

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.051

煤矿智能集成传感器设计与性能分析

庞博, 于晓波, 卢燃

(国能北电胜利能源有限公司, 内蒙古自治区 锡林浩特 026099)

摘要:针对煤矿瓦斯和岩石爆炸事故频发的问题,设计一种集成式智能传感器 CW-1。通过实验室动态特性测试和 Barbara 实验矿现场试验,对传感器性能进行全面评估。结果表明:压力和声音传感器能在 80 ms 内快速响应突发事件,而瓦斯浓度传感器的响应时间约为 2 s。实验室测试中,传感器在 4.5×10^5 Pa 初始压力下能准确捕捉 6.5 ms 的压力波周期。现场试验中,CW-1 传感器在模拟爆炸后能同步记录压力、声音和瓦斯浓度变化。研究结论表明:CW-1 传感器具备快速、准确检测煤矿突发事件的能力,为提高煤矿安全生产水平提供了可靠的技术支持。

关键词:煤矿安全;瓦斯和岩石爆炸;集成式传感器;动态特性;实时监测;智能检测

中图分类号:TD76;TP212.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)06-0279-05

Design and Performance Analysis of Intelligent Integrated Sensors in Coal Mines

PANG Bo, YU Xiaobo, LU Ran

(Guoneng Beidian Shengli Energy Co., Ltd., Xilinhot 026099, China)

Abstract: An integrated intelligent sensor, CW-1, was designed to address the frequent safety issues caused by gas and rock outbursts in coal mines. The sensor's performance was thoroughly evaluated through laboratory dynamic characteristic testing and field trials at the Barbara experimental mine. Results showed that the pressure and sound sensors could respond to sudden events within 80 milliseconds, while the gas concentration sensor took approximately 2 seconds. In laboratory tests, the sensor accurately captured a pressure wave cycle of 6.5 milliseconds under an initial pressure of 4.5×10^5 Pa. In field trials, the CW-1 sensor synchronized the recording of pressure, sound, and gas concentration changes after a simulated explosion. The study concluded that the CW-1 sensor is capable of rapidly and accurately detecting sudden events in coal mines, providing reliable technical support for enhancing coal mine safety.

Keywords: coal mine safety; gas and rock protrusion; integrated sensors; dynamic characterization; real-time monitoring; intelligent detection

0 引言

煤矿瓦斯和岩石爆炸是严重威胁矿工生命安全的灾害之一^[1-5]。近年来,随着开采深度的增加,发生这类事故频率和其危害程度不断上升^[6-8]。WANG 等^[9]对煤-气复合动力灾害进行了分类和机制分析,强调了快速检测的重要性。为应对这一挑战,研究人员开发了多种监测技术。XU 等^[10]提出了煤与瓦斯爆炸动力系统模型,为爆炸机制研究提供了新思路。SADEGHI 等^[11]设计了基于无线传感网络的煤矿人员定位系统,提高了矿井安全管理水平。然而,现有的单一参数监测方法往往反应滞后,难以满足突发事件的快

速响应需求^[12-14]。

针对这一问题,本研究开发了一种集成式智能传感器 CW-1,结合压力、声音和瓦斯浓度三重检测方法,旨在实现对突发事件的快速、准确识别。本文通过实验室动态特性测试和现场试验,全面评估了 CW-1 传感器的性能,为煤矿安全生产提供了新的技术支持。

1 集成式爆炸检测传感器

本研究开发了一种集成式爆炸检测传感器 CW-1。CW-1 集成传感器是一种针对瓦斯与岩石突发事件设计的多功能智能检测装置,由压力传感器、麦克风和甲烷传感器 3 部分组成,如图 1

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61862046)

