

中文引用格式:赵腾龙,王枫潇,李梓豪,等. 活性复合粉体抑制甲烷爆炸的效能试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(2): 180–188.

英文引用格式: ZHAO Tenglong, WANG Fengxiao, LI Zihao, et al. Study on inhibition effect of active composite powder for methane explosions[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(2): 180–188.

活性复合粉体抑制甲烷爆炸的效能试验研究^{*}

赵腾龙^{1, 2} 讲师, 王枫潇^{**1, 2} 讲师, 李梓豪^{1, 2}, 尹小桐^{1, 2}

(1 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105;

2 辽宁工程技术大学 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 辽宁 葫芦岛 125105)

中图分类号: X932

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.0668

基金项目: 辽宁省自然科学基金联合基金资助(20240342/2025-Z0015); 辽宁省自然科学基金资助(2024-BS-257)。

【摘要】 为获得具有更好抑爆效能的粉体抑爆剂, 利用复配方法将 NaHCO_3 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 K_2CO_3 与 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 混合, 制备新的复合粉体, 并采用可视化球形爆炸测试系统, 分析不同质量浓度与配比下复合粉体对用烷(CH_4)爆炸超压、火焰发展及自由基生成的影响。结果表明: 当 NaHCO_3 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 K_2CO_3 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的质量配比为 1:1:2:1 时, 复合粉体抑爆效能达到最佳。复合粉体的协同增效主要体现在: 250 °C 之前, 复合粉体发生复分解反应, 释放大气体如 H_2O 、 CO_2 与 NH_3 等, 在爆炸初期吸收能量并稀释 CH_4 与氧气, 抑制初期火焰的快速发展; $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 具有吸收 CH_4 燃烧反应中含 C 自由基的作用, 该作用在复合粉体条件下被增强, 能够有效阻止燃烧反应。

【关键词】 复合粉体; 用烷(CH_4)爆炸; 抑爆效能; 协同增效; 火焰发展; 自由基

Study on inhibition effect of active composite powder for methane explosions

ZHAO Tenglong^{1, 2}, WANG Fengxiao^{1, 2}, LI Zihao^{1, 2}, YIN Xiaotong^{1, 2}

(1 College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao,

Liaoning 125105, China; 2 Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and

Control of Ministry of Education, Huludao, Liaoning 125105, China)

Abstract: To obtain the powder suppressant with greater inhibition effect, NaHCO_3 , $\text{Al}(\text{OH})_3$, K_2CO_3 and $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ were mixed by a compounding method, and a new composite powder was obtained. A visual spherical vessel was applied to study the effects of the composite powder with different mixing ratios on methane explosion overpressure, flame propagation and free radical production. The results indicate that as the mass proportion of NaHCO_3 , $\text{Al}(\text{OH})_3$, K_2CO_3 and $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ is 1:1:2:1, the inhibition effect of composite powder is significantly greater than that of the single powder. The synergistic mechanisms of the composite powder are as follows: Before 250 °C, the composite powder undergoes a metathesis reaction, a large number of gases such as H_2O , CO_2 and NH_3 are released. In the early stage of

* 文章编号: 1003-3033(2026)02-0180-09; 收稿日期: 2025-09-25; 修稿日期: 2025-12-16

** 通信作者: 王枫潇(1994—), 男, 甘肃兰州人, 博士, 讲师, 主要从事煤矿热动力灾害防控方面的研究。E-mail: wangfengxiao@lntu.edu.cn。

methane explosion, the energy is absorbed and methane is diluted by the gases, so the rapid flame propagation is inhibited. $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ plays a role in absorbing C-containing free radicals during methane combustion. This effect is enhanced when powder is mixed, leading to a further inhibition for methane combustion reaction.

