



移动扫码阅读

刘国磊,王泽东,曲效成,等.低透气性煤层工作面煤与瓦斯突出灾害中心体致灾机理[J].煤炭科学技术,2022,50(10):76-85.

LIU Guolei, WANG Zedong, QU Xiaocheng, et al. Mechanism of coal and gas outburst disaster in low permeability coal seam mining face[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(10): 76-85.

低透气性煤层工作面煤与瓦斯突出 灾害中心体致灾机理

刘国磊¹,王泽东¹,曲效成²,崔 崙¹,尹永明³

(1.山东理工大学 资源与环境工程学院,山东 淄博 255000;2 北京安科兴业科技股份有限公司,北京 100083;

3.中国安全生产科学研究院 矿山安全技术研究所,北京 100012)

摘 要:为有效揭示低透气性煤层回采工作面煤与瓦斯突出机理,提高监测和防治的针对性与有效性,基于瓦斯赋存状态和开采扰动等因素建立了突出灾害中心体力学模型,通过理论分析、相似模拟试验和现场试验的方法,验证了该理论假设,揭示了中心体致灾机理,并验证了微震与突出危险的关联性。相似模拟试验结果显示:在煤壁距中心体 60~20 m 时中心体逐渐孕育和发展,至 20~10 m 时中心体突出风险急剧升高,该范围即宏观的中心体突出临界区域,是重点防治时期和位置,该结论在寺家庄矿 15112 回采工作面基于钻屑瓦斯解吸指标 K_1 值的试验中得到验证,突出灾害中心体致灾机理假设也得到验证。结果表明:吸附瓦斯在节理、裂隙等非均质性的孔洞中由于局部煤体破碎且渗透性升高而大量解吸为游离瓦斯,与煤粉混合成具有高能量的气固两相流体,形成突出灾害中心体;中心体在低透气性煤层中是客观性存在的,且赋存于多个位置,采动效应提供了外在动力,导致煤层应力环境和瓦斯状态发生变化,易诱发中心体突出;从中心体致灾的角度得到微震与突出危险间具有较好的拟合关系,说明微震是有效的突出危险监测手段,为进一步提高突出监测及防治的针对性和有效性提供了方向。

关键词:低透气性煤层;煤与瓦斯突出;突出灾害中心体;致灾机理

中图分类号:TD713 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2022)10-0076-10

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

LIU Guolei¹, WANG Zedong¹, QU Xiaocheng², CUI Yu¹, YIN Yongming³

(1.School of Resource and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255030, China; 2.Beijing Anke Xingye Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China; 3.Institute of Mine Safety Technology, China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to effectively reveal the mechanism of coal and gas outburst in the working face of low permeability coal seam, and improve the pertinence and effectiveness of monitoring and prevention, the central mechanical model of outburst disaster was established based on factors such as gas occurrence state and mining disturbance. Similar simulation experiments and field experiments have verified the theoretical hypothesis, the disaster-causing mechanism of central body was revealed, and the correlations between microseismic and outburst hazards was verified. The results of similar simulation experiments show that the centrosome gradually inoculates and develops when the coal wall is about 60-20 m away from the central body, and the risk of central body outburst increases sharply at 20-10 m. This range is the macroscopic critical mass of central body outburst, which is the key prevention period and position. This conclusion has been verified in the test of No.15112 working face of Sijiazhuang Mine based on the K_1 value of drilling cuttings gas desorption index, and the

收稿日期:2022-01-03 **责任编辑:**朱恩光 **DOI:**10.13199/j.cnki.cst.2021-1055

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51904178);山东省自然科学基金博士基金资助项目(ZR2018BEE009);中国博士后科学基金上资助项目(2018M632677)

作者简介:刘国磊(1985—),男,山东淄博人,副教授,博士。E-mail:liuguolei2003@163.com

hypothesis of disaster-causing mechanism of outburst disaster center body has also been verified. The results show that the adsorbed gas is largely desorbed into free gas due to local fragmentation and the increase of permeability in heterogeneous holes such as joints and cracks, and mixed with pulverized coal to form a gas-solid two-phase fluid with high energy, forming a outburst disaster center. The center body exists objectively in the low permeability coal seam, and occurs in multiple locations. The mining effect provides external driving force, which leads to changes in the stress environment and gas state of the coal seam, and is easy to induce the center body outburst. From the perspective of central body hazard, there is a good fitting relationship between microseismic and outburst danger, indicating that microseismic is an effective means of outburst danger monitoring, which provides a direction for further improving the pertinence and effectiveness of outburst monitoring and prevention.

Key words: low permeability coal seam; coal and gas outburst; outburst disaster center; disaster mechanism

0 引言

煤与瓦斯突出(以下简称“突出”)是低透气性突出煤层开采最严重的灾害之一^[1]。近年来随着研究的深入^[2-4],突出灾害防治技术快速发展,事故率也呈下降趋势,但由于影响因素复杂,突出机理未完全揭示,特别是低透气性煤层,存在抽采效率低、监测手段单一、防治工程量巨大等问题^[5],突出灾害仍是煤矿企业面临的重大安全问题之一^[6]。

当前普遍认为煤与瓦斯突出是在地应力、瓦斯压力、煤岩物理力学性质综合作用下的结果^[7]。近年来,国内外专家学者在突出机理、实验室试验、监测预警等方面开展了大量研究工作。王汉鹏等^[8]通过模拟不同强度型煤在瞬间揭露试验中的突出表现进行分析研究发现,吸附气体含量越大,气体突出时其膨胀能越大,从而导致突出强度也越大;李冬等^[9]利用基于遗传算法的支持向量机网络、概率神经网络反演等计算方法,综合瓦斯含量、构造煤分布及煤层顶板岩性 3 个因素,建立了瓦斯突出危险区域综合预测方法;许江等^[10]利用多场耦合煤矿动力灾害大型模拟试验系统开展了不同应力集中系数条件下的突出物理模拟试验,监测了两相流冲击力、突出孔洞内气压及煤体声发射信号,得到了突出试验中脉动式发展过程特征;彭守建等^[11]利用突出模拟试验台在不同瓦斯、应力、煤体强度条件下进行了物理模拟试验,发现在突出过程中的瓦斯压力时空演化特征与煤体的破坏直接相关,而煤体的破坏又同时受到地应力和瓦斯的双重影响;唐巨鹏等^[12]利用真 3 轴突出模拟试验装置开展突出相似模拟试验,基于声发射能量分析进行了突出前兆特征研究,表明突出过程经历了孕育前期、孕育后期、激发-发展和终止 4 个阶段;郑仰峰等^[13]基于应力转移目的提出了穿层注浆加固与水力冲孔强弱耦合防突方法,并采用数值模拟、现场试验方法进行了防突措施可行性研究。上述研究在突出机理等问题上进行了积极探索,得到了有益成果,但上述研究过程中,一般

