次循环下的 Y_a 增幅明显增加,第 8 次循环所得 Y_a 达到最大值 1.87;在高速路径下加卸载响应比呈现明显的单增趋势,第 8 次循环得到 Y_a 最大值达到 2.04。循环加卸载过程中,低速路径下的 Y_a 呈现出相对稳态的趋势,中速路径下的 Y_a 呈现出先稳态、后增加的趋势,高速路径下的 Y_a 值呈持续增加趋势。

由于加卸载路径下的卸载应力大小变化量普遍小于加载应力变化量,使得加载峰值处的弹性模量相对稳定,基本等于峰值前方一定阶段的弹性模量;卸载谷值处的弹性模量未能稳定,普遍小于谷值前方一定阶段的弹性模量,若继续卸载其弹性模量亦会持续减小,从而使不同推进路径初始阶段的 Y_a 处于 1.50 附近波动,在中速路径煤样循环第 7,8 次时,煤样临近破坏时的内部损伤加剧, E_- 开始增加, E_+ 保持稳定,使得 Y_a 突然增大,而高速推进在第 5 次循环便出现 Y_a 突增,且循环加卸载过程中的 Y_a 普遍大于中速,

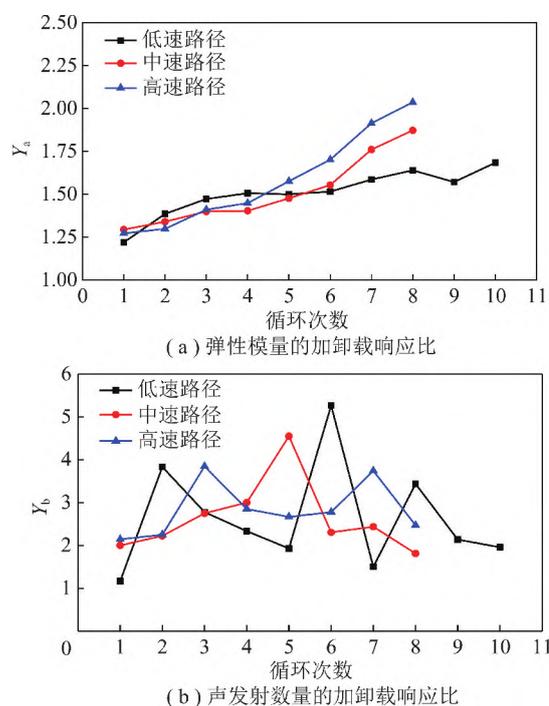


图 15 弹性模量及声发射数量的加卸载响应比

Fig.15 Loading-unloading response ratio of elastic modulus and acoustic emission quantity

即高速推进应力路径下的煤样损伤程度高于中速。

由图 15(b)可知低速应力路径下,第 6 次循环加卸载的声发射数量响应比 Y_b 突增至 5.27;中速路径第 5 次循环加卸载的 Y_b 达到最大 4.55,循环加卸载过程中的 Y_b 稳定在 2.00~4.55 内;高速路径第 3,7 次循环下的 Y_b 分别突增至 3.85,3.74,响应比 Y_b 整体随循环次数的增加呈明显的波动式递增趋势。

加卸载路径下的加载阶段,煤样持续受载使得煤样内部持续压缩,损伤较为明显,因而加载阶段的声发射数量 N_+ 普遍大于卸载阶段;而卸载阶段通过应力的释放使得煤样内部存在试件存在弹塑性变形而

产生摩擦,随着循环加卸载的进行,其卸载阶段的弹性变形逐渐向塑性变形转换,卸载阶段因变形产生摩擦效应形成的声发射数量 N_- 随着卸载次数增加而产生的增量较小。

4.3 基于加卸载响应比的冲击煤样评价指标

通过类比煤矿冲击矿压的评价方法将不同推进速度应力路径下的循环加卸载煤样冲击类型进行划分后,引入加卸载响应比理论得出响应比的大小,形成采动应力路径下的煤样循环加卸载响应比评价指标,对急倾斜巨厚煤层不同推进速度开采扰动诱发煤层的破坏规律加以表征。其采动应力路径下煤样加卸载响应表征分析方法如图 16 所示。