Keywords: composite powder; methane explosion; inhibition effect; synergistic effect; flame propagation; free radical

0 引言

甲烷(CH_4)爆炸严重威胁着工业能源储运安全,是亟待解决的安全科学问题之一^[1-2]。 CH_4 爆炸初期,火焰发展没有被有效抑制时,极易向爆轰发展,会造成更为严重的人员伤亡与财产损失^[3-4]。因此,有效防控 CH_4 爆炸已成为保障能源安全的迫切需求。

随着安全科学的发展,世界工业对抑爆材料也提出了更高的要求,包括多重功能化以及多重复合抑制效用化等。多功能化趋势要求粉体抑爆剂在具有更好抑爆效能的同时,还要兼具低毒、抑烟、无卤及更好的分散性等优点^[5];多重复合抑制效用化要求粉体抑爆剂具有抑爆协同增效,即通过粉体间的协同抑制作用提升粉体抑爆效果^[6]。在抑爆材料中,复合粉体不仅综合了不同粉体抑爆剂在抑爆上的优势,还能通过粉体间的化学作用实现抑爆协同增效。粉体间的化学作用包括快速吸热复分解以及生成更多消耗自由基的产物等,是提升粉体抑爆能力、抑制火焰快速发展的重要技术^[7-8]。

近年来,学者们针对复合粉体开展了大量研究,张延松等^[9]研究发现,复合粉体具有抑制爆炸温度升高和消耗 $\cdot\text{H}$ 与 $\cdot\text{OH}$ 自由基的作用。ZHANG Shuqi 等^[10]发现,硼酸锌分解产生的 H_2O 、 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 与 ZnO 等能够降低三聚氰胺聚磷酸盐分解产生的 NH_3 ,从而提升三聚氰胺聚磷酸盐抑制铝粉爆炸的能力。PAN Rongkun 等^[11]发现, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 对 CH_4 爆炸的抑制作用好于 CaCO_3 和 NaCl 。LI Manhou 等^[12]发现,磷酸铵盐干粉灭火剂(ABC干粉,主要成分 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)和 KHCO_3 /沸石复合粉体的抑爆效能明显好于单粉体。

现有研究多聚焦于复合粉体对燃烧反应的影响,但对复合粉体抑制下 CH_4 燃烧反应过程自由基的变化特性研究尚不完善,协同抑爆机制的研究仍需深入。因此,笔者拟在制备抑爆活性复合粉体(简称复合粉体)的基础上,分析粉体抑制条件下 CH_4 爆炸超压、火焰形态和抑爆特性,并阐释粉体间

的化学作用,揭示复合粉体协同抑爆增效机制,以期获得具有更好抑爆效能的粉体抑爆剂。

1 CH_4 抑爆效能试验系统与设计

1.1 抑爆效能试验装置

20 L球形爆炸测试装置如图1所示。压力传感器位于装置内部右侧,量程为0~4 MPa,采集频率为5 000 Hz;火焰图像由高速摄像机记录,分辨率为 800×800 ,拍摄频率为5 000 帧/s,可视窗直径110 mm;自由基发射光谱信号由单色仪记录,采集频率为5 000 Hz,采集时间3.44 s。喷粉装置与反应容器相连,除喷粉触发外始终与反应容器分隔,设定喷粉压力1 MPa。电弧方式点火,点火能量为18 J。

1.2 抑爆效能复合粉体的选取

选取 NaHCO_3 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 K_2CO_3 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 作为复合粉体的单元组分,分析纯均为99%,中位粒径为20~30 μm 。3种金属盐化合物与其热分解产物对环境无污染; $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 具有淬火效应,是含卤灭火剂的替代品。将4种粉体以一定比例混合,密封后放入30 $^{\circ}\text{C}$ 干燥箱中备用。

1.3 抑爆效能试验方案

为分析复合粉体的抑爆效能,配制4种质量配比 $m(\text{NaHCO}_3):m[\text{Al}(\text{OH})_3]:m(\text{K}_2\text{CO}_3):m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$ 分别为2:1:1:1、1:2:1:1、1:1:2:1和1:1:1:2。设定 CH_4 体积分数为9.5%,粉体添加质量浓度为75 g/m^3 。图2为未抑制及复合粉体抑制下的 CH_4 爆炸压力曲线。

