



移动扫码阅读

唐巨鹏,任凌冉,潘一山,等.高地应力条件煤与瓦斯突出冲击力演化规律研究[J].煤炭科学技术,2023,51(8):116-128.

TANG Jupeng, REN Lingran, PAN Yishan, *et al.* Study on the impact force evolution law of coal and gas outburst under high ground stress[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 116-128.

## 高地应力条件煤与瓦斯突出冲击力演化规律研究

唐巨鹏<sup>1</sup>,任凌冉<sup>1</sup>,潘一山<sup>2</sup>,张昕<sup>1</sup>,余泓浩<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁大学 物理学院, 辽宁 沈阳 110036)

**摘要:**随着开采深度和强度增加,煤与瓦斯突出动力灾害频发,冲击力致灾机制成为目前研究的主要方向。为进一步揭示高地应力条件煤与瓦斯突出冲击力演化规律及破坏机制,采用自主研发的煤与瓦斯突出全过程模拟巷道系统,引入冲击力和声发射监测技术,以 45%CO<sub>2</sub> 和 55%N<sub>2</sub> 混合气体压力模拟煤层瓦斯压力,以轴压模拟上覆岩层应力作用,围压模拟围岩应力作用,以平煤十一矿突出煤层为研究对象,考虑埋深为 600、800、1 000、1 200、1 400 和 1 600 m 的地应力条件,进行了煤与瓦斯突出模拟试验,分析了煤-瓦斯两相流运移过程、煤粉分布及冲击力演化特征,得到了瓦斯压力、临界瓦斯压力、试验有效应力、声发射信号与冲击力之间的影响关系规律,从煤与瓦斯突出能量转化角度分析了瓦斯内能向冲击动能,即瓦斯压力向冲击力转化特征。研究表明:①突出孕育阶段受力情况及破坏程度影响突出发生后冲击力在巷道内传播特性,随模拟埋深增加,冲击力演化特征愈发复杂,具有明显脉冲特征,且随脉冲特征出现冲击力升高。②脉冲特征划分为高频阶段和低频阶段,高频阶段煤-瓦斯两相流速度快、强度高、突出危险性高;低频阶段危险性随突出发展进程逐渐减弱。③突出两相流动能主要由瓦斯内能提供,部分瓦斯压力转化成冲击力,冲击力强弱主要由瓦斯压力决定,在高地应力作用下,深部煤体相对浅部更易发生煤与瓦斯突出。④突出开始时,声发射振铃计数峰值点早于冲击力峰值点,声发射信号更早监测到突出危险性,但冲击力更能具象反映煤体破裂情况,声发射振铃计数出现陡增时,伴随脉冲特征出现,但脉冲特征出现不一定对应声发射振铃计数陡增。

**关键词:**煤与瓦斯突出;高地应力;冲击力;脉冲特征;声发射信号

中图分类号:TD713

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2023)08-0116-13

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

TANG Jupeng<sup>1</sup>, REN Lingran<sup>1</sup>, PAN Yishan<sup>2</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, YU Honghao<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. School of Physics, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

**Abstract:** With the increase of mining depth and intensity, the dynamic disaster of coal and gas outburst was frequent. The disaster-causing mechanism of impact force has become the main direction of current research. In order to further reveal the impact force evolution law and failure mechanism of coal and gas outburst under high ground stress. The self-developed simulation roadway system in the whole process of coal and gas outburst was adopted, and the monitoring technology of impact force and acoustic emission were introduced. The gas pressure in coal seam was simulated by mixture pressure of 45% CO<sub>2</sub> and 55% N<sub>2</sub>. The stress of overlying strata and surrounding rock was simulated by axial and confining stress, respectively. Taking the outburst coal seam of Pingding shan No.11 mine as the research object to conduct the simulation test of coal and gas outburst. The ground stress with buried depths of 600 m, 800 m, 1 000 m, 1 200 m, 1 400 m and

收稿日期:2023-04-09

责任编辑:宫在芹

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0503

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51874165);辽宁省“兴辽英才计划”资助项目(XLYC1902106)

作者简介:唐巨鹏(1976—),男,辽宁锦州人,教授,博士。E-mail: tangjupeng@lntu.edu.cn

通讯作者:任凌冉(1997—),女,内蒙古锡林浩特人,博士研究生。E-mail: 47221007@stu.lntu.edu.cn

1 600 m were considered. The migration process of coal-gas two-phase flow, distribution of pulverized coal and evolution characteristics of impact force were analyzed. The influence between impact force and gas pressure, critical gas pressure, effective stress of test, acoustic emission signal were obtained, respectively. Transformation characteristics of gas internal energy to impact kinetic energy, i.e., gas pressure to impact force, was analyzed from the viewpoint of energy conversion of coal and gas outburst. The results shown that, (1) The force condition and damage degree in embryonic stage of outburst affected the propagation characteristics of impact force in the roadway after outburst. As the simulated buried depth increased, the impact force evolution became more complex, accompanied by obvious pulse characteristics, and the impact force value increased with the pulse characteristics. (2) The pulse characteristics was divided into the stage of high and low frequency. Coal-gas two-phase flow in high frequency stage had the characteristics of rapid speed, high strength and strong outburst hazard. The outburst hazard in low frequency stage gradually weakened with the development of outburst. (3) The two-phase flow energy of outburst was mainly from gas internal energy. Part of gas pressure was converted into impact force. The strength of impact force was mainly determined by gas pressure. Deep coal, with high ground stress, was more prone to coal and gas outburst than shallow one. (4) At the beginning of outburst, the peak point of acoustic emission ringing count preceded that of impact force, i.e., the acoustic emission signal detected outburst hazard earlier. But the impact force was more specific to coal fracture. A steep increase in acoustic emission ringing count was accompanied by pulse characteristics. However, the appearance of the pulse characteristic did not necessarily correspond to a steep increase in acoustic emission ringing count.

**Key words:** coal and gas outburst; high ground stress; impact force; pulse characteristics; acoustic emission signal

## 0 引 言

目前我国已查明的高瓦斯煤矿有 840 处、煤与瓦斯突出(简称“突出”)煤矿 719 处<sup>[1]</sup>, 开采深度和开采强度的增加, 是多处低瓦斯煤矿向高突矿井转变的重要原因, 进而导致突出等煤矿动力灾害频繁发生。突出是一种动力失稳现象, 表现为瓦斯气流裹挟大量破碎煤体在压力作用下突然向采掘空间喷出<sup>[2-3]</sup>。矿井突出灾害形式主要包括煤-瓦斯两相流冲击、煤粉掩埋、瓦斯窒息和采掘倒吸等, 其中煤-瓦斯两相流冲击可以沿巷道传播数十米, 同时引发次生灾害, 严重影响煤矿安全生产<sup>[4]</sup>。因此, 研究突出过程中煤-瓦斯两相流冲击演化特征具有重要意义。

突出过程中煤-瓦斯两相流冲击具有强破坏性, 巷道内实时监测难以实现。因此, 大部分学者多基于理论推导和数值模拟的方式对突出两相流进行分析。程五一等<sup>[5]</sup>通过建立突出后冲击波模型, 得到冲击波超压与瓦斯压力呈非线性关系, 与突出强度呈线性关系。吴爱军等<sup>[6-7]</sup>通过分析突出过程中冲击波在巷道内传播规律, 得到入射、反射和透射超压解析解, 其中透射波产生的反射促进煤体层状体的产生。张建方等<sup>[8]</sup>从冲击波理论出发, 得出了突出瓦斯膨胀能大于冲击波初始能量的结论。苗法田等<sup>[9]</sup>对不同流动状态下冲击波形成机理进行了分析, 认为当煤-瓦斯两相流处于高度及以上未完全膨胀状态时, 产生的危险性较强。ZHOU 等<sup>[10-12]</sup>通过交叉模拟巷道演示突出瓦斯运移过程, 得到冲击波与瓦斯流的传播特性及衰减规律, 建立流固耦合两相

模型, 揭示了突出全过程能量释放规律, 得到瓦斯解吸是引起突出孕育的重要因素。

理论和模拟的手段无法真实地再现现场实际突出两相流的运移特征及冲击力的演化规律, 部分专家学者考虑通过试验模拟研究突出两相流的运移规律和致灾机理。刘义等<sup>[13-14]</sup>利用自主搭建的突出管网实验系统, 研究了突出发生后冲击气流传播特性和衰减规律以及煤粉运移分布特征; 曹偲等<sup>[15]</sup>通过相似模拟试验, 得到了低气压条件下两相流运移规律和冲击波的传播特征; 孙东玲等<sup>[16]</sup>通过对试验结果的分析, 建立了突出煤粉运移力学模型, 计算得到煤粉突出距离随初始气流增大而增大的结论; 许江等<sup>[17, 19-20]</sup>、耿加波<sup>[18]</sup>通过试验手段深入研究了突出发展过程中煤层内瓦斯压力和温度、突出发生后巷道内煤-瓦斯两相流运移、冲击力、冲击气流和温度的演化规律; 唐巨鹏等<sup>[21]</sup>开展了不同埋深条件下深部突出模拟试验, 分析了临界瓦斯压力、有效应力对冲击参数的影响。

