

文章编号: 1671-251X(2024)04-0121-07

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2023100059

煤的原位瓦斯放散初速度测定装置及方法研究

薛伟超^{1,2}

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 抚顺 113122)

摘要: 瓦斯放散初速度是鉴定煤与瓦斯突出危险性的重要指标之一。现有研究未将煤的瓦斯放散初速度指标测试与突出鉴定的其他3个指标(煤层瓦斯压力、煤的破坏类型、煤的坚固性系数)的测试有机结合。现行瓦斯放散初速度测定方法基于AQ 1080—2009《煤的瓦斯放散初速度指标(Δp)测定方法》,测定结果仅反映标准实验条件下瓦斯通过煤粒子向外释放的难易程度,未考虑煤层瓦斯赋存的原位环境,无法准确反映现场煤岩体内部瓦斯向外释放的灾害严重程度。针对上述问题,提出了一种原位瓦斯放散初速度测定装置及方法:采用原始煤块代替煤颗粒,用原始瓦斯成分代替甲烷,增加煤体所处瓦斯压力、应力、温度环境,还原测定的原位环境。对某煤矿煤与瓦斯突出煤层进行原位瓦斯放散初速度测定试验,得出结论:①随着模拟瓦斯放散过程的进行,瓦斯放散流量逐渐减小,随时间大致呈负指数变化规律。用瓦斯流量表征原位瓦斯放散初速度,则 $\Delta p_{QA}=7.1$ mmHg, $\Delta p_{QI}=2.9$ mmHg。②随着模拟放散过程的进行,放散空间内的瓦斯压力逐渐增大,放散瓦斯压力增大速度逐渐减小,瓦斯压力随时间变化大致呈对数函数关系。用放散瓦斯压力表征原位瓦斯放散初速度,则 $\Delta p_{PA}=25$ mmHg, $\Delta p_{PI}=26.6$ mmHg, $\Delta p_{PD}=11$ mmHg。测定结果可综合反映煤层赋存的双重孔隙结构、煤体的力学特性、煤体内瓦斯的赋存能量、煤层赋存的地应力和温度等原位环境,真实反映煤矿井下发生突出危险性程度。

关键词: 煤与瓦斯突出; 突出危险性鉴定; 瓦斯放散初速度; 原位环境; 放散瓦斯压力; 放散瓦斯流量
中图分类号: TD712 文献标志码: A

Research on the device and method for measuring the initial velocity of in-situ gas emission from coal

XUE Weichao^{1,2}

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. CCTEG Shenyang Research Institute, Fushun 113122, China)

Abstract: The initial velocity of gas emission is one of the important indicators for identifying the risk of coal and gas outburst. The existing research has not organically combined the testing of the initial gas emission rate index of coal with the testing of the other three indicators for outburst identification (coal seam gas pressure, coal failure type, and coal solidity coefficient). The current method for measuring the initial velocity of gas emission is based on AQ 1080-2009 "Method for Measuring the Initial Velocity Index (Δp) of Coal Gas Emission". The measurement results only reflect the difficulty of gas emission through coal particles under standard experimental conditions, without considering the in-situ environment of coal seam gas occurrence. The results cannot accurately reflect the severity of the disaster of gas emission inside the coal rock mass on site. In order to solve the above problems, the device and method for measuring the initial velocity of in-situ gas emission are proposed. The method replaces coal particles with original coal blocks, replaces methane with original gas

收稿日期: 2023-10-19; 修回日期: 2024-04-19; 责任编辑: 李明。

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(2022-MS-463)。

作者简介: 薛伟超(1988—), 男, 河南沁阳人, 副研究员, 博士研究生, 主要从事煤岩动力灾害防治工作, E-mail: xinshijixue@163.com。

引用格式: 薛伟超. 煤的原位瓦斯放散初速度测定装置及方法研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(4): 121-127.

XUE Weichao. Research on the device and method for measuring the initial velocity of in-situ gas emission from coal[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(4): 121-127.