第一作者简介:庞博(1988—),男,内蒙古自治区锡林郭勒盟人,工程师,硕士,研究方向为设备维护管理、煤矿智能化设备,hsbb104@163.com。

所示。压力传感器用于实时检测巷道内的快速压力变化,量程覆盖 $8 \times 10^4 \sim 12 \times 10^4$ Pa,具备抗过载能力。麦克风捕捉突发事件中的声学信号,结合算法区分背景噪声与异常信号,确保检测精度。甲烷传感器作为核心元件,由两个检测器组成:0%~5%CH₄范围的微珠式检测器和5%~100%CH₄范围的热导式检测器,实现了0%~100%CH₄的浓度覆盖。传感器通过智能算法整合压力、声波及甲烷浓度的动态变化及其时间关系,精准判定突发事件,避免误报。整体设计具有防爆特性(EEExiaI/II(CH₄))和IP54防护等级,适应矿山高湿度、高粉尘环境。传感器还具备自动触发报警和紧急断电功能,并通过快速信号处理提高了响应效率,体现了智能化和高可靠性的设计理念。

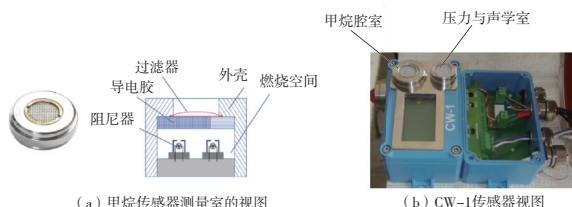


图1 集成式CW-1爆炸检测传感器

报警触发算法是CW-1集成式爆炸检测传感器的核心组成部分,其设计旨在快速、准确地识别瓦斯和岩石爆炸事件,同时最大程度地减少误报。该算法综合分析来自压力传感器、声学传感器和瓦斯浓度传感器的数据。算法的核心在于其时间关联分析和自学习功能。时间关联分析采用滑动时间窗口法,定义时间窗口 T 。在此窗口内,算法计算各参数(压力、声学信号和瓦斯浓度)相对于基线的加权累积和 $S(t)$ 公式如下:

$$S(t) = \sum (w_p \times \Delta P + w_s \times \Delta S + w_c \times \Delta C) \quad (1)$$

式中: w_p 、 w_s 和 w_c 分别为压力、声学信号和瓦斯浓度变化的权重; ΔP 、 ΔS 和 ΔC 为相对于基线的变化。当 $S(t)$ 超过预设的阈值 $S_{\text{threshold}}$ 时,触发报警。

自学习功能通过动态调整权重和阈值来优化算法的性能,适应不同矿井的环境变化^[15]。首先,采用指数移动平均法更新各参数的基线值,公式为^[16]

$$B_{\text{new}} = \alpha \times C_v + (1 - \alpha) \times B_{\text{old}} \quad (2)$$

式中: α 为平滑因子; C_v 为当前传感器读取的信号值; B_{new} 和 B_{old} 分别为当前步长和上一时间步长的基线值。

同时,权重的调整使用梯度下降法,公式如下^[17]:

$$w_{\text{new}} = w_{\text{old}} - \eta \times \frac{\partial E}{\partial w} \quad (3)$$

式中: η 为学习率; E 为检测误差; w_{old} 和 w_{new} 分别为更新前、更新后的权重。通过这种自学习机制,算法能够逐步优化检测精度,并适应不同矿井的特定条件。

报警触发算法的伪代码如表1所示。

表1 报警触发算法伪代码

步骤	伪代码
1	初始化参数(阈值,权重,时间窗口 T)
2	while (true) do
3	读取传感器数据(P , S , C)
4	计算变化率(dP/dt , dS/dt , dC/dt)
5	更新基线值(指数移动平均法)
6	计算加权累积和 $S(t)$
7	if $S(t) > S_{\text{threshold}}$ then
8	触发初级警报
9	进入高频采样模式
10	if 连续 T 秒内 $S(t) > S_{\text{threshold}}$ then
11	触发最终警报
12	end if
13	end if
14	更新权重(梯度下降法)
15	end while