将煤和瓦斯视为理想状态,未充分重视开采活动对突出的影响。虽有部分学者指出采掘扰动对突出有重要影响,如朱权洁等^[14]研究发现,采动影响造成局部区域的应力迁移向地质异常区域,使这些区域更容易具备突出或冲击的条件和可能性;文献[15-17]也通过试验研究指出,采动效应是诱导突出的外在动力源,是发生突出的必要条件,但上述研究未充分揭示开采扰动的突出影响机理。

开采扰动是诱发突出的一个关键因素,提出“突出灾害中心体”致灾假设,并重点分析开采活动对突出的影响关系,采用理论分析、相似模拟试验与工程试验等方法对低透气性煤层回采工作面的突出过程、特征和机理进行研究,以期促进煤与瓦斯突出理论、实验方法的进步和发展,为防治突出灾害提供依据和指导。

1 突出灾害中心体致灾机理

1.1 提出假设

瓦斯在煤体内分散分布,局部相对富集,特别是在低透气性煤层中局部富集情况更加显著,为方便研究,将易突出的瓦斯聚集区具象化为突出灾害中心体,进而提出相应突出机理假设。低透气性煤层突出灾害中心体是在原始地应力作用下,吸附瓦斯在节理、裂隙等非均质性的孔洞中由于局部煤体破碎且渗透性升高而大量解吸,与煤粉形成的气固两相流体,其具有高瓦斯压力的特征。

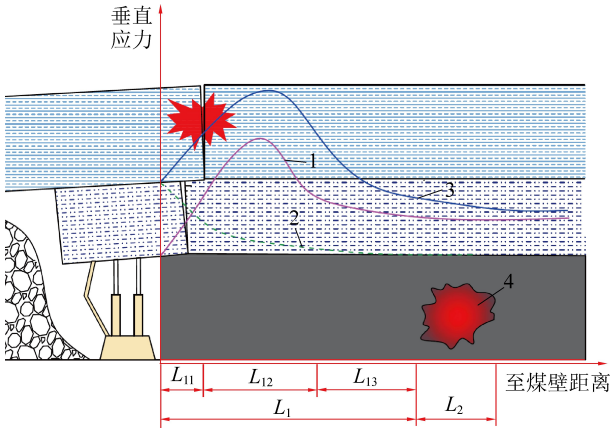
在综合作用假设等理论基础上,建立突出灾害中心体致灾模型(图 1),从地应力、瓦斯压力、煤岩物理力学性质 3 方面揭示低透气性煤层回采工作面突出机理。

1.2 突出灾害中心体的形成条件

1.2.1 地应力

在当前采深下,低透气性煤层内瓦斯以吸附态为主,游离态瓦斯仅占 10%~20%^[18]。但瓦斯在节理、裂隙等孔洞内以游离态赋存,且在一定条件下,吸附瓦斯可解吸为游离瓦斯,瓦斯穿过基质和微孔

向外扩散并通过孔隙渗透过程如图 2 所示。



1—超前支承压力;2—扰动应力;3—超前支承压力与扰动应力叠加;
4—突出灾害中心体; L_1 —中心体与煤壁间的突出阻碍区宽度;
 L_2 —中心体宽度; L_{11} 、 L_{12} 、 L_{13} —根据突出阻碍区内超前支承压力分布特征,划分卸压阻碍区 L_{11} 、峰值应力阻碍区 L_{12} 和原岩应力阻碍区 L_{13}

图 1 回采工作面突出灾害中心体力学模型
Fig.1 Mechanical model of outburst disaster center in working face

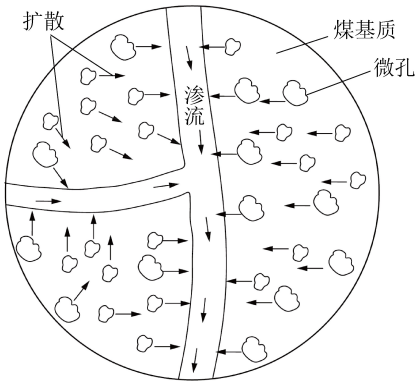


图 2 瓦斯由煤内表面解吸穿过微孔、煤基质到裂隙过程^[14]
Fig.2 Process of gas desorption from coal inner surface through micropores, coal matrix and fractures^[14]

地应力则是中心体形成的主导因素。在地应力场的演化过程中,自重应力和构造应力等综合作用,剪切破坏在煤体内广泛发生。在局部高地应力作用下,突出中心煤体破碎,渗透性增大,吸附瓦斯大量解吸并向破坏区扩散,形成了瓦斯富集区。这为中心体的形成提供了物质和应力条件。

1.2.2 煤体渗透性

一方面,煤体越破碎,孔隙率越大,其解吸放散瓦斯初速度增大^[19],裂隙内游离瓦斯量越大,中心体越易形成。另一方面,地质构造在煤层中普遍存在,煤层应力环境受其影响较大,由于煤的割理系统在构造应力作用下发生变化,部分突出煤层通常有着一个显著特征是在原位条件下的低渗透性,低透气性煤体会形成对瓦斯流动的天然封堵,这使得

局部区域易出现瓦斯富集,而随着开采深度的增加,这种现象愈加明显^[20]。

由于低渗透性煤体的阻碍作用,瓦斯不能流出,只能在煤体破坏区积聚,而在瓦斯压力作用下,破碎的煤粒间失去机械联系,形成分散相,成为固气混合相流体,在突出阻碍区的作用下,该流体内能量不易释放并在该区不断累积,从而形成具有高能量的突出灾害中心体。

1.2.3 开采扰动应力

当煤层开采时,工作面超前支承压力与扰动应力叠加,在面前一定范围煤层内形成高应力环境,这会诱导煤中瓦斯的解吸行为^[21],促进游离瓦斯扩散,而因低渗透性煤体的阻碍作用,突出中心体压力升高,能量进一步积累。同时开采扰动产生作用于破坏区的非周期性循环扰动载荷,煤体进而拉伸破坏,并逐步分解为粉粒,这也促进了更多中心体的形成或规模扩大。