扫码移动阅读

components, increases the gas pressure, stress, and temperature environment in which the coal body is located. The method restores the in-situ environment for measurement. A in-situ gas emission initial velocity measurement experiment is conducted by use of coal samples from coal and gas outburst coal seams in a certain coal mine. The conclusions are listed as follows. ① With the simulation of gas emission process, the gas emission flow rate gradually decreases and shows a negative exponential change law with time. The gas flow rate is used to characterize the initial velocity of in-situ gas emission, then $\Delta p_{QA}=7.1$ mmHg, $\Delta p_{QI}=2.9$ mmHg. ② As the simulation of the gas emission process progresses, the gas pressure in the emission space gradually increases, and the rate of gas pressure increase gradually decreases. The gas pressure changes roughly with time in a logarithmic function relationship. The emission gas pressure is used to characterize the initial velocity of in-situ gas emission, then $\Delta p_{PA}=25$ mmHg, $\Delta p_{PI}=26.6$ mmHg, $\Delta p_{PD}=11$ mmHg. The measurement results can comprehensively reflect the dual pore structure of coal seams, the mechanical properties of coal bodies, the energy of gas occurrence in coal bodies, the in-situ environment of stress and temperature in coal seams, and truly reflect the degree of outburst danger in coal mines underground.

Key words: coal and gas outburst; outburst danger identification; initial velocity of gas emission; in situ environment; emission gas pressure; emission gas flow rate

0 引言

煤与瓦斯突出(简称突出)是破碎的煤、岩和瓦斯在地应力和瓦斯耦合作用下突然向采掘空间抛出的动力现象,是影响煤矿安全生产的重大灾害。突出机理尚不完全清楚。目前防治的基本流程是先对煤层进行突出危险性评估或鉴定,其中采用单项指标测定法鉴定所需的 4 个单项指标分别为煤层瓦斯压力、煤的破坏类型、煤的坚固性系数和煤的瓦斯放散初速度。

煤的瓦斯放散初速度是反映煤层突出危险性的关键指标,其表征煤的微观结构,反映煤放散瓦斯的能力^[1-4]。我国学者对煤的瓦斯放散初速度的影响因素和特性进行了大量研究^[5]。雷红艳^[6]基于多元线性回归统计,得出常压瓦斯吸附量、瓦斯吸附常数和煤的坚固性系数是对煤的瓦斯放散初速度影响最显著的 3 个煤样参数。郭怀广等^[7]认为煤的瓦斯放散初速度与突出强度、突出距离及相对突出强度之间存在正相关关系。曹焱林^[8]研究了高压吸附条件下煤样在 0~60 s 内的瓦斯放散初速度规律,发现 10~60 s 内瓦斯放散初速度 $\Delta p_{10\sim 60}$ 和 0~60 s 内瓦斯放散初速度 $\Delta p_{0\sim 60}$ 基本上保持正比例关系,部分煤样在前 10 s 内已放散出大部分瓦斯。富向等^[9]研究了热力-动力复合变质煤的瓦斯放散特征,认为瓦斯放散速度曲线符合幂函数变化趋势,热力-动力复合变质煤吸附瓦斯能力较正常煤更强。周秀红等^[10]认为要取软分层的构造煤样,且在煤样原始水分的条件下测量瓦斯放散初速度,才能确保突出鉴定的准确性。

现有研究未将煤的瓦斯放散初速度测试与突出鉴定的其他 3 个单项指标测试有机结合,导致表征突出危险的 4 个单项指标临界值松散、不紧凑。此外,现行煤的瓦斯放散初速度指标测定方法没有反映煤矿现场真实存在的原位环境问题。针对上述问题,本文提出一种原位瓦斯放散初速度测定装置及方法。

1 现行瓦斯放散初速度测定方法存在的问题

煤的瓦斯放散初速度名义上是指煤在初始揭露后,煤中瓦斯向外界空间逸散的速度。但实际上,煤的瓦斯放散初速度在 AQ 1080—2009《煤的瓦斯放散初速度指标(Δp)测定方法》中定义为“3.5 g 定规模度的煤样在 0.1 MPa 压力下吸附瓦斯后向固定真空空间释放时,用压差(Δp) (mmHg)表示的 10~60 s 时间内释放出瓦斯量指标”。这是现行的煤的瓦斯放散初速度测定所采用的表征方法。该方法在煤层突出危险性鉴定方面发挥着至关重要的作用,但也存在以下缺点。

1) 该方法测定前对煤样进行处理,筛分出粒度为 0.20~0.25 mm 的煤样,取 3.5 g。这样无法体现出原位煤样节理裂隙的结构特性,而原位煤作为一种双重孔隙结构的岩体,其节理裂隙对瓦斯的吸附与解吸、放散与运移具有重要作用^[4, 11-13],进而影响突出发生。