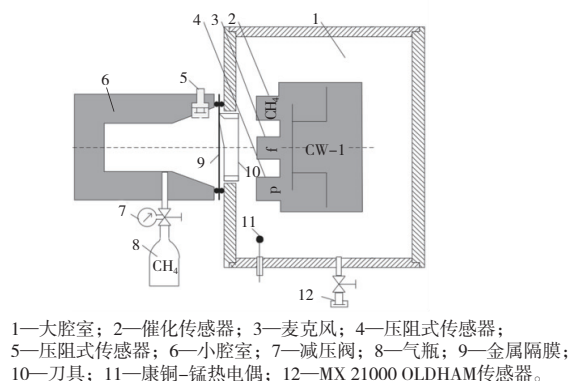
2 实验室测试台

随着煤矿安全生产要求的不断提高,智能集成传感器在爆炸预警中的应用日益广泛^[18-19]。为了评估CW-1智能集成传感器的性能,本研究设计了专门的实验室测试台,如图2所示。该测试台模拟了煤矿井下爆炸事件的动态过程,为传感器的优化提供了重要依据。

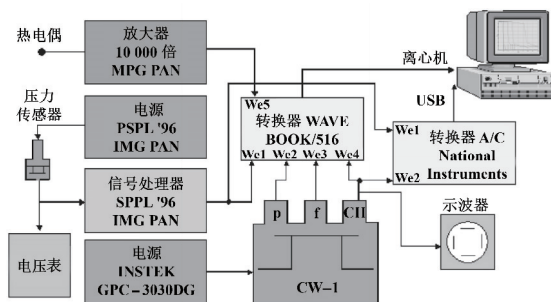
测试台由金属隔膜分隔的两个腔室组成,模拟了煤矿巷道中的爆炸环境。CW-1传感器模型放置在较大的腔室1中(图2(a)),该腔室内为大气压的空气,代表正常的矿井环境。通过减压阀7从气瓶8向较小的腔室6注入浓度为 c_p 、压力为 p_p 的空气和甲烷混合气体,模拟爆炸过程中的瓦斯释放。混合气体压力由压阻式传感器5测量。

当刀具 10 切开金属隔膜 9 后,气体迅速流入较大腔室 1。CW-1 传感器模型实时测量气体压力(压阻式传感器 4)、声学信号(麦克风 3)以及甲烷浓度(催化传感器 2)。稳态甲烷浓度由 MX 21000 OLDHAM 传感器 12 在隔膜破裂约 1 min 后测得,混合气体温度由康铜-锰热电偶 11 测量。较小腔室 6 的体积为 0.27 dm^3 ,较大腔室 1 的体积为 11.3 dm^3 。测试中分别使用了 99% CH_4 、61.24% CH_4 和 2.2% CH_4 作为实验气体,通过调节腔室 6 的初始压力与甲烷浓度,获得目标甲烷浓度。

图 2(b) 为测试台接线图。数据采集通过 16 位 Wave Book/516 模数转换器(A/C)完成。腔室 6 中高压甲烷-空气混合物的压力传感器信号接入第 1 通道(We1),CW-1 传感器的压力信号接入第 2 通道(We2),麦克风信号接入第 3 通道(We3),甲烷浓度测量信号接入第 4 通道(We4),热电偶信号接入第 5 通道(We5)。



(a) 实验布局



(b) 测试台接线图

图 2 实验室测试台

在测量动态变化的物理量时,A/C 转换器需与实验起点同步。A/C 转换器允许通过第 1 通道(We1)的信号触发处理,触发电平设定为 0.5 V,即当电压从高于 0.5 V 降至低于 0.5 V 时开始处理信号。

A/C 转换器支持在触发信号前采集一定数量的样本 n_{pr} ,并可调节处理点数 n_p 和处理频率 f_p ,这些参数决定了实验的总记录时间和陡峭斜率区域的采样密度。在固定采样频率下,测量时间为处理点数的整数倍,处理频率越高,陡峭变化区域的采样点越多。

