



惰性粉体抑制瓦斯/煤尘复合爆炸特性及机理研究

纪文涛 张国涛 杨帅帅 徐子晖 毛文哲 王燕

引用本文：

纪文涛, 张国涛, 杨帅帅, 等. 惰性粉体抑制瓦斯/煤尘复合爆炸特性及机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 337–345.
JI Wentao, ZHANG Guotao, YANG Shuaishuai. Study on the characteristics and mechanism of inert powder inhibition of gas/coal dust compound explosion[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 337–345.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023-1411>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤尘组分对瓦斯/煤尘复合爆炸下限的影响研究

Influence study of coal dust composition on the lower explosion limit of hybrid mixture of gas and coal dust
煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d5760132-ef13-4c0a-b5c9-fdf0abcf6c3e>

基于小波散射变换的煤矿瓦斯和煤尘爆炸声音识别方法

Sound identification method of coal mine gas and coal dust explosion based on wavelet scattering transform
煤炭科学技术. 2024, 52(S1): 70–79 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1849>

瓦斯抑爆材料及机理研究进展与发展趋势

Research progress and development trend of gas explosion suppression materials and mechanism
煤炭科学技术. 2021, 49(8): 114–124 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e4f04382-d119-49cf-b755-58e3dd1315d4>

基于声谱图和SVM的煤矿瓦斯和煤尘爆炸识别方法

Recognition method of coal mine gas and coal dust explosion based on sound spectrogram and SVM
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 366–376 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2050>

复合阻化剂抑制煤自燃过程的阶段阻化特性

Stage inhibition characteristics of composite inhibitor in process of inhibiting coal spontaneous combustion
煤炭科学技术. 2022, 50(10): 68–75 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c1a425d2-dcb3-4870-99d4-34c06dac39ba>

惰性气体对KHCO₃冷气溶胶甲烷抑爆性能的影响研究

Research on synergistic effect of inert gas on methane explosion suppression performance of KHCO₃ cold aerosol
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 145–152 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.02.018>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

纪文涛, 张国涛, 杨帅帅, 等. 惰性粉体抑制瓦斯/煤尘复合爆炸特性及机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 337–345.

JI Wentao, ZHANG Guotao, YANG Shuaishuai, et al. Study on the characteristics and mechanism of inert powder inhibition of gas/coal dust compound explosion[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 337–345.

惰性粉体抑制瓦斯/煤尘复合爆炸特性及机理研究

纪文涛^{1,2,3}, 张国涛^{1,2,3}, 杨帅帅^{1,2,3}, 徐子晖^{1,2,3}, 毛文哲^{1,2,3}, 王 燕^{1,2,3}

(1. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南省燃爆动力灾害预警与应急工程技术研究中心, 河南 焦作 454003;

3. 煤炭安全生产与清洁利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454003)

摘要: 瓦斯/煤尘复合爆炸是一个耦合了均相燃烧与异相燃烧的复杂过程, 燃烧主控机制动态变化, 爆炸机理更加复杂, 导致其相比单相瓦斯或煤尘爆炸具有更高的爆炸敏感性和爆炸强度, 严重制约着煤矿的安全生产。为了防治瓦斯/煤尘复合爆炸灾害, 选取碳酸氢钠和碳酸钙两种惰性粉体, 在 20 L 球型爆炸装置中开展了惰性粉体抑制瓦斯/煤尘复合爆炸实验。通过系统的改变瓦斯和煤尘浓度配比, 对不同浓度惰性粉体作用下瓦斯/煤尘复合体系最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率变化规律进行分析, 并对比分析不同惰性粉体抑制瓦斯/煤尘复合爆炸性能之间的区别和联系。研究结果表明, 碳酸氢钠和碳酸钙对不同浓度配比的瓦斯/煤尘复合体系爆炸均具有抑制作用, 其中碳酸氢钠不仅可以通过分解吸热、延缓煤尘热解、降低煤尘分解速率等物理抑制方式来抑制瓦斯/煤尘复合爆炸, 还可以通过消耗爆炸反应的关键自由基的化学抑制方式来抑制瓦斯/煤尘复合爆炸, 而碳酸钙只能以物理吸热的方式抑制爆炸, 因此碳酸氢钠对瓦斯/煤尘复合体系爆炸的抑制效果优于碳酸钙, 具体表现为碳酸氢钠可完全抑制所有工况, 碳酸钙仅能完全抑制瓦斯浓度低于 8% 时的瓦斯/煤尘复合工况。另外, 2 种惰性粉体对瓦斯/煤尘复合体系爆炸压力的抑制效率随着体系中瓦斯浓度的提升先升高后降低, 当瓦斯浓度为 6%、煤尘浓度为 100 g/m³ 时抑爆效率最高; 对瓦斯/煤尘复合体系爆炸压升速率的抑制效率随着体系中瓦斯浓度的提升逐渐升高, 对浓度为 10% 的纯瓦斯爆炸时抑爆效率最高。

关键词: 瓦斯; 煤尘; 复合爆炸; 碳酸氢钠; 碳酸钙; 爆炸抑制

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)11-0337-09

Study on the characteristics and mechanism of inert powder inhibition of gas/coal dust compound explosion

JI Wentao^{1,2,3}, ZHANG Guotao^{1,2,3}, YANG Shuaishuai^{1,2,3}, XU Zihui^{1,2,3}, MAO Wenzhe^{1,2,3}, WANG Yan^{1,2,3}

(1. College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Henan Province Explosion Power Disaster Warning and Emergency Engineering Technology Research Center, Jiaozuo 454003, China; 3. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Gas/coal dust composite explosion is a complex process that combines homogeneous and heterogeneous combustion. The combustion main control mechanism changes dynamically and the explosion mechanism is more complex, resulting in higher explosion sensitivity and explosion intensity compared to single-phase gas or coal dust explosion, which seriously restricts the safe production of coal mines. In order to prevent and control the gas/coal dust composite explosion disaster, two inert powders, sodium bicarbonate and calcium carbonate, are selected to conduct experiments on inert powder suppression of gas/coal dust composite explosions in a 20 L spherical explosion device. Based on the different concentration ratios of gas and coal dust, the inhibition effect of two inert powders on the maximum explosion pressure and the maximum explosion pressure rise rate of the gas/coal dust composite system are analyzed and compared, as well as the differences and connections between the inhibition effect of the two inert powders. And the inhibition efficiency and mechan-

收稿日期: 2023-10-07 策划编辑: 宫在萍 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.12438/cst.2023-1411

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52374197, 51904094); 国家自然科学基金联合基金重点支持资助项目(U22A20120)

