

煤层倾角突变区煤与瓦斯突出模拟试验研究

唐巨鹏^{1,2}, 黄磊¹, 潘一山³, 任凌冉¹, 张昕¹, 张众华¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 沈阳大学 环境学院, 辽宁 沈阳 110044;
3. 辽宁大学 灾害岩体力学研究所, 辽宁 沈阳 110036)

摘 要: 煤层倾角突变区是深部煤炭采掘过程中极易发生煤与瓦斯突出的复杂地质条件之一。以河南平顶山某矿为研究对象, 开展不同倾角突变条件下突出模拟试验研究, 设置倾角突变界面, 界面上侧为原煤, 下侧为型煤, 分别用于模拟原生煤层与构造煤层。定义煤层倾角突变初始角度 θ_1 、突变角度 θ_M 、突变角临界值 θ_T 、瓦斯在倾角突变区集中系数 I_θ , 用以分析煤层倾角突变对突出强度造成的影响。引入单位突出强度 I_U 表征试验过程中的突出强弱, 期间利用声发射技术对突出过程中能量演化规律进行监测, 并通过内置于试样中的温度传感器记录各区域温度的变化情况。研究结果表明: (1) 煤层倾角突变区对突出时临界瓦斯压力及单位突出强度具有显著影响, 在 $10^\circ < \theta_1 \leq 20^\circ$ 、 $10^\circ \leq \theta_M \leq 20^\circ$ 范围内存在煤层倾角突变临界值 θ_T , 当 θ_1 与 θ_M 均大于等于 θ_T 时, 易发生低指标突出; 当 θ_1 或 θ_M 一定时, 单位突出强度随瓦斯在倾角突变区集中系数增大而增大。(2) 煤层倾角突变初始角度 θ_1 及突变角度 θ_M 与声发射能量峰值及累计声发射能量间呈负相关关系, 随着 θ_1 与 θ_M 的增大, 煤体达到破裂失稳所需能量逐渐降低, 当所处地应力环境相同时, 其在低瓦斯压力条件下即可发生突出。(3) 突出孕育与激发阶段, 煤体内部温度变化存在显著差异, 煤层倾角突变区附近温度变化明显高于其余各区域, 突出口近端区域煤体温度波动较其他区域表现出了更强的不稳定性。

关 键 词: 煤层倾角突变; 煤与瓦斯突出; 单位突出强度; 声发射能量; 温度

中图分类号: TD823

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2025) 06-1719-12

Experimental study on coal and gas outburst simulation in abrupt change area of coal seam dip

TANG Ju-peng^{1,2}, HUANG Lei¹, PAN Yi-shan³, REN Ling-ran¹, ZHANG Xin¹, ZHANG Zhong-hua¹

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

2. School of Environmental, Shenyang University, Shenyang, Liaoning 110044, China;

3. Institute of Disaster Rock Mechanics, Liaoning University, Shenyang, Liaoning 110036, China)

Abstract: The abrupt change area of coal seam dip is one of the complex geological conditions that significantly increase the risk of coal and gas outburst during deep mining. Using a mine in Pingdingshan, Henan Province, as the research subject, we conducted experimental research to simulate coal and gas outburst under various inclination mutation conditions. An interface with a dip mutation was established, positioning raw coal on the upper side and type coal on the lower side to emulate primary and tectonic coal seams, respectively. The initial angle (θ_1) of abrupt change in coal seam dip, the abrupt change angle (θ_M), the critical value of the abrupt change angle (θ_T), and the gas concentration coefficient (I_θ) in the abrupt change area of coal seam dip were defined. The above parameters were used to analyze the effect of abrupt change in coal seam dip on the intensity of coal and gas outburst. The unit outburst intensity (I_U) was introduced to characterize the strength of coal and gas outburst during the test. Acoustic emission technology was employed to monitor the energy evolution pattern during coal and gas outburst, while temperature changes in each area were recorded using sensors embedded in the sample. The findings of the study indicate that: (1) The abrupt change area of coal seam dip significantly impacts on both the critical gas pressure and the unit outburst intensity during coal and gas outburst. There exists a critical value (θ_T) of the abrupt change angle in coal seam within the range of $10^\circ < \theta_1 \leq 20^\circ$, $10^\circ \leq \theta_M \leq 20^\circ$. When both θ_1 and θ_M exceed or are equal to θ_T , a low-index coal and gas outburst becomes more likely to occur. When θ_1 or θ_M is fixed,

收稿日期: 2024-10-24

录用日期: 2025-01-10

基金项目: 国家自然科学基金 (No.52374122, No.51874165); 辽宁省“兴辽英才计划”项目 (No.XLYC1902106)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52374122, 51874165) and the Liaoning Province “Xingliao Talent Program” (XLYC1902106).

第一作者简介: 唐巨鹏, 男, 1976 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事矿山环境与灾害力学等方面的理论与试验研究。

E-mail: tangjupeng@lntu.edu.cn

the unit outburst intensity in the abrupt change area of coal seam dip increases as the gas concentration coefficient(I_g) increases. (2) A negative correlation exists between θ_1 and both the peak and cumulative AE energy. A similar negative correlation exists between θ_M and both the peak and cumulative AE energy. As both θ_1 and θ_M increase, the energy required for the coal body to reach rupture and destabilization progressively diminishes. Under identical geostress conditions, this phenomenon facilitates coal and gas outburst even at lower gas pressures. (3) Notable temperature variations occur within the coal body during the incubation and excitation phases of coal and gas outbursts. Temperature changes in the abrupt change area of coal seam dip are significantly higher than in other zones. Temperature fluctuations in the proximal region of the outburst vent show greater instability than in other regions.

Keywords: abrupt change in coal seam dip; coal and gas outburst; unit outburst intensity; acoustic emission energy; temperature

1 引言

近年来,伴随着人口快速增长与经济高速发展,我国各类能源消耗以前所未有的速度增加。煤炭资源作为我国轻重工业重要的能源支柱,受长久大量开采影响,现有浅部储层逐渐枯竭,深部开采成为必然趋势^[1-2]。在此背景下,伴随开采深度与开采强度的增大,地应力、地温和瓦斯压力不断增加,采场结构更为复杂,采动影响越发突出,煤与瓦斯突出事故发生的风险性随之增加^[3-4]。煤层倾角突变区作为深部煤炭采掘过程中极易发生突出事故的复杂地质条件之一,对深部煤炭安全开采带来了巨大挑战^[5]。因此,基于煤与瓦斯突出综合作用假说^[6-7],开展煤层倾角突变区煤与瓦斯突出模拟试验研究,对深部煤炭安全开采具有重要理论与实践意义。

煤层倾角突变是指煤层倾角在某个地点或某个范围内发生了显著变化,这种突变可能是由于煤体内部破碎、断层形成或地壳运动等诸多因素引起的,其会导致煤体内部应力与瓦斯分布发生变化,从而极大增加突出事故发生的风险。当前,国内外学者从理论、模拟及现场等诸多方面对煤层倾角突变区开展了相关研究并获得了众多成果。王恩元等^[8]通过对我国当前突出研究现状总结发现,煤层倾角增大,煤层倾角突变等地质构造影响区多发煤与瓦斯突出事故,并在此基础上提出在未来的研究中应加强复杂多变地层及不同构造条件下突出耦合演化机制和量化表征研究。Tu 等^[9]通过对构造活动与突出间作用关系研究发现,在采掘过程中煤层倾角经常发生突然变化,甚至出现煤层反转,其导致煤层自重应力对突出的影响增强,从而加大了突出危险性。Hou 等^[10]利用 FLAC3D 软件对不同倾角煤层掘进过程开展了数值模拟研究,结果表明,随着煤层倾角增大,围岩不稳定面积随之增加,工作面突出危险性逐渐增大。Zhao 等^[11]通过对不同煤层倾角瓦斯运移通道的发育特征二维物理相似模拟试验发现,随着煤层倾角增大,瓦斯运移通道的高度