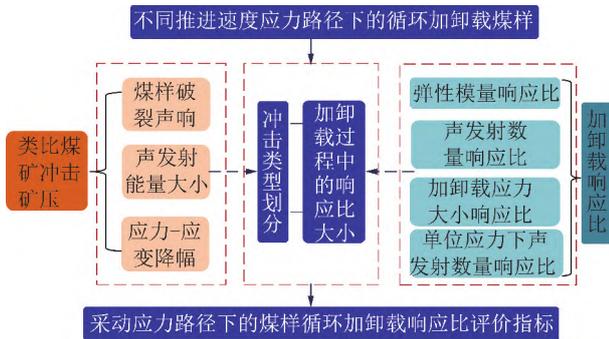


图 16 采动应力路径下煤样加卸载响应表征分析方法

Fig.16 Characterization and analysis method of coal sample loading-unloading response under mining stress path

低速、中速、高速 3 种应力路径采用相同加载速率时,煤样循环加卸载时间的加卸载响应比与煤样循环加卸载大小的加卸载响应比相同。借助于加卸载响应比的由来,引入加卸载大小比,对开采扰动的加卸载比加以表征。

加卸载响应比 Y_c 采用式(4)计算。

$$Y_c = \frac{\sigma_+}{\sigma_-} \tag{4}$$

式中, σ_+ 、 σ_- 分别为循环加卸载阶段的加载应力和卸载应力。

单位应力变化量下声发射数量的加卸载(声发射数量/加卸载)响应比 Y_d 为

$$Y_d = \frac{N_+ / \sigma_+}{N_- / \sigma_-} \tag{5}$$

由表 3 不同推进速度应力路径的加卸载参数变化,计算出单次加载与卸载阶段的应力差值,其不同应力路径下加载应力变化量 σ_+ 与卸载应力变化量 σ_- 均普遍随着循环加卸载次数的增加而增大,其中卸载应力变化量 σ_- 于中速、高速的末次循环阶段的变化量较为明显,分别为 5.05 与 5.17 MPa,略大于该阶段的加载应力大小。

采动应力路径循环加卸载过程中的加载应力普遍大于卸载应力,加卸载应力变化量差异较大,为此采用声发射数量/加卸载大小的响应比,即单位应力变化量下的声发射数量之比对煤样循环加卸载加以表征。根据式(4),(5),绘制了煤样加卸载应力大小及单位应力下声发射数量的加卸载响应比如图 17 所示。由图 17(a)可知,低速、中速、高速应力路径下,煤样循环加卸载大小的加卸载响应比 Y_c 变化幅度较大, Y_c 普遍大于 1。在低速路径的第 2,6,8 次循环加卸载时 Y_c 分别达到 3.80,4.58,2.49,产生明显突增峰值;在中速路径的第 5 次循环加卸载时 Y_c 达到 3.83;在高速路径的第 3,7 次循环加卸载时 Y_c 明显突增到 3.64,2.48。由图 17(b)可知,在低速、中速、高速不同路径下,单位应力下声发射数量的加卸载响应比 Y_d 均大于 1,表明声发射事件主要产生于加载阶段,且随着循环次数的增加整体呈现明显的递增趋势,其中最后 3 次循环加卸载过程中的递增趋势最为明显。在低速路径下的前 9 次循环加卸载过程中, Y_d 基本在 1.07~1.52 内波动,第 10 次循环加卸载 Y_d 达到最大值 1.70;在中速、高速路径第 1~6 次循环下的 Y_d 基本在 1.04~1.34 内呈震荡式波动,第 7,8 次循环下的 Y_d 增幅明显增加,中速、高速路径的末次循环所得 Y_d 达到最大,分别为 1.93,2.63。