在开采扰动下,动静载叠加影响也使得顶底板附近的煤岩产生裂隙,煤层局部透气性增加,游离瓦斯在破碎区积累,同样受煤体阻碍,不易排放到采掘空间而不断汇集,煤体破碎成煤粒后,在高瓦斯压力作用下,其处于悬浮状态,与瓦斯共同形成固气混合突出灾害中心体,其具有对外的膨胀力。

开采扰动改变煤体应力相对平衡状态,造成局部应力集中,促进中心体孕育和发展;采动应力改变煤体内部平衡,煤体在采动应力与地应力和中心体综合作用下发生动态调整,随工作面持续推进,突出阻碍区煤体在多因素综合作用下承载能力逐渐下降,在某—临界点煤体失稳冲出,中心体发生突出。因此,采动效应是中心体突出的外在动力源,理清开采扰动诱发中心体突出的作用机理对灾害防治具有重要意义。

1.3 回采工作面煤与瓦斯突出灾害中心体致灾机理

如图 1 所示,当突出阻碍区 L_1 很大时,一般情况下开采扰动应力还未传输至突出危险区即已衰减耗尽,因此中心体不受开采扰动应力的影响。随工作面推进, L_1 越来越小,当扰动前移到达中心体时,危险区内煤体在原岩应力和扰动应力共同作用下逐渐破碎,扩容膨胀,对其周边产生膨胀力的作用,同时煤体内瓦斯不断解吸膨胀,由于支承压力峰值区内煤岩被压缩,煤层透气性差,瓦斯不能经煤壁流出,高压瓦斯与破碎煤体形成以固气混合形式存在的突出灾害中心体。

工作面前方支承压力峰值区煤体受到高集中应力作用,而中心体由于似流体的性质,其承载能力下降,部分载荷向四周转移,使阻碍区煤体所受应力变

大,根据发生冲击地压强度理论,当煤体所受应力超过一定程度后将发生冲击地压,发生冲击地压的应力条件是:

$$\sigma > \sigma^*$$

(1)

即煤体所受应力 σ 大于煤体与围岩系统的综合强度 σ^* 。其中煤体所受应力主要包括自重应力、构造应力、因开采引起的附加应力、煤体与围岩交界处的应力和其他条件(如水、温度等)引起的应力。

工作面前方支承压力峰值区是煤体易发生冲击的压危险区,当峰值区煤体所受应力大于煤体与围岩系统综合强度时,煤体发生冲击地压,阻碍区 L_1 减小,即突出阻力减小。同时,煤体冲击释放的能量部分传输至中心体内,使其膨胀能增大,当膨胀能大于阻碍区阻力时,中心体发生突出。

突出发动的必要条件之一是突出中心形成以固气混合相流体形式存在的“突出灾害中心体”;另一不可缺少的条件是开采扰动。中心体是地应力、煤与瓦斯综合作用而自然形成,在低透气性煤层中客观性存在的,其赋存于多个位置,开采活动导致煤层应力环境和瓦斯状态发生变化,引起部分中心体自身能量和周围环境改变,进而诱发突出。

2 相似模拟试验

以阳泉矿区新景煤矿 8 号煤回采工作面为背景,建立开采过程中的物理相似模拟试验模型,研究采动过程中煤岩体应力场与中心体压力演变规律及突出机理。

2.1 相似模拟方案

2.1.1 模拟试验系统

煤与瓦斯突出模拟试验台如图 3 所示,模型规格为 2.5 m×0.2 m×1.4 m(长×宽×高),模型架有足够大的刚度。模型两端及底部均固定,在其上边界安设加载油缸,施加应力以模拟地应力条件。

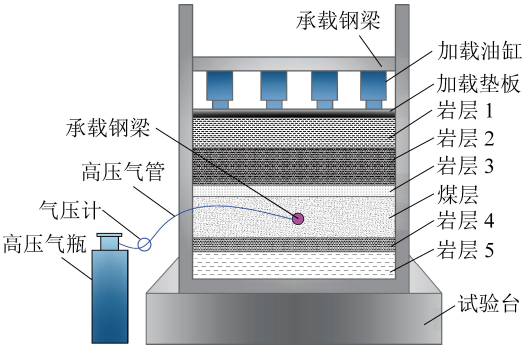


图 3 煤与瓦斯突出模拟试验系统示意
Fig.3 Schematic diagram of coal and gas outburst simulation test system

在相似模拟试验台基础上,煤层中安设定制的人工仿制突出中心体(定制胶囊、瓦斯和煤粉),并通过气管与气压计连通。通过调节实验台顶部油缸载荷模拟采场地应力变化,通过开挖煤层模拟采动影响,形成地应力和瓦斯压力可控的煤与瓦斯突出模拟实验系统,通过调整地应力和煤层开挖可以诱发中心体突出。

在该试验系统基础上,采用 YJZ-16 型静态数字应变仪及 DYB-1 系列土式传感器观测上覆岩层应力;采用 YHD-30,YHD-50 电阻式位移计观测位移场;电子气压计测量突出中心体气压。

2.1.2 模拟参数的确定

相似模拟试验主要考虑以下参数:煤层厚度 M ,岩层厚度 H ,抗压强度 σ_c ,抗拉强度 σ_t ,容重 γ ,弹性模量 E ,时间 t ,泊松比 μ 等,方程为

$$F(H,M,\sigma_c,\sigma_t,\gamma,E,\mu,t)=0$$

(2)

故要使模型与原型相似,则需满足下列方程:

$$\begin{cases} \frac{E_m}{E_p} = \frac{\sigma_{tm}}{\sigma_{tp}} \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{cp}} = \frac{\sigma_{tm}}{\sigma_{tp}} \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{cp}} = \frac{\gamma_m H_m}{\gamma_p H_p} \\ \frac{H_m}{H_p} = \frac{M_m}{M_p} \frac{t_m}{t_p} = \sqrt{\frac{H_m}{H_p}} \end{cases}$$

(3)

式中:下标 m 为模型的相应参数;下标 p 为原型的相应参数。

1)相似材料的选取,根据经验及本试验所模拟的岩层性质,确定以细河砂为骨料,以水泥和石膏为胶结材料,用四硼酸钠(硼砂)作为缓凝剂,见表 1。煤层采用煤粉与水混合搅拌压制而成。

2)相似参数的确定,根据现有试验条件及选定模型架尺寸及其他条件综合考虑,确定相似系数:长度相似系数为 0.01;时间相似系数为 0.1;容重相似系数为 0.6;强度比为 0.006;外力比为 6×10^7 ;弹性模量比为 0.006;泊松比为 1。初始条件及边界条件相似,可以近似认为是均质重力场,所以初始应力场是相似的。