作者简介: 纪文涛(1989—), 男, 河南周口人, 副教授, 博士。E-mail: jiwentao@hpu.edu.cn

通讯作者: 王 燕(1982—), 女, 河南周口人, 教授, 博士。E-mail: yanwang@hpu.edu.cn

ism of the two inert powders on gas/coal dust composite explosions are reflected comprehensively. The research results indicate that sodium bicarbonate and calcium carbonate have an inhibitory effect on the explosion of gas/coal dust composite systems with different concentration ratios. Sodium bicarbonate can not only suppress the explosion of gas/coal dust composite by physical suppression methods such as decomposing heat absorption, delaying coal dust pyrolysis, and reducing coal dust decomposition rate, but also by chemical suppression methods that consume key free radicals in the explosion reaction, however, calcium carbonate can only suppress explosions through physical heat absorption, so the inhibitory effect of sodium bicarbonate on the explosion of gas/coal dust composite system is better than that of calcium carbonate. Specifically, sodium bicarbonate can completely suppress all working conditions, while calcium carbonate can only completely suppress the gas/coal dust composite working conditions when the gas concentration is below 8%. In addition, the suppression efficiency of two inert powders on the explosion pressure of the gas/coal dust composite system first increases and then decreases with the increase of gas concentration in the system. The suppression efficiency is highest when the gas concentration is 6% and the coal dust concentration is 100 g/m³; The suppression efficiency of the explosion pressure rise rate of the gas/coal dust composite system gradually increases with the increase of gas concentration in the system, and the suppression efficiency is highest for pure gas explosions with a concentration of 10%.

Key words: Gas; coal dust; Composite explosion; Sodium bicarbonate; Calcium carbonate; Explosion suppression

0 引言

截至目前,煤炭依然占据我国能源消耗总量中的60%左右,在我国国民经济发展中具有重要地位^[1]。然而,我国煤矿普遍存在瓦斯含量大、煤层透气性低、地质构造复杂等问题,在煤炭开采过程中极易引发瓦斯或煤尘爆炸事故。据统计^[2],近20 a我国共发生223起瓦斯或煤尘爆炸事故,造成1475人死亡,严重威胁着煤矿安全生产。由于煤矿井下瓦斯和煤尘是共存的,因此多数煤矿爆炸事故是由瓦斯和煤尘复合爆炸引发的,即使事故被最终定性为瓦斯或煤尘爆炸,其爆炸过程多是由瓦斯和煤尘共同参与的。因此,开展瓦斯/煤尘复合爆炸灾害防治技术研究对于煤矿安全生产具有重要意义。

爆炸抑制技术因其积极主动性,在工业防爆领域应用非常广泛。爆炸抑制技术的关键是抑制剂性能。目前常用的抑爆剂有细水雾、惰性粉体和惰性气体等^[3-6],其中惰性气体在狭小或封闭空间内可能会致人窒息^[7];细水雾难以在短时间内大量生产且不适用于复杂环境;惰性粉体相较于前二者具有成本低廉、环境友好、易储存等优势在井下应用更多,近年来被广为研究。

目前,许多学者开展了惰性粉体抑制瓦斯、煤尘爆炸性能研究^[8-14],结果表明^[15-18]碳酸盐、磷酸盐等对瓦斯和煤尘爆炸均展现出良好的抑制效果。如兼具物理和化学抑制效果的NaHCO₃、KHCO₃、NH₄H₂PO₄等粉体,一方面可通过热解吸收反应热量,另一方面可通过消耗关键自由基、破坏爆炸反应链的方式达到抑制效果;石膏、白云石、石灰岩等虽以物理抑制效果为主,但因其更加稳定的性能在煤矿中被广泛应用^[19]。然而,瓦斯/煤尘复合爆炸是一个

耦合了均相燃烧与异相燃烧的复杂过程,且燃烧主控机制动态变化,爆炸机理更加复杂。目前已有许多学者对瓦斯/煤尘复合爆炸特性进行了研究^[20-26],结果表明瓦斯/煤尘复合体系具有较瓦斯和煤尘更高的爆炸敏感性和爆炸强度。因此,已有的针对单相瓦斯和煤尘爆炸的抑制剂对瓦斯/煤尘复合体系的适用性还有待验证,相关机理还有待分析。

基于此,笔者选取了对单相瓦斯和煤尘均具较好抑爆效果并以化学抑制作用为主的碳酸氢钠^[16,27]以及煤矿常用并以物理抑制作用为主的碳酸钙^[28]作为惰性粉体,在20 L球型爆炸装置中开展了惰性粉体抑制瓦斯/煤尘复合爆炸特性与机理研究。通过系统的改变瓦斯和煤尘浓度配比,对不同浓度惰性粉体作用下瓦斯/煤尘复合体系最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率变化规律进行分析,并对比分析不同惰性粉体抑制瓦斯/煤尘复合爆炸性能之间的区别和联系,以期全面反映惰性粉体抑制瓦斯/煤尘复合爆炸特性的抑制效果和抑制机理。研究结果可为煤矿爆炸灾害防治提供参考和依据。

1 实验设备与材料

1.1 实验设备及参数

实验采用国际通用的20 L球型爆炸装置开展,结构如图1所示,主要由爆炸罐体、数据采集系统、同步控制系统、点火系统和喷粉系统等组成。爆炸罐体为带夹层的不锈钢球体,夹层用于通循环水来保持罐体温度恒定,顶部装有点火电极,底部装有分散阀,前侧安装有玻璃视窗,后侧接有废气排放阀门;数据采集系统由压力传感器、电脑与压力采集软件组成;点火系统由点火电极和10 kJ化学点火头组成;喷粉系统由进气阀、空气气瓶、甲烷气瓶、储粉仓与

气粉两相阀组成,上述系统均在同步控制系统的控制下有序运行。根据标准 EN 14034^[29,30], 化学点火头由质量比为 4:3:3 的锆粉、过氧化钡、硝酸钡混合而成, 点火延迟时间和喷粉压力按照标准分别设置为 60 ms、2 MPa。为确保实验结果的科学性和合理性, 每组工况实验均重复 3 次以上。

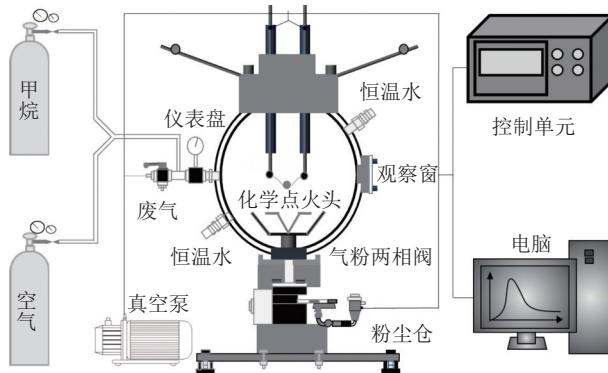


图 1 实验装置结构

Fig.1 Schematic diagram of the structure of the experimental device

1.2 实验材料

实验使用的煤尘为山西大同烟煤, 挥发分含量较高, 爆炸性能稳定, 其组分见表 1, 碳酸氢钠和碳酸钙购自天津市河东区红岩试剂厂。粒径是影响煤尘爆炸特性和惰性粉体抑爆的关键参数之一, 因此首先采用 Mastersizer-3000 超高速智能粒度分析仪对实验所用的 3 种粉体进行了粒径测试, 测得煤尘、碳酸氢钠、碳酸钙 3 种粉体的粒径分布如图 2 所示, 中位直径 (D_{50}) 分别为 40.30 μm 、11.90 μm 、5.66 μm 。其中煤尘粒径与煤矿实际生产过程中产生的煤尘粒径相近, 研究成果可为煤矿灾害防治提供直接参考; 碳酸氢钠与碳酸钙的粒径接近, 可以减小 2 种抑爆粉体抑爆性能对比时粒径产生的影响。实验采用纯度为 99.9% 的甲烷代替瓦斯。实验前, 3 种粉体均置于 60 °C 的真空干燥箱中干燥 12 h, 以消除环境湿度的影响。