和宽度也随之增加,裂缝角度也随之增大。杨威等^[12]利用 FLAC3D 软件建立了不同煤层倾角井下巷道掘进过程中的煤层层数值模拟模型,通过模拟结果发现,随着煤层倾角的增大,掘进头周围发生突出的概率逐渐增加。焦汉林等^[13]利用 FLAC3D 软件对煤层倾角为 30°、45°、60° 揭煤前围岩应力分布情况、塑性破坏情况及揭煤全过程中应力位移演化规律进行数值模拟,最终将卸压区宽度确定为石门揭煤突出危险性的评价指标。于美鲁等^[14]通过不同倾角逆断层对突出影响研究发现,由于贵州地区煤矿的区域封闭性,在不同倾角变化处压扭性断层较多,不利于瓦斯的自然释放,易造成大量瓦斯积聚从而增大突出危险性。马曙^[15]通过对贵州地区煤矿突出规律研究发现,当煤层受到地质构造应力影响时,其倾角可能会在一定范围内发生突变(变陡或变缓),在突变点附近会产生较为明显的应力集中现象,从而导致该区域易发突出。刘高峰等^[16]通过对“两软一硬”煤层突出发生规律研究发现,云盖山一矿二₁煤层受地质构造变动影响,其煤层产状变化较大,在煤层倾角发生急剧变化区域,地应力相对集中,同时该区域煤体严重破坏并伴随着瓦斯大量积聚,极易发生突出事故。

综上所述,尽管国内外学者对煤层倾角突变区突出机制开展了大量理论与数值研究,并取得了众多成果,但仍缺乏相关试验数据予以佐证,有关煤层倾角突变区对突出参数的影响尚不明确。因此,采用自主研发的真三轴煤与瓦斯突出模拟试验系统在实验室条件下开展煤层倾角突变区煤与瓦斯突出模拟试验研究,利用声发射、温度及瓦斯压力等监测设备探究煤层倾角突变对煤与瓦斯突出的影响规律,旨在为深部复杂地质构造条件下煤与瓦斯突出的治理与防治提供一定的参考。

2 煤与瓦斯突出模拟试验

煤与瓦斯突出作为煤矿采掘过程中可能发生的一种极为复杂的瓦斯动力灾害,其特点是在极短时

间内煤岩体系发生连续破裂失稳,同时大量高压瓦斯气体裹挟着破碎的煤岩体涌向采掘空间^[17]。此种情况下,依靠现有技术手段对突出全程进行现场监测基本无法实现,因此,在实验室条件下开展煤与瓦斯突出模拟试验具有重要意义。

2.1 试验装置

试验采用自主研发的真三轴煤与瓦斯突出模拟试验系统,如图1所示,该系统主要由真三轴多功能试验腔室、荷载与气体压力控制装置、数据监测与采集装置及模拟巷道构成。模拟试验腔体尺寸为200 mm×200 mm×200 mm,腔体前端设有直径 $\phi=80$ mm的圆形卡口,用于安装模拟突出弱面的有机玻璃挡板,安装过程采用套筒压实及涂抹密封胶的方式保证腔体的稳定性与密封性。荷载与气体压力控制装置可分别实现对现场真实地应力与瓦斯压力的模拟,其通过单独控制的液压油缸,可进行三向应力的同步加卸载,从而模拟更为复杂的深部地应力环境。通过气瓶减压阀与瓦斯压力传感器可实现对不同煤层环境瓦斯压力实时模拟。为保证试验整体的安全性,采用氮气替代瓦斯气体用于模拟突出全过程。

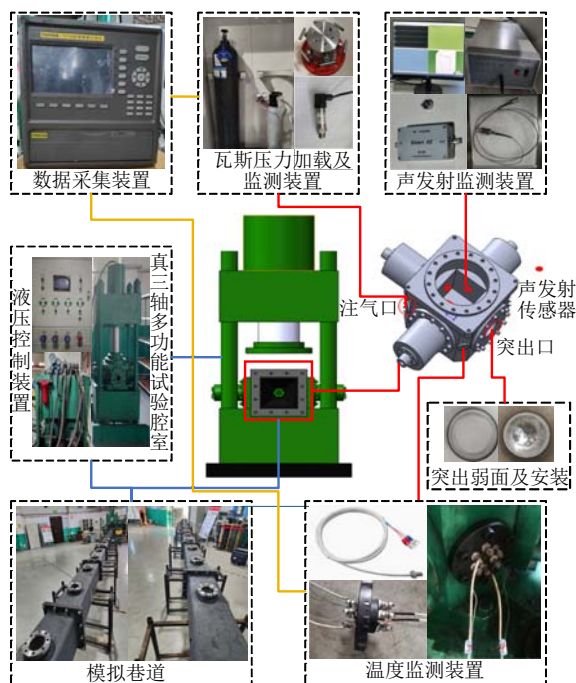


图1 煤与瓦斯突出模拟试验系统

Fig.1 Coal and gas outburst simulation test system

2.2 试验方案及步骤

煤样选取自河南省平顶山某矿己₁₆₋₁₇煤层^[18],平均埋深为1 090 m,硬度为 $1 \leq f \leq 1.32$,煤视密度为1.23 g/cm³,真密度为1.29 g/cm³,瓦斯含量为

2.93~9.14 m³/t,平均瓦斯含量为4.33 m³/t,利用模拟试验相似三定理^[19],计算得出原煤与型煤间几何、体积力、应力相似常数分别为9.12、1.19、10.80。根据李新平等^[20]深部煤岩体地应力实测资料拟合结果确定预设埋深下垂直地应力 σ_v 、最大水平地应力 σ_H 、最小水平地应力 σ_h ,通过相关计算进而得到试验时Z轴应力 σ'_v 、X轴应力 σ'_H 、Y轴应力 σ'_h 的取值。基于前人研究经验^[21],结合倾角突变区所处的高地应力环境,将该矿1 000 m埋深作为试验参照对象,选取与煤样强度及硬度相近的有机玻璃板模拟突出弱面开展试验。试验过程中,以0.01 MPa/s的恒定速率分别对X、Y、Z轴应力进行同步加载,当三向应力分别达到试验模拟应力时停止加载。瓦斯压力加卸载过程中,当瓦斯压力示数达到预设方案要求并基本保持稳定时,即表明当前阶段完成。具体应力与瓦斯压力加载方案如表1所示。

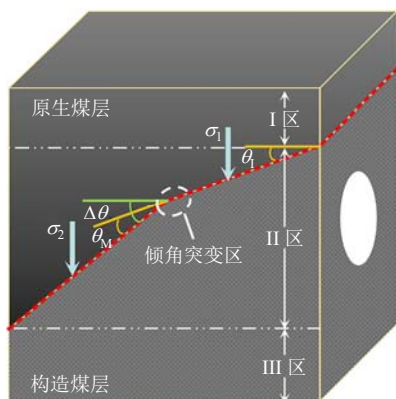
依照突出现场实际情况与前人研究经验^[9, 15],将煤层局部范围内角度变化 $\geq 10^\circ$ 定义为煤层倾角突变,基于实验室现有条件,设计如图2所示的倾角突变方案,设定煤层倾角突变初始角度位于 $10^\circ \sim 30^\circ$ 范围内,突变角度位于 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内,以每级角度变化 10° 为一个阶梯开展正交试验,受煤层倾角突变影响,易导致煤体内部应力分布不均,造成突变角下方煤体破碎,因此,试样上部采用原煤,下部采用型煤,分别用于模拟原生煤层与构造煤层。依照前人研究经验与级配理论^[22-23],选用粒径为0.38~0.85、0.25~0.38、0.18~0.25、0.15~0.18 mm和 <0.15 mm煤粉制作型煤,期间加入水泥作为黏结剂,各粒径煤粉及水泥质量占比分别为29.3%、16.5%、8.2%、4.0%、37.0%、5.0%^[24],采用对应倾角模具施加100 kN压力压制成型。原煤试样在试验开始前统一切割打磨,完成后包裹保鲜膜置于相同环境下保存,待对应型煤试样压制成型后置入腔体上方,采用上端压头自身重力将其压入腔内与型煤试样完全接触。具体试验步骤见图3。