2) 该方法取煤样测定其在 0.1 MPa 时 10~60 s 内向固定真空空间释放的瓦斯量,是固定压差下的煤中瓦斯导流能力测试,忽略了煤层赋存的结构特征^[14]、煤体的力学特性、煤层内瓦斯的“游离+吸

进行内部数据计算处理;与阀门 1—阀门 10、增压泵、温度控制器、真空泵电连接,根据内部算法控制其动作。

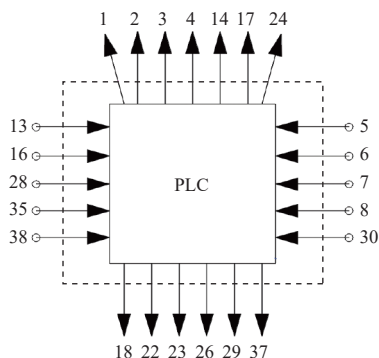


图 2 PLC 控制模块

Fig. 2 PLC control module

PLC 控制模块可输入待测煤层的原位瓦斯参数及环境参数,包括煤层瓦斯压力、煤层瓦斯含量、三维地应力($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)、煤层瓦斯气体组分、煤层温度、煤矿井下采掘巷道大气压力,根据各温度传感器和压力传感器监测数据,结合输入参数,自动进行计算并判断,进而驱动受控元件动作。

2.2 测定方法

基于煤的原位瓦斯放散初速度测定装置^[21],提出了一种煤的原位瓦斯放散初速度测定方法,具体步骤如下。

1) 获取实测的原位瓦斯参数及环境参数。

2) 根据原位环境参数中的瓦斯成分,将不同的气体进行混合,通过增压装置和温控装置控制其压力和温度,使制备的原位瓦斯气体组分、压力、温度符合原位环境参数。

3) 对原位环境室中的测试煤样加载,得到三维地应力。将制备好的原位瓦斯气体充入原位环境室。放散空间压力调整至符合原位环境参数的煤矿井下采掘巷道大气压力。

4) 连通原位环境室与瓦斯放散空间,进行原位瓦斯气体放散,并获取原位条件下第三标定时间段(如 0~60 s)内瓦斯放散流量 $Q(t)$ 和放散空间压力 $P(t)$, t 为时间。

5) 瓦斯放散流量 $Q(t)$ 对时间 t 的导数即为原位瓦斯流量放散速度 $v_Q(t)$, 放散空间压力 $P(t)$ 对时间 t 的导数即为原位瓦斯压力放散速度 $v_P(t)$ 。特别地,记录 $t=10$ s 和 $t=60$ s 时的原位瓦斯流量放散速度 $v_Q(10)$ 和 $v_Q(60)$ 、原位瓦斯压力放散速度 $v_P(10)$ 和 $v_P(60)$, 即可得出 AQ 1080—2009《煤的瓦斯放散初速度指标(Δp)测定方法》标准框架体系下,用瓦斯流量表征的原位瓦斯放散速度 $\Delta p_Q = v_Q(60) - v_Q(10)$, 用

瓦斯压力表表征的原位瓦斯放散速度 $\Delta p_P = v_P(60) - v_P(10)$ 。同时还可对 $v_Q(t)$ 和 $v_P(t)$ 求导,得出原位瓦斯流量放散速度衰减曲线及原位瓦斯压力放散速度衰减曲线。

3 测定装置及方法试验

某矿为突出矿井, S 煤层为突出煤层。现场取煤样, 测定该煤层的原位瓦斯放散初速度。

3.1 原位环境参数测定

根据《煤矿井下煤层瓦斯压力的直接测定方法》, 测得 S101 工作面回风巷距开口处 800 m 的 S 煤层瓦斯压力(相对)为 0.52 MPa。采用水压致裂法测得该处的地应力 $\sigma_1=35$ MPa, $\sigma_2=20$ MPa, $\sigma_3=16$ MPa。根据 GB/T 23250—2009《煤层瓦斯含量井下直接测定方法》测得 S 煤层的自然瓦斯成分—— N_2 , CH_4 , CO_2 , C_2-C_8 的体积分数分别为 85.39%, 12.56%, 0.88%, 1.17%。采用测温导线法测得 S 煤层的温度为 22.4 °C, 采用空气盒气压计测得煤矿井下采掘巷道 S101 工作面回风巷处的大气压力为 96 kPa。