表 1 煤尘组分分析

Table 1 Analysis of coal dust components

煤样	水分/%	灰分/%	挥发分/%	固定碳/%
大同烟煤	5.6	22.5	23.4	48.5

2 实验结果与分析

2.1 瓦斯/煤尘复合爆炸强度变化规律

作为爆炸抑制实验的参考依据, 首先对不同瓦斯浓度氛围条件下煤尘爆炸压力和压力上升速率变

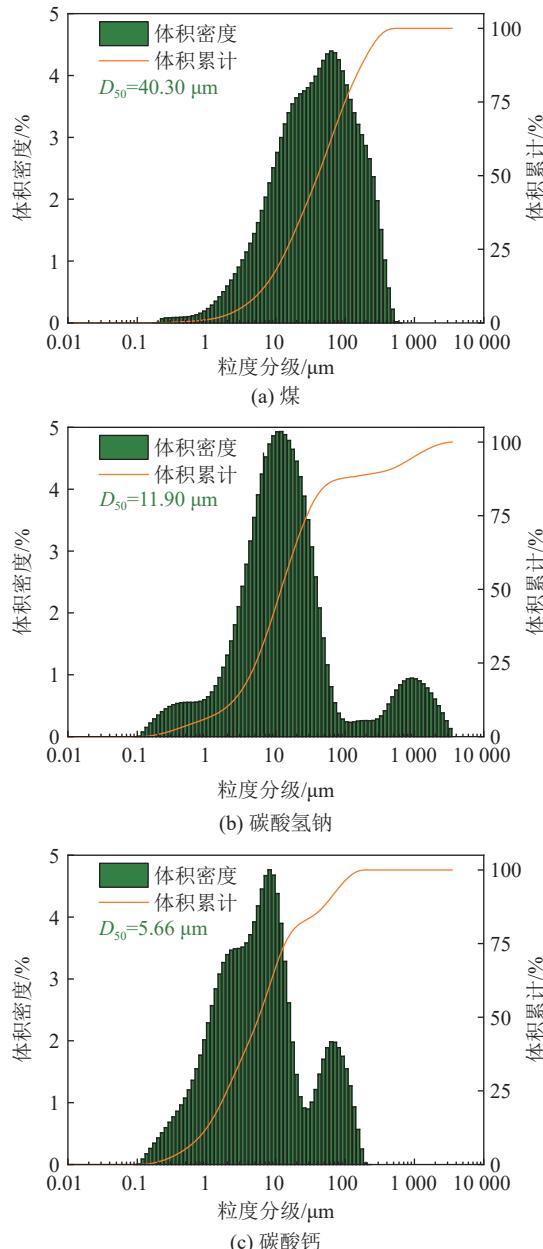


图 2 煤与惰性粉体粒径分布

Fig.2 Particle size distribution diagram of coal and inert powder

化规律进行了测试和分析。根据基于测试实验和文献调研, 选定 2% 作为瓦斯浓度跨度, 100 g/m³ 作为煤尘浓度跨度, 结果如图 3 所示。由图 3 可知, 当瓦斯浓度分别为 0% (纯煤尘)、2%、4%、6%、8% 时, 煤尘爆炸压力和压力上升速率均随煤尘浓度的增大先增大后减小, 并分别在煤尘浓度为 400、300、200、100、100 g/m³ 时达到峰值, 分别为 0.65、0.66、0.67、0.69、0.70、0.73 MPa 和 28.88、44.40、45.71、58.79、91.22、99.00 MPa/s。但是, 当瓦斯浓度为 10% 时, 煤尘爆炸压力和压力上升速率却随煤尘浓度的增加逐渐减小, 即该瓦斯浓度条件下煤尘的最佳爆炸浓度

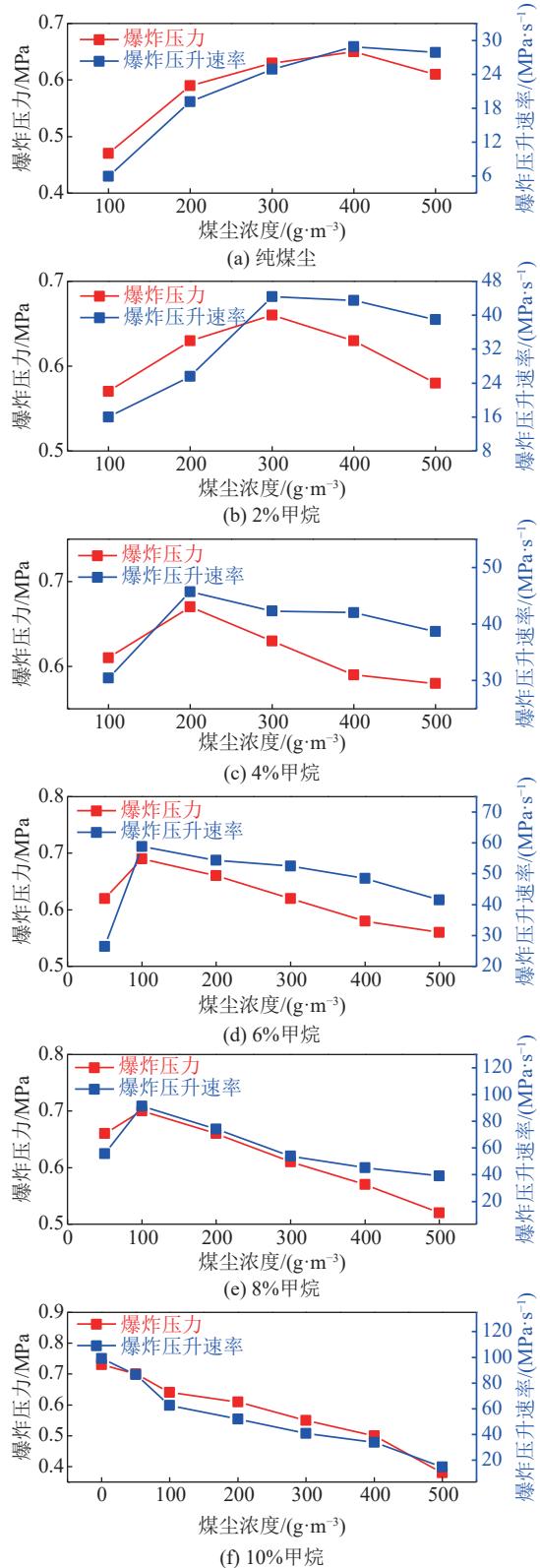


图3 不同瓦斯浓度下煤尘爆炸强度变化

Fig.3 Changes in the explosion intensity of coal dust at different gas concentrations