目前, 国内外学者对煤-瓦斯突出两相流运移规律及冲击力演化特征和致灾机制进行了理论分析和模拟试验的研究, 但随着我国开采深度增加, 突出机理尚未达到机理清晰、规律明确的程度。多从同一时间点巷道不同位置监测冲击力, 未考虑不同时间同一巷道监测点冲击力演化, 或是仅考虑瓦斯压力对冲击力影响, 未考虑瓦斯压力与冲击力的转化关系及不同埋深地应力条件对冲击力的影响。笔者利用自主研发的突出全过程及巷道模拟试验系统, 进行不同埋深地应力条件下巷道突出物理模拟试验,

分析了同一巷道监测点、不同时间冲击力的脉冲特征及冲击力作用下突出煤粉的分选特征,从突出能量转化角度分析了瓦斯压力与冲击力转化关系,探讨了冲击力与声发射信号间关系。笔者对冲击力演化规律的研究有助于明确突出动力致灾机制,在目前无法完全从源头消除突出灾害的情况下,旨在为不同埋深地应力条件下突出致灾机理及有效防灾减灾提供参考。

## 1 试验设计

随着开采向深部发展,煤岩受地应力、采掘应力等因素作用发生改变,深部最显著的特点为高地应力,因此,考虑高地应力对突出的影响尤为重要。以相似模拟试验为研究主线,以液压油缸加载模拟煤层所受三向应力,以气瓶减压阀控制 45%CO<sub>2</sub> 和 55% N<sub>2</sub> 混合气体压力模拟煤层瓦斯压力,以平煤十一矿突出煤层为研究对象,模拟埋深为 600、800、1 000、1 200、1 400、1 600 m 的地应力条件,引入冲击力和声发射监测技术,对突出进行深入研究。

### 1.1 试验系统

根据综合作用假说,考虑突出发生时煤层实际受力情况及赋存地质环境,利用目前现有手段,自主研发了突出全过程模拟试验系统,该试验系统主要

由突出主体装置、地应力及瓦斯压力加载装置、突出模拟巷道装置、声发射监测装置、冲击力监测装置、数据采集控制装置等组成。突出模拟试验系统如图 1 所示。

突出主体压力腔尺寸为 200 mm×200 mm×200 mm,最大加载压力 25 MPa,设有 4 个注气口及 24 个各类传感器接口,压力腔前端设有直径为 80 mm 突出口,安装有机玻璃挡板模拟突出弱面,用于诱导突出发生。地应力加载装置通过液压油缸加载作用实现,液压油缸安装在突出内腔的底部、后部和左右两侧,模拟煤层所受三向应力作用即轴压模拟上部岩层压力,围压模拟围岩压力。突出模拟巷道装置主要由长度为 1 000 mm、断面尺寸为 200 mm×200 mm 的 12 节直巷道组成,右侧面设置传感器安装孔,用于监测巷道内煤与瓦斯突出两相流运移情况。冲击力传感器采用手动触发的电压型超压传感器,采样速度最高 4 MHz,采样频率为 1 000 Hz,采样间隔为 0.25 μs,测量精度为 0.000 001 MPa,采样长度为 200 K,即每秒采集 2×10<sup>5</sup> 个数据。DS5 系列全信息声发射监测装置可实时提取试验过程中声发射信号,放大器增益 40 dB,为排除周围环境噪声对试验数据的干扰,门限值依据每次试验前的测试设定为 52~65 mV。

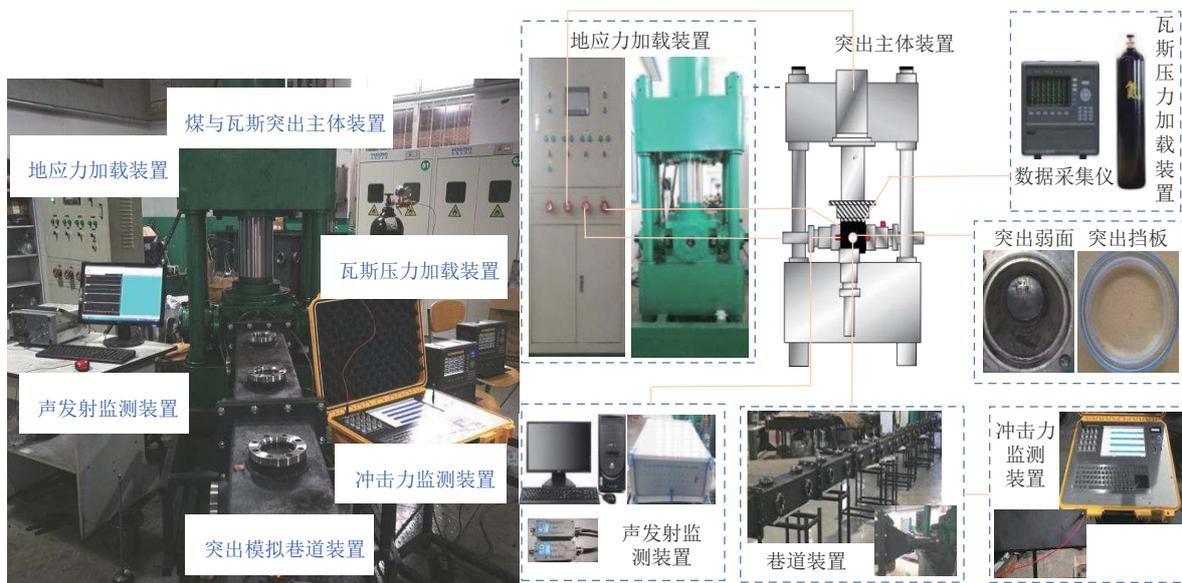


图 1 煤与瓦斯突出试验设备连接示意

Fig.1 Schematic of connecting coal and gas outburst test equipment

### 1.2 试验方案及步骤

试验用煤取自河南平顶山平煤十一矿。平煤十一矿为高瓦斯矿井,原始瓦斯压力 0.21~0.67 MPa,瓦斯含量 2.28~5.65 m<sup>3</sup>/t,绝对瓦斯涌出量 0.37~

0.71 m<sup>3</sup>/min,相对瓦斯涌出量 2.79~3.34 m<sup>3</sup>/t。已<sub>16-17</sub>煤层平均厚度约 1.82 m,密度近似为 1.29 t/m<sup>3</sup>,经河南理工大学鉴定,已<sub>16-17</sub>煤层为突出煤层,标高-600 m 以深为突出危险区,该工作面埋深超过 1 000 m,具

有突出危险性。多数学者认为,我国深部开采中“深部”可拟定为 800~1 500 m,其中煤矿 700~1 000 m 为一般深部,1 000~1 200 m 为超深部,考虑瓦斯突出量,埋深 600~900 m 瓦斯突出量明显增高,故深部矿井上限为 600~800 m<sup>[22-26]</sup>。据此,选定试验模拟埋深范围为 600~1 600 m。

考虑到瓦斯气体危险性,张庆贺等<sup>[27]</sup>提出甲烷相似气体概念,通过试验研究发现体积分数分别为 45%CO<sub>2</sub> 和 55%N<sub>2</sub> 混合气体突出现象和突出临界值与瓦斯气体相似,基于此,笔者采用体积分数分别为 45%CO<sub>2</sub> 和 55%N<sub>2</sub> 混合气体代替瓦斯气体。李新平等<sup>[28]</sup>对多地深部煤岩所受地应力进行采样,得到计算地应力拟合公式,依据此确定不同工况煤体所受实际地应力取值。利用力学相似方程:

$$C_1 = \frac{C_\sigma}{C_L C_\rho} = 1 \quad (1)$$

式中: C<sub>σ</sub>为应力相似系数; C<sub>L</sub>为几何相似常数;

C<sub>L</sub> = L<sub>p</sub>/L<sub>m</sub>, L<sub>p</sub> = 1.82 m, L<sub>m</sub> = 0.2 m; C<sub>ρ</sub>为体积力相似常数, C<sub>ρ</sub> = ρ<sub>p</sub>/ρ<sub>m</sub>, ρ<sub>p</sub> = 1.29 t/m<sup>3</sup>, ρ<sub>m</sub> = 1.088 t/m<sup>3</sup>; 其中, p表示原煤, m表示型煤。得到应力相似比为 10.8, 瓦斯压力相似比为 1.0, 进而得出试验初始垂直地应力、最大水平地应力、最小水平地应力及瓦斯压力的加载值,具体加载方案见表 1。试验过程中地应力并非恒定值,随型煤试件破裂抛出,地应力逐渐减小,与挖掘开采中卸压情况相符。

图 2 为试验具体加载步骤,其中考虑到目前突出试验中对型煤试件配比方案没有明确的规定,参考型煤与原煤各物理特征参数相似性<sup>[29]</sup>,选用煤粉粒径 40~80 目(0.180~0.425 mm)与>80 目(0.180 mm)的质量比为 1:1,并加入少量水泥作为黏结剂。《煤矿安全生产规程》规定当瓦斯压力大于 0.74 MPa 时具有突出危险性,考虑到试验过程中煤与瓦斯突出要达到射流效果,故瓦斯压力加载方案初始值设为 0.6 MPa。