3)相似材料配比及用量,计算得到模型各分层的各种材料用量见表 1。

2.1.3 模拟试验过程

试验系统搭建完毕后,油缸加载模拟上覆岩层自重,在距开切眼 140 cm 的位置埋设用定制胶囊、瓦斯和煤粉模拟的突出中心体,即推采 140 m 时揭露该中心体,其由高压气泵充气加压,模型内布设应力、位移监测测点,中心体气压由电子气压计测量。

表 1 模型相似材料配比
Table1 Model similar material ratio

岩性	序号	厚度/m		抗压强度/MPa		配比号	材料用量					
		原型	模型	原型	模型		各层总质量/kg	砂/kg	石灰/kg	石膏/kg	水/kg	硼砂/g
基本顶 细砂岩	10-3	3.29	3.29	66.00	396	319	24.65	18.49	0.62	5.55	2.74	27.39
	10-2	3.29	3.29	66.00	396	319	24.65	18.49	0.62	5.55	2.74	27.39
	10-1	3.29	3.29	66.00	396	319	24.65	18.49	0.62	5.55	2.74	27.39
直接顶	9	9.11	9.11	122.67	736	219	68.33	45.55	2.28	20.50	7.59	75.92
8 号煤	8	5.00	5.00	9.83	59							
直接底 泥岩	7	5.00	5.00	39.17	235	455	41.72	30.00	3.76	3.76	4.16	41.66
基本底 泥岩	6-4	3.13	3.13	39.17	235	455	23.44	18.75	2.34	2.34	2.60	26.04
	6-3	3.13	3.13	39.17	235	455	23.44	18.75	2.34	2.34	2.60	26.04
	6-2	3.13	3.13	39.17	235	455	23.44	18.75	2.34	2.34	2.60	26.04
	6-1	3.13	3.13	39.17	235	455	23.44	18.75	2.34	2.34	2.60	26.04

如图 4 所示,模型每步模拟开挖 15 m,随工作面推进,上覆岩层逐步垮落,同时也出现纵向和横向裂隙,且裂隙随工作面推进越来越大,并出现明显的离层;随着推进继续深入,出现多次周期来压,裂隙继续向上发展,上部岩层之间出现明显裂隙,裂隙的影响范围也不断扩大,当工作面推进到 150 m 时,其中离层裂隙发育明显;工作面推进到 160 m,顶板出现明显下沉的范围为 62 m,卸压角为 63°。工作面推采 130 m 时临近中心体,140 m 位置推过中心体,此时后方采空区顶板出现明显裂隙,后期工作面推采基本顶垮落程度大且出现明显回转,作用于采煤工作面。

2.2 试验结果分析

1) 覆岩应力分布特征,分别在顶板距离煤层 0、10、20、30 m 位置布置应力测线,读取数据并处理后得到工作面推进 15、25、90 m 时的水平剖面覆岩垂直应力分布如图 5 所示。

由应力监测结果可知,初采期间围岩未发生大规模变形和破坏,受覆岩结构影响,应力向煤壁深部转移,扰动影响范围大,且根据不同层位顶板应力分布可知,煤层支承应力升高明显,因此,开采低透气性突出煤层时,若开切眼邻近区域存在断层等易形成突出中心体的地质构造,工作面初采期间的突出危险性增大。

随开采规模扩大,顶板垮落规模扩大且充分,无明显强动载影响,相比初采期间,影响范围减小,但煤壁前方应力峰值升高,约为初采期间的 2 倍,且顶板各岩层支承应力升高明显,高静载对煤体和中心体产生强烈压缩作用,此时煤体破碎,中心体压力升

高,达到了突出的临界状态,开采扰动可能会诱发中心体突出。

此外,工作面超前影响 50~60 m,面前约 20 m 应力升高明显,应力峰值约在 10 m 位置,说明在煤壁推采距离中心体 60~20 m 时中心体逐渐孕育和发展,其瓦斯压力和浓度不断升高,在 20~10 m 时中心体突出风险急剧升高,该范围即宏观的中心体突出临界区域,是重点防治时期和位置。

2) 瓦斯包(突出中心体)内气体压力变化,图 6 为距开切眼 140 m 处瓦斯包气体压力增量与工作面推进距离的关系曲线。工作面推进 0~86 m 时中心体测点应力无明显变化;在工作面推采过 86 m 位置时中心体测点压力开始升高,说明此时工作面采动对中心体产生影响,范围是 54 m;工作面推进至 126 m 位置时中心体应力变化率明显增大,推进至 130 m 位置时应力达到峰值,此时工作面距中心体 10 m,这与超前应力峰值监测情况相印证;期间测点压力增量随推进距离增加呈线性增长,经回归分析得到中心体压力升高值 P 与推进距离 X 的关系为

$$P = 0.884\ 353X - 70.701\ 8, R^2 = 0.996 \quad (4)$$

随工作面推进过 130 m 位置,中心体瓦斯包爆裂,中心体压力迅速降低。

模拟试验中,超前应力影响范围随工作面推采持续向中心体推移,中心体压力逐渐升高,同时起约束作用的煤体宽度 L_1 逐渐减小,当其减至 10 m 时,原岩应力阻碍区 L_{13} 为 0,卸压阻碍区 L_{11} 和峰值应力阻碍区 L_{12} 受超前支承应力与中心体施加应力叠加影响,煤体内形成应力集中并发生失稳破坏,同时中心体能量瞬时释放,诱发中心体突出。