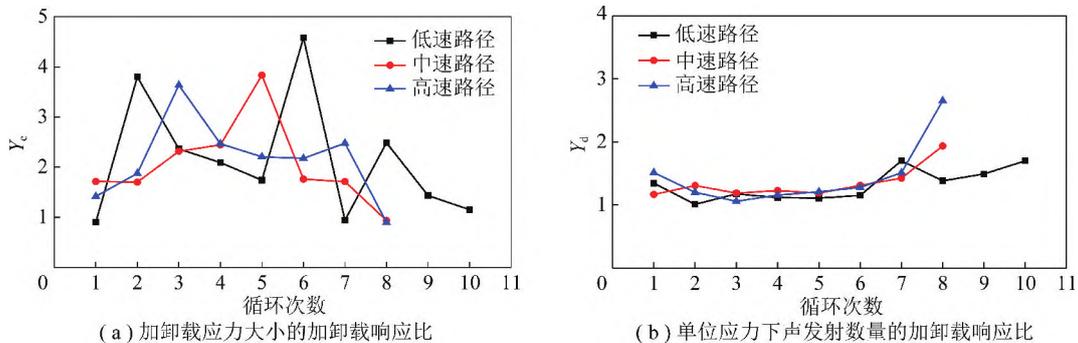


图 17 加卸载应力大小及单位应力下声发射数量的加卸载响应比

Fig.17 Loading-unloading response ratio of loading-unloading size and acoustic emission quantity under unit stress

根据煤样循环加卸载的弹性模量、单位应力下声发射数量响应比即 Y_a, Y_d 综合分析得出:煤样所受外部载荷较低时,损伤程度较小,其稳定性较高,加卸载响应比较小,微小的扰动造成了原煤内部损伤微扩展及变形微增量。随载荷的持续增加,原煤材料内部损伤和破坏不断增加,此时煤样宏观表现出刚度下降,且内部结构稳定性逐渐下降。

根据循环加卸载的冲击煤样评价结果,得出不同推进速度应力路径下的煤样冲击类型,即 6.4 m/d 高速推进应力路径下的煤样破坏可视为冲击煤样,而 3.2, 4.8 m/d 低速与中速推进应力路径下的煤样破坏视为非冲击煤样;结合加卸载响应比,掌握了不同推进速度应力路径下的煤样加卸载响应比的大小,即 6.4 m/d 高速推进应力路径下的弹性模量比及声发射

数量/加卸载大小的响应比均大于 2, 分别为 2.04, 2.63, 低速与中速则小于 2。结合各类煤样冲击类型的评价结果及其加卸载响应比,提出了适用于采动应力路径下的煤样循环加卸载响应比评价指标,具体内容见表 6。

由不同应力路径下的煤样抗压强度、能量变化情况、破坏特征、煤样冲击类型等的汇总分析可知,高速应力路径下的煤样强度较高,产生破坏的冲击效应较强,释放能量较大,6.4 m/d 高速推进虽然可以满足矿井生产的高效作业,但其存在一定的冲击危险性;3.2 m/d 低速推进虽然可以达到矿井的安全生产,但其生产效率较低,因而 3 种不同速度中,满足乌东煤矿 B3+6 煤层+425 m 水平的安全高效开采的合理推进速度为 4.8 m/d。

表 6 采动应力路径下煤样循环加卸载响应比评价指标

Table 6 Evaluation index of cyclic loading-unloading response ratio of coal samples under mining stress path

评价指标	计算公式	判别依据
加卸载响应比	(1) 弹性模量响应比: $Y_a = E_- / E_+$ (2) 单位应力下声发射数量响应比: $Y_d = (N_+ / \sigma_+) / (N_- / \sigma_-)$	(1) 煤样循环加卸载下的弹性模量响应比大于 2 (2) 声发射数量/加卸载大小的响应比,即单位应力变化量下的声发射数量比大于 2

5 工程实践

微震监测可以实现采动过程中煤岩破裂事件时间、空间及能量的监测,是冲击地压矿井必备的监测手段。通过对 B3+6 煤层+425 m 水平工作面开采过程中微震事件数据的统计分析,可以分析不同开采速

度下微震事件的数量及能量,支撑工作面合理推进速度的确定及验证。

根据 B3+6 煤层+425 m 水平工作面 950 ~ 1 520 m 开采过程中的微震监测,形成了 B3+6 煤层+425 m 水平工作面开采过程中的微震空间分布特征,具体如图 18 所示。