2.3 试验结果

根据2.2节中的试验方案分别对不同倾角突变煤体试样开展煤与瓦斯突出模拟试验,为尽量减少试样个体差异对试验结果造成的影响,每组试验重复3次,选取数据相近的结果比较分析(见表2)。在试验过程中,随着瓦斯压力逐级加载、抽采及稳压,煤体与突出弱面逐步逼近失稳破坏的临界值,突出在某一时刻瞬间发生,伴随着一声巨响的同时突出弱面发生破坏,大量瓦斯气体裹挟着破碎后的煤粉在极短时间内由突出口向模拟巷道中喷出,突

表 1 应力及瓦斯压力加载方案
Table 1 Stress and gas pressure loading program

试样产地	模拟埋深/m	实际现场地应力/MPa			试验模拟应力/MPa			瓦斯压力/MPa
		σ_v	σ_H	σ_h	σ'_v	σ'_H	σ'_h	
河南平顶山某矿	1 000	31.448	19.348	22.995	2.91	1.79	2.13	0.6~3.6 MPa, 以每级 0.2 MPa 加载, 稳压完成后进行抽采使得瓦斯压力 ≤ 0.6 MPa;
								0.6~2.0 MPa, 每次加压及抽采稳压 5 min;
								2.2~3.6 MPa, 每次加压及抽采稳压 3 min, 直至发生突出



注: θ_1 为煤层倾角突变初始角度; θ_m 为突变角度; $\Delta\theta$ 为突变后煤层与水平方向夹角, $\Delta\theta = \theta_1 + \theta_m$; σ_1 与 σ_2 分别为初始角度 θ_1 与突变角度 θ_m 下部构造煤受上部原煤自重及垂直地应力分布影响综合作用值; I 区为原生煤层破裂塌陷区; II 区为倾角突变区附近原生煤层与构造煤层易突出区; III 区为构造煤层突出区。

图 2 煤层倾角突变设计图

Fig.2 Design diagram of abrupt change in coal seam dip

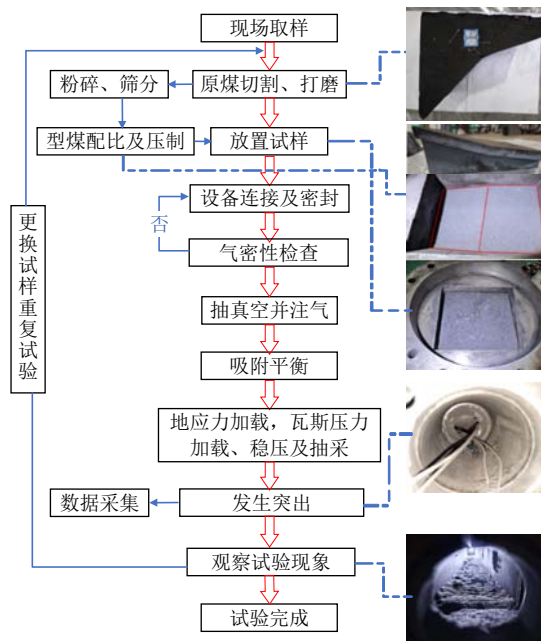


图 3 煤与瓦斯突出试验流程图

Fig.3 Flow chart of coal and gas outburst test

表 2 煤与瓦斯突出试验结果
Table 2 Coal and gas outburst test results

试样编号	初始角度/(°)	突变角度/(°)	突出前			突出后		临界瓦斯压力/MPa	突出发生时瓦斯压力所处阶段	相对突出强度/%	单位突出强度/MPa ⁻¹
			原煤质量/g	型煤质量/g	总装煤质量/g	腔内剩余煤粉质量/g	巷道内煤粉质量/g				
10-0	10	0	2 473	6 629	9 102	3 125	5 977	3.22	稳压阶段	65.67	0.203 9
10-10	10	10	2 592	6 421	9 013	3 389	5 624	2.98	加压阶段	62.40	0.209 5
10-20	10	20	2 804	6 194	8 998	3 705	5 293	2.68	稳压阶段	58.82	0.219 8
10-30	10	30	3 028	5 907	8 935	3 798	5 137	2.14	加压阶段	57.49	0.268 7
20-0	20	0	3 376	5 812	9 188	3 456	5 732	3.02	稳压阶段	62.39	0.206 6
20-10	20	10	3 696	5 577	9 273	3 972	5 301	2.71	加压阶段	57.17	0.210 6
20-20	20	20	3 730	5 084	8 814	4 735	4 079	1.41	抽采阶段	46.28	0.328 9
20-30	20	30	4 533	4 916	9 449	5 436	4 013	1.11	抽采阶段	42.47	0.380 9
30-0	30	0	4 872	4 881	9 753	3 408	6 345	2.66	稳压阶段	65.06	0.244 3
30-10	30	10	5 012	4 602	9 614	3 807	5 807	2.32	加压阶段	60.40	0.259 9
30-20	30	20	5 154	4 550	9 704	6 456	3 248	0.84	抽采阶段	33.47	0.400 5
30-30	30	30	5 727	4 185	9 912	6 900	3 012	0.72	抽采阶段	30.39	0.419 5

出持续时间约为 0.6~1.7 s。突出发生时模拟巷道产生了剧烈振动, 突出结束后振动仍持续了一段时间并伴有部分粉尘从模拟巷道连接处逸散, 这表明瓦斯气体与煤粉在巷道中运移速度极快且破坏性极强, 这与严重破坏的突出现场情况相吻合。破碎后

的突出弱面沿模拟巷道向外喷出, 破坏了位于模拟巷道尾端的煤粉收集袋, 同时部分煤粉收集袋被卷入了模拟巷道中(见图 4), 这是由于突出发生时模拟巷道前方空气受到剧烈压缩导致模拟巷道尾端产生了负压效应, 这一现象与耿加波^[25]试验现象类

似。



图4 煤粉收集袋

Fig.4 Coal dust collection bag

突出结束后升起试验腔体上端压头可以发现，上部原煤试样倾角突变区中后方产生了较为明显的裂纹或塌陷（见图5(a)~5(d)），随着突变角的增大这一现象越发明显。突出发生后腔内剩余试样出现

了层裂现象，说明突出的激发是含瓦斯煤体积蓄大量能量达到临界状态后在突出弱面处突然释放的结果，这与郭品坤^[26]的研究结果近似。以试样10-30为例，突出口近端区域积聚了部分尺寸 ≥ 5 mm的小块（见图5(e)）；巷道前段（0.45~3.45 m）煤粉厚度为9~12 mm以手捻无感及颗粒尺寸较小的煤粉为主，其表面具有较多凹坑且部分位置堆积现象明显（见图5(f)）；巷道中段（3.45~9.45 m）煤粉堆积厚度为3~6 mm，较巷道前段有所下降，小粒径煤粉随突出距离的增加逐渐减少，大颗粒煤粉占比逐渐增加（见图5(g)）；巷道末段（9.45~12.45 m）煤粉堆积厚度为1~3 mm，此时大粒径煤粉占比较高，小粒径煤粉较之前大量减少（见图5(h)），这是由于部分小粒径煤粉受空气阻力影响动能耗散过快提前沉降导致的。通过对比发现本次试验模拟巷道中煤粉分布特征与前人试验研究及现场观测结果^[27]相吻合。