表 1 煤与瓦斯突出应力加载方案

Table 1 Experimental scheme of coal and gas outburst

试验埋深/m	实际地应力/MPa			试验施加地应力/MPa			瓦斯压力/MPa
	σ <sub>11</sub>	σ <sub>h</sub>	σ <sub>v</sub>	σ <sub>11</sub>	σ <sub>h</sub>	σ <sub>v</sub>	
600	21.928	11.988	14.675	2.03	1.11	1.36	抽真空 3 h, 当腔内负压 0.1 MPa 时, 充入气体模拟吸附 24 h。试验从 0.6 MPa 开始, 以每级 0.2 MPa 加载, 每次加载稳压 2 min, 直至突出发生
800	26.688	15.668	18.835	2.47	1.45	1.74	
1 000	31.448	19.348	22.995	2.91	1.79	2.13	
1 200	36.208	23.028	27.155	3.35	2.13	2.51	
1 400	40.968	26.708	31.315	3.79	2.47	2.90	
1 600	45.728	30.388	35.475	4.23	2.81	3.28	

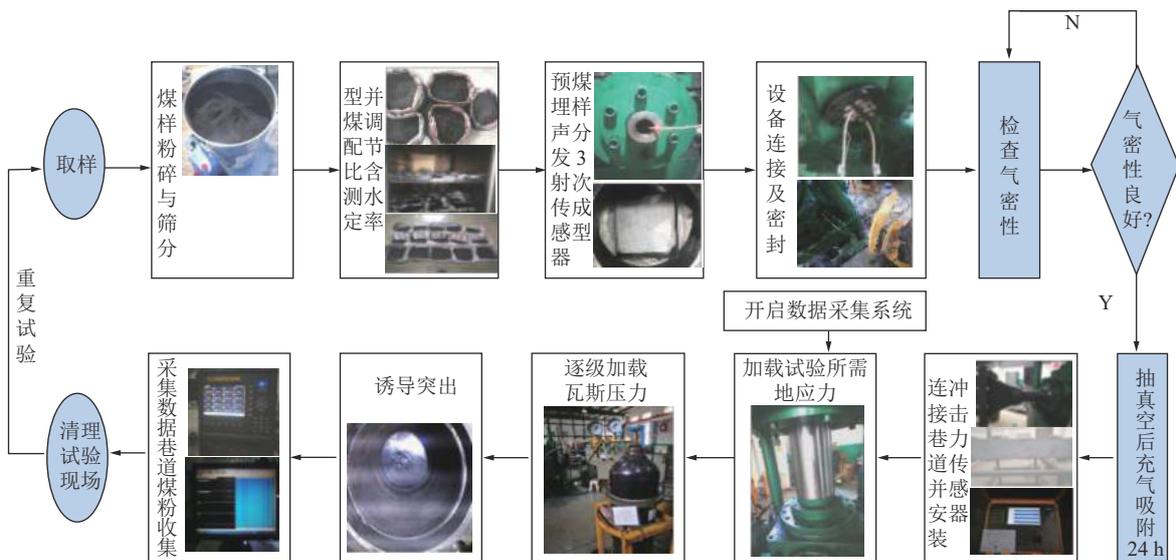


图 2 煤与瓦斯突出试验步骤

Fig.2 Coal and gas outburst test procedure

### 1.3 试验现象

按照表1地应力和瓦斯压力加载方案进行了埋深600~1600 m的突出模拟试验,试验现象表明当瓦斯压力加载至临界值时,突出弱面挡板破裂损坏,破碎煤体被瓦斯气体从突出弱面抛出,突出发生。

突出强度大,破坏性强,突出弱面破裂面积高达90%以上(图3a),在两相流冲击力作用下,突出弱面破裂面冲破巷道末端煤粉收集袋或停留在收集袋内,导致其破损。突出发生后,煤粉收集袋被吸入末端巷道内部(图3b),原因在于煤-瓦斯两相流在巷道内部运移迅速,两相流与空气分界面受到挤压,与前人分析结果一致<sup>[18]</sup>,证实了煤与瓦斯突出过程中巷道内存在负压。

### 1.4 突出煤粉分布特征

突出两相流包括冲击气流和煤粉流。冲击气流进入巷道空间后速度可达声速或者超声速,具有极强破坏性,其破坏性主要体现在巷道末端煤粉收集袋撕裂(图3d)。煤粉流情况主要通过视镜录像观察,结合前人经验,认为巷道内煤粉流运移状态可分为3个阶段:加速阶段、减速阶段、沉降阶段<sup>[15]</sup>。如图4

可知,突出初始时期,瓦斯气流大量涌出,具有极强搬运能力,携带煤粉做加速运动;运移中期,随瓦斯涌出量减小及两相流运移时间和距离增加,能量无法达到供应,煤粉流运移速度开始下降;运移后期,巷道内气体压力趋近于大气压,煤粉无法前移,靠自身重力开始沉降。

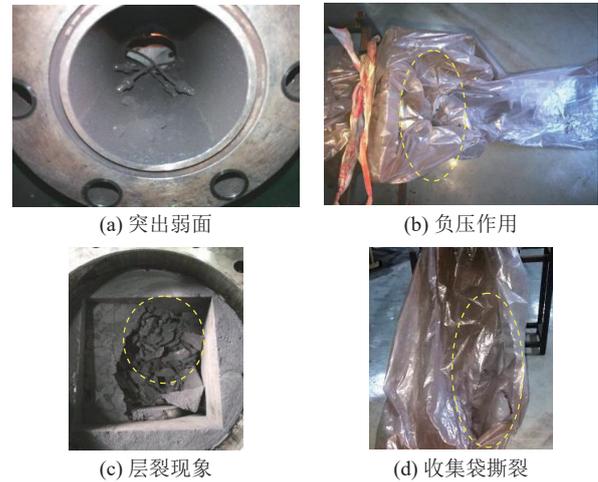


图3 煤与瓦斯突出现象

Fig.3 Phenomenon of coal and gas outburst

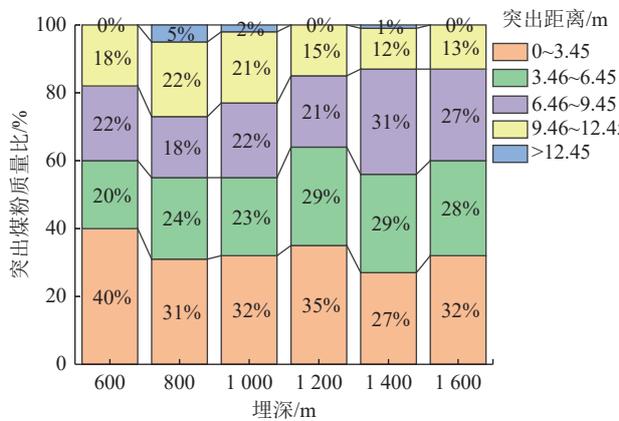


图4 不同埋深地应力条件下各区域突出煤粉质量占总突出煤粉质量比例

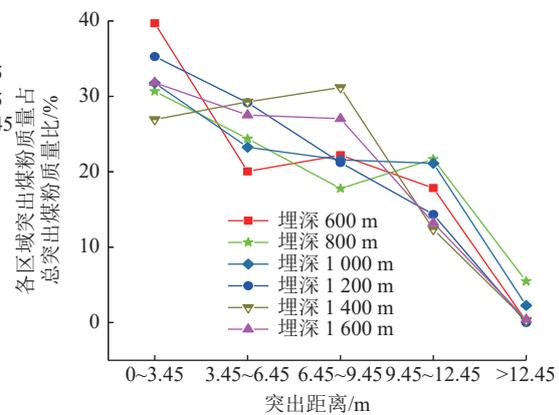
Fig.4 Proportion of prominent pulverized coal quality to total prominent pulverized coal mass in each area under different buried depth stress conditions

突出煤粉主要集中在0.45~3.45、3.45~6.45、6.45~9.45 m,3个区域煤样累计占比高达73%以上;大于12.45 m区域内,喷出煤样质量最少,最高占比小于6%。如图5所示,在突出近端(0.45~3.45 m)存在肉眼可见大粒径煤样,大粒径煤样在此区域占比较高,与井下实际突出情况类似;在突出中近端和中远端(3.45~6.45、6.45~9.45 m)煤样主要以小粒径形式存在,小粒径煤粉受空气阻力影响逐渐沉降,表面有明显凹痕,是由于部分大颗粒煤粒在冲击力作用下粉碎沉降,剩余部分在运移过程中造成凹痕;

在突出远端(>9.45 m),随突出过程能量耗散和空气阻力影响,突出煤粉随运移距离增加逐渐减少。以上分析表明,突出煤粉在巷道内沉降规律具有分选特征,与前人所得结论<sup>[4,30]</sup>一致,说明试验的合理性和可靠性。