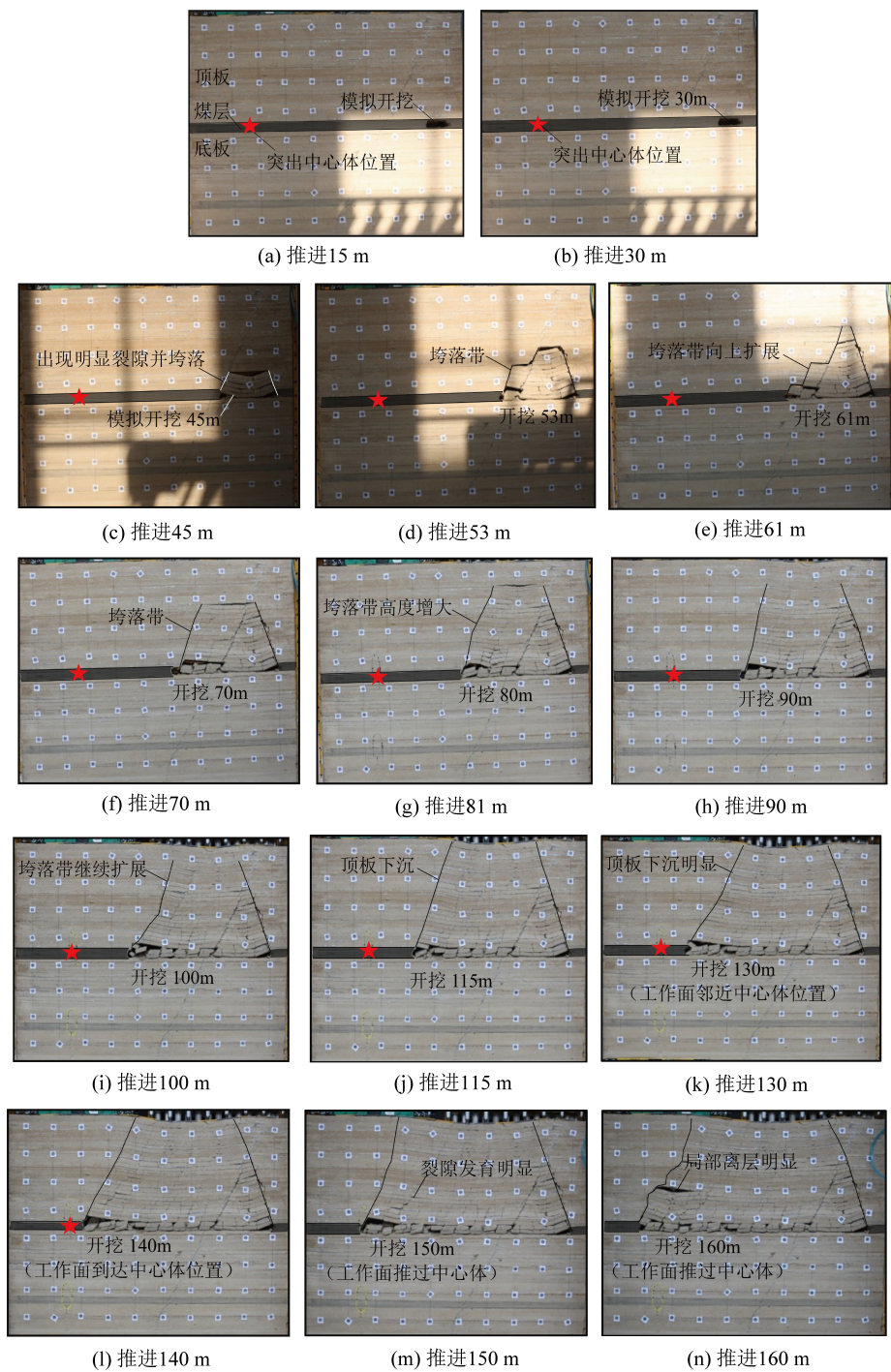


图 4 工作面开采模拟试验结果

Fig.4 Simulation test results of working face mining

根据试验条件可知,当 $L_{13}=0$ 时:

$$P = 53.107\ 62 - 0.884\ 353(L_{11} + L_{12}) \quad (5)$$

综合上式分析可知,工作面推采邻近中心体时,卸压阻碍区 L_{11} 和峰值应力阻碍区 L_{12} 宽度总和与中心体压力值呈反比关系,当前者减小到临界值时承载能力也达到极限,而中心体压力也升高至临界值,当开采扰动破坏了这一平衡,此时中心体发生突出,中心体突出的临界位置位于应力峰值附近。

3 工程实践

在阳泉矿区寺家庄矿 15112 回采工作面进行基于 K_1 值的验证性试验,在选定的开采时段内,采用微震、应力监测系统分析回采工作面顶板运动、应力变化情况,结合 K_1 值变化情况,从现场开采实践验证突出灾害中心体作用机理。

3.1 工程概况

阳泉矿区是全国瓦斯涌出量最大、自然灾害最

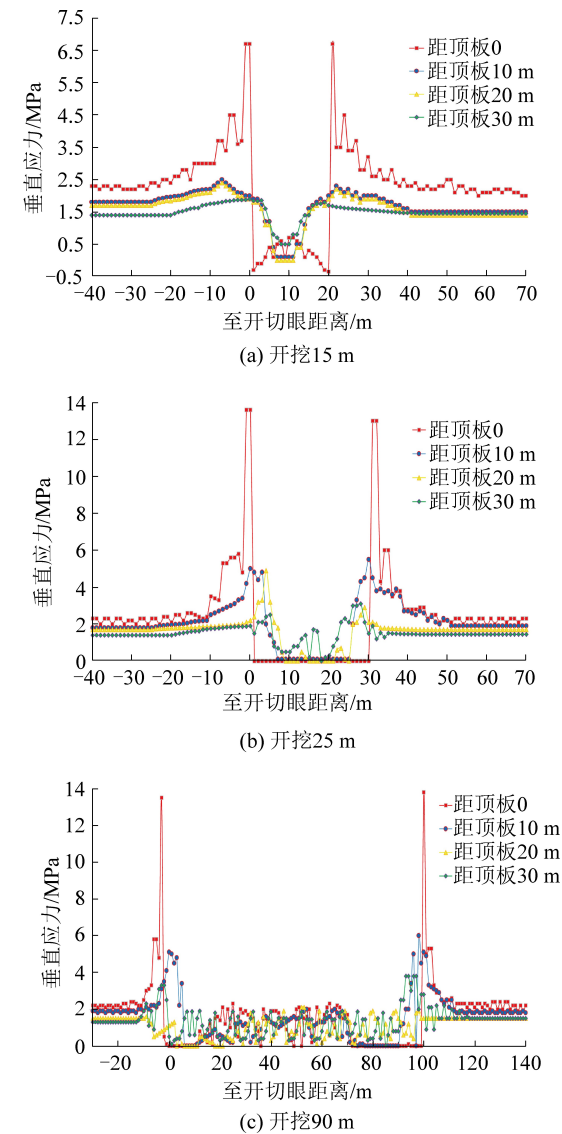


图 5 水平剖面覆岩垂直应力分布
Fig.5 Vertical stress distribution of overburden in horizontal section