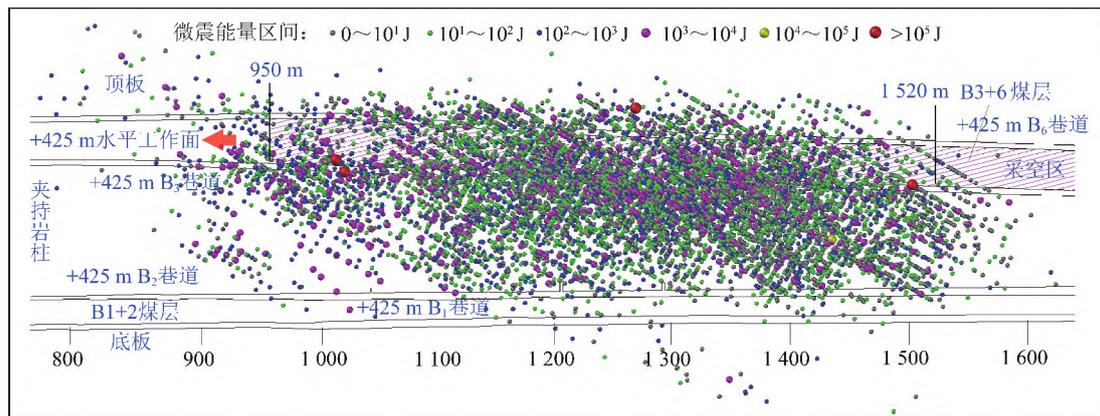


图 18 +425 m 水平工作面开采过程中的微震空间分布特征

Fig.18 Spatial distribution characteristics of microseisms during mining in +425 m horizontal working face

图 18 反映出+425 m 水平工作面的微震事件主要分布在夹持岩柱、B3+6 煤层及其顶底板的区域范围内,其中+425B₃巷道周围的震源分布较为多,且 10⁵ J 以上的大能量事件有 4 处,其中 3 处分布在+425B₃巷道,1 处分布在 B₆巷道。

工作面不同推进速度形成了覆岩不同的破

坏特征,引发的微震能量也存在明显不同,为有效分析不同推进速度下的微震能量分布特征,绘制了工作面约 57.6 m(与数值模拟中 3 种不同推进速度的公倍数保持一致)开采过程中,不同推进速度各能量区间的累计能量-事件关系,如图 19 所示。

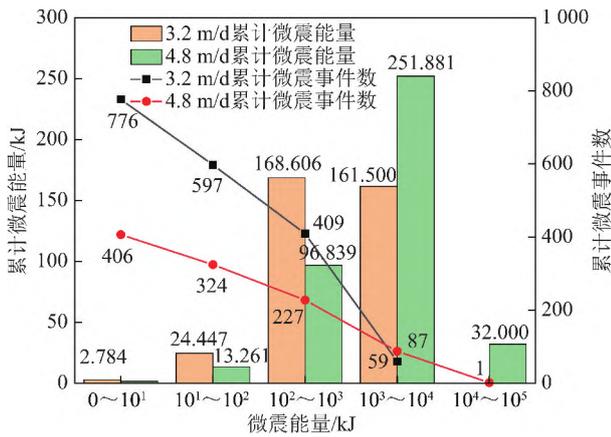


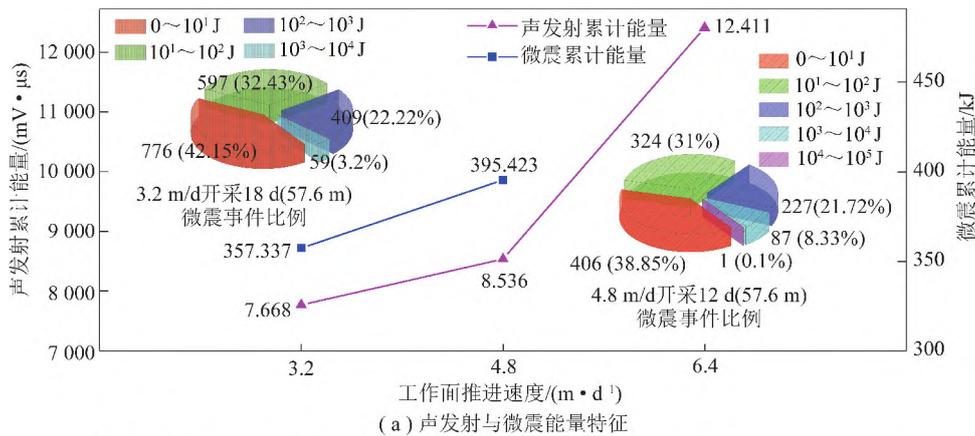
图 19 不同推进速度各能量区间的累计能量-事件关系
Fig.19 Cumulative energy-event relationship in different energy intervals of different propulsion speeds