3.2 测定装置气密性检测

关闭阀门 1—阀门 4、阀门 10, 打开阀门 5—阀门 9, 开启真空泵, 观测压力传感器 2, 当其压力为 -10 kPa 时, 关闭真空泵。观察 10 min, 若压力传感器的示数没有明显变化, 证明测定装置密封性良好。

3.3 原位瓦斯气体制备

通过控制阀门 1—阀门 4 和对应的流量传感器, 使 N_2 、 CH_4 、 CO_2 、 C_2-C_8 的体积比例为 85.39:12.56:0.88:1.17。将总计 10 L 的 4 种气体通过配套管路排进气体混合室充分混合, 关闭阀门 1—阀门 4。通过增压泵使混合气体的压力增加至原煤瓦斯压力 0.52 MPa, 其间通过压力传感器 1 来监测、记录并显示混合气体压力变化。之后将混合气体通过配套管路排至温度控制器, 使混合气体温度达到原煤温度 22.4 °C, 其间通过温度传感器来监测、记录并显示温度控制器内的混合气体温度。整个过程中阀门 5、阀门 6 始终处于关闭状态。由此制备得到具有原位煤层瓦斯压力和温度的原位瓦斯气体。

3.4 原位环境模拟

通过煤矿井下定点取样的方式取测试地点块状煤样, 用切割机制成 5 cm×5 cm×5 cm 的原煤试块。将试块放入原位环境室, 通过应力加载机三向同时逐渐加载, 使得三维地应力 $\sigma_1=35$ MPa, $\sigma_2=20$ MPa, $\sigma_3=16$ MPa。关闭阀门 7、阀门 9, 打开阀门 5, 将制备好的原位瓦斯气体充入原位环境室, 持续 5~

10 min,完成一次充气过程。关闭阀门5、阀门6、阀门8和阀门9,打开阀门7,打开真空泵,释放原位环境室内的气体。观察气体压力传感器的示数,示数低于-1 kPa时关闭真空泵,关闭阀门7,完成一次放气过程。持续5个充气-放气循环,使原位瓦斯气体的温度与煤样温度一致。整个循环由PLC控制模块控制完成,每个循环的实际持续时间和循环的实际次数由PLC控制模块通过接收压力传感器3和温度传感器2的实时数据分析判断。每次充气时,保持煤样内原位瓦斯压力15 min。

打开阀门10,使放散空间内进入空气。关闭阀门10,打开阀门8,打开真空泵,观察压力传感器2示数,当其与所测巷道空间实测压力96 kPa相等时,关闭真空泵,关闭阀门8。这样,放散空间内的压力即调整至煤矿井下采掘空间的实际大气压力。

3.5 原位瓦斯放散及测定

打开阀门9,连通原位环境室与瓦斯放散空间,通过流量传感器5、压力传感器2分别测定、记录第三标定时间段(0~60 s)内瓦斯放散流量和放散空间压力,并将相关数据实时传输给PLC控制模块进行记录。

4 瓦斯放散数据分析

4.1 流量表征瓦斯放散初速度

放散过程测得标定条件下第三标定时间段(0~60 s)内原位瓦斯放散流量曲线 $Q(t)$,如图3所示。

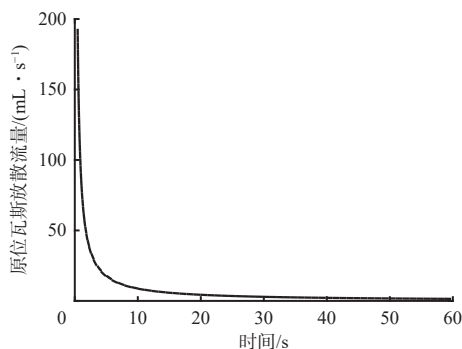


图3 本文方法测定的原位瓦斯放散流量曲线

Fig. 3 In-situ gas emission flow curve measured by the method in the paper

图3中曲线的拟合方程为

$$Q(t) = 86.881t^{-1} \quad R^2 = 0.9575 \quad (1)$$

式中: $t \in (a, 60 \text{ s}]$, a 为突出模拟发生的启动时间与传感器测得数据所需的反应时间之和, $a \approx 0.45 \text{ s}$; R^2 为相关系数。