甲烷浓度的测量由 NI USB 6009 模数转换器完成,转换器以 1 Hz 的频率在连续处理模式下运行,测量结果实时显示在屏幕上,便于观察甲烷浓度的变化,尤其是其趋近稳态的过程。根据初始甲烷浓度,记录时间范围为 300~500 s。

3 压力与声波分析

在煤矿安全生产中,快速准确地识别爆炸前兆至关重要^[20]。本研究通过两组实验,深入分析了压力和声波特征,为智能集成传感器的设计提供了重要参数。实验分别在小腔室内填充空气与 2.23% CH_4 的空气-甲烷混合气体,开展了两组实验。图 3 展示了腔室内填充甲烷与空气时的压力下降情况。甲烷的初始压力为 $4.5 \times 10^5 \text{ Pa}$,空气的初始压力为 $4.3 \times 10^5 \text{ Pa}$,两者的压力变化模式相似。压力从最大值降至 0 的时间为 1.5 ms(下降速率 300 Pa/s),表明了热力学现象的迅速发生。

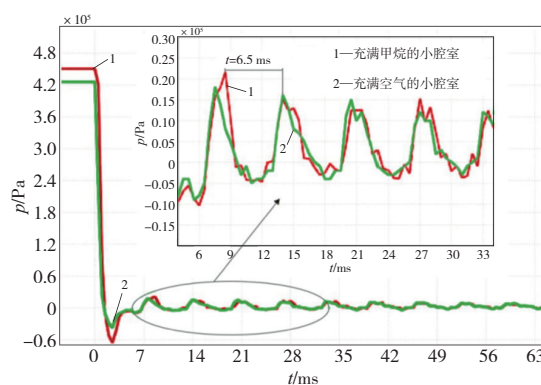


图 3 小腔室中的压力下降

周期性压力变化源自压力波在腔室壁上的反射。假设空气中的声速 v_d 为 335 m/s,腔室长度 l_d 为 2.1 m,则振荡时间 t_{osc} 可由公式 $t_{osc} = l_d/v_d = 6.3 \text{ ms}$ 计算得出。根据图 3 测得的实际振荡时间为 6.5 ms,进而计算出声速为 $v_d = 323 \text{ m/s}$,该结果验证了测量系统的准确性。

图 4 显示了大腔室中的压力变化情况,最大压力在约 9 ms 后记录。0~60 ms 时间段内的平均压力为 4 300 Pa。基于理想气体的等温变换关

系式 $p = p_0 V_0 / V_k$, 其中 $p_0 = 6 \times 10^5 \text{ Pa}$, $V_0 = 0.2 \text{ dm}^3$, $V_k = 30 \text{ dm}^3$, 计算得出的压力值为 $4 \times 10^3 \text{ Pa}$, 与测量值接近。同样, 高压波的振荡周期为 6.5 ms , 与传感器记录的压力波相一致。

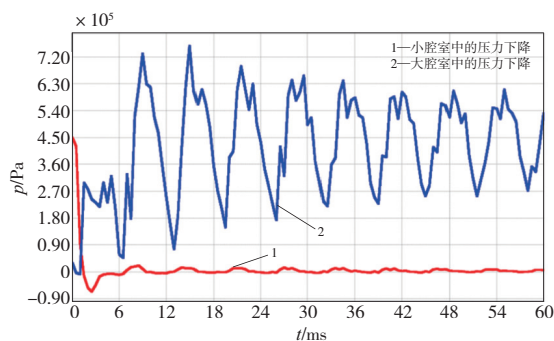


图4 小腔室和大腔室的压力变化(初始阶段)

对声波的频率分析与压力波相似, 声波的基本谐波周期为 6.5 ms , 符合压力波传播前的理论计算结果。

声学信号分析(图5)表明麦克风与高压传感器同步响应。隔膜破裂产生的声学信号超出麦克风工作范围, 出现过载, 导致实验初期无法详细分析声波传播。然而, 在气体爆炸检测传感器中, 麦克风仅作为指示器, 信号初始边缘的出现是关键, 即便超出范围或麦克风损坏, 仍可接受并计入。