可以看出,未抑制 CH_4 点火触发($t_0=0$ ms)后,爆炸压力上升,于151.2 ms达到最大压力值 $p_{\max}=0.666$ MPa;复合粉体抑制的 $p_{\max}$ 分别为0.431、0.560、0.429和0.585 MPa,明显低于 CH_4 爆炸,这表明复合粉体能够减少爆炸能量的产生^[13]。其中,质量配比为1:1:2:1的复合粉体对 CH_4 的抑爆效能明显好于其他配比,不同粉体的质量分数见表1。

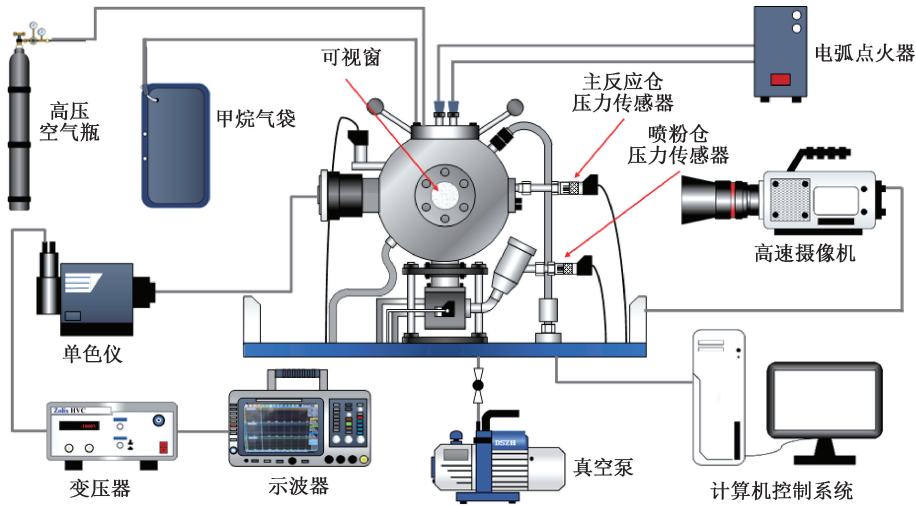


图 1 20 L 球形爆炸测试装置

Fig. 1 Schematic of 20 L explosion vessel

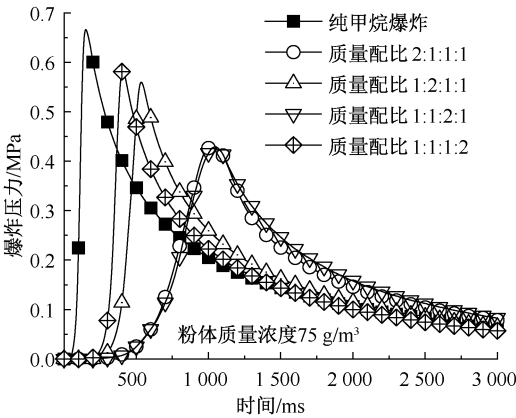


图 2 未抑制及复合粉体抑制下的 CH₄ 爆炸压力

Fig. 2 Explosion pressure of methane explosion under no inhibition and composite powder inhibition

表 1 不同粉体的质量分数

Table 1 Mass fractions of different powders %

序号	NaHCO ₃	Al(OH) ₃	K ₂ CO ₃	NH ₄ H ₂ PO ₄
1	20	20	40	20
2	100	0	0	0
3	0	100	0	0
4	0	0	100	0
5	0	0	0	100

利用热重 - 差热分析 (Thermogravimetric Analysis-Differential Thermal Gravimetry, TG-DTG) 分析粉体的热分解特性,升温范围为 30~800 ℃,升温速率为 20 K/min,进气流量为 20 mL/min。粉体的热分解特性如图 3 所示。4 种粉体受热会发生热分解反应,释放大 量 气 体 如 CO₂、H₂O 与 NH₃ 等,起到稀释可燃物与氧气、吸收爆炸产生的能量以及消耗