## 2 试验结果及其分析

突出过程两相流的本质是瓦斯气流裹挟煤粉在巷道内运动,形成的冲击气流直接关系着巷道内冲击力大小。依据冲击力对人体的损伤情况<sup>[31-32]</sup>,认



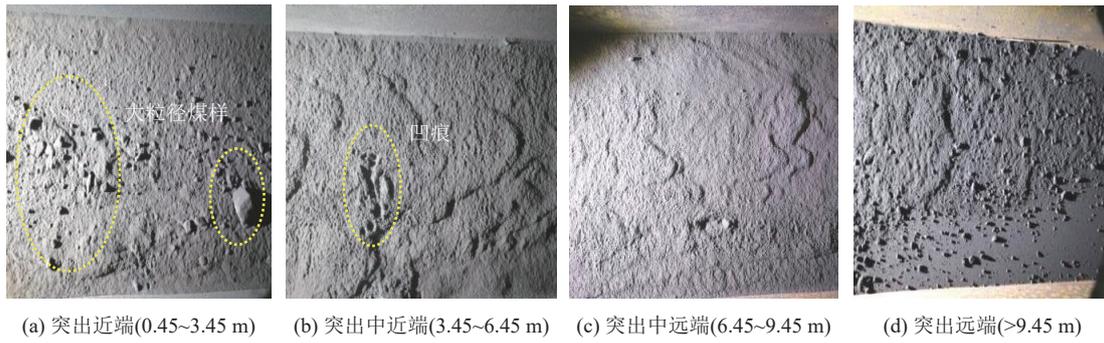


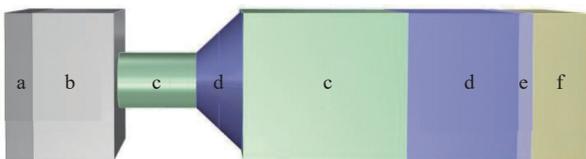
图 5 突出煤粉分布

Fig.5 Graphical representation of pulverized coal

为冲击力大于 0.019 6 MPa 具有危险性,因此研究不同埋深突出过程冲击力演化规律对保障井下工作人员安全具有重要意义。

### 2.1 煤-瓦斯两相流运移过程

试验开始前,模拟巷道内空气未受干扰,试验开始后,随着瓦斯压力加载,压力腔内气体逐渐聚集扰动,达到某一临界值时,突出弱面破裂,形成突出发动区。破碎煤体被高压气流从突出弱面抛出到模拟巷道内形成突出两相流,同时伴有爆炸声,运移的两相流气体为煤-瓦斯两相流运移区。两相流气体快速运移压缩模拟巷道内空气,使煤-瓦斯混合流与巷道空气分界面受到挤压,形成空气压缩区,导致其密度、压力、温度等突变,继续挤压前方相邻气体,使相邻气体压力升高,以此规律多次叠加传播<sup>[5,33]</sup>,最终形成冲击波。冲击波未波及到的地方为巷道未扰动区。突出孕育激发是间歇式多次发生的,突出发动后将多次重复上述过程。因此,形成的两相流运移区和空气压缩区不止一个(图 6)。



a—煤层未扰动区; b—突出发动区; c—煤-瓦斯两相流运移区;  
d—空气压缩区; e—冲击波; f—巷道未扰动区

图 6 煤-瓦斯两相流运移过程示意

Fig.6 Schematic of coal-gas flow migration process

综上,突出孕育激发过程形成了煤层未扰动区、突发动区、煤-瓦斯两相流运移区、空气压缩区、冲击波和巷道未扰动区 6 个部分。

### 2.2 不同埋深地应力条件冲击力演化特征

试验过程中瓦斯压力产生能量主要聚集在突出出口处,经突出发展进程消耗,巷道远端冲击力无法良好反映突出能量释放多少,故将冲击力传感器安装在距离突出出口 1 m 侧方位置。为深入研究冲击力演

化特征,试验选取不同模拟埋深对冲击力进行监测(图 7)。模拟埋深 800 m 时冲击力传感器失常,未监测到冲击力变化情况,其余埋深均正常监测,故不影响整体分析。

通过图 7 得到突出发生后同一测点埋深分别为 600、1 000、1 200、1 400、1 600 m 地应力条件冲击力演化规律如下:

1)埋深 600 ~ 1 000 m,冲击力变化规律为“上升→峰值→平稳波动→下降”,埋深 1 200 ~ 1 600 m,冲击力变化规律为“上升→峰值→平稳波动→下降→回升”。依据“深部”拟定情况和冲击力变化规律,认为平煤十一矿临界深度为埋深 1 000 m,临界深度是浅部开采到深部的过渡,该深度面临的地应力水平、瓦斯浓度和采动应力等更加复杂,因此突出过程冲击力也存在较大波动。埋深 1 200 ~ 1 600 m,随埋深增加,地应力逐渐增大,煤体破坏更为剧烈,由于气体压力选用逐级加载方式,使得突出发生时临界瓦斯压力减小,不足以携带全部破碎煤粉喷出,煤粉在突出出口处堆积,堵塞两相流运移通道。而压力腔内煤体仍在不断解吸气体,当气体压力再次升高至临界状态时,高压气体携带煤粉再次喷出,冲破堵塞通道,此时冲击力在巷道内回升,且仅在突出出口处明显,证实了突出是间歇多次发生。

2)冲击力峰值随临界瓦斯压力增大而增大,冲击力出现波峰次数随临界瓦斯压力增大而增加,冲击力峰值及波峰出现次数与瓦斯压力大小密切相关。试验条件下,随埋深增加,地应力增大,临界瓦斯压力减小,故在深部试验工况条件中高地应力低瓦斯压力更能阻碍冲击力在巷道内传播频率。

3)突出发生后模拟巷道内冲击力明显存在负压作用,埋深 1 200 ~ 1 600 m,负压作用随埋深增加而增大,导致突出结束后巷道末端煤粉收集袋被吸入巷道(图 3b)。埋深 1 400 m 和 1 600 m 负压作用产生的吸力远大于突出产生的冲击力,说明随着开采

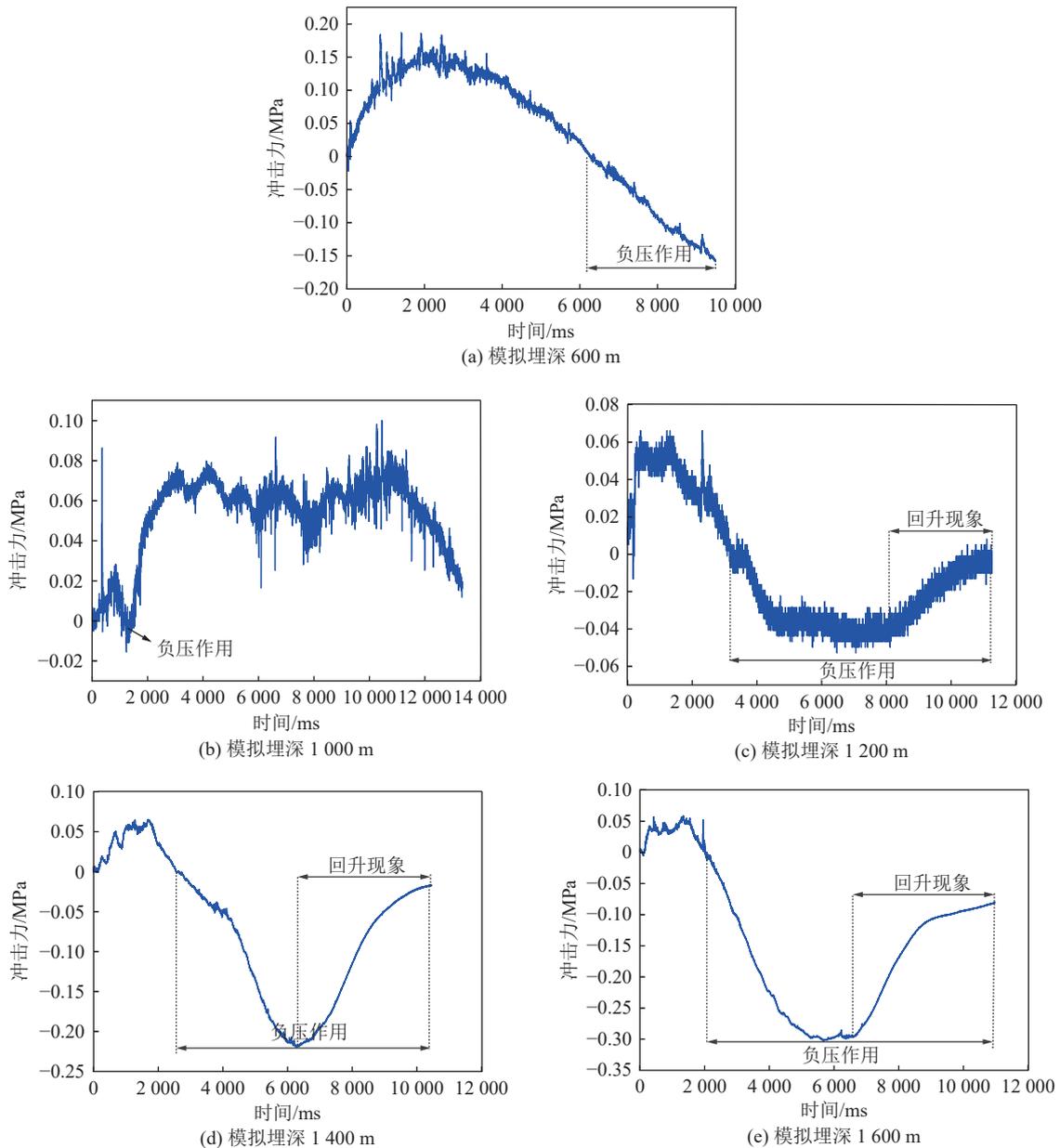


图7 不同埋深地应力条件下突出过程中冲击力演化规律

Fig.7 Law of impact force evolution during outburst under different buried depth stress conditions