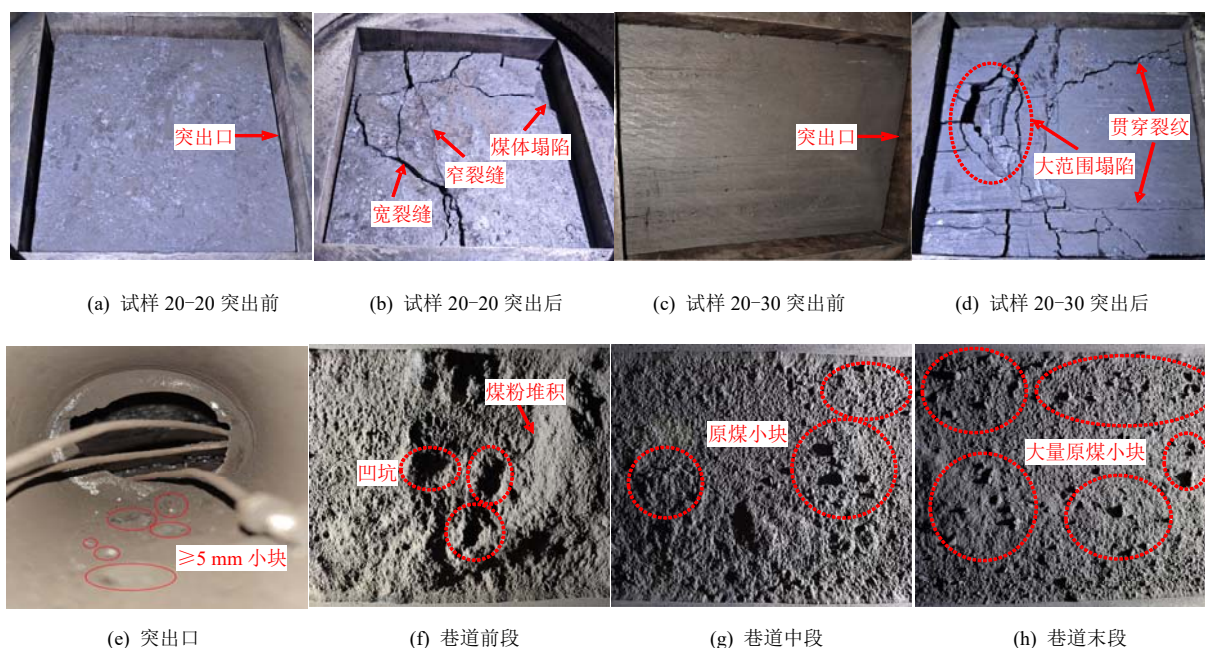


图5 煤与瓦斯突出试验现象

Fig.5 Phenomenon of coal and gas outburst test

3 突出参数演化规律

3.1 煤层倾角突变对突出强度影响分析

在实际突出事故现场，通常采用涌出的煤体总量作为衡量突出强度的标准，但突出事故发生时通常会涌出几十吨甚至上百吨的煤。然而，由于实验室模拟尺度的限制无法采用相同标准与现场突出强度对应，因此，结合前人研究经验^[28]，引入单位突出强度用于表征试验过程中的突出强度大小。

$$I_U = \frac{M_o}{M_f P_{cr}} \quad (1)$$

式中： I_U 为单位突出强度（ MPa^{-1} ）； M_o 为突出煤量（g）； M_f 为突出前总装煤量（g）； P_{cr} 为临界瓦斯压力（MPa）。

定义煤层倾角突变初始角度为 θ_i ，突变角度为 θ_M ，突变角临界值为 θ_T 。受煤层倾角突变区地质构造活动影响，突变角上下部煤体强度、应力分布

及吸附、解吸等特征存在差异,结合试验方案,综合考虑倾角突变区煤体自重、应力及瓦斯作用情况,定义了瓦斯在倾角突变区集中系数,用以分析煤层倾角突变对突出强度造成的影响。

$$I_{\theta} = \frac{\Delta\theta \frac{\sigma_1}{\sigma_2}}{P_{cr}} \quad (2)$$

式中: I_{θ} 为瓦斯在倾角突变区的集中系数($^{\circ}$)/MPa)。

由图 6 可知,当 θ_1 或 θ_M 一定时, I_U 与 I_{θ} 呈正线性相关关系,且当 θ_1 与 θ_M 均大于等于 θ_T 时这一现象更为显著。当 $\theta_1 = 30^{\circ}$ 时, $\theta_M = 0^{\circ}$ 、 10° 、 20° 、 30° 试样的单位突出强度分别为 0.244 3、0.259 9、0.400 5、0.419 5 MPa $^{-1}$, $\theta_M = 10^{\circ}$ 、 20° 、 30° 试样的单位突出强度较 $\theta_M = 0^{\circ}$ 分别增大了 6.39%、63.94%、71.72%。说明在相同地应力条件下,突变角越大的煤体应力集中现象越明显,而瓦斯作为突出的主要能量来源,其在煤层中的运移路径与吸附、解吸量受煤层倾角变化影响较大。随着 θ_M 的增大,倾角突变区煤体瓦斯吸附量较之前有所下降,但因运移路径受到更为严重的阻塞作用,其突变角下方瓦斯积聚量较之前大幅增加,故更易受外界扰动影响从而发生突出。

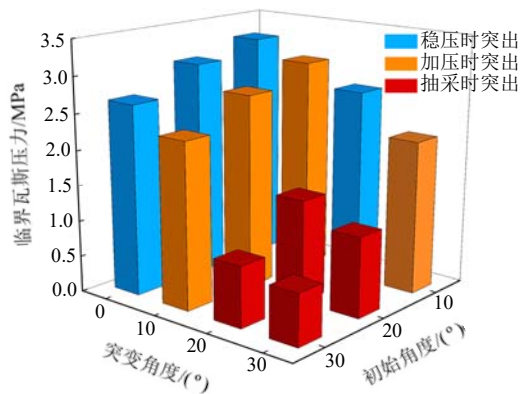


图 6 突出时临界瓦斯压力

Fig.6 Critical gas pressure of coal and gas outburst

瓦斯在倾角突变区集中系数与单位突出强度的关系见式 (3) 和图 7。

$$I_U = kI_{\theta} + b \quad (3)$$

式中: k 为斜率; b 为截距。

由图 7 与式 (3) 可知,在 I_U 与 I_{θ} 的关系式中,斜率 k 代表突出难易程度,其值越小越易发生突出;截距 b 代表突出强度大小,其值越大突出强度越大,且这一现象在 θ_1 与 θ_M 均大于等于 θ_T 时更为显著。

当 $\theta_1 = 10^{\circ}$ 、 20° 、 30° 时斜率 k 分别为 0.033 4、0.013 4、0.005 0, $\theta_1 = 10^{\circ}$ 的 k 值分别为 $\theta_1 = 20^{\circ}$ 及 $\theta_1 = 30^{\circ}$ 的 2.49 倍与 6.68 倍;截距 b 分别为 0.095 8、0.115 2、0.193 1, $\theta_1 = 20^{\circ}$ 与 $\theta_1 = 30^{\circ}$ 较 $\theta_1 = 10^{\circ}$ 分别增大了 20.25%与 101.57%。因此, I_{θ} 为煤层倾角突变区突出危险性的治理提供了一定的理论依据。

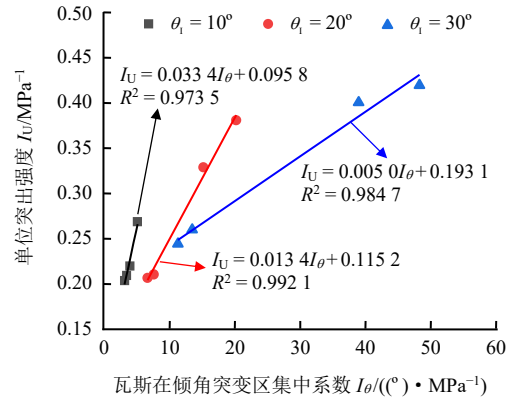


图 7 瓦斯在倾角突变区集中系数与单位突出强度关系图

Fig.7 Relationship between gas concentration coefficient and unit outburst intensity in abrupt change area of dip