CH₄ 燃烧反应关键自由基等作用。其中,NaHCO₃ 与 Al(OH)₃ 的质量损失发生在 400 ℃ 之前,NH₄H₂PO₄ 在 200~800 ℃ 均会发生热分解。K₂CO₃ 在 800 ℃ 以下不会发生热分解,其质量损失主要归因于粉体颗粒中结晶水的蒸发^[12]。

2 复合粉体抑爆效能分析

2.1 爆炸超压分析

复合粉体与单粉体抑制下的 p_{max} 如图 4 所示。复合粉体抑制 CH₄ 爆炸的 p_{max} 明显低于单粉体。当粉体质量浓度为 225~525 g/m³ 时, p_{max} 值没有明显下降。随着粉体质量浓度提升,颗粒间的范德华力与分子间的相互作用会加剧粉体的团聚与沉降^[2,5],粉体的实际质量浓度往往要低于计算的理论质量浓度,导致抑爆性能下降。当粉体质量浓度超过 525 g/m³ 时, p_{max} 值再次出现快速下降,直至爆炸不发生。复合粉体完全抑制 CH₄ 爆炸的质量浓度为 600 g/m³,而单粉体质量浓度为 600 g/m³ 时未完全抑制 CH₄ 爆炸。由于分子结构不同,复合粉体中各单组分起到了分散剂的作用,粉体团聚程度减弱,这是复合粉体协同增效的重要因素^[10]。

2.2 火焰发展分析

当粉体质量浓度为 150 g/m³ 时,复合粉体与单粉体抑制下的火焰发展如图 5 所示。复合粉体抑制下,火焰传播速度降低,火焰核心在浮力效应的影响下向上移动,火焰形变明显。粉体受热分解消耗了大量火焰面附近 CH₄ 燃烧产生的能量,因此火焰亮度明显降低^[14]。