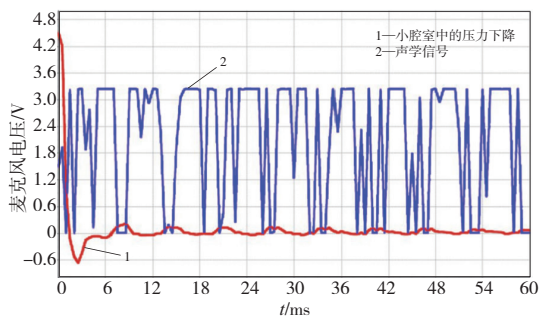


图5 实验初始阶段的声波分析

4 甲烷浓度记录与压力和声信号的比较

图6展示了各测量时间变化对比。小腔室的压力下降, 初始超压为 $2.44 \times 10^3 \text{ Pa}$, 甲烷浓度为 $61.24\% \text{ CH}_4$; 大腔室的压力最大值为 $7.3 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。当小腔室压力下降时, 大腔室的压力传感器和麦克风立即响应。大腔室中的甲烷浓度阶梯状变化源于微珠式传感器的工作模式, 确定浓度约需 200 ms , 反应延迟 $t_{op} = 0.5 \text{ s}$, 约为两个处理周期($2 \times 200 \text{ ms}$)。

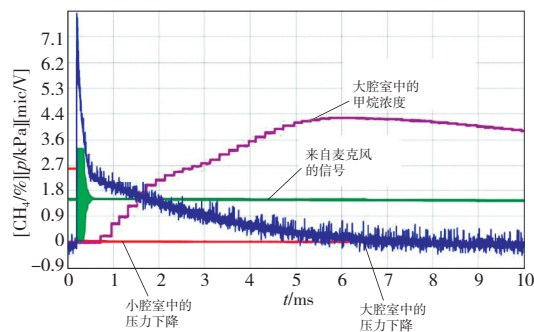


图6 甲烷浓度与压力及声学信号的对比分析

实验结果表明: 集成传感器模型能够准确响应甲烷、压力和声强等快速变化, 同时验证了波形记录的稳定性与重复性, 为智能煤矿安全监测系统的开发提供了关键技术支持。

为验证 CW-1 智能集成传感器在实际煤矿环境中的性能, 本研究在 Barbara 实验矿进行了全面的现场测试, 测试在 400 m 实验巷道中通过受控煤尘爆炸进行, 以 $50 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ 甲烷点火作为爆炸初始条件。实验巷道经过专门改造, 以模拟实际煤矿中的复杂工况, 测试的传感器布置如图7所示。

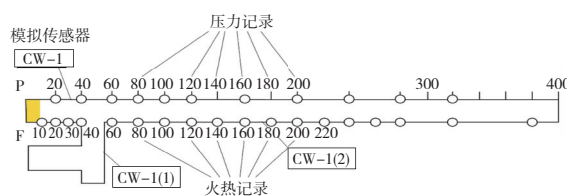


图7 现场测试中的传感器布置

实验共设置6个凹槽, 每个凹槽配备快速压力传感器, 用于记录爆炸过程中压力的瞬态变化。此外, 3个爆炸传感器分别安装于距爆炸点 50 m 、 100 m 和 150 m 的凹槽中, 其中两个为原型 CW-1 传感器, 通过电源-传输模块供电, 并通过该模块传输测量信号。数据以 2 s 间隔可视化并记录在模拟矿井瓦斯测量系统的调度终端。第3个传感器为“模拟传感器”CW-1 模型, 通过独立电源供电, 信号记录在 A/C 模拟转换卡上。