(c_{opt})为0 g/m³,向该浓度瓦斯中添加任何浓度的煤尘均将导致体系爆炸强度的降低。这是因为本实验条件下测得的瓦斯最佳爆炸浓度为10%,在该浓度

条件下,瓦斯与煤尘在复合爆炸过程中将形成“竞氧”机制,而气相瓦斯在“竞氧”机制中占优,会优先与氧气发生反应,煤尘则在一定程度上充当了“惰性粉体”起到吸热抑制的作用^[31]。

基于不同瓦斯浓度条件下煤尘爆炸压力和爆炸压力峰值,可以得到瓦斯/煤尘复合体系最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率随瓦斯浓度变化规律(图4)。由图4可知,在不同浓度瓦斯环境条件下,瓦斯/煤尘复合体系的最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率并非固定值,而是随瓦斯浓度的增大而逐渐增大,且对应着不同的瓦斯和煤尘浓度。研究表明,瓦斯爆炸是由化学反应控制的均相燃烧,而煤尘爆炸则是由扩散控制的异相燃烧。因此,对于不同瓦斯和煤尘浓度组合条件下的复合体系,其在爆炸过程中的燃烧主控机制必然有所变化。当瓦斯浓度较低时,复合体系爆炸以由扩散控制的异相燃烧为主,当瓦斯浓度较高时,复合体系爆炸则以由化学反应控制的均相燃烧为主。爆炸强度和爆炸机理的不同,必将导致惰性粉体对其抑制性能及机理发生变化。因此,若要全面反映惰性粉体抑制瓦斯/煤尘复合爆炸特性和机理,需对多种不同瓦斯和煤尘浓度组合下的复合体系爆炸抑制特性进行分析和研究。基于此,爆炸抑制实验将以表2的6种瓦斯/煤尘复合体系进行开展,以期全面反映粉体抑制瓦斯/煤尘复合体系爆炸特性和机理。

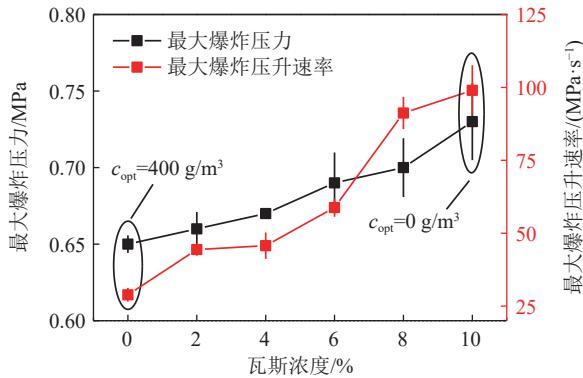


图4 瓦斯/煤尘复合体系最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率变化规律

Fig.4 Variation pattern of maximum explosion pressure and maximum explosion pressure rise rate in gas/coal dust composite system

2.2 惰性粉体作用下瓦斯/煤尘复合爆炸压力变化规律

图5为不同浓度惰性粉体作用下6种瓦斯/煤尘复合体系爆炸压力变化规律,为了便于分析,将6种瓦斯/煤尘复合体系分别命名为A、B、C、D、E、F,每种复合体系对应瓦斯和煤尘浓度见表2。如图5

表2 瓦斯/煤尘复合最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率

Table 2 Maximum explosion pressure and maximum explosion pressure rise rate of gas/coal dust composite

介质	命名	瓦斯/%	煤尘/ (g·m ⁻³)	爆炸压 力/MPa	爆炸压升速 率/(MPa·s ⁻¹)
复合	A	0	400	0.65	28.88
	B	2	300	0.66	44.40
	C	4	200	0.67	45.71
	D	6	100	0.69	58.79
	E	8	100	0.70	91.22
甲烷	F	10	0	0.73	99.00

所示,2种不同惰性粉体作用下,6种瓦斯/煤尘复合体系爆炸压力均随惰性粉体浓度的增大而减小,即2种惰性粉体对6种瓦斯/煤尘复合体系均具抑制作用。其中,碳酸氢钠作用下,6种瓦斯/煤尘复合体系爆炸压力均能在一定浓度惰性粉体作用下降低至0.15 MPa以下。依据EN 14034-3^[32]中规定容器中爆炸压力 $P_{ex} \geq (P_{ig} + 0.05)$ MPa时,可认为容器内粉尘发生了爆炸,本实验中点火引起的升压 $P_{ig} \approx 0.10$ MPa,因此将0.15 MPa设为临界值,低于0.15 MPa视为完全抑制。因此,碳酸氢钠作用下A—F 6种瓦斯/煤尘

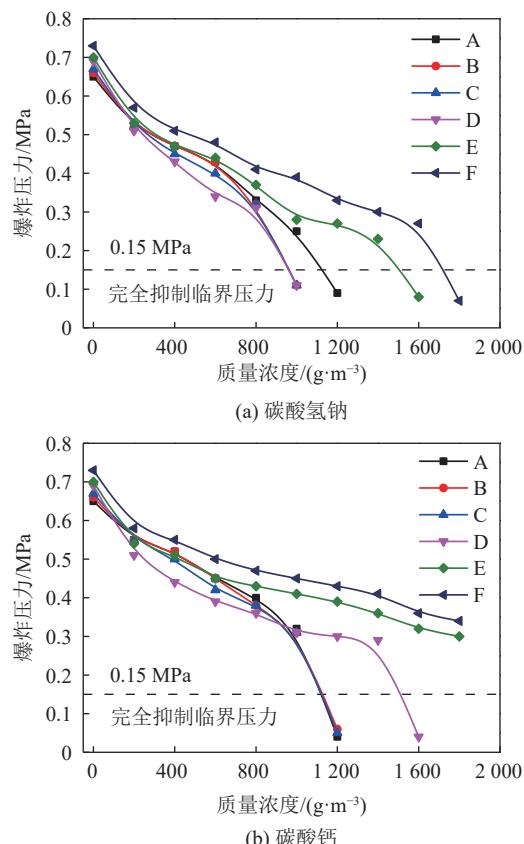
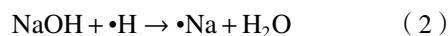