3.2 煤层倾角突变区声发射信号演化特征

利用声发射 (acoustic emission, 简称 AE) 技术对煤与瓦斯突出过程中煤体动态破坏特征进行研究,对深部矿井瓦斯动力灾害的有效预测与防治具有重要的实践意义。Li 等^[29]利用自主研发的声发射连续监测预警系统对矿井工作面的煤与瓦斯突出动力灾害进行了监测与预测,发现煤体主要表现为韧性破坏,此时 AE 信号具有上升—峰值—回落的演化特征。Zhang 等^[30]通过对深部煤与瓦斯突出模拟试验 AE 信号特征研究发现,在突出的孕育初期,AE 以低频信号为主,且此时 AE 能量处于较低水平;而在突出的孕育后期,AE 以高频信号为主,且相较于孕育前期 AE 能量大幅增加。结合前人研究经验,对不同煤层倾角突变试样瓦斯压力、声发射能量、累计声发射能量等参数进行分析,并根据胡千庭等^[31]提出的煤与瓦斯突出的力学作用机制假说及突出发生过程中 AE 能量幅值变化的实际变化情况,将煤与瓦斯突出 AE 信号划分为低活跃阶段、中活跃阶段、高活跃阶段与激发阶段。

结合上述分析,选取一组正交试验所得声发射信号参数,绘制如图 8 所示的关系曲线,探究不同煤层倾角突变区突出试验结果,得到以下规律:

(1) AE 能量信号总体上呈现平稳—波动—峰值—回落的演化过程。以试样 20-10 为例,在 0~

2 071 s 内 AE 能量信号位于低活跃阶段,其幅值处于较低水平且未发生明显波动,说明此时煤体内部未发生大规模破坏,AE 能量小范围波动是由于煤体内部产生部分微裂隙导致的;在 2 072~5 900 s 内 AE 能量信号位于中活跃阶段,其幅值较低活跃阶段产生了较为明显的波动且部分能量信号幅值达到了较高水平,表明随着瓦斯压力的逐渐增加,煤

体内部微裂隙逐渐扩展、贯通,同时破坏性更强的宏观裂隙正在大量产生,煤体正逐步靠近失稳破坏的边缘;在 5 901~6 467 s 内 AE 能量信号位于高活跃阶段,此时 AE 能量信号幅值出现大范围波动且明显高于中活跃阶段,说明煤体已无限逼近失稳破坏边缘,随时可能发生突出;在 6 468 s 时 AE 能量信号达到峰值,随后突出激发,此时 AE 能量信号

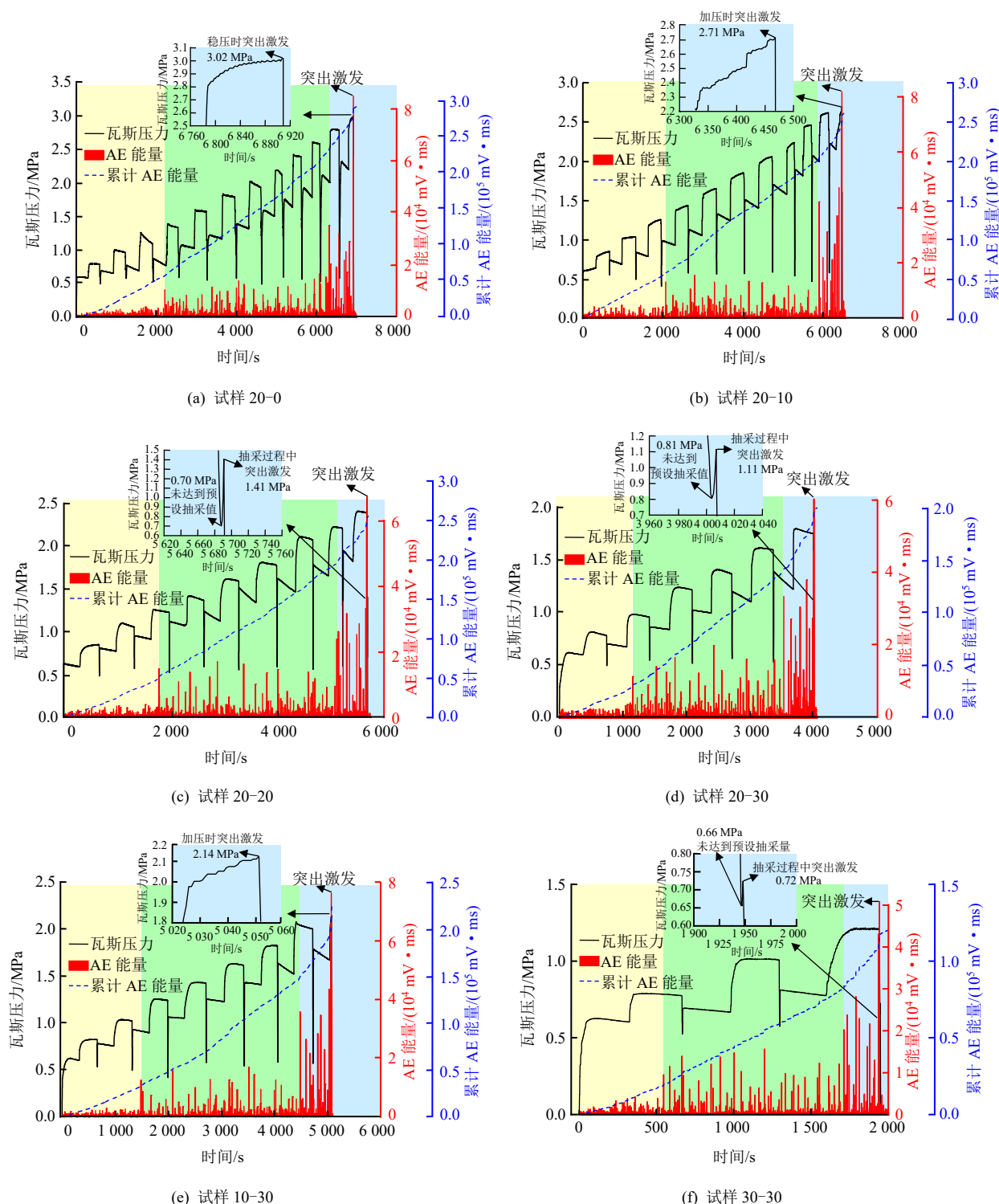


图 8 不同煤层倾角突变区瓦斯压力、AE 能量随时间变化曲线

Fig.8 Variation of gas pressure and AE energy with time in different abrupt change areas of coal seam dip

幅值远远高于之前各个阶段,说明在瓦斯扰动影响下煤体破坏程度不断加深,并具备了失稳破坏的力学条件,此时煤体内部积聚的能量瞬间释放,导致煤体完全破坏突出激发;在 6 469 s 至结束时,伴随着突出的发生,AE 能量信号从峰值迅速回落至较低值,并在较短时间内出现小范围波动,这是由于突出发生时能量巨大,突出结束后仍有部分余能未完全耗散造成的。对比其余各煤层倾角突变试样可以发现 AE 能量信号均经历了平稳—波动—峰值—回落的发展顺序,表明煤与瓦斯突出是一个由于煤体能量积累与破坏逐步加深,最终达到失稳破坏的力学过程。

(2) θ_1 及 θ_M 与 AE 能量低活跃阶段及中活跃阶段时长占比呈负相关关系,与高活跃阶段时长占比呈正相关关系。当 $\theta_1 = 20^\circ$ 时, $\theta_M = 0^\circ$ 、 10° 、 20° 、 30° 的试样低活跃阶段时长占比分别为 31.92%、31.59%、31.07%、28.55%,中活跃阶段时长占比分别为 59.24%、58.41%、57.86%、57.15%,高活跃阶段时长占比分别为 9.79%、9.99%、11.07%、12.89%。说明伴随 θ_1 与 θ_M 的增大,煤层倾角突变区瓦斯积聚现象越发突出,煤体内部裂隙的产生与发展速度逐渐增加,其抵抗破坏的能力逐渐减弱,此时煤体强度随之下降,并逐步逼近失稳破坏的边缘。由此可见,煤层倾角突变对突出 AE 能量信号各阶段具有显著影响,故在实际矿井突出预警观察时应同步考虑 AE 能量信号与煤层倾角突变区的联系。