由图 19 可知,随着微震能量区间的增加,能量计数呈明显的线性递减趋势,其较低的能量区间微震事件数量越多,但累计的微震能量较少。3.2 m/d 推进速度下微震事件呈明显的“高频-低能”特征,4.8 m/d推进速度下微震事件呈相对明显的“低频-高

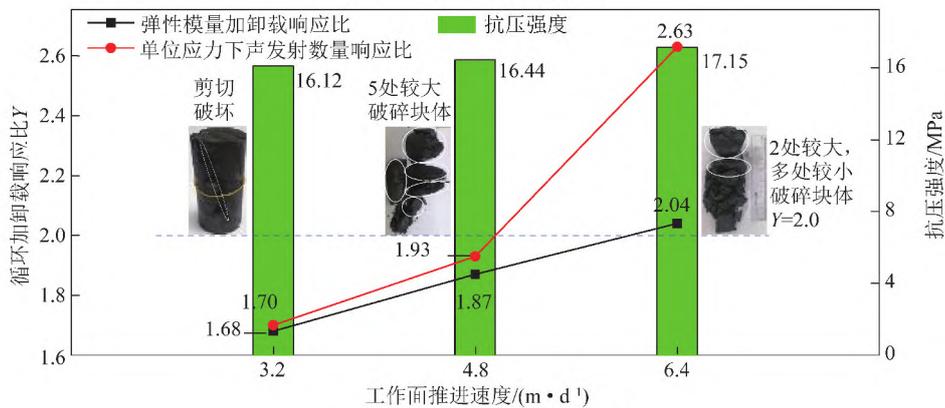
能”特征,0~10¹,10¹~10²,10²~10³ J 各区间范围内 3.2 m/d 推进下的微震事件明显较多,但 3.2 m/d 推进速度下,10³~10⁴ J 范围的较大能量事件为 59 个,明显小于 4.8 m/d 时的 87 个,且 3.2 m/d 推进速度下未产生 10⁴~10⁵ J 内的大能量事件。

至 57.6 m 开采结束后,3.2,4.8 m/d 推进速度下累计微震能量分别为 357 337,395 423 J,4.8 m/d 较 3.2 m/d 推进下的累计微震能量高约 10.66%,其单日推进 4.8 m 时平均每日微震能量为 32 952 J,较 3.2 m 推进的 19 852 J 增加约 65.99%。4.8 m/d 推进时的单日能量较 3.2 m/d 存在明显增加,但现场+425 m 工作面开采采用顶底板深浅孔爆破,于煤层顶底板岩层中形成立体缓冲带,并在 B3 巷沿煤体倾向施工注水,弱化了中间夹持岩柱,合理的现场施工作业,满足了+425 m 水平工作面 4.8 m/d 的安全开采。

为全面分析不同推进速度应力路径下煤样的抗压强度、声发射能量、破坏特征、现场微震能量与事件及其加卸载响应比的变化规律,图 20 展示了不同推进速度采动影响的加卸载效应综合分析。



(a) 声发射与微震能量特征



(b) 煤样加卸载响应比与抗压强度

图 20 不同推进速度采动影响的加卸载效应综合分析

Fig.20 Comprehensive evaluation of loading-unloading response of propulsion speed