深度增加,井下工作人员不仅面临着突出危险性,还面临着被吸入矿井淹埋的危险性,因此,研究不同埋深地应力条件下突出的差异性,并进行突出预测预警是十分重要的。

### 2.3 冲击力脉冲特征

冲击力传感器可用于监测突出两相流的冲击效应,突出过程中两相流冲击效应呈现一定的脉动规律<sup>[17]</sup>,将此规律定义为脉冲特征,产生此规律的主要原因是瓦斯压力的升高,由于突出是间歇多次发生,瓦斯压力不止一次升高,脉冲特征也就具有多发性。脉冲特征可用冲击力变化情况反映,根据两相流冲击力峰值特点,将脉冲特征分为2类:①冲击力峰值

点陡增,呈跃迁式发展,多以单峰形式存在,称为主要脉冲特征;②冲击力峰值点增量较小,多以多峰形式存在,称为次要脉冲特征。同一测点研究不同时期下冲击力脉冲特征,以埋深600 m为例,如图8所示。

试验过程中共出现了23次脉冲特征,其中包括8次主要脉冲特征( $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$ 、 $D_1$ 、 $E_1$ 、 $F$ 、 $G_1$ 、 $H$ )和15次次要脉冲特征( $A_2$ - $A_3$ 、 $B_2$ 、 $C_2$ - $C_3$ 、 $D_2$ - $D_4$ 、 $E_2$ 、 $G_2$ - $G_3$ 、 $H_2$ - $H_5$ )。不同脉冲阶段冲击力变化规律如图8所示:

1)首次脉冲阶段(图8a, 0~1397 ms):突出开始后,两相流喷出,冲击力陡增,865 ms时出现第一次

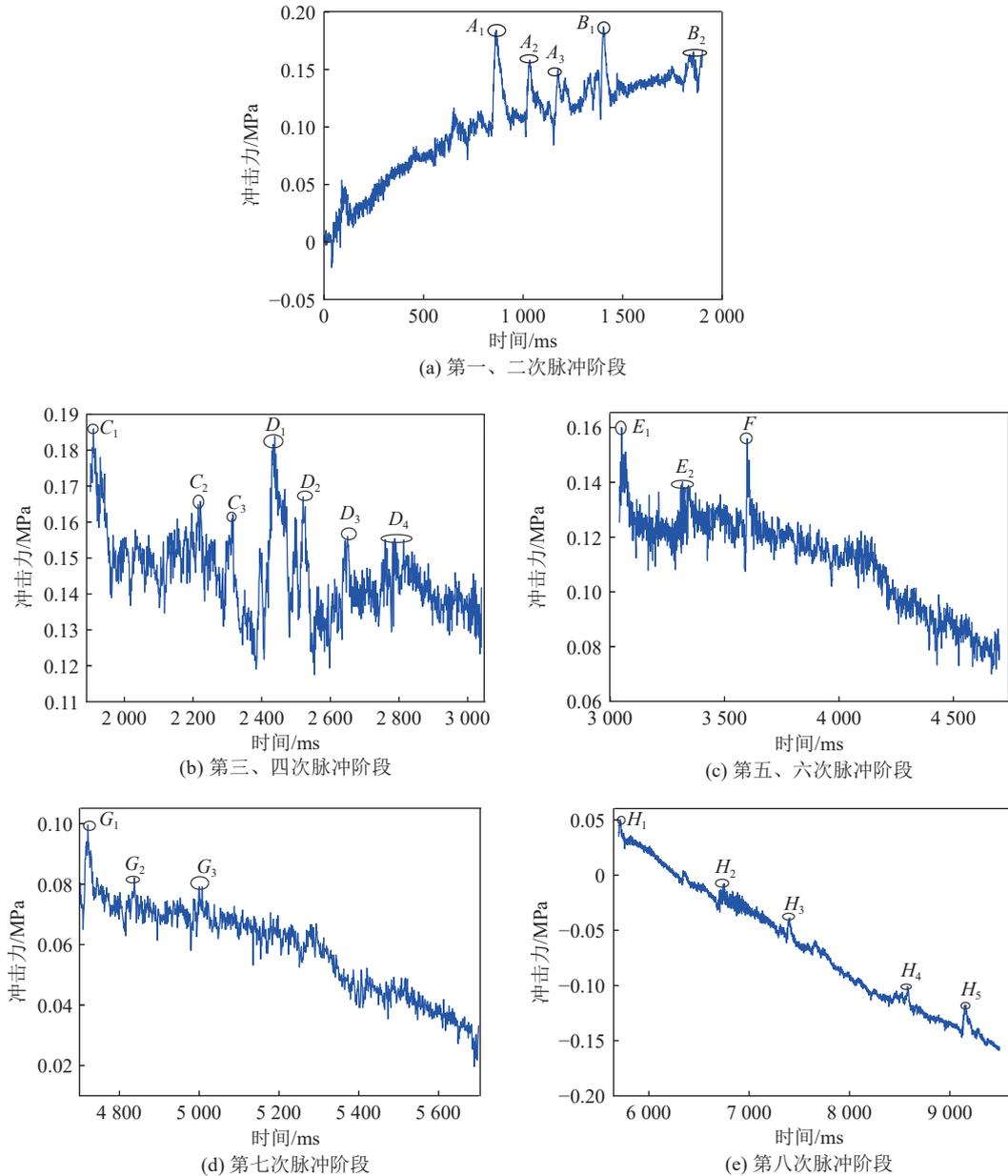


图8 脉冲特征各阶段随时间变化曲线

Fig.8 Periodic shock features of each stage changes with time

主要脉冲特征,最大值为 0.184 MPa,随后分别在 1 034、1 176 ms 出现 2 次次要脉冲特征,冲击力分别为 0.158、0.151 MPa;第二次脉冲阶段(图 8a, 1 398 ~ 1 901 ms):冲击力在 1 403 ms 达到最大值 0.187 MPa,1 837 ms 时出现一次次要脉冲特征,冲击力为 0.163 MPa;第三次脉冲阶段(图 8b, 1 902 ~ 2 400 ms):冲击力在 1 910 ms 达到最大值 0.186 MPa,此阶段出现 2 次次要脉冲特征,分别为 2 222 ms 的 0.167 MPa 和 2 316 ms 的 0.162 MPa;第四次脉冲阶段(图 8b, 2 401 ~ 3 040 ms):冲击力在 2 438 ms 达到最大值 0.184 MPa,此阶段出现 3 次次要脉冲特征,分别为 2 521 ms 的 0.167 MPa、2 650 ms 的 0.156

MPa 和 2 838 ms 的 0.152 MPa。这 4 个阶段冲击力最大值相差甚少,是因为压力腔内煤体在地应力和瓦斯压力综合作用下破坏,破碎煤体在瓦斯气体携带下迅速向突出弱面移动并喷出,由于设备“口小腔大”的特征,初始煤体破碎量大于喷出量,破碎煤体逐渐向突出口附近移动,准备喷出,导致两相流产生冲击力出现多个大小几乎相同的峰值点,证实了突出是间歇多次发生。同时,次要脉冲特征出现是因为主要脉冲无法将全部破碎煤粉喷出,出现了“堵塞-冲破”的情况,消耗了部分能量,因此冲击力逐渐减小。

2)第五次脉冲阶段(图 8c, 3 041 ~ 3 590 ms):冲

击力在 3 050 ms 时陡增至 0.160 MPa, 3 316 ms 时出现一次次要脉冲特征, 冲击力为 0.140 MPa; 第六次冲击阶段(图 8c, 3 591 ~ 4 700 ms): 此阶段只有主要脉冲特征, 冲击力在 3 599 ms 时升至最大值 0.156 MPa。这 2 个阶段能量释放率变小, 是因为压力腔内初始游离态气体不足以提供突出能量, 需要从煤体中不断解吸提供动力, 解吸气体向压力偏低的突出口聚集, 当积蓄能量达到一定值时, 瓦斯气体再次裹挟煤粉喷出, 此时突出已进入稳定发展阶段, 能量释放较为均匀。

3) 第七次脉冲阶段(图 8d, 4 701 ~ 5 700 ms): 4 721 ms 时主要脉冲冲击力为 0.1 MPa, 此阶段包含 2 次次要脉冲特征, 分别为 4 837 ms 的 0.082 MPa 和 5 000 ms 的 0.079 MPa。此阶段冲击力未出现回升或缓降, 一直处于匀速下降状态, 是因为压力腔内气体大量消耗, 煤体解吸气体减少, 无法快速到达突出口附近提供能量, 突出口附近与压力腔内部压差增大, 更深处煤体产生破裂, 新生裂隙导致原始应力区气体涌至突出口处, 发生突出现象。

4) 第八次脉冲阶段(图 8e, 5 700 ~ 9 495 ms): 5 713 ms 时发生主要脉冲, 冲击力为 0.05 MPa, 共发生 4 次次要脉冲特征, 此时已无法提供瓦斯气体, 冲击力处于快速降低阶段, 当压力腔内气体消耗殆尽时, 突出终止, 压力腔内剩余煤体不再突出, 巷道内残余微弱气流。