实验的目的是使用3个爆炸传感器记录爆炸后获取的参数, 并对测试巷道中标准配置的快速压力传感器(图8)与爆炸传感器(图9)的记录性能。由于爆炸后压力变化迅速, 压力传感器和声学传感器的信号记录时间限制为爆炸后 3.5 s 。

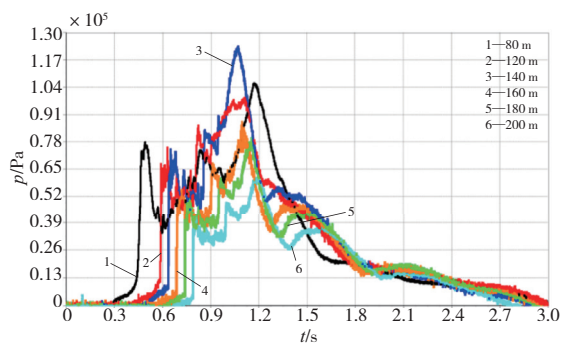


图8 爆炸后的压力波记录

图9中,CW-1爆炸传感器记录的麦克风、压力和甲烷信号显示,麦克风信号比压力信号提前约80 ms,而甲烷传感器信号出现了明显的2 s延迟。

实验期间,瓦斯测量系统以2 s周期记录CW-1传感器信号(图10)。结果表明:爆炸瞬间压力和麦克风信号几乎同时响应(图10(a)),且这两个信号变化早于甲烷浓度的变化(图10(b))。这验证了CW-1传感器在爆炸初期对压力和声学信号的快速响应性能。

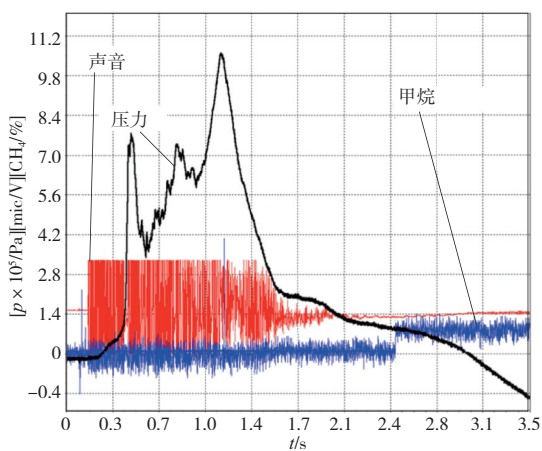
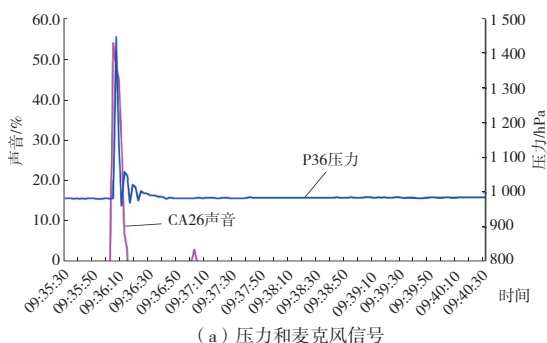