由图 20 可知,低速、中速、高速不同推进速度应力路径下的煤样抗压强度、累计声发射能量与 2 种

方法所得加卸载响应比呈明显的正相关关系。且随着推进速度增加,其应力路径下的煤样破碎程度逐

步加大。当载荷水平不断提高,使得煤层抵抗失稳破坏的能力不断下降,所以失稳破坏的可能性及其破坏程度随着载荷水平的增加而逐渐增大,同时导致煤样的临界敏感性不断增加, Y 增大。其中,不同推进速度应力路径下的末次循环加卸载结束后,6.4 m/d 推进应力路径下的 Y 明显大于低速和中速,循环加卸载在 6.4 m/d 应力路径下的损伤程度大于 3.2,4.8 m/d 下的损伤程度。

现场实测开采速度相对保持在 4.8 m/d 连续开采 12 d 的微震事件中, $10^3 \sim 10^5$ J 内的较大能量事件占比达到 8.43%,明显大于 3.2 m/d 连续开采 18 d 的能量占比。同时 4.8 m/d 开采的微震累计能量较高,连续开采 57.6 m 的用时较短,使得平均单日开采微震事件以及单个微震事件的能量较大,现场实测的平均单日开采微震事件以及单个微震事件的能量大小与 2 种方法所得加卸载响应比呈明显的正相关关系。

通过类比煤矿冲击矿压的评价指标,得到 6.4 m/d 应力路径下的煤样可视为冲击煤样,结合不同推进速度应力路径下的加卸载响应比的大小,形成了采动应力路径下弹性模量响应比与单位应力变化的声发射数量响应比均大于 2 的加卸载响应比评价指标,得到了 3 种推进速度中 4.8 m/d 能较好的满足乌东煤矿 B3+6 煤层+425 m 水平的安全高效开采。现场微震监测得到+425 m 水平工作面开采在采用深浅孔爆破与注水弱化顶底板与中间夹持岩柱的施工作业后,4.8 m/d 的推进速度实现了+425 m 水平工作面的安全高效开采。

6 结 论

(1)数值模拟实验揭示了急倾斜巨厚煤层不同推进速度下的采动应力路径变化特征,得到了工作面 3.2,4.8,6.4 m/d 理想推进情况下工作面前方煤体分别经历 14,10,8 个明显的加卸载循环次数,推进速度增加使得采动应力峰值增大,同时随工作面推进速度增加其采动应力路径下循环加卸载幅度增大,循环次数减小,主要影响区域范围增加,而作用时间减小。

(2)基于工作面推进速度采动影响下煤体受到的加卸载循环次数,提出以急倾斜巨厚煤层不同推进速度下的采动应力路径为煤岩试件的加卸载应力路径,完成了采动应力路径作用下的煤样力学行为分析。得出了采动应力路径下煤样的平均抗压强度随工作面推进速度增加呈明显的非线性递增趋势,且其递增幅度逐渐增加,煤样破坏程度、声发射能量

亦随不同应力路径所处推进速度的增加而增大,其中循环加卸载结束后 6.4 m/d 应力路径下的累计声发射能量较低速、中速应力路径分别高约 61.9%,45.4%。

(3)通过类比冲击矿压评价指标与加卸载响应比的特征分析,掌握了煤样冲击类型及其加卸载响应的规律,提出了基于采动加卸载响应比的冲击地压矿井工作面推进速度合理确定方法,根据弹性模量与单位应力下声发射数量响应比的变化特征,构建了不同推进速度采动应力路径下加卸载响应比的煤样破坏临界值,确定了冲击地压矿井急倾斜巨厚煤层工作面的合理推进速度,现场工程实践监测反映出 4.8 m/d 的推进速度能较好实现+425 m 水平的安全高效开采。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,张泽天,高峰,等.不同开采方式下煤岩应力场-裂隙场-渗流场行为研究[J].煤炭学报,2016,41(10):2405-2417. XIE Heping, ZHANG Zetian, GAO Feng, et al. Stress-fracture-seepage field behavior of coal under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(10): 2405-2417.
- [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] 高明忠,王明耀,谢晶,等.深部煤岩原位扰动力学行为研究[J].煤炭学报,2020,45(8):2691-2703. GAO Mingzhong, WANG Mingyao, XIE Jing, et al. In-situ disturbed mechanical behavior of deep coal rock[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2691-2703.
- [4] 高明忠,刘军军,林文明,等.特厚煤层超前采动原位应力演化规律研究[J].煤炭科学技术,2020,48(2):28-35. GAO Mingzhong, LIU Junjun, LIN Wenming. The law of in-situ stress evolution in advance mining of extra thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 28-35.
- [5] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机制和防治[J].煤炭学报,2014,39(2):205-213. JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [6] 秦冬冬.新疆准东矿区缓斜巨厚煤层多分层开采覆岩结构演变机理及控制[D].徐州:中国矿业大学,2020. QIN Dongdong. Evolution mechanism and control of overburden structure for gently inclined ultra-thick coal seam multi-layer mining in Xinjiang East Junggar mining area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [7] 许猛堂.新疆巨厚煤层开采覆岩活动规律及其控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.