从图3可看出: $t=0.45 \text{ s}$ (初始时刻)时瓦斯放

散流量为 $193.1 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$, $t=60 \text{ s}$ 时瓦斯放散流量为 $1.4 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$;随着模拟放散过程的进行,瓦斯放散流量逐渐减小,大致呈负指数变化规律。

用第三标定时间段内任意时刻的瞬时流量或第三标定时间段内任一时间段的平均流量表征煤的原位瓦斯放散初速度。对设备参数进行标准化设置,对测试结果进行无量纲处理。若取第三标定时间段内的平均瓦斯放散流量作为煤的原位瓦斯放散初速度 Δp_{QA} ,则通过函数求导取平均值可得 $\Delta p_{QA} = 7.1 \text{ mmHg}$ 。若取第一标定时刻(30 s)的瞬时速度作为煤的原位瓦斯放散初速度 Δp_{QI} ,则 $\Delta p_{QI} = Q(30) = 2.9 \text{ mmHg}$ 。

根据AQ 1080—2009《煤的瓦斯放散初速度指标(Δp)测定方法》测得的瓦斯放散流量曲线如图4所示。

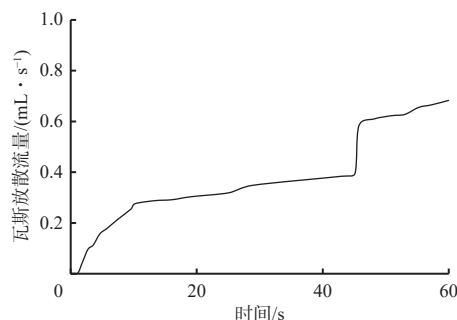


图4 现行方法测定的瓦斯放散流量曲线

Fig. 4 Gas emission flow curve measured by existing method

对比图3和图4可知,采用原位瓦斯放散初速度测定装置测得的瓦斯放散流量体现了突出发生过程的内在规律,反映了突出事故的突然性和对井下巷道、设施破坏的危险性。

对式(1)进行积分,可求得放散空间内瓦斯放散量随时间变化情况,如图5所示。

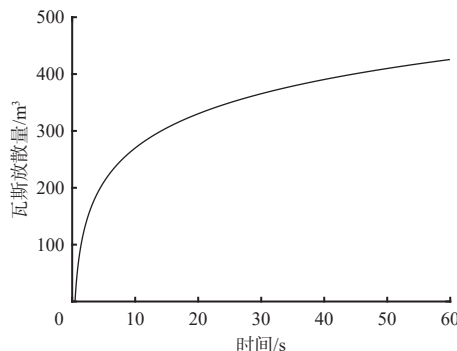


图5 瓦斯放散量随时间变化曲线

Fig. 5 Variation curve of gas emission volume with time

瓦斯放散量 $V(t)$ 随时间 t 变化规律为

$$V(t) = 86.881 \ln(t/s) + 69.375 \quad (2)$$

从图5可看出,随着放散过程进行,瓦斯放散量

不断增多,大致呈对数变化规律,60 s 内瓦斯放散总量为 425.1 mL。

4.2 压力表征瓦斯放散初速度

放散过程测得标定条件下第三标定时间段(0~60 s)内,原位瓦斯放散压力曲线 $P(t)$,如图 6 所示。

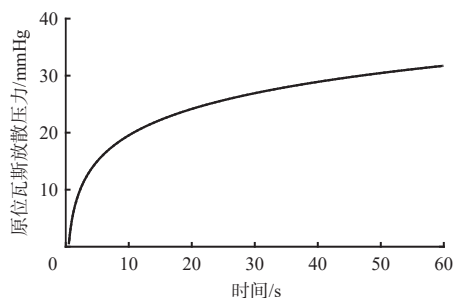


图 6 本文方法测定的原位瓦斯放散压力曲线

Fig. 6 In-situ gas emission pressure curve measured by the method in the paper

图 6 中曲线的拟合方程为

$$P(t) = 6.1626 \ln(t/s) + 5.6380 \quad R^2 = 0.9532 \quad (3)$$

从图 6 可看出:随着模拟放散过程的进行,放散空间内的瓦斯压力逐渐增大,瓦斯压力增大速度逐渐减小;放散空间内的瓦斯压力随时间变化大致呈对数函数关系, $t=60$ s 测得最大瓦斯放散压力,为 30.9 mmHg。