图5 复合体系爆炸压力随惰性粉体浓度变化

Fig.5 Diagram of the change of the explosion pressure of the composite system with the concentration of inert powder

复合体系均可被完全抑制,完全抑制浓度分别为1 000、1 000、1 000、1 200、1 600、1 800 g/m³。而碳酸钙作用下,仅有A—D 4个工况的爆炸压力降低至0.15 MPa以下,即仅有A—D 4个瓦斯/煤尘复合体系被完全抑制,完全抑制浓度分别为1 200、1 200、1 200、1 600 g/m³,且均高于相同工况下碳酸氢钠完全抑制浓度。因此可以推断,碳酸氢钠对瓦斯/煤尘复合体系爆炸压力的抑制效果优于碳酸钙。

图6为煤尘以及煤/碳酸氢钠、煤/碳酸钙的重量-重量变化率(TG-DTG)曲线。根据图6中的TG曲线可知,碳酸氢钠和碳酸钙均能发生热解并吸收热量,且碳酸氢钠热解起始温度远低于碳酸钙。此外,碳酸氢钠和碳酸钙作用下煤热解起始温度分别从313.0 °C提升至350.9 °C和332.8 °C,即碳酸氢钠和碳酸钙均能显著提升煤尘初始分解温度。根据图6中的DTG曲线可知,碳酸氢钠和碳酸钙作用下煤的最大失重率由-5.05%/min分别降低至-3.30%/min和-3.34%/min,即两种惰性粉体可显著降低煤的燃烧分解速率。综合上述分析可知,碳酸氢钠和碳酸钙均能在煤尘爆炸过程中通过分解吸热、延缓煤尘热解、降低煤尘分解速率来抑制瓦斯/煤尘复合体系爆炸,且碳酸氢钠的分解吸热性能及其对煤尘热解的延缓作用均优于碳酸钙。此外,碳酸氢钠热解产生的NaOH、•NaO、Na₂O、•Na等自由基团可与瓦斯/煤尘复合爆炸的关键自由基•H、•OH发生以下反应^[33],消耗活性基团、降低链传播速度、减弱爆炸强度。



进一步分析图5可知,虽然6种瓦斯/煤尘复合体系最大爆炸压力均随2种惰性粉体浓度增大而降低,但变化趋势线的斜率却有所区别,图5(a)、(b)都表现出变化趋势线斜率由工况A—D逐渐增大、工况D—F逐渐减小的趋势。为了更直观的展示此现象,计算获得未完全抑爆条件下不同浓度惰性粉体诱导瓦斯/煤尘复合体系不同工况爆炸压力降幅,如图7所示。由图7可知,2种惰性粉体诱导瓦斯/煤尘复合体系爆炸压力降幅由工况A—D逐渐增大、工况D—F逐渐减小,即2种惰性粉体抑制瓦斯/煤尘复合体系爆炸压力效率由工况A—D

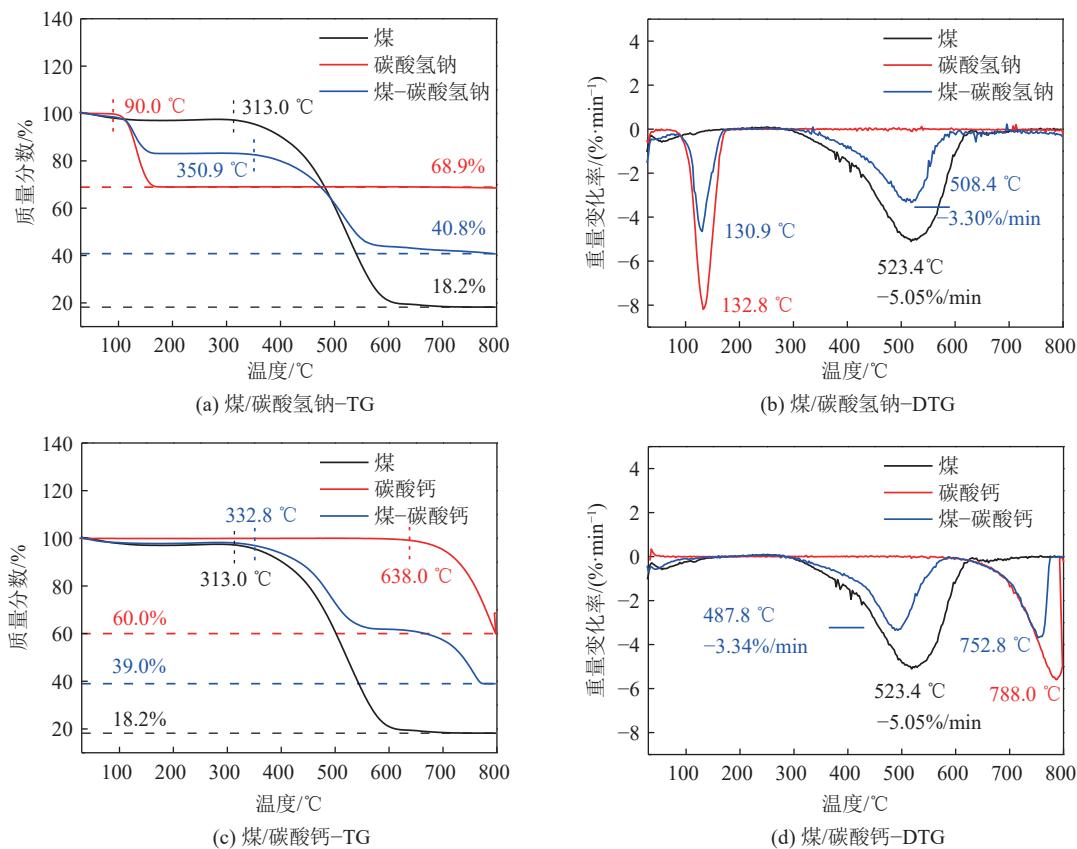


图 6 煤与惰性粉体热重曲线

Fig.6 Thermogravimetric curve of coal and inert powder

逐渐增加、工况 D—F 逐渐降低。这是因为 2 种惰性粉体对瓦斯/煤尘复合体系爆炸压力的抑制作用主要来自于惰性粉体自身热解形成的吸热作用和自由基销毁作用, 而 2 种惰性粉体的吸热作用和自由基销毁作用主要受其受热分解率的影响, 受热分解率越高, 吸热越多, 分解形成的自由基数量越多。因此 2 种惰性粉体的受热分解率是影响其对爆炸压力抑制效率的关键参数, 而惰性粉体的受热分解率主要受复合体系爆炸过程中介质燃烧温度和燃烧时间影响。工况 A 为纯煤尘爆炸, 其爆炸强度相对较低, 即爆炸过程中燃烧产生的温度相对较低, 因此该工况下惰性粉体受热分解率相对较小, 抑制效率较低。工况 B—D 为瓦斯/煤尘复合爆炸, 根据表 2 可知, 复合体系中瓦斯浓度越高, 爆炸强度越高, 燃烧产生的温度也越高, 进而导致 2 种惰性粉体的受热分解率越来越高, 抑制效率逐渐提升。但是, 随着瓦斯浓度进一步提升, 体系的燃烧温度已处于较高值, 此时对惰性粉体受热分解率影响较大的主要因素将由介质燃烧温度转化为燃烧时间。对于工况 E 和 F, 体系的燃烧温度虽然进一步提升, 但是此时体系中瓦斯浓度较高, 煤尘浓度较低, 体