(3) θ_1 及 θ_M 与 AE 能量峰值及累计 AE 能量之间呈负相关关系,随着 θ_1 及 θ_M 的增大,突出需求能量逐渐降低,易发生低指标突出。在相同地应力环境下,当 θ_1 与 θ_M 均大于等于 θ_T 时,其突出时临界瓦斯压力远低于常规突出煤层,且此时 AE 能量峰值及累计 AE 能量较常规突出煤层处于较低水平,故将其定义为低指标突出。如当埋深同为 1 000 m 时,常规突出煤层临界瓦斯压力为 2.90 MPa^[28,30],而当 θ_1 与 θ_M 均大于等于 θ_T 时,煤层倾角突变区突出临界瓦斯压力最大值为 1.41 MPa,其仅为常规突出煤层的 48.6%。当 $\theta_M = 30^\circ$ 时, $\theta_1 = 10^\circ$ 、 20° 、 30° 试样突出激发时 AE 能量峰值分别为 7.61×10^3 、 6.09×10^3 、 5.09×10^3 mV·ms;累计 AE 能量分别为 2.24×10^5 、 2.02×10^5 、 1.20×10^5 mV·ms。说明随着 θ_1 及 θ_M 的增大,煤体达到破裂失稳所需能量逐渐降低,当所处地应力环境相同时,其在低瓦斯压力条件下即可发生突出,故煤层倾角突变区较常规煤层开采区更易发生煤与瓦斯突出事故,其对矿井安全

生产带来了巨大隐患。

(4) 突出孕育与激发过程中腔内瓦斯压力总体呈缓增—缓降—平稳—陡增—骤降的演化过程,伴随瓦斯压力的逐渐增大,抽采过程中瓦斯压力下降幅度逐渐增加,部分试样在抽采过程中发生突出。以试样 20-20 为例,在 2.4 MPa 稳压完成后进行抽采,当抽采瓦斯压力达到 0.7 MPa 时出现激增,并在达到 1.41 MPa 时发生突出,依照 2.2 节中试验方案,其未达到预设抽采值 0.6 MPa,结合图 6 可知, $\theta_1 \geq 20^\circ$, $\theta_M \geq 20^\circ$ 试样也存在此种情况,说明当 θ_1 与 θ_M 均大于等于 θ_T 时,煤体极易受到瓦斯抽采扰动影响,此时突出弱面十分脆弱,当瓦斯抽采速度低于煤体瓦斯解吸及瓦斯积聚区扩散速度时,该区域极易发生失稳破坏从而导致低指标突出的发生。

3.3 煤层倾角突变区温度信号演化特征

煤与瓦斯突出作为煤体不断积聚能量并最终失稳破坏释放能量的力学过程,受煤体破碎与瓦斯吸附、解吸的影响,其在突出孕育与激发阶段常伴有热量的转换与传递,从而导致煤体温度发生变化。Zhang 等^[32]研究发现,煤体在应力集中状态下破碎是造成温度异常变化的主要因素,并提出了一种基于温度监测的突出预测方法,能有效、准确地预测突出。杨孝波等^[33]研究发现,突出过程中煤体温度的升高与下降分别受瓦斯吸附与瓦斯解吸及膨胀作用的影响,是一个多变的热力学过程。

综上所述,试验采用多组铂热电阻式温度传感器分别置于倾角突变区与突出口远近端煤体内部,用以测量突出过程中不同区域温度变化情况,受突出的强破坏性影响,温度传感器损毁严重,突出结束后部分数据无法采集,故选取探头保留较为完整的试样 20-20 数据为例(见图 9)对突出过程中温度演化规律进行探究,得到以下规律:

(1) 突出过程中煤体内部温度总体呈现波动式上升—平稳上升—急剧下降的演化过程。在 0~1 041 s 时煤体受瓦斯抽采扰动影响较小,总体温度呈增长趋势;在 1 041~4 117 s 时,煤体受瓦斯抽采扰动影响增大,温度呈波动式上升(见图 9(b)),其波动上升段是由于煤体内部裂隙大量产生部分破碎能转化为热能,煤体基质对游离的瓦斯气体分子吸附量增加导致的。波动下降段是由于煤体孔隙外部气体压力降低,附着于其基质表面的瓦斯大量解吸耗散能量导致的。在 4 118~5 508 s 时,煤体内部温度较前段呈平稳上升趋势(见图 9(c)),此时煤体内部破坏更为严重,破碎能逐步增加,其值远远高于瓦斯气体解吸所需能量,温度持续上升,并在