综上, 冲击力随脉冲特征出现而升高; 随突出发生发展, 脉冲各阶段冲击力逐渐减小, 经历时长逐渐增加, 所得结论与前人研究成果<sup>[17]</sup>一致。基于此, 将脉冲特征划分为高频阶段和低频阶段, 脉冲特征第一次出现到第五次结束为高频阶段, 每次持续时长为 499 ~ 640 ms, 冲击力在较高水平(0.140 ~ 0.187 MPa)波动, 考虑到冲击力受气相速度、固相速度、冲击到传感器上的固相颗粒质量大小等影响, 将气相速度与固相速度统称为速度, 固相颗粒质量大小用于反映强度, 说明该阶段两相流具有速度快、强度高等特征, 此时突出危险性高; 脉冲特征第六次到第八次为低频阶段, 每次持续时长均在 1 000 ms 以上, 冲击力处于快速下降状态, 直至突出终止, 说明该阶段两相流速度减缓, 此时突出危险性随突出发展进程逐渐减弱。

#### 2.4 瓦斯压力对冲击力演化特征的影响

突出是地应力和瓦斯压力综合作用产生的矿井瓦斯动力现象, 依据试验过程及现象可知, 地应力主要作用于型煤试件断裂破碎, 破碎煤粉在瓦斯气流

裹挟下向巷道内运动形成冲击力, 因此, 瓦斯压力对决定冲击力强弱起关键作用。

当瓦斯压力加载至临界值时, 发生突出, 煤-瓦斯两相流向巷道内喷出, 冲击力传感器监测到信号。图 9 为突出发生后冲击力主要脉冲峰值、次要脉冲峰值(下文统称为冲击力峰值)和瓦斯压力变换关系, 得到如下规律: 瓦斯压力变化趋势为“下降→平稳→陡降→平稳”, 冲击力峰值变化趋势为“陡增→波动→缓慢下降→快速下降后趋于平缓”。

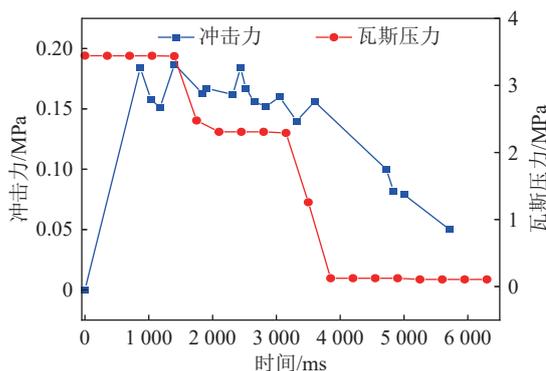


图 9 突出发生后冲击力和瓦斯压力对应关系

Fig.9 Highlight the correspondence between impact force and gas pressure

由图 9 可知, 瓦斯气体裹挟煤粉喷出, 瓦斯压力开始下降, 冲击力陡增至峰值; 当两相流通道拥堵, 瓦斯压力聚集在突出口附近, 出现间歇多次喷出现象, 冲击力峰值在较高水平波动; 压力腔内聚集的瓦斯气体逐渐喷出后, 煤体重新解吸气体需要一定时间, 腔体内瓦斯压力下降, 提供能量不足, 使得冲击力峰值开始缓慢下降; 当煤体不再解吸气体时, 压力腔内瓦斯压力趋近于大气压, 巷道内冲击力峰值快速下降后趋于平缓, 但仍存在微弱气流。

突出是能量耗散的过程, 突出启动前煤体内部能量为弹性应变能和瓦斯内能, 突出发生后能量主要转化为煤体破碎功和移动功<sup>[34]</sup>, 其中移动功是由瓦斯内能提供, 部分瓦斯内能转化成两相流动能, 使破碎煤粉和瓦斯气流从压力腔内喷出, 形成煤-瓦斯突出两相流冲击力沿巷道运移冲击<sup>[4]</sup>, 基于此从能量角度分析瓦斯压力与冲击力关系。

根据热力学第一定律和前人研究经验可知<sup>[35-36]</sup>, 突出过程能量方程可简化为

$$W_1 + W_2 = A_1 + A_2 \quad (2)$$

式中:  $W_1$  为弹性应变能, J;  $W_2$  为瓦斯膨胀能, J;  $A_1$  为煤体破碎功, J;  $A_2$  为煤体移动功, J。

弹性应变能计算公式<sup>[37-38]</sup>为:

$$W_1 = \frac{V}{2E} \left[ (\sigma_H^2 + \sigma_h^2 + \sigma_v^2) - 2\mu(\sigma_H\sigma_h + \sigma_H\sigma_v + \sigma_h\sigma_v) \right] \quad (3)$$

式中:  $V$ 为突出范围内煤体体积,  $\text{m}^3$ ;  $E$ 为煤体卸载模量,  $E = 326 \text{ MPa}$ ;  $\mu$ 为泊松比,  $\mu = 0.31$ ;  $\sigma_H$ 、 $\sigma_h$ 、 $\sigma_v$ 为煤体试验施加三向应力。计算可得  $W_1 = 39.23 \text{ J}$ 。

受地应力、瓦斯压力、温度等因素影响,突出过程为热力多变过程,为能够定量计算突出过程的瓦斯膨胀能,对能量转化过程中各能量间量级上差异有清楚认知,考虑到突出过程持续时间短,将突出按绝热过程处理<sup>[38-39]</sup>,对瓦斯膨胀能进行简单计算,游离瓦斯膨胀能计算公式<sup>[39-41]</sup>为

$$W_2' = \frac{10^3 m_2 K p_1}{n-1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (4)$$

$$K = \frac{1}{\rho_p} - \frac{1}{\rho_t} \quad (5)$$

吸附瓦斯膨胀能计算公式<sup>[41]</sup>为

$$W_2'' = 41.99 m_2' p_1' \quad (6)$$

瓦斯膨胀能计算公式为

$$W_2 = W_2' + W_2'' \quad (7)$$

式中:  $p_1$ 、 $p_2$ 为突出前后煤层瓦斯压力,  $\text{MPa}$ ;  $n$ 为瓦斯绝热指数,取值为 1.31;  $K$ 为煤体孔隙率,%;  $m_2$ 为煤体整体质量,  $\text{kg}$ ;  $\rho_p$ 为型煤视密度,计算得  $1.088 \text{ t/m}^3$ ;  $\rho_t$ 为型煤真密度,测试得  $1.133 \text{ t/m}^3$ ; 计算吸附瓦斯膨胀能的公式为无量经验公式,  $m_2'$ 、 $p_1'$ 取为无量纲数值。计算可得  $W_2 = 191251 \text{ J}$ 。

煤体所需破碎功<sup>[42-43]</sup>为

$$A_1 = \sum \left[ \frac{m_d}{\rho} 6W \sum \left( \gamma_i \frac{1}{d_i} \right) \right] \quad (8)$$

式中:  $m_d$ 为该区域突出煤粉质量,  $\text{kg}$ ;  $\rho$ 为型煤密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $W$ 为建立单位新表面积所消耗能量,  $W = 0.2 \text{ J/cm}^2$ ;  $\gamma_i$ 为该粒径颗粒质量比;  $d_i$ 为该粒径颗粒直径,  $\text{m}$ 。计算可得煤体破碎功  $A_1 = 112585 \text{ J}$ 。

煤体移动功<sup>[41]</sup>为

$$A_2 = \frac{1}{2} m_1 v^2 \quad (9)$$

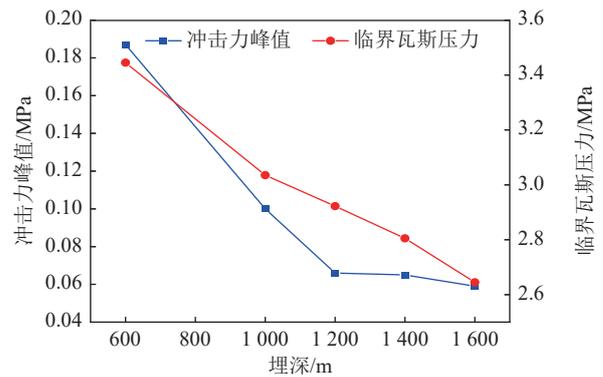
式中:  $m_1$ 为突出煤粉质量,  $\text{kg}$ ;  $v$ 为突出煤粉瞬时速度,  $\text{m/s}$ 。计算可得  $A_2 = 1118 \text{ J}$ 。

瓦斯膨胀能  $W_2$ 为弹性应变能  $W_1$ 的 4875 倍,满足前人<sup>[35,40]</sup>提出的突出过程中瓦斯膨胀能释放量比弹性应变能释放量大 3~4 个能量级,说明突出过程能量主要来源于瓦斯内能。煤体移动功  $A_2$ 为 1118 J 是弹性应变能  $W_1$ 的 28.5 倍,瓦斯膨胀能  $W_2$ 为煤体移动功  $A_2$ 的 171 倍,说明弹性应变能主要在前期煤体