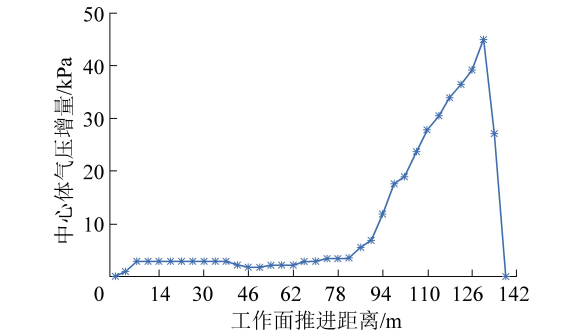


图 6 瓦斯包气体压力变化曲线
Fig.6 Gas pressure variation curve of gas package

严重的矿区之一,选择试验地点为该寺家庄矿的 15112 回采工作面。

15112 工作面走向长度 1 639 m,倾斜长度 200 m,煤厚 3.0~6.6 m,平均 5.63 m。煤层基本顶为细砂岩,厚 8.5 m;直接顶为砂质泥岩,厚 4.3 m;直

接底为砂质泥岩,厚 3.0 m;基本底为砂质泥岩,厚 7.4 m。该工作面构造发育,依据突出中心体自然存在于节理、裂隙等孔洞区域的特征,试验以工作面内距开切眼约 1 100 m 和 1 400 m 的地质构造位置为中心体普遍赋存的区域。在工作面开采过程中布置高频 KJ551 微震监测系统 and KJ550 应力监测系统。

KJ551 微震监测系统布置:工作面进风巷和回风巷内共 24 个微震测点,两巷各 12 个,其中 WZ_i 为探头编号,WZ₁、WZ₂ 测点距离开切眼 100 m (位于回采进度牌 50 号处),其他测点由工作面向外每间隔 50 m 依次布置 WZ₃—WZ₂₄ 号测点,如图 7 所示。

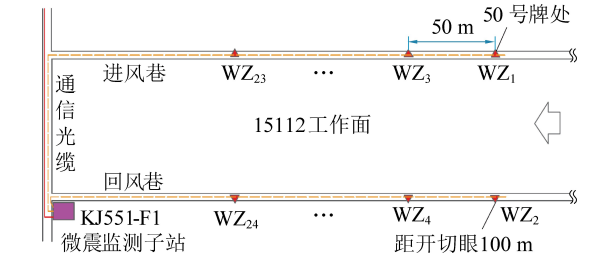


图 7 15112 工作面微震测点布置示意
Fig.7 Layout diagram of microseismic monitoring points in No.15112 working face

KJ550 应力监测系统布置:测点布置在进风巷内,共 20 组测点,组间距 20 m,每组布置 2 个应力传感器,深度分别为 10、20 m,传感器间距 1 m,如图 8 所示,其中 YL_i 为测点编号。

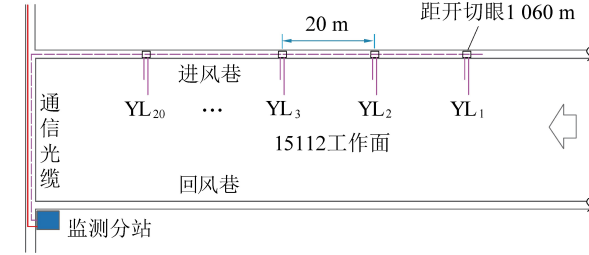


图 8 15112 工作面应力测点布置示意
Fig.8 Schematic diagram of stress measuring point arrangement in No.15112 working face

整个试验期间工作面推采 450 m,共采集到有效事件 168 个,大部分为小能量事件,有 7 次超过 1 000 J,事件在假定的两处中心体发育区内集中分布,如图 9、图 10 所示。

从图 9、图 10 可以看出事件集中区分布于开切眼前方 1 000~1 250 m 及 1 350~1 450 m 的区域。其中,前方 1 000~1 250 m 工作面位于地质异常区内,有多条断层发育;开切眼前方 1 350~1 450 m 的区域内微震事件主要分布于断层附近。上述区域节理、裂隙发育,普遍存在突出中心体。同样,在监测期间内,以上区域应力测点也出现了较明显的应力

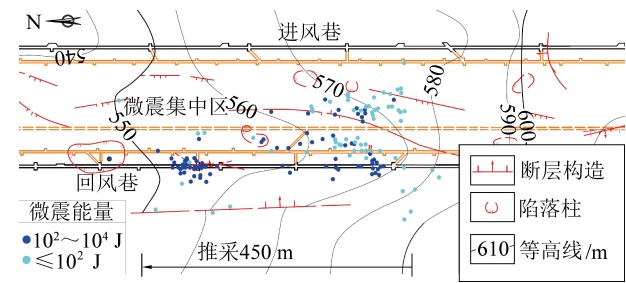


图 9 微震事件分布示意

Fig.9 Microseismic event distribution diagram

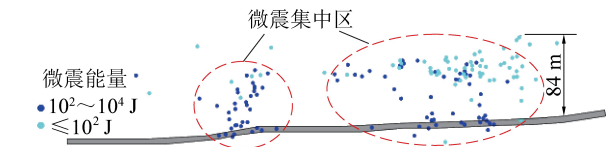


图 10 微震事件分布剖面

Fig.10 Profile of microseismic event distribution

升高,开切眼前方 1 140 m 和 1 440 m 位置的应力值最高达到 14 MPa,增幅 75%。以上监测结果证明,在假设的突出中心体发育区域应力分布出现异常,在回采过程中该区煤体受到了高动静载叠加影响。

3.2 监测分析

15112 工作面在推进过程中每天通过煤壁钻孔获取煤体瓦斯压力、钻孔瓦斯浓度及钻屑瓦斯解吸指标 K_1 的参数,所得瓦斯含量、压力及 K_1 值随工作面推进的关系如图 11—图 14 所示。