突出时达到峰值。5 509 s至结束时煤体内部温度呈急剧下降趋势,其在较短时间段内出现回升随后继

续下降(见图9(d)),这是由于突出后煤体内积聚的部分能量未完全耗散转化为热量导致的。

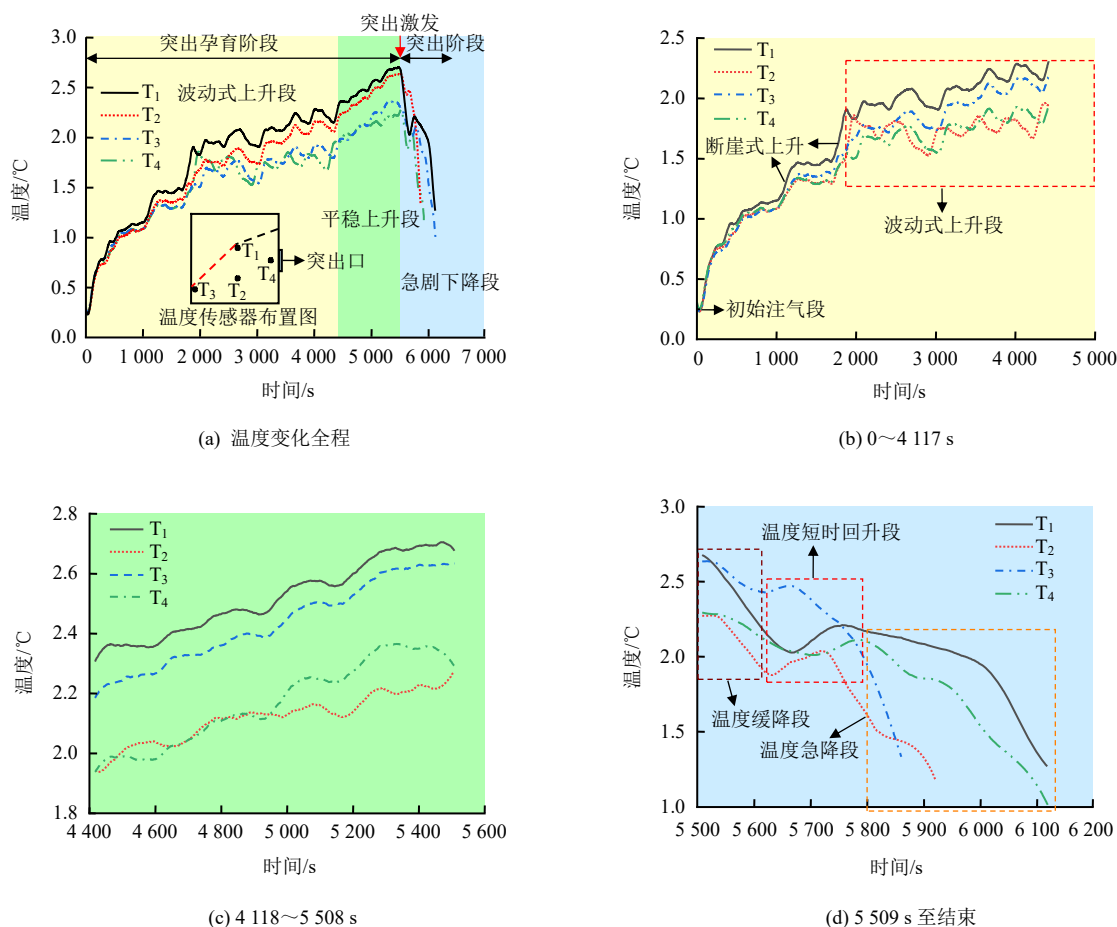


图9 突出过程中温度变化曲线

Fig.9 Variation of temperature during coal and gas outburst

(2) 煤层倾角突变区附近温度变化明显高于其余各区域。观察图9(a)可以发现,监测点 $T_1 \sim T_4$ 温度初始值与峰值间差值分别为2.79、2.71、2.42、2.35 $^{\circ}\text{C}$,距倾角突变区最近的 T_1 监测点附近温度变化高于其余各监测点。受煤层倾角突变影响,突变区附近易形成应力集中现象,而应力集中导致的煤体破坏产生的破碎能正是煤体温度上升热量的主要来源。与此同时,受突变区上下部煤体渗透率差异影响,该区域易形成瓦斯积聚与气体膨胀现象,其对煤体基质吸附与解吸瓦斯气体有较大影响,从而导致该区域煤体温度变化异常。因此,在实际开采过程中,应对煤层倾角突变区附近温度变化进行实时监测,当该区域温度出现异常变化时,应加强防范,避免人员与设备的损失。

(3) 受煤层倾角突变影响,突出口近端区域煤体温度波动较其他区域表现出更强的不稳定性。观察图9可以发现,突出口远近端温度变化有所不同,其中 T_4 监测点所处的突出口近端温度变化略低于

其他区域,但其波动更为剧烈,部分时间段内其温度呈现断崖式增长或下降(见图9(b)、图9(d)),说明突出口附近煤体更易发生破碎且易受瓦斯扰动影响。当积聚于该区域的瓦斯受腔内压力变化影响向四周扩散时,其向突出口方向扩散难度远低于突变角方向,因此造成了突出口附近煤体破碎程度及瓦斯吸附量高于其余区域,从而导致突出口附近温度波动更为显著。

4 讨论

煤与瓦斯突出作为一种极其复杂的煤岩动力灾害,其发生机制一直是突出灾害研究中最主要、最根本的内容之一,也是突出灾害防治的前提和理论基础^[34]。因此,当前学者十分重视深部复杂地质构造突出发生机制的研究,而煤层倾角突变区作为近年来受地质构造活动影响的突出易发地带,其突出机制的研究对深部煤层的安全开采尤为重要。

结合第2章和第3章中煤层倾角突变区突出强

度、AE 能量信号及温度信号等试验结果分析,对煤层倾角突变区煤与瓦斯突出全程进行简要分析

(见图 10),发现煤层倾角突变对突出的影响主要表现为“三易两集中”:

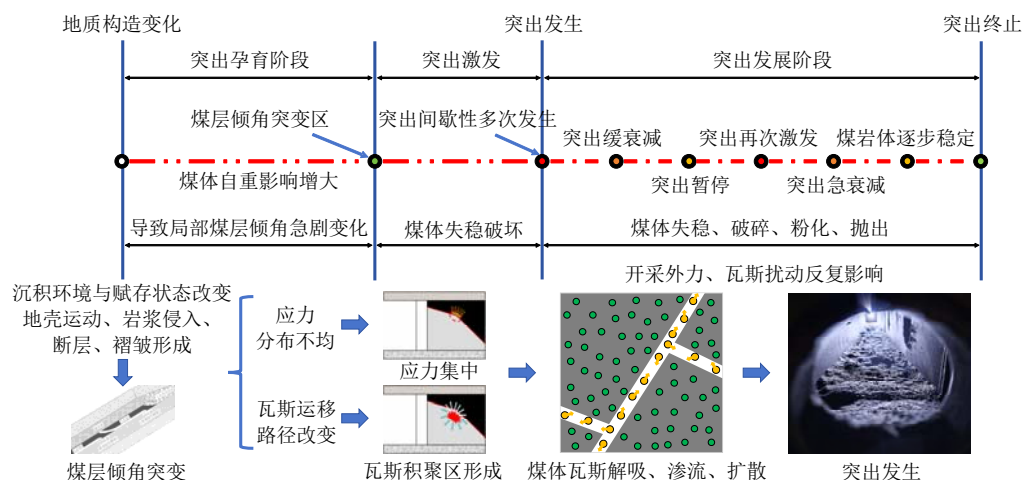


图 10 煤层倾角突变区煤与瓦斯突出过程简述

Fig.10 Brief description of coal and gas outburst process in abrupt change area of coal seam dip

(1) 煤层倾角突变区易受地质构造变动影响,导致煤体破坏失稳。受地质构造变动影响,倾角突变区煤体强度发生改变,易出现断裂与破碎现象,导致煤体稳定性下降,瓦斯运移通道增加,从而加大了突出的危险性。

(2) 煤层倾角突变地带易形成应力集中区。倾角突变会导致煤体受到的垂直地应力及水平地应力分布产生变化,造成煤体内部应力分布不均产生应力集中区,其一旦受到瓦斯扰动及外力作用的影响,极易打破现有平衡状态发生失稳破坏从而导致突出的发生。

(3) 煤层倾角突变地带易改变煤体内部瓦斯运移路径,导致突变角附近大量瓦斯集中,形成瓦斯积聚区。在常规开采中,瓦斯通常会沿着煤层倾向方向发生运移,但受倾角突变区上下部煤体强度及渗流特性不同影响,瓦斯扩散难易程度存在差异,易造成瓦斯集聚区,从而导致突出风险性增加。

5 结 论

研究了煤层倾角突变对煤与瓦斯突出临界瓦斯压力、单位突出强度、AE 能量及温度信号等参数的影响,分析了其突出的发生机制,所得结论如下:

(1) 煤层倾角突变区较常规煤层更易受到外界扰动影响,从而发生煤与瓦斯突出。在 $10^\circ < \theta_1 \leq 20^\circ$ 与 $10^\circ < \theta_M \leq 20^\circ$ 范围内存在一个煤层倾角突变临界值 θ_T , 当 θ_1 与 θ_M 均大于等于 θ_T 时,易发生低指

标突出。

(2) 瓦斯在倾角突变区集中系数 I_θ 可以为煤层倾角突变区突出危险性的治理提供一定的理论依据,当 θ_1 或 θ_M 一定时,单位突出强度 I_U 与瓦斯在倾角突变区集中系数 I_θ 呈正线性相关关系。

(3) θ_1 及 θ_M 与 AE 能量峰值及累计 AE 能量间呈负相关关系; θ_1 及 θ_M 与 AE 能量低活跃阶段及中活跃阶段时长占比呈负相关关系,与高活跃阶段时长占比呈正相关关系。

(4) 煤层倾角突变区附近温度变化明显高于其余各区域,突出近端区域煤体温度波动较其他区域表现出了更强的不稳定性。

参 考 文 献

- [1] 袁亮,王恩元,马衍坤,等.我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J].煤炭学报,2023,48(5):1825-1845.
YUAN Liang, WANG En-yuan, MA Yan-kun, et al. Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 1825-1845.
- [2] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报,2019,44(5):1283-1305.
XIE He-ping. Research progress of deep rock mechanics and mining theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [3] 唐巨鹏,张昕,潘一山.煤与瓦斯突出物理模拟试验研