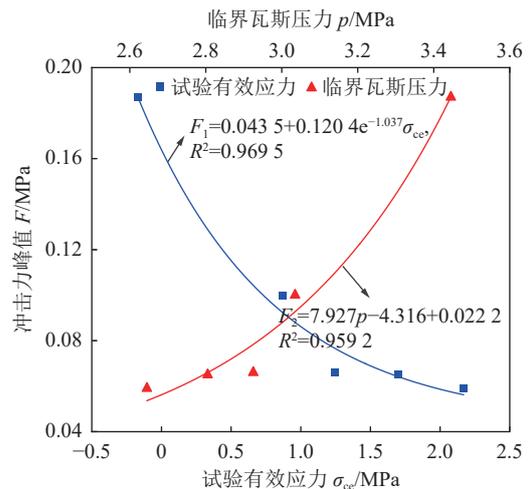
产生裂隙破坏起作用,煤-瓦斯两相流动能主要由瓦斯内能提供,瓦斯内能决定巷道内两相流冲击力强弱。

依据瓦斯压力和冲击力对应关系变化过程以及能量转换关系可知,瓦斯内能为两相流冲击力提供能量,部分瓦斯内能转化为冲击动能,即部分瓦斯压力转化成冲击力。

试验过程中瓦斯压力作为诱导突出发生的条件,与实际采深下瓦斯压力赋存情况存在差异,因此,采用临界瓦斯压力(突出瞬时的瓦斯压力)对冲击力演化规律进行分析。图 10a 为不同埋深地应力条件下冲击力峰值和临界瓦斯压力变化关系,冲击力峰值和临界瓦斯压力变化趋势一致,均随开采深度增加而减小,冲击力峰值下降幅度分别为 46.52%、34%、1.52%、9.23%,临界瓦斯压力下降幅度分别为 11.9%、3.62%、4.1%、5.7%。



(a) 冲击力峰值-临界瓦斯压力-埋深关系



(b) 试验有效应力-临界瓦斯压力-冲击力峰值关系

图 10 冲击力峰值变化

Fig.10 Change of impact force peak

随开采深度增加,煤体受地应力影响增大,破碎变形程度增加,此时瓦斯压力出现微小变动就会引发突出发生,深部实际工况中,地应力与瓦斯压力均

随埋深增大而增大,因而深部更易发生突出。

图10b为冲击力峰值随试验有效应力和临界瓦斯压力变化规律拟合曲线,冲击力峰值与试验有效应力和临界瓦斯压力均呈指数变化关系,表达式分别为

$$F_1 = 0.0435 + 0.1204 e^{-1.037\sigma_{ce}} \quad (10)$$

$$F_2 = 7.927P^{-4.316} + 0.0222 \quad (11)$$

拟合系数分别为0.9695, 0.9592。

试验结果表明,冲击力峰值随试验有效应力增大而减小,随临界瓦斯压力增大而增大,冲击力能量主要来源于瓦斯内能,瓦斯压力对冲击力的影响大于地应力。

试验有效应力由瓦斯压力和地应力组成,埋深增加,试验有效应力增大,地应力和瓦斯压力在突出孕育→激发过程中分别起破坏和抛出作用,煤体受高地应力作用发生破坏,瓦斯压力加载使瓦斯气流裹挟煤粉抛出,形成两相流冲击力。因此,在现场开采过程中必须实时监测瓦斯涌出量,避免达到煤体破裂所需临界值,产生强大的冲击力,为保障井下工作人员与设备安全,应尽早进行抽采防护治理。

## 2.5 冲击力与声发射演化特性关系

煤体破裂变形时内部集聚能量被瞬时释放,产生的弹性波现象称为声发射。研究表明声发射信号能够很好的表征煤体破裂程度,与煤与瓦斯突出孕育过程各阶段具有对应关系。因此,将冲击力演化特征与声发射信号关联分析,能够更好地反映煤体破裂程度及其带来的危害性。

图11为埋深600m时突出发生后冲击力及声发射振铃计数和累计声发射振铃计数关系。

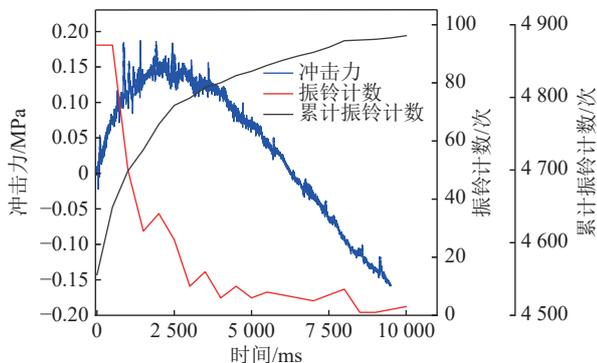


图11 埋深600m地应力条件下冲击力和声发射振铃计数变化关系

Fig.11 Change relationship between impact force and AE ringing count under buried depth of 600 m

冲击力变化趋势为“上升→峰值→高水平波动→下降”,声发射振铃计数变化趋势为“陡降→缓慢下

降→平稳”,累计声发射振铃计数变化趋势为“快速上升→缓慢上升→平稳”,可以发现:

1) 声发射振铃计数峰值点早于冲击力峰值点,是因为声发射信号监测腔体内煤体破裂情况,冲击力监测巷道内两相流运移情况,煤体破裂后在瓦斯压力裹挟下喷出,在巷道内形成两相流冲击力。

2) 冲击力出现脉冲特征时,声发射振铃计数和累计声发射振铃计数也会出现相应波动,说明冲击力与声发射信号具有同步监测效果,都可以反映出发生后煤体破裂情况,实现各项监测数据互相验证,证实了试验可靠性。

3) 声发射振铃计数变化趋势在减小过程中未直接降至最低值,出现多次明显回升,是因为脉冲特征出现时,煤体内聚集大量能量,产生较大破坏,声发射振铃计数监测到破坏发生,出现小范围波动。并不是每次脉冲特征出现都会伴随声发射振铃计数陡增,当突出发生到后期时能量聚集较少,脉冲特征带来影响较小,或出现次要脉冲特征,煤-瓦斯两相流突出冲击不够明显,声发射信号无法监测,不会出现陡增。因此,声发射振铃计数出现陡增时,必然伴随着脉冲特征出现,但脉冲特征出现不一定对应声发射振铃计数陡增。

## 3 结 论

1) 突出两相流包括冲击气流和煤粉流,煤粉流决定突出煤粉分选特征,冲击气流决定冲击力大小。随模拟埋深增加,冲击力演化特征愈发复杂,突出危险性增加。

2) 冲击力传播具有明显的脉冲特征,冲击力随脉冲特征出现而升高,脉冲特征划分为高频阶段和低频阶段,高频阶段煤-瓦斯两相流速度快、强度高、突出危险性强;低频阶段危险性随突出发展进程逐渐减弱。

3) 突出是能量耗散的过程,两相流动能主要由瓦斯内能提供,部分瓦斯压力转化成冲击力,冲击力峰值随试验有效应力增大而减小,随临界瓦斯压力增大而增大,冲击力受瓦斯压力影响大于地应力,冲击力强弱主要由瓦斯压力决定。

4) 突出开始时,声发射振铃计数峰值点早于冲击力峰值点,声发射信号更早监测到突出危险性;突出开始后,冲击力与声发射信号具有同步监测效果,但冲击力更能具象反映煤体破裂情况,声发射振铃计数出现陡增时,伴随脉冲特征出现,但脉冲特征出现不一定对应声发射振铃计数陡增。