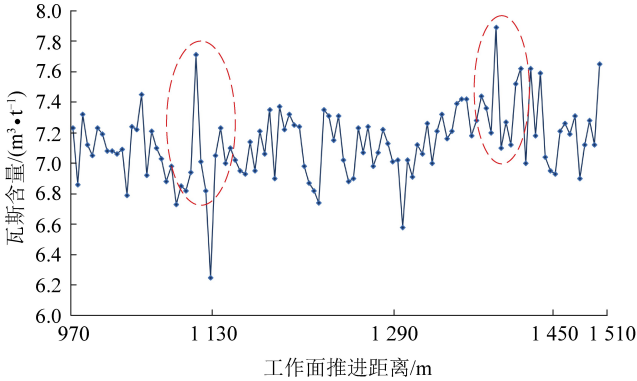


图 11 钻孔瓦斯含量随推进距离变化

Fig.11 Variation of gas content in borehole with advancing distance

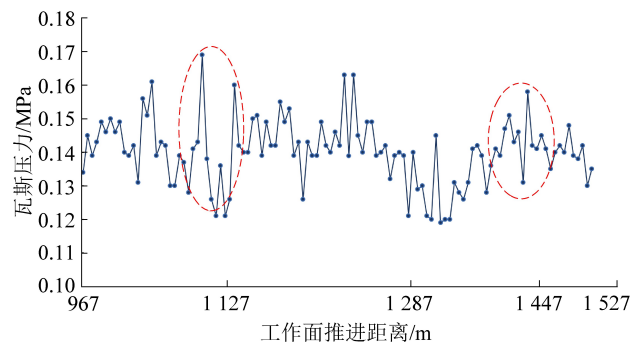


图 12 钻孔瓦斯压力随推进距离变化

Fig.12 Variation of borehole gas pressure with advancing distance

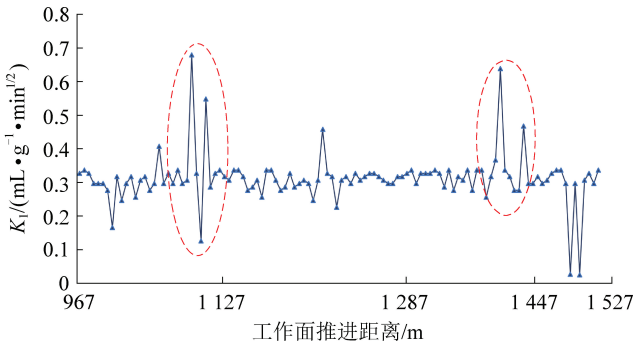
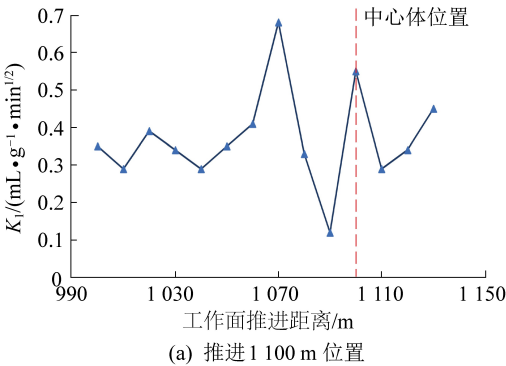


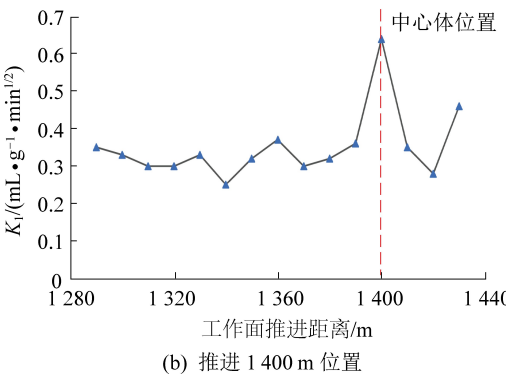
图 13 K_1 值随推进距离变化

Fig.13 K_1 value changing with advancing distance

瓦斯压力、瓦斯浓度和 K_1 值随工作面推进不断变化,其中瓦斯含量为 6.25~7.89 m³/t,瓦斯压力为 0.121~0.169 MPa, K_1 值为 0.13~0.68,以上指标均在 1 100 m 及 1 400 m 前后出现峰值;根据假定的中心体位置 K_1 值与推采距离的关系可以看出,随工作面推进,中心体受开采扰动影响, K_1 值明显上升,随后突降,表明中心体能量发生突变,并引起周边瓦斯和应力环境变化,此时工作面的突出危险较大。



(a) 推进 1 100 m 位置



(b) 推进 1 400 m 位置

图 14 中心体位置 K_1 值随推进距离变化

Fig.14 K_1 value of center position with advancing distance

3.3 支承压力与瓦斯涌出关系

对比微震事件、应力监测值、瓦斯压力、瓦斯浓度和 K_1 值的变化,应力和瓦斯监测参数出现峰值的位置位于前述开切眼前方 1 000~1 250 m 及 1 350~

1 450 m 假定的中心体位置。中心体瓦斯参数突变与监测到的应力升高异常基本吻合,工作面推采引起支承压力升高,开采活动导致该区域附近中心体发生了变化,瓦斯和煤的赋存状态发生改变,中心体能量发生突变,两相流压力向周围环境中释放,使得 K_1 值升高,此时工作面前方煤体处于高突出风险状态,应及时采取治理措施。

通过在寺家庄矿 15112 工作面的实践,验证了开采活动、突出灾害中心体和突出 3 者之间的联系,从突出灾害中心体和开采活动的角度揭示了突出灾害致灾机理,并且建立了微震、应力与突出危险(K_1 值)间的关系,可有效弥补 K_1 值无法连续在线监测的不足,为进一步提高突出监测和防治的针对性和有效性提供了方向。

4 结 论

1)在原始地应力作用下,吸附瓦斯在节理、裂隙等非均质性的孔洞中由于局部煤体破碎且渗透性升高而大量解吸,与煤粉混合成具有高能量的气固两相流体,形成突出灾害中心体。

2)突出发动的必要条件之一是突出中心形成以固气混合相流体形式存在的“突出灾害中心体”;另一不可缺少的条件是开采扰动。突出灾害中心体是地应力、煤与瓦斯综合作用而自然形成,在低透气性煤层中客观性存在的,其赋存于多个位置,开采活动导致煤层应力环境和瓦斯状态发生变化,引起部分中心体自身能量和周围环境改变,进而诱发突出。

3)工作面前方支承压力峰值区是煤体易发生冲击的危险区,当峰值区煤体所受应力大于煤体与围岩系统综合强度时,煤体发生冲击,突出阻力减小;突出中心体膨胀能增大,当其大于阻碍区阻力时,中心体发生突出。初始突出阻碍区宽度 L_1 和突出危险区宽度 L_2 均为固定数值。突出灾害体形成过程中,灾害体内应力均化,承载能力下降,煤体将承受更高支承压力的作用,发生突出的危险性增大,特别是当灾害体再受到工作面超前支承压力影响时,突出危险性更大。

4)通过相似模拟试验验证了突出灾害中心体致灾的假设,开采活动引起中心体应力升高,固气混合相膨胀力增大,中心体位于超前应力峰值位置时突出危险较大。

5)通过工程实践,验证了开采活动、突出灾害中心体和突出 3 者之间的联系,从突出灾害中心体和开采扰动的角度揭示了突出灾害致灾机理,并且建立了微震、应力与突出危险(K_1 值)间的关系,可

有效弥补 K_1 值无法连续在线监测的不足,为进一步提高突出监测和防治的针对性和有效性提供了方向。

当前煤与瓦斯突出机理尚未完全揭示,暂无统一论,以当前被普遍认可的理论为基础开展突出机理的探索性研究,仍具有一定的局限性。同时,微震与突出危险具有较好关联性,但当前其量化关联关系及预警指标尚不确定,是突出危险监测的发展方向和重点研究方向。

参考文献 (References) :

[1] 付建华,程远平.中国煤矿煤与瓦斯突出现状及防治对策[J].采矿与安全工程学报,2007,24(3):253-259.
FU Jianhua, CHENG Yuanping. Situation of coal and gas outburst in China and control countermeasures [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(3): 253-259.