系爆炸主要是以瓦斯为主的均相燃烧, 燃烧速度较快, 因此燃烧作用于 2 种惰性粉体的时间相对较短, 受热分解率反而会降低, 进而导致抑制效率的降低。总体而言, 对于瓦斯/煤尘复合体系, 2 种惰性粉体对其爆炸压力的抑制效率随着体系中瓦斯浓度的提升先升高后降低, 当瓦斯浓度为 6%、煤尘浓度为 100 g/m³ 时达到最佳。

2.3 惰性粉体作用下瓦斯/煤尘复合爆炸压升速率变化规律

图 8 为不同浓度惰性粉体作用下 6 种瓦斯/煤尘复合体系爆炸压升速率变化规律, 由图 8 知, 2 种不同惰性粉体作用下, 6 种瓦斯/煤尘复合体系爆炸压升速率均随惰性粉体浓度的增大而减小。碳酸氢钠作用下, 6 种瓦斯/煤尘复合体系爆炸压升速率均能在一定浓度惰性粉体作用下降低至 2.50 MPa/s 左右, 而碳酸钙作用下仅有 A—D 4 个工况降低至 2.50 MPa/s 左右, 工况 E、F 的爆炸压升速率在 1800 g/m³ 碳酸钙作用下仅降低至 8.04、14.77 MPa/s。由此可见, 碳酸氢钠对瓦斯/煤尘复合体系爆炸压升速率的抑制效果同样优于碳酸钙。图 9 为煤尘以及煤/碳酸氢钠、煤/碳酸钙的热流量(DSC)曲线。根据图 9 和图 6 可

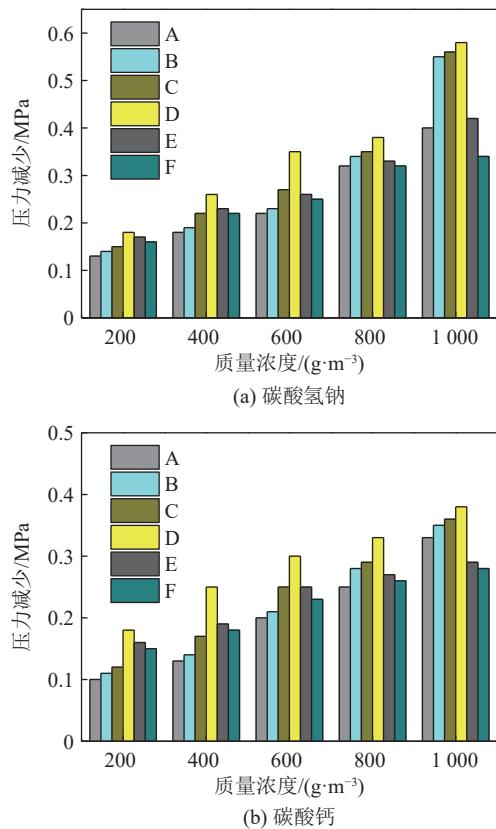


图 7 不同浓度惰性粉体诱导不同工况瓦斯/煤尘复合体系爆炸压力降幅
Fig.7 Explosion pressure reduction diagram of gas/coal dust composite system under different working conditions induced by different concentrations of inert powder

知,碳酸氢钠和碳酸钙均能发生热解并吸收热量,二者作用下煤达到放热峰的温度由 530.9 °C 分别提前至 525.9 °C 和 492.8 °C,且添加惰性粉体后煤尘的放热峰面积变小,证明添加碳酸氢钠和碳酸钙能减小瓦斯/煤尘复合爆炸的放热量,降低体系温度,从而降低复合体系的爆炸压升速率。图 9a 中碳酸氢钠作用下煤尘的最大热流量大于图 9b 中碳酸钙作用下煤尘的最大热流量,并且煤/碳酸氢钠的放热峰面积大于煤/碳酸钙,这是因为碳酸氢钠热解在 177.8 °C 已经结束,热解产物碳酸钠对煤热解的影响较小,而碳酸钙热解起始温度为 638 °C,即碳酸钙在煤热解结束前一直处于吸热状态,因此碳酸钙作用下煤的最大热流量小于碳酸氢钠作用下煤的最大热流量。值得注意的是,煤/碳酸钙混合物在 650 °C 后仍继续放热,这是由于煤尘热解会生成大量的水,碳酸钙的固体热解产物氧化钙会与水反应生成氢氧化钙,这个过程释放的热量高于碳酸钙的吸热量,因此煤/碳酸钙混合物在 650 °C 后仍处于放热状态。

图 8 还表明在 2 种不同的惰性粉体作用下,瓦

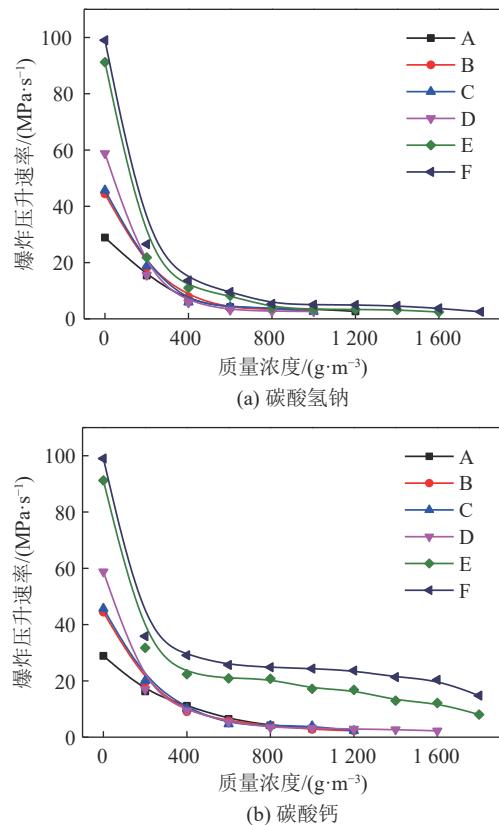


图 8 复合体系爆炸压升速率随惰性粉体浓度变化
Fig.8 Variation of explosion pressure rise rate of composite system with inert powder concentration