- 究现状及展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(3): 521-541.
- TANG Ju-peng, ZHANG Xin, PAN Yi-shan. Research status and prospect on physical simulation test of coal and gas outburst[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2024, 43(3): 521-541.
- [4] 王磊, 陈礼鹏, 刘怀谦, 等. 不同初始瓦斯压力下煤体动力学特性及其劣化特征[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 144-158.
- WANG Lei, CHEN Li-peng, LIU Huai-qian, et al. Dynamic behaviors and deterioration characteristics of coal under different initial gas pressures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(1): 144-158.
- [5] BLACK D J. Review of coal and gas outburst in Australian underground coal mines[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2019, 29(6): 815-824.
- [6] WU S Y, GUO Y Y, LI Y X, et al. Research on the mechanism of coal and gas outburst and the screening of prediction indices[J]. **Procedia Earth and Planetary Science**, 2009, 1(1): 173-179.
- [7] 徐德宇. 构造变形对煤与瓦斯突出的控制作用研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
- XU De-yu. Research on the control role of tectonic deformation on coal and gas protrusion[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2018.
- [8] 王恩元, 张国锐, 张超林, 等. 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 297-322.
- WANG En-yuan, ZHANG Guo-rui, ZHANG Chao-lin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. **Journal of China Coal Society**, 2022, 47(1): 297-322.
- [9] TU Q Y, CHENG Y P, XUE S, et al. Analysis of the coal and gas outburst mechanism from the perspective of tectonic movement[J]. **Geofluids**, 2021, 2021(1): 9988420.
- [10] HOU C, ZHANG Y H, YAN Y. Effects of coal seam dip angle on the outburst in coal roadway excavation[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2019, 29(5): 757-764.
- [11] ZHAO P X, ZHUO R S, LI S G, et al. Fractal characteristics of methane migration channels in inclined coal seams[J]. **Energy**, 2021, 225: 120127.
- [12] 杨威, 林柏泉, 屈永安, 等. 煤层采动应力场空间分布的数值模拟研究[C]//2010(沈阳)国际安全科学与技术学术研讨会论文集. 沈阳: 东北大学出版社, 2010: 339-344.
- YANG Wei, LIN Bai-quan, QU Yong-an, et al. Numerical investigations of the stress distribution caused by the mining activities[C]//2010 (Shenyang) International Colloquium on Safety Science and Technology. Shenyang: Northeastern University Press, 2010: 339-344.
- [13] 焦汉林, 杨胜强, 李贺. 煤层倾角变化对石门揭煤突出危险性影响的数值模拟研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(4): 150-153.
- JIAO Han-lin, YANG Sheng-qiang, LI He. Study on numerical simulations of outburst risk influence on cross cut in uncovering coal seam at different dip angles[J]. **Coal Technology**, 2015, 34(4): 150-153.
- [14] 于美鲁, 左宇军, 潘超, 等. 逆断层倾角对煤与瓦斯突出影响的研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(11): 171-174.
- YU Mei-lu, ZUO Yu-jun, PAN Chao, et al. Study on impact of reverse fault dip on coal and gas outburst[J]. **Safety in Coal Mines**, 2017, 48(11): 171-174.
- [15] 马曙. 贵州煤矿煤与瓦斯突出主控因素及规律研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2009.
- MA Shu. Research on the main control factors and law of coal and gas protrusion in Guizhou coal mines[D]. Guiyang: Guizhou University, 2009.
- [16] 刘高峰, 张子成, 宋志敏, 等. 两软一硬煤层突出控制因素与发生规律[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2013, 32(5): 531-535.
- LIU Gao-feng, ZHANG Zi-xu, SONG Zhi-min, et al. Control factors and occurrence regularity on coal and gas outburst of two-soft and one-hard coalbed[J]. **Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)**, 2013, 32(5): 531-535.
- [17] 程远平, 雷杨, 杨斯杰. 煤与瓦斯突出相似模拟试验的能量原理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 4078-4096.
- CHENG Yuan-ping, LEI Yang, YANG Si-jie. Energy principle of simulation experiments on coal and gas outburst[J]. **Journal of China Coal Society**, 2023, 48(11): 4078-4096.
- [18] 姜笑楠. 基于应力指数法冲击地压瓦斯突出复合灾害危险性评价与防治研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2022.
- JIANG Xiao-nan. Study on risk assessment and prevention of compound disaster of rock burst and gas outburst based on stress index method[D]. Shenyang: Liaoning University, 2022.
- [19] 曹康, 李忠辉, 余得胜, 等. 掘进工作面煤与瓦斯突出前兆特征及综合预警研究[J]. 煤炭科学技术, 2020,

- 48(11): 147-152.
- CAO Kang, LI Zhong-hui, YU De-sheng, et al. Study on precursor characteristics and comprehensive early warning of coal and gas outburst risk in driving face[J]. **Coal Science and Technology**, 2020, 48(11): 147-152.
- [20] 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(增刊 1): 2875-2880.
- LI Xin-ping, WANG Bin, ZHOU Gui-long, et al. Research on distribution rule of geostress in deep stratum in the mainland of China[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Suppl.1): 2875-2880.
- [21] 任凌冉. 深部煤与瓦斯突出温度和冲击力演化规律研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
- REN Ling-ran. Study on evolution law of temperature and impact force of coal and gas outburst in deep coal mines[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.
- [22] 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 Gui-bing, LI Bo-bo, et al. Experimental study on briquette mechanics and permeability characteristics under different binder ratios[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(1): 104-110.
- [23] 孙海涛, 朱墨然, 曹偲, 等. 突出煤层相似材料配比模型构建的正交试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 116-122.
- SUN Hai-tao, ZHU Mo-ran, CAO Jie, et al. Orthogonal experimental study on proportioning model construction of similar materials of outburst coal seam[J]. **Coal Science and Technology**, 2019, 47(8): 116-122.
- [24] 郝娜. 深部煤与瓦斯突出孕育特征及声发射能量演化规律研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021.
- HAO Na. Study on breeding characteristics of deep coal and gas outburst and the evolution law of acoustic emission energy[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021.
- [25] 耿加波. 煤与瓦斯突出灾变时空演化及其煤-瓦斯两相流运移特性物理模拟试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- GENG Jia-bo. Experimental study on physical simulation of spatio-temporal evolution of coal and gas protrusion catastrophe and its coal-gas two-phase flow transport characteristics[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [26] 郭品坤. 煤与瓦斯突出层裂发展机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- GUO Pin-kun. Research on the development mechanism of coal and gas protruding layer fracture[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [27] 许江, 程亮, 周斌, 等. 突出过程中煤-瓦斯两相流运移的物理模拟研究[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 in coal and gas outburst process[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(10): 1945-1953.
- [28] 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, 41(6): 1081-1092.
- TANG Ju-peng, ZHANG Xin, PAN Yi-shan, et al. Experimental study on outburst and impact evolution characteristics of coal and gas in deep roadways[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2022, 41(6): 1081-1092.
- [29] LI J G, HU Q T, YU M G, et al. Acoustic emission monitoring technology for coal and gas outburst[J]. **Energy Science & Engineering**, 2019, 7(2): 443-456.
- [30] ZHANG X, TANG J P, PAN Y S, et al. Experimental study on intensity and energy evolution of deep coal and gas outburst[J]. **Fuel**, 2022, 324: 124484.
- [31] 胡千庭, 周世宁, 周心权. 煤与瓦斯突出过程的力学作用机理[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1368-1372.
- HU Qian-ting, ZHOU Shi-ning, ZHOU Xin-quan. Mechanical mechanism of coal and gas protrusion[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(12): 1368-1372.
- [32] ZHANG C L, WANG E Y, XU J, et al. Research on temperature variation during coal and gas outbursts: implications for outburst prediction in coal mines[J]. **Sensors**, 2020, 20(19): 5526.
- [33] 杨孝波, 许江, 周斌, 等. 煤与瓦斯突出发生前后煤层温度演化规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(1): 206-214.
- YANG Xiao-bo, XU Jiang, ZHOU Bin, et al. Evolution law of coal seam temperature before and after coal and gas outburst[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2021, 38(1): 206-214.
- [34] 张超林, 许江, 彭守建. 煤与瓦斯突出及其防控物理模拟试验研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2020.
- ZHANG Chao-lin, XU Jiang, PENG Shou-jian. Physical simulation experimental research on coal and gas protrusion and its prevention and control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2020.