- XU Mengtang. Study on movement laws of overlying strata and its control of extra-thick coal seam mining in xinjiang region [D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2014.
- [8] TU Hongsheng, TU Shihao, YUAN Yong, et al. Present situation of fully mechanized mining technology for steeply inclined coal seams in China [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8 (7): 4485-4494.
- [9] WANG Jinhua. Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines [J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2014, 1(3): 253-260.
- [10] 来兴平, 许慧聪, 陈建强, 等. 急斜采动夹持岩柱能量异化特征及其调控方法 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(3): 429-438.
- LAI Xingping, XU Huicong, CHEN Jianqiang, et al. Research on energy dissipation characteristics and control method of sandwiched rock pillar by steeply inclined mining [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(3): 429-438.
- [11] 潘一山. 煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用 [J]. *煤炭学报*, 2018, 43(8): 2091-2098.
- PAN Yishan. Disturbance response instability theory of rockburst in coal mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(8): 2091-2098.
- [12] 潘俊锋. 煤矿冲击地压启动理论及其成套技术体系研究 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44(1): 173-182.
- PAN Junfeng. Theory of rockburst start-up and its complete technology system [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 173-182.
- [13] 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.
- QI 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.
- [14] 王家臣, 王兆会. 高强度开采工作面顶板动载冲击效应分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S2): 1844-1851.
- WANG Jiachen, WANG Zhaohui. Impact effect of dynamic load induced by roof in high-intensity mining face [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S2): 1844-1851.
- [15] 冯龙飞, 窦林名, 王晓东, 等. 回采速度对坚硬顶板运动释放能量的影响机制 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44(11): 3329-3339.
- FENG Longfei, DOU Linming, WANG Xiaodong, et al. Mechanism of mining advance speed on energy release from hard roof movement [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(11): 3329-3339.
- [16] 刘金海, 孙浩, 田昭军, 等. 煤矿冲击地压的推采速度效应及其动态调控 [J]. *煤炭学报*, 2018, 43(7): 1858-1865.
- LIU Jinhai, SUN Hao, TIAN Zhaojun, et al. Effect of advance speed on rock burst in coal mines and its dynamic control method [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(7): 1858-1865.
- [17] 赵同彬, 郭伟耀, 韩飞, 等. 工作面回采速度影响下煤层顶板能量积聚释放分析 [J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(10): 37-44.
- ZHAO Tongbin, GUO Weiyao, HAN Fei, et al. Analysis on energy accumulation and release of roof under influence of mining speed [J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(10): 37-44.
- [18] 马海峰, 李传明, 李家卓, 等. 不同推进速度下煤岩体采动力学行为响应特征与控制 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(12): 74-79.
- MA Haifeng, LI Chuanming, LI Jiazhao, et al. Response characteristics of mining-induced mechanical behavior for coal and rock mass under different advancing speed and its control [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(12): 74-79.
- [19] CUI Feng, YANG Yanbin, LAI Xingping, et al. Experimental Study on the effect of advancing speed and stoping time on the energy release of overburden in an upward mining coal working face with a hard roof [J]. *Sustainability*, 2020, 12(1): 37.
- [20] 崔峰, 贾冲, 来兴平, 等. 近距离强冲击倾向性煤层上行开采覆岩结构演化特征及其稳定性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(3): 2803-2813.
- CUI Feng, JIA Chong, LAI Xingping, et al. Study on the evolution characteristics and stability of overburden structure in upward mining of short distance coal seams with strong burst tendency [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(3): 2803-2813.
- [21] 谭云亮, 王子辉, 刘学生, 等. 采动诱冲动能估算及冲击危险性评价 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 123-131.
- TAN Yunliang, WANG Zihui, LIU Xuesheng, et al. Estimation of dynamic energy induced by coal mining and evaluation of burst risk [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 123-131.
- [22] 王振, 胡千庭, 文光才, 等. 采动应力场分布特征及其对煤岩瓦斯动力灾害的控制作用分析 [J]. *煤炭学报*, 2011, 36(4): 623-627.
- WANG Zhen, HU Qianting, WEN Guangcai, et al. Study on the distribution laws of mining pressure field and its control action on dynamic disasters in coal mines [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(4): 623-627.
- [23] 杨继华, 盛谦, 朱泽奇, 等. 地下岩体洞室群地震响应的加、卸载响应比分析 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(7): 2127-2132.
- YANG Jihua, SHENG Qian, ZHU Zeqi, et al. Loading/unloading response ratio study of seismic response on underground rock cavern group [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(7): 2127-2132.
- [24] 夏冬, 杨天鸿, 王培涛, 等. 干燥及饱和岩石循环加卸载过程中声发射特征试验研究 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(7): 1243-1247.
- XIA Dong, YANG Tianhong, WANG Peitao, et al. Experimental study of acoustic emission characteristics of dry and saturated rocks during cyclic loading-unloading process [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(7): 1243-1247.
- [25] 张浪平, 尹祥础, 梁乃刚. 加卸载响应比与损伤变量关系研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(9): 1874-1881.
- ZHANG Langping, YIN Xiangchu, LIANG Naigang. Study on relation between load/unload response ratio and damage variable [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(9): 1874-1881.
- [26] 王金安, 焦申华, 谢广祥. 综放工作面开采速率对围岩应力环