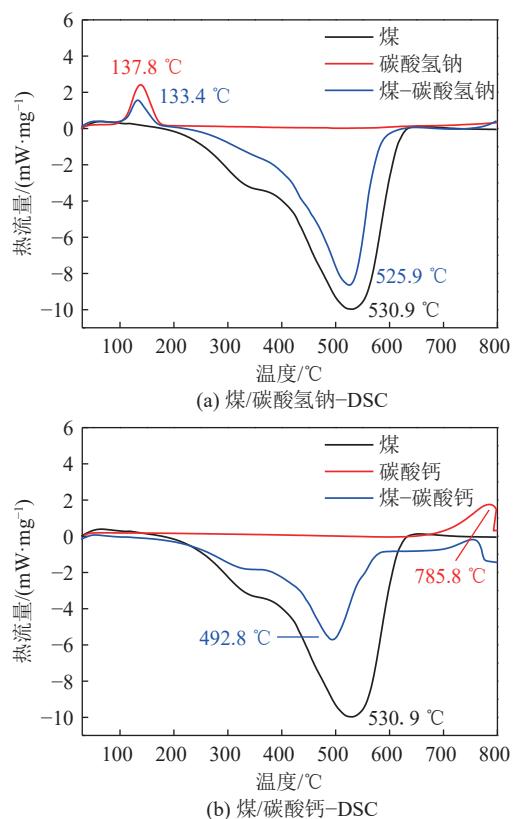


图 9 煤与惰性粉体热流量曲线
Fig.9 Heat flow rate curve of coal and inert powder

斯/煤尘复合体系爆炸压升速率变化趋势线呈现与爆炸压力相似趋势,即变化趋势线斜率由工况A—F逐渐增加。按照与图7同样的方法计算得到不同浓度惰性粉体诱导不同工况瓦斯/煤尘复合体系爆炸压升速率降幅(图10)。由图10可知,与爆炸压力不同,2种惰性粉体诱导瓦斯/煤尘复合体系爆炸压升速率降幅由工况A—F并未先增大后减小,而是逐渐增大,即2种惰性粉体对瓦斯/煤尘复合体系爆炸压升速率的抑制效率由工况A—F逐渐增加。这是因为2种惰性粉体对瓦斯/煤尘复合体系爆炸压升速率的抑制效果主要来自于惰性粉体自身热解形成的吸热速率和自由基销毁速率,而2种惰性粉体的吸热速率和自由基销毁速率主要受其分解速率的影响,因此2种惰性粉体的分解速率是影响其对爆炸压升速率抑制效率的关键参数。而惰性粉体的分解速率主要受复合体系爆炸过程中介质燃烧温度的影响,温度越高,分解速率越高。由工况A—F,复合体系中瓦斯浓度越来越高,燃烧温度也越来越高,2种惰性粉体的分解速率越来越快,导致2种惰性粉体的吸热速率也越来越快,因此抑制效率越来越高。总体而言,

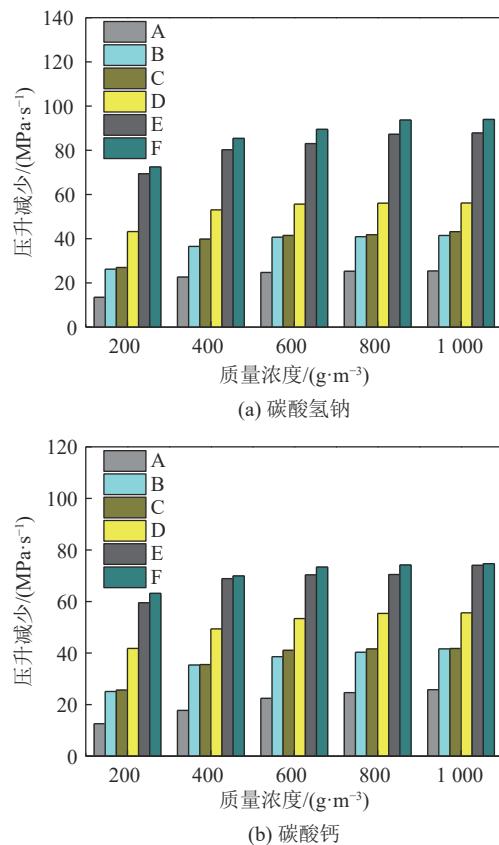


图10 不同浓度惰性粉体诱导不同工况瓦斯/煤尘复合体系爆炸压升速率降幅

Fig.10 Reduction in explosion pressure rise rate of gas/coal dust composite system under different conditions induced by different concentrations of inert powder

对于瓦斯/煤尘复合体系爆炸压升速率,2种惰性粉体对其爆炸压升速率的抑制效率随着体系中瓦斯浓度的提升逐渐升高,并在浓度为10%的纯瓦斯爆炸时达到最佳。

3 结 论

1) 碳酸氢钠和碳酸钙对不同瓦斯和煤尘浓度组合下的瓦斯/煤尘复合体系爆炸均具有抑制作用。其中,碳酸氢钠作用不同瓦斯和煤尘浓度组合下的瓦斯/煤尘复合体系均可被完全抑制,碳酸钙作用下仅当瓦斯浓度低于8%时,瓦斯/煤尘复合体系才能被完全抑制,且相同条件下,碳酸氢钠完全抑制瓦斯/煤尘复合体系爆炸所需浓度低于碳酸钙。

2) 碳酸氢钠和碳酸钙对瓦斯/煤尘复合体系爆炸压力的抑制效率随着体系中瓦斯浓度的提升先升高后降低,当瓦斯浓度为6%、煤尘浓度为100 g/m³时抑爆效率最高。但是2种抑爆剂对瓦斯/煤尘复合体系爆炸压升速率的抑制效率随着体系中瓦斯浓度的提升逐渐升高,并在浓度为10%的纯瓦斯爆炸时达到最佳。

3) 碳酸氢钠和碳酸钙均能在煤尘爆炸过程中通过分解吸热、延缓煤尘热解、降低煤尘分解速率来抑制瓦斯/煤尘复合爆炸。但是,碳酸氢钠的分解吸热性能及其对煤尘热解的延缓作用均优于碳酸钙,且碳酸氢钠可以通过消耗爆炸反应的关键自由基来抑制瓦斯/煤尘复合爆炸,而碳酸钙只能以物理吸热的方式抑制爆炸,因此碳酸氢钠对瓦斯/煤尘复合体系爆炸的抑制效果优于碳酸钙。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,吴立新,郑德志. 2025年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949–1960.
XIE Heping, WU Lixin, ZHENG Dezh. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949–1960.
- [2] 张培森,张晓乐,董宇航,等. 2008—2021年我国煤矿事故规律分析及预测研究[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(2): 136–140, 146.
ZHANG Peisen, ZHANG Xiaole, DONG Yuhang, et al. Law analysis and prediction research of coal mine accidents in China from 2008 to 2021[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(2): 136–140, 146.
- [3] ZHAO Q, LIU J, HUANG C Y, et al. Characteristics of coal dust deflagration under the atmosphere of methane and their inhibition by coal ash[J]. Fuel, 2021, 291: 120121.
- [4] WEN X P, WANG M M, SU T F, et al. Suppression effects of ultrafine water mist on hydrogen/methane mixture explosion in an obstructed chamber[J]. International Journal of Hydrogen Energy,