用第三标定时间段内任意时刻的瞬时压力或第三标定时间段内任意时间段的平均压力表征煤的原位瓦斯放散初速度。对设备参数进行标准化设置,对测试结果进行无量纲处理。若取第三标定时间段内的平均瓦斯放散压力作为煤的原位瓦斯放散初速度 Δp_{PA} ,则 $\Delta p_{PA}=25$ mmHg;若取第一标定时刻(30 s)的瞬时压力作为煤的原位瓦斯放散初速度 Δp_{PI} ,则 $\Delta p_{PI}=P(30)=26.6$ mmHg。

若参考 AQ 1080—2009《煤的瓦斯放散初速度指标(Δp)测定方法》中采用压差表征瓦斯放散初速度的方法,记录 10 s 时压力传感器 2 的读数 p_1 及 60 s 时读数 p_2 。无量纲处理后,计算煤的原位瓦斯放散初速度 $\Delta p_{PD}=p_1-p_2=P(60)-P(10)=11$ mmHg。

5 结论

1) 设计了煤的原位瓦斯放散初速度测定装置。考虑煤层赋存的原位瓦斯环境,将突出鉴定的 4 个单向指标统一起来,提出了一种煤的原位瓦斯放散初速度测定方法。

2) 随着模拟瓦斯放散过程的进行,瓦斯放散流量逐渐减小,大致呈负指数变化规律。用瓦斯流量

表征原位瓦斯放散初速度,则 $\Delta p_{QA}=7.1$ mmHg, $\Delta p_{QI}=2.9$ mmHg。

3) 随着模拟放散过程的进行,放散空间内的瓦斯压力逐渐增大,瓦斯压力增大的速度逐渐减小,瓦斯压力随时间变化大致呈对数函数关系。用放散空间内瓦斯压力表征原位瓦斯放散初速度,则 $\Delta p_{PA}=25$ mmHg, $\Delta p_{PI}=26.6$ mmHg, $\Delta p_{PD}=11$ mmHg。

4) 提出的原位瓦斯放散初速度测定方法所得结果能够综合反映煤层赋存的双重孔隙结构、煤体的力学特性、煤体内瓦斯的赋存能量、煤层赋存的地应力和温度等原位环境,真实反映煤矿井下发生突出的危险性,是一个综合指标,突破了以往突出危险性预测指标分散、单项指标临界值地区差异大等难题,可更方便、精准地指导煤矿井下突出危险性预测和防治工作。

参考文献(References):

- [1] 李成武,雷东记. 静电场对煤放散瓦斯特性影响的实验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6): 962-966.
LI Chengwu, LEI Dongji. Experimental research of the influence of static electric field on the characteristics of coal gas emission[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6): 962-966.
- [2] 刘军,王兆丰. 煤变质程度对瓦斯放散初速度的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2013, 32(6): 745-748.
LIU Jun, WANG Zhaofeng. Relation between metamorphic grade and initial velocity of gas diffusion[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2013, 32(6): 745-748.
- [3] 陈立. 煤粉化驱动瓦斯放散机理及突出预测方法研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
CHEN Li. Study on gas desorption mechanism by coal pulverization driven and predication method of outburst[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [4] 陈刘瑜,李希建,沈仲辉,等. 贵州北部突出煤的孔隙结构及分形特征研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(2): 66-72.
CHEN Liuyu, LI Xijian, SHEN Zhonghui, et al. Pore structure and fractal characteristics of outburst coal in northern Guizhou[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(2): 66-72.
- [5] 杨萌萌,袁梅,徐林,等. 煤的瓦斯放散初速度影响因素实验现状研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(2): 168-170.
YANG Mengmeng, YUAN Mei, XU Lin, et al. Study of experimental situation of influence factors on initial speed of methane diffusion[J]. Coal Technology, 2016, 35(2): 168-170.