- 境影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1118-1124.
- WANG Jinan, JIAO Shenhua, XIE Guangxiang. Study on influence of mining rate on stress environment in surrounding rock of mechanized top caving mining face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1118-1124.
- [27] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2499-2503.
- LI Shulin, YIN Xiangang, WANG Yongjia, et al. Study on acoustic emission characteristics of uniaxial compression rock failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2499-2503.
- [28] 沈威, 窦林名, 贺虎, 等. 实体煤掘进加卸载路径下的冲击机理及防控研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(4): 768-776.
- SHEN Wei, DOU Linming, HE Hu, et al. Study on mechanism and prevention of rock burst under loading-unloading path in solid coal driving [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(4): 768-776.
- [29] 尹祥础, 尹灿. 非线性系统的失稳前兆与地震预报——响应比理论及其应用[J]. 中国科学(B辑), 1991, 21(5): 512-518.
- YIN Xiangchu, YIN Can. The precursor of instability for nonlinear system and earthquake prediction—Load/unload response ratio theory and its application [J]. Science in China (Series B), 1991, 21(5): 512-518.
- [30] YIN Xiangchu, YIN Can. The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction [J]. Science in China, 1991, 34(8): 977-986.
- [31] 李世愚, 和泰名, 尹祥础. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2010.
- [32] 尹祥础, 刘月. 加卸载响应比——地震预测与力学的交叉[J]. 力学进展, 2013, 43(6): 555-580.
- YIN Xiangchu, LIU Yue. Load-unload response ratio—An interplay between earthquake prediction and mechanics [J]. Advances in Mechanics, 2013, 43(6): 555-580.
- [33] 赵毅鑫, 龚爽, 滕腾, 等. 单轴多级循环加载下原煤加卸载响应比演化特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1096-1105.
- ZHAO Yixin, GONG Shuang, TENG Teng, et al. Characteristics of the load/unload response ratio of raw coal under uniaxial multi-level cyclic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1096-1105.
- [34] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2013.