- 2019, 44(60): 32332–32342.
- [5] WANG Y, MENG X Q, JI W T, et al. The inhibition effect of gas–solid two-phase inhibitors on methane explosion[J]. *Energies*, 2019, 12(3): 398.
- [6] 余明高, 阳旭峰, 郑凯, 等. 我国煤矿瓦斯爆炸抑爆减灾技术的研究进展及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 168–188.
- YU Minggao, YANG Xufeng, ZHENG Kai, et al. Progress and development of coal mine gas explosion suppression and disaster reduction technology in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 168–188.
- [7] SONG Y F, NASSIM B, ZHANG Q. Explosion energy of methane/deposited coal dust and inert effects of rock dust[J]. *Fuel*, 2018, 228: 112–122.
- [8] DA H M, YIN H P, LIANG G Q. Explosion inhibition of coal dust clouds under coal gasification atmosphere by talc powder[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 165: 286–294.
- [9] DAI H M, LIANG G Q, YIN H P, et al. Experimental investigation on the inhibition of coal dust explosion by the composite inhibitor of carbamide and zeolite[J]. *Fuel*, 2022, 308: 121981.
- [10] DONG Z Q, LIU L J, CHU Y Y, et al. Explosion suppression range and the minimum amount for complete suppression on methane-air explosion by heptafluoropropane[J]. *Fuel*, 2022, 328: 125331.
- [11] CAO X Y, LU Y W, JIANG J C, et al. Experimental study on explosion inhibition by heptafluoropropane and its synergy with inert gas[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 71: 104440.
- [12] DU B, HUANG W X, KUAI N S, et al. Experimental investigation on inerting mechanism of dust explosion[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 43: 338–342.
- [13] 刘天奇. 不同煤质煤尘云最低着火温度变化规律研究[J]. 工矿自动化, 2019, 45(9): 80–85.
LIU Tianqi. Research on the minimum ignition temperature variation law of coal dust cloud with different coal quality[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(9): 80–85.
- [14] ZHAO Q, CHEN X F, YANG M J, et al. Suppression characteristics and mechanisms of ABC powder on methane/coal dust compound deflagration[J]. *Fuel*, 2021, 298: 120831.
- [15] YU C F, JIANG B Y, YUAN L, et al. Inhibiting effect investigation of ammonium dihydrogen phosphate on oxidative pyrolysis characteristics of bituminous coal[J]. *Fuel*, 2023, 333: 126352.
- [16] WEI X R, ZHANG Y S, WU G G, et al. Study on explosion suppression of coal dust with different particle size by shell powder and NaHCO₃[J]. *Fuel*, 2021, 306: 121709.
- [17] ZHENG L G, WANG Y L, YU S J, et al. The premixed methane/air explosion inhibited by sodium bicarbonate with different particle size distributions[J]. *Powder Technology*, 2019, 354: 630–640.
- [18] 罗振敏, 张江, 任军莹, 等. NH₄H₂PO₄粉体热分解产物在瓦斯爆炸中的作用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1489–1495.
LUO Zhenmin, ZHANG Jiang, REN Junying, et al. Role of thermal decomposition products of NH₄H₂PO₄ powder in gas explosion[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(6): 1489–1495.
- [19] 司荣军, 王磊, 贾泉升. 瓦斯煤尘爆炸抑隔爆技术研究进展[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 98–107.
- SI Rongjun, WANG Lei, JIA Quansheng. Research progress of explosion suppression and isolation technology of gas and coal dust[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(10): 98–107.
- [20] LI Q Z, WANG K, ZHENG Y N, et al. Experimental research of particle size and size dispersity on the explosibility characteristics of coal dust[J]. *Powder Technology*, 2016, 292: 290–297.
- [21] CAO W G, QIN Q F, CAO W, et al. Experimental and numerical studies on the explosion severities of coal dust/air mixtures in a 20-L spherical vessel[J]. *Powder Technology*, 2017, 310: 17–23.
- [22] WANG S Y, SHI Z C, PENG X, et al. Effect of the ignition delay time on explosion severity parameters of coal dust/air mixtures[J]. *Powder Technology*, 2019, 342: 509–516.
- [23] NIU Y H, ZHANG L L, SHI B M. Experimental study on the explosion-propagation law of coal dust with different moisture contents induced by methane explosion[J]. *Powder Technology*, 2020, 361: 507–511.
- [24] SU B, LUO Z M, WANG T, et al. Experimental and principal component analysis studies on minimum oxygen concentration of methane explosion[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(21): 12225–12235.
- [25] WANG H Y, ZHANG Y W, XU J D, et al. Experimental study on effect of dilute coal dust on gas explosion pressure/flame evolution process[J]. *Powder Technology*, 2022, 404: 117450.
- [26] SONG S X, CHENG Y F, MENG X R, et al. Hybrid CH₄/coal dust explosions in a 20-L spherical vessel[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 122: 281–287.
- [27] ZHAO T L, CHEN X K, CHENG F M, et al. Study on the synergistic inhibition mechanism of multicomponent powders on methane explosions[J]. *Powder Technology*, 2023, 418: 118326.
- [28] 谭迎新, 曹卫国, 张云, 等. 固态惰性介质对煤粉尘爆炸的抑制作用[J]. 测试科学与仪器, 2018, 9(4): 335–338.
TAN Yingxin, CAO Weiguo, ZHANG Yun, et al. Suppression effect of solid inertants on coal dust explosion[J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2018, 9(4): 335–338.
- [29] Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 1: Determination of the maximum explosion pressure p_{exp} of dust clouds; German version EN 14034-1: 2004+A1: 2011; DIN EN 14034-1-2011[S]. UK: Standards Policy and Strategy Committee, 2011.
- [30] Determination of explosion characteristics of dust clouds - Part 2: Determination of the maximum rate of explosion pressure rise (dp/dt) of dust clouds (includes Amendment A1: 2011); DIN EN 14034-2[S]. DIN, 2011.
- [31] GARCIA-AGREDA A, DI BENEDETTO A, RUSSO P, et al. Dust/gas mixtures explosion regimes[J]. *Powder Technology*, 2011, 205(1-3): 81–86.
- [32] Determination of explosion characteristics of dust clouds - Part 3: Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds; German version EN 14034-3: 2006; DIN EN 14034-3-2011[S]. UK: Standards Policy and Strategy Committee, 2011.
- [33] WANG Y, CHENG Y S, YU M G, et al. Methane explosion suppression characteristics based on the NaHCO₃/red-mud composite powders with core-shell structure[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 335: 84–91.