[2] 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.

[3] 齐庆新,潘一山,舒龙勇,等.煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术架构[J].煤炭学报,2018,43(7):1801-1810.
QI Qingxin, PAN Yishan, SHU Longyong, et al. Theory and technical framework of prevention and control with different sources in multiscales for coal and rock dynamic disasters in deep mining of coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1801-1810.

[4] 窦林名,何学秋,REN Ting,等.动静载叠加诱发煤岩瓦斯动力灾害原理及防治技术[J].中国矿业大学学报,2018,47(1):48-59.
DOU Linming, HE Xueqiu, REN Ting, et al. Mechanism of coal gas dynamic disasters caused by the superposition of static and dynamic loads and its control technology [J]. Jouranal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 48-59.

[5] 宋大钊,何学秋,窦林名,等.煤层突出危险微震区域探测技术研究[J].中国安全科学学报,2021,31(1):89-94.
SONG Dazhao, HE Xueqiu, DOU Linming, et al. Research on MS regional detection technology for coal and gas outburst hazard [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(1): 89-94.

[6] 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.

[7] 朱立凯,杨天鸿,徐 涛,等.煤与瓦斯突出过程中地应力、瓦斯压力作用机理探讨[J].采矿与安全工程学报,2018,35(5):1038-1044.

ZHU Likai, YANG Tianhong, XU Tao, *et al.* Explore the mechanism of ground stress and gas pressure in coal-gas outburst[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(5): 1038-1044.

[8] 王汉鹏, 张冰, 袁亮, 等. 吸附瓦斯含量对煤与瓦斯突出的影响与能量分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(10): 2449-2456.

WANG Hanpeng, ZHANG Bing, YUAN Liang, *et al.* Influence of adsorption gas content on coal and gas outburst and energy analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(10): 2449-2456.

[9] 李冬, 彭苏萍, 杜文凤, 等. 煤层瓦斯突出危险区综合预测方法[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 466-472.

LI Dong, PENG Suping, DU Wenfeng, *et al.* Comprehensive prediction method of coal seam gas outburst danger zone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 466-472.

[10] 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 Jiabo, PENG Shoujian, *et al.* Analysis of the pulsating development process of coal and gas outburst[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(1): 145-154.

[11] 彭守建, 宋肖微, 许江, 等. 基于综合作用假说煤与瓦斯突出强度影响因素试验[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(12): 81-84, 95.

PENG Shoujian, SONG Xiaozheng, XU Jiang, *et al.* Experiment of factors affected to coal and gas outburst intensity based on hypothesis of comprehensive effect[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(12): 81-84, 95.

[12] 唐巨鹏, 郝娜, 潘一山, 等. 基于声发射能量分析的煤与瓦斯突出前兆特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(1): 31-42.

TANG Jupeng, HAO Na, PAN Yishan, *et al.* Experimental study on precursor characteristics of coal and gas outbursts based on acoustic emission energy analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(1): 31-42.

[13] 郑仰峰, 翟成, 辛海会, 等. 煤巷掘进工作面强弱耦合能量控制防治煤与瓦斯突出理论与方法[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 35(6): 1269-1280.

ZHENG Yangfeng, ZHAI Cheng, XIN Haihui, *et al.* Theories and methods of coal and gas outburst prevention by strong-weak coupling energy control in coal roadway driving face[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 35(6): 1269-1280.

[14] 朱权洁, 李青松, 张尔辉, 等. 采动影响下突出煤层地质异常区域的微震特征规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(7): 39-46.

ZHU Quanjie, LI Qingsong, ZHANG Erhui, *et al.* Study on micro-seismic characteristics of geologic anomaly region in coal and gas outburst seam induced by roadway excavation[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(7): 39-46.

[15] 鲜学福, 辜敏, 李晓红, 等. 煤与瓦斯突出的激发和发生条件[J]. *岩土力学*, 2009, 30(3): 577-582.

XIAN Xuefu, GU Min, LI Xiaohong, *et al.* Excitation and occurrence conditions for coal and gas outburst[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(3): 577-582.

[16] 尹永明. 冲击性煤与瓦斯突出发生机理及防治技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2014.

LEI Wenjie. Research on mechanism and control technology of coal and gas outburst Induced by rockburst [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2014.

[17] 雷文杰, 王兆丰, 韩真理. 采动效应微震特征及其变化规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(4): 795-803.

LEI Wenjie, WANG Zhaofeng, HAN Zhenli. Micro-Seismic characteristics due to mining effects [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(4): 795-803.

[18] 史广山, 魏风清. 基于煤粒扩散理论的吸附瓦斯解吸膨胀能研究[J]. *安全与环境学报*, 2013, 13(4): 200-203.

SHI Guangshan, WEI Fengqing. Study on desorption expansion energy of adsorptive gas based on diffusion theory [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2013, 13(4): 200-203.

[19] 刘彦伟, 刘明举. 粒度对软硬煤粒瓦斯解吸扩散差异性的影响[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(3): 579-587.

LIU Yanwei, LIU Mingju. Effect of particle size on difference of gas desorption and diffusion between soft coal and hard coal [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(3): 579-587.

[20] 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.

CHENG Yuanping, LEI Yang. Causality between tectonic coal and coal and gas outbursts [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 180-198.

[21] 魏建平, 温志辉, 苑永旺, 等. 应力对含瓦斯煤解吸特征影响的试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(5): 35-43.

WEI Jianping, WEN Zhuohui, YUAN Yongwang, *et al.* Study on influence of stress on desorption characteristics of coal containing gas [J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(5): 35-43.