- [6] 雷红艳. 基于多元线性回归的瓦斯放散初速度影响因素试验研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(2): 9-15.
LEI Hongyan. Experimental study on influencing factors of initial gas emission velocity based on multiple linear regression[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(2): 9-15.
- [7] 郭怀广, 朱立凯. 深部动力灾害诱发机理及影响因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 175-181.
GUO Huaiguang, ZHU Likai. Discussion on mechanism and influencing factors of deep dynamic disaster[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 175-181.
- [8] 曹垚林. 高压吸附下的瓦斯放散初速度研究[J]. 煤矿安全, 2004, 35(9): 4-6.
CAO Yaolin. Study on initial speed of methane diffusion in the condition of high pressure absorption[J]. Safety in Coal Mines, 2004, 35(9): 4-6.
- [9] 富向, 沙慧慧, 陈志平, 等. 热力-动力复合变质煤的瓦斯放散特征及表征指标研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2023, 42(6): 641-648.
FU Xiang, SHA Huihui, CHEN Zhiping, et al. Study on gas dispersion characteristics and characterization indexes of thermodynamic composite metamorphic coal[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2023, 42(6): 641-648.
- [10] 周秀红, 杨胜强, 胡新成, 等. 煤与瓦斯突出鉴定的现状及建议[J]. 煤矿安全, 2011, 42(1): 116-118.
ZHOU Xiuhong, YANG Shengqiang, HU Xincheng, et al. The present situation and advises to the identification of coal and gas outburst[J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(1): 116-118.
- [11] 程波, 马代辉, 高月. 煤的灰分、挥发分与孔隙率的关联及其对瓦斯放散初速度的影响[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(1): 12-17.
CHENG Bo, MA Daihui, GAO Yue. Correlation of ash content, volatile matter and porosity of coal and their impact on initial speed of methane diffusion[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2017, 44(1): 12-17.
- [12] 王玉丽. 贵州低渗突出煤层瓦斯解吸及放散初速度试验研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
WANG Yuli. Experimental study on gas desorption and initial velocity of gas dispersion in low permeability and outburst coal seam in Guizhou[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018.
- [13] 林海飞, 程博, 李树刚, 等. 煤的吸附孔结构对瓦斯放散特性影响的实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(3): 557-563.
LIN Haifei, CHENG Bo, LI Shugang, et al. Experimental study on the effect of adsorption pore structure on gas emission characteristics[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(3): 557-563.
- [14] 王月红, 陈庆亚. 煤的微观结构对瓦斯放散特性的影响研究[J]. 华北科技学院学报, 2014, 11(7): 1-5.
WANG Yuehong, CHEN Qingya. Research on influence of microstructure of coal on the gas radiation characteristics[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2014, 11(7): 1-5.
- [15] 张小东, 李朋朋, 张硕. 不同煤体结构煤的瓦斯放散特征及其影响机理[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(9): 93-98.
ZHANG Xiaodong, LI Pengpeng, ZHANG Shuo. Gas emission features of coals with different coalbody structure and their influencing mechanism[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(9): 93-98.
- [16] 陈向军, 程远平, 王林. 水分对不同煤阶煤瓦斯放散初速度的影响[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(12): 62-65.
CHEN Xiangjun, CHENG Yuanping, WANG Lin. Moisture content affected to initial gas emission velocity of different ranking coal[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(12): 62-65.
- [17] 秦兴林. 水分对不同变质程度煤瓦斯放散初速度的影响研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 1063-1067.
QIN Xinglin. Study on the influence of moisture content on initial gas emission velocity of different rank coals[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(3): 1063-1067.
- [18] 秦恒洁, 魏建平, 李栋浩, 等. 煤与瓦斯突出过程中地应力作用机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(5): 933-942.
QIN Hengjie, WEI Jianping, LI Donghao, et al. Research on the mechanism of in-situ stress in the process of coal and gas outburst[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(5): 933-942.
- [19] SHANG Xianguang, WEI Jianping, WEN Zhihui, et al. Determination of initial velocity of gas diffusion under temperature control[J]. Frontiers in Earth Science, 2023. DOI: [10.3389/FEART.2023.1138828](https://doi.org/10.3389/FEART.2023.1138828).
- [20] 郭志刚. 温度和放散空间体积对等容变压法测定瓦斯放散初速度的影响分析[J]. 能源与环保, 2018, 40(12): 42-44, 48.
GUO Zhigang. Influences of temperature and dissipate space volume on determination of gas initial emission velocity by isobaric variable pressure method[J]. China Energy and Environmental Protection, 2018, 40(12): 42-44, 48.
- [21] 薛伟超, 李艳增, 王春光, 等. 一种煤的原位瓦斯放散初速度测定装置及方法: CN115561115A[P]. 2023-01-03.
XUE Weichao, LI Yanzeng, WANG Chunguang, et al. A measurement device and method of the in-situ gas emission initial velocity of coal: CN115561115A[P]. 2023-01-03.