## 参考文献(References):

- [1] 袁 亮. 我国煤矿安全发展战略研究[J]. 中国煤炭, 2021, 47(6): 1-6.  
YUAN Liang. China coal mine safety development strategy research[J]. China Coal, 2021, 47(6): 1-6.
- [2] 唐巨鹏, 任凌冉, 潘一山, 等. 高地应力条件煤与瓦斯突出模拟试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 113-121.  
TANG Jupeng, REN Lingran, PAN Yishan, *et al.* Simulation test of coal and gas outburst under high ground stress[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 113-121.
- [3] 许 江, 程 亮, 彭守建, 等. 煤与瓦斯突出冲击气流形成及传播规律[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 333-347.  
XU Jiang, CHENG Liang, PENG Shoujian, *et al.* The formation and propagation law of impact airflow in coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 333-347.
- [4] 许 江, 程 亮, 周 斌, 等. 突出过程中煤-瓦斯两相流迁移的物理模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 1945-1953.  
XU Jiang, CHENG Liang, ZHOU Bin, *et al.* Physical simulation of coal-gas two-phase flow migration during outburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 1945-1953.
- [5] 程五一, 刘晓宇, 王魁军, 等. 煤与瓦斯突出冲击波阵面传播规律的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 57-60.  
CHENG Wuyi, LIU Xiaoyu, WANG Kuijun, *et al.* Study on the propagation law of coal and gas outburst shock wave front[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(1): 57-60.
- [6] 吴爱军, 蒋承林. 煤与瓦斯突出冲击波传播规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(6): 852-857.  
WU Aijun, JIANG Chenglin. Study on shock wave propagation law of coal and gas outburst[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(6): 852-857.
- [7] 吴爱军, 蒋承林, 唐 俊. 瓦斯突出作用下煤岩体中冲击波传播规律的研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1644-1648.  
WU Aijun, JIANG Chenglin, TANG Jun. Study on the propagation law of shock wave in coal and rock mass under gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1644-1648.
- [8] 张建方, 王 凯, 韦彩平. 煤与瓦斯突出冲击波的形成与传播规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 67-71.  
ZHANG Jianfang, WANG Kai, WEI Caiping. Study on the formation and propagation law of shock wave of coal and gas outburst[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 67-71.
- [9] 苗法田, 孙东玲, 胡千庭. 煤与瓦斯突出冲击波的形成机理[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 367-372.  
MIAO Fatian, SUN Dongling, HU Qianting. Formation mechanism of shock wave in coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 367-372.
- [10] ZHOU Aitao, WANG Kai, WU Zeqi. Propagation law of shock waves and gas flow in cross roadway caused by coal and gas outburst[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2014, 24(1): 23-29.
- [11] ZHOU Aitao, ZHANG Meng, WANG Kai, *et al.* Rapid gas desorption and its impact on gas-coal outbursts as two-phase flows[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 150: 478-488.
- [12] ZHOU Aitao, ZHANG Meng, WANG Kai, *et al.* Quantitative study on gas dynamic characteristics of two-phase gas-solid flow in coal and gas outbursts[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 139.
- [13] 刘 义, 石必明, 张 煜, 等. 煤与瓦斯突出冲击气流传播特征研究[J]. 煤炭技术, 2021, 40(11): 94-96.  
LIU Yi, SHI Biming, ZHANG Yu, *et al.* Study on the propagation characteristics of coal and gas outburst impact airflow[J]. Coal Technology, 2021, 40(11): 94-96.
- [14] 刘 义, 石必明, 张 煜, 等. 煤与瓦斯突出两相流传播特性实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(7): 91-96.  
LIU Yi, SHI Biming, ZHANG Yu, *et al.* Experimental study on two-phase flow propagation characteristics of coal and gas outburst[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(7): 91-96.
- [15] 曹 偲, 孙海涛, 戴林超, 等. 煤与瓦斯突出动力效应的模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 113-120, 154.  
CAO Ji, SUN Haitao, DAI Linchao, *et al.* Simulation study on dynamic effect of coal and gas outburst[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 113-120, 154.
- [16] 孙东玲, 曹 偲, 苗法田, 等. 突出煤-瓦斯在巷道内的迁移规律[J]. 煤炭学报, 2018, 43(10): 2773-2779.  
SUN Dongling, CAO Ji, MIAO Fatian, *et al.* The migration law of outburst coal-gas in roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10): 2773-2779.
- [17] 许 江, 耿加波, 彭守建, 等. 煤与瓦斯突出脉动式发展过程的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 145-154.  
XU Jiang, GENG Jabo, PENG Shoujian, *et al.* Experimental study on pulsating development process of coal and gas outburst[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 145-154.
- [18] 耿加波. 煤与瓦斯突出灾变时空演化及其煤-瓦斯两相流迁移特性物理模拟试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.  
GENG Jiabo. Physical simulation experiment on spatial-temporal evolution of coal and gas outburst disaster and migration characteristics of coal-gas two-phase flow[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [19] 程 亮, 许 江, 周 斌, 等. 不同瓦斯压力对煤与瓦斯突出两相流传播规律的影响研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2619-2626.  
CHENG Liang, XU Jiang, ZHOU Bin, *et al.* Study on the influence of different gas pressure on the two-phase flow propagation law of coal and gas outburst[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(8): 2619-2626.
- [20] 周 斌, 许 江, 彭守建, 等. 突出过程中煤层及巷道多物理场参数动态响应[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1385-1397.  
ZHOU Bin, XU Jiang, PENG Shoujian, *et al.* Dynamic response of multi-physical field parameters of coal seam and roadway during outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1385-1397.
- [21] 唐巨鹏, 张 昕, 潘一山, 等. 深部巷道煤与瓦斯突出及冲击演化特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 16(5): 1-12.  
TANG Jupeng, ZHANG Xin, PAN Yishan, *et al.* Experimental study on coal and gas outburst and impact evolution characteristics of deep roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 16(5): 1-12.
- [22] 李 铁, 蔡美峰, 纪洪广. 抚顺煤田深部开采临界深度的定量判

- 别[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(3): 363-367.
- LI Tie, CAI Meifeng, JI Hongguang. Quantitative determination of critical depth of deep mining in Fushun coalfield[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(3): 363-367.
- [23] 梁政国. 煤矿山深浅部开采界线划分问题[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2001, 20(4): 554-556.
- LIANG Zhengguo. Division of mining boundary in deep and shallow coal mines[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2001, 20(4): 554-556.
- [24] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深部开采的定量界定与分析[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(1): 1-10.
- XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, *et al.* Quantitative definition and analysis of deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 1-10.
- [25] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(16): 2854-2858.
- HE Manchao. Deep concept system and engineering evaluation index[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2854-2858.
- [26] 胡社荣, 戚春前, 赵胜利, 等. 我国深部矿井分类及其临界深度探讨[J]. *煤炭科学技术*, 2010, 38(7): 10-13, 43.
- HU Sherong, QI Chunqian, ZHAO Shengli, *et al.* Classification and critical depth of deep mines in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2010, 38(7): 10-13, 43.
- [27] 张庆贺, 王汉鹏, 李术才, 等. 煤与瓦斯突出物理模拟试验中甲烷相似气体的探索[J]. *岩土力学*, 2017, 38(2): 479-486.
- ZHANG Qinghe, WANG Hanpeng, LI Shucai, *et al.* Exploration of methane similar gas in physical simulation test of coal and gas outburst[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(2): 479-486.
- [28] 李新平, 汪斌, 周桂龙. 我国大陆实测深部地应力分布规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(S1): 2875-2880.
- LI Xiping, WANG Bin, ZHOU Guilong. Research on the distribution law of measured deep crustal stress in mainland China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(S1): 2875-2880.
- [29] 许江, 叶桂兵, 李波波, 等. 不同黏结剂配比条件下型煤力学及渗透特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(1): 104-110.
- XU Jiang, YE Guibing, LI Bobo, *et al.* Experimental study on briquette mechanics and permeability characteristics under different binder ratios[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(1): 104-110.
- [30] 唐巨鹏, 潘一山, 杨森林. 三维应力下煤与瓦斯突出模拟试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(5): 960-965.
- TANG Jupeng, PAN Yishan, YANG Shenlin. Simulation test of coal and gas outburst under three-dimensional stress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(5): 960-965.
- [31] 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 China Coal Society*, 2015, 32(6): 1037-1042.
- [32] LIU Hongtao, GUO Linfeng, ZHAO Xidong. Expansionary evolution characteristics of plastic zone in rock and coal mass ahead of excavation face and the mechanism of coal and gas outburst[J]. *Energies*, 2020, 13(4): 984.
- [33] 宋选民, 朱德福, 王仲伦, 等. 我国煤矿综放开采40年: 理论与技术装备研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(3): 1-29.
- SONG Xuanmin, ZHU Defu, WANG Zhonglun, *et al.* Advances on longwall fully-mechanized top-coal caving mining technology in China during past 40 years: theory, equipment and approach[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(3): 1-29.
- [34] 熊阳涛, 黄滚, 罗甲渊, 等. 煤与瓦斯突出能量耗散理论分析与试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S2): 3694-3702.
- XIONG Yangtao, HUANG Gun, LUO Jiayuan, *et al.* Theoretical analysis and experimental study on energy dissipation of coal and gas outburst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S2): 3694-3702.
- [35] 王刚, 武猛猛, 王海洋, 等. 基于能量平衡模型的煤与瓦斯突出影响因素的灵敏度分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(2): 238-248.
- WANG Gang, WU Mengmeng, WANG Hai, *et al.* Sensitivity analysis of influencing factors of coal and gas outburst based on energy balance model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(2): 238-248.
- [36] 胡千庭, 文光才. 煤与瓦斯突出的力学作用机理[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [37] 鲜学福, 许江. 煤与瓦斯突出潜在区(带)预测[J]. *中国工程科学*, 2001, 3(2): 39-46.
- XIAN Xuefu, XU Jiang. Prediction of potential coal and gas outburst zones[J]. *Strategic Study of CAE*, 2001, 3(2): 39-46.
- [38] 魏风清, 史广山, 张铁岗. 基于瓦斯膨胀能的煤与瓦斯突出预测指标研究[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(S1): 95-99.
- WEI Fengqing, SHI Guangshan, ZHANG Tiegang, *et al.* Study on coal and gas outburst prediction indexes base on gas expansion energy[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(S1): 95-99.
- [39] 李成武, 付帅, 解北京, 等. 煤与瓦斯突出能量预测模型及其在平煤矿区的应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(2): 231-239.
- LI Chengwu, FU Shuai, XIE Beijing, *et al.* Establishment of the prediction model of coal and gas outburst energy and its application in Pingdingshan coal mining area[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2018, 47(2): 231-239.
- [40] XU L, JIANG C. Initial desorption characterization of methane and carbon dioxide in coal and its influence on coal and gas outburst risk[J]. *Fuel*, 2017, 203: 700-706.
- [41] 王伟, 王汉鹏, 张冰, 等. 煤与瓦斯突出多因素影响规律与能量判据实验研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(4): 582-590.
- WANG Wei, WANG Hanpeng, ZHANG Bing, *et al.* Experimental study on multi-factor influence law and energy criterion of coal and gas outburst[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2022, 43(4): 582-590.
- [42] 徐小荷, 余静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [43] 罗甲渊. 煤与瓦斯突出的能量源及能量耗散机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- LUO Jiayuan. Energy source and energy dissipation mechanism of coal and gas outburst[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.