图9 CW-1爆炸传感器模型记录的实验信号



(a) 压力和麦克风信号

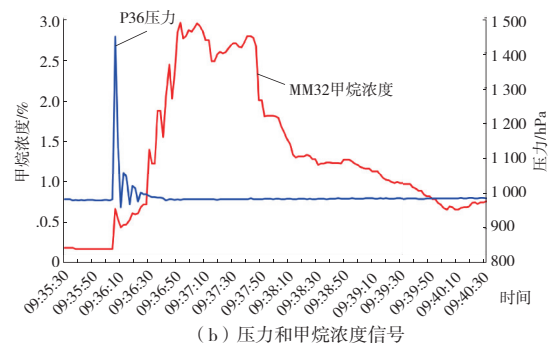


图10 CW-1爆炸传感器记录爆炸期间的参数

5 结语

本研究开发的CW-1智能集成爆炸检测传感器在实验室和现场测试中展现了优异性能。压力和声学传感器能在80 ms内响应突发事件,而甲烷传感器的响应时间约为2 s。在实验室测试中,传感器准确捕捉了6.5 ms的压力波周期,对应323 m/s的声波速度。Barbara实验矿现场测试表明,CW-1传感器能在爆炸后3.5 s内同步记录压力、声音和甲烷浓度变化。压力峰值达 7.3×10^3 Pa,甲烷浓度从初始的61.24%迅速变化。这些结果证实了CW-1传感器在复杂矿井环境中的可靠性和快速响应能力,为煤矿安全生产提供了有力保障。

参考文献:

- [1] 王磊,黄晴,尚伟栋,等. 面向微服务架构的煤矿生产监控数据采集系统设计[J]. 电子技术应用,2023,49(12):31-37.
- [2] 李军. 煤矿井下应急救援无线通信系统设计与实现[J]. 微型电脑应用,2023,39(1):155-158.
- [3] 王乐军. 数字式安全监控系统关键参数检测装置设计[J]. 电子设计工程,2022,30(8):76-81.
- [4] 李敏,王丹,贺珊,等. 煤矿瓦斯爆炸风险评估研究综述及进展[J]. 中国安全科学学报,2025,35(2):127-136.
- [5] 郑晓亮,廖冉,薛生,等. 煤矿低浓度瓦斯爆炸/燃烧特性数值模拟研究[J]. 广东化工,2025,52(6):4-7.
- [6] 盛武,张琪. 基于CIA-ISM-BN煤矿瓦斯爆炸事故分析[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2024,46(3):32-43.
- [7] 尹方洲. 煤尘与瓦斯复合环境下的爆炸风险及其控制策略[J]. 当代化工研究,2024(3):126-128.
- [8] 孙建兵. 基于光纤传感的瓦斯监测系统的设计[J]. 机械管理开发,2021,36(7):243-245.

(下转第294页)

- 收稿日期:2024-11-22

- [9] WANG K, DU F. Coal-gas compound dynamic disasters in China: a review[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 133: 1-17.
- [10] XU L J, FAN C J, LUO M K, et al. Elimination mechanism of coal and gas outburst based on geodynamic system with stress - damage - seepage interactions[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2023, 10(1): 74.
- [11] SADEGHI S, SOLTANMOHAMMADLOU N, NASIRZADEH F. Applications of wireless sensor networks to improve occupational safety and health in underground mines [J]. Journal of Safety Research, 2022, 83: 8-25.
- [12] 贾林杰. 煤矿安全风险监测预警体系的设计及应用分析[J]. 西部探矿工程, 2025, 37(4): 188-191.
- [13] 王森. 人工智能技术在煤矿安全监测中的应用[J]. 信息记录材料, 2025, 26(5): 136-138.

- [14] 王喆. 煤矿火区远程快速隔离密闭灾害系统设计[J]. 能源与节能, 2024(3): 224-227.
- [15] 邵泽华, 李勇. 具有自学习功能的安全切断型智能燃气表[J]. 煤气与热力, 2022, 42(5): 39-40, 46.
- [16] 吴桐, 袁培燕. 一种基于指数移动平均的物联网边缘设备选择机制[J]. 应用科学学报, 2025, 43(1): 183-194.
- [17] 王梅, 任怡果, 刘勇, 等. 求解多核学习的自适应随机递归梯度下降法[J]. 计算机技术与发展, 2025, 35(7): 1-8.
- [18] 潘帅. 基于多传感器的煤矿通风智能监测系统的设计[J]. 能源与节能, 2025(1): 120-123.
- [19] 于建华. 煤矿机械设备智能化技术在安全生产中的应用[J]. 南方农机, 2024, 55(24): 144-147.
- [20] 王成, 周汝凯. 火灾引起煤矿瓦斯爆炸事故分析与反思[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025(1): 61-63.

收稿日期:2024-10-09