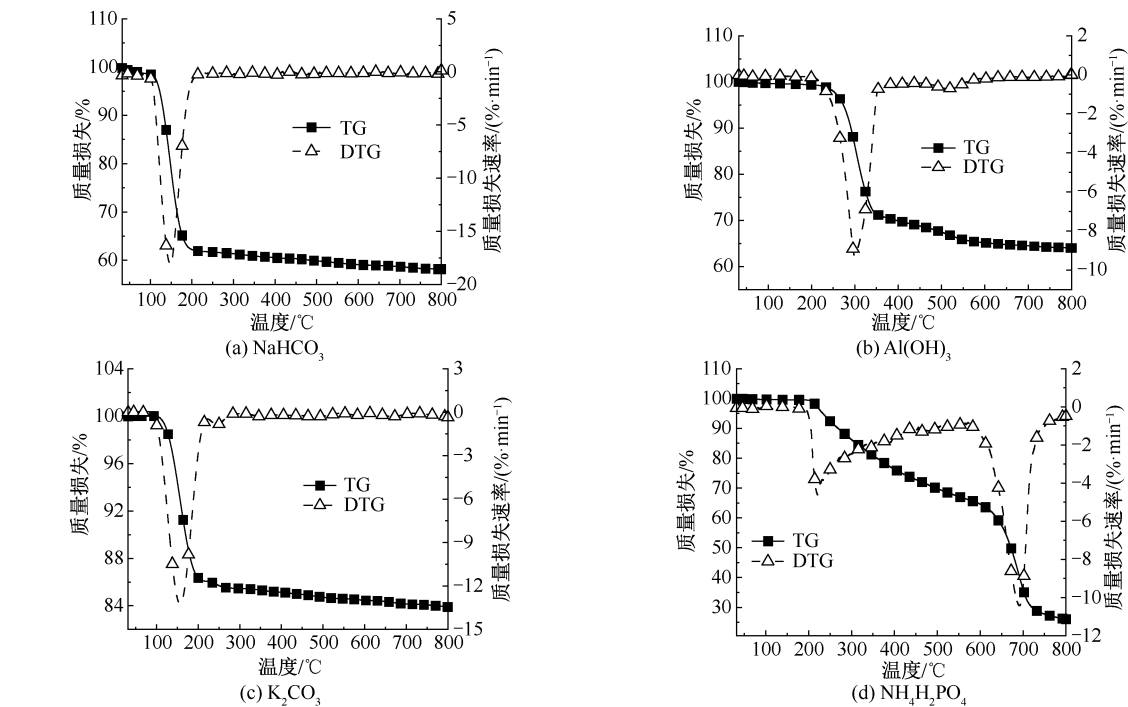


图 3 单粉体的 TG-DTG 曲线

Fig. 3 Curves of TG-DTG for single powder suppressant

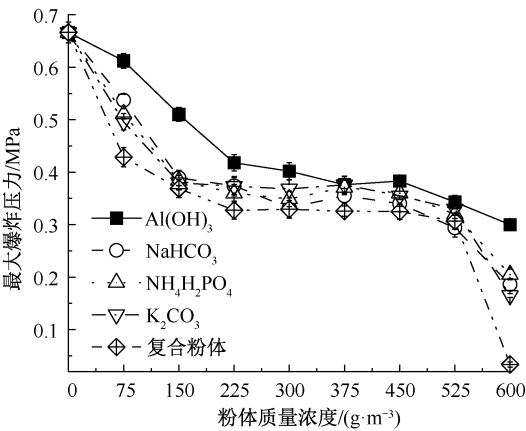


图 4 复合与单粉体抑制下 CH₄ 的最大爆炸压力

Fig. 4 $p_{\max}$ of methane explosion inhibited by composite powder and single powder

点火电极上方垂直于水平面的火焰前锋平均传播速度 u_{H} (m/s) 为:

$$u_{\text{H}} = \lim_{\Delta \tau \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta \tau} = \frac{dr}{d\tau} = \frac{r_{\tau_2} - r_{\tau_1}}{\tau_2 - \tau_1} \quad (1)$$

式中: r 为点火电极上方火焰前锋的传播距离, $r = 55 \text{ mm}$; τ 为火焰传播的时间, ms。CH₄ 爆炸时 u_{H} 为 1.19 m/s。粉体质量浓度超过 375 g/m³ 时, 火焰形变较大, 无法准确判断火焰前锋位置, 故选取粉体质量浓度为 75~375 g/m³ 分析 u_{H} 。复合粉体与单粉体抑制下的 u_{H} 如图 6 所示。75 g/m³ 质量浓度抑

制下, 复合粉体、[Al (OH)₃]、NaHCO₃、NH₄H₂PO₄ 和 K₂CO₃ 等 5 种工况下的 u_{H} 分别为 0.51、1.14、0.55、0.55 和 0.52 m/s。这表明复合粉体对火焰的抑制作用明显优于单粉体, 即复合粉体的抑爆协同增效提升了粉体的抑爆能力。375 g/m³ 质量浓度抑制下, 上述 5 种工况下的 u_{H} 分别为 0.233、0.55、0.26、0.26 和 0.26 m/s。随着粉体质量浓度提升, u_{H} 进一步下降。这表明火焰发展与 CH₄ 燃烧反应速率相关; u_{H} 降低表明 CH₄ 燃烧反应速率降低^[15], 使原本快速发展的爆炸转变成速度较慢的燃烧。

2.3 自由基发射光谱分析

· H、· OH、· CH₂O 以及 · NO 等含 C、O、N 元素的自由基发射光谱火焰光波长选取见表 2^[16]。

radical emission spectra					
自由基	· CH ₂ O	· H	· OH	· CH	· CHO
波长 λ	412.10	656.25	306.36	314.50	318.60
自由基	· O	· CO	· NO	· CN	—
波长 λ	470.50	199.09	237.02	359.00	—

粉体质量浓度为 75 g/m³ 时, 复合粉体与单粉体抑制下 · CH₂O 自由基发射光谱值 U 的变化曲线如图 7 所示。复合粉体抑制下光谱值缓慢上升, 这表明火焰无法迅速扩散, 自由基产生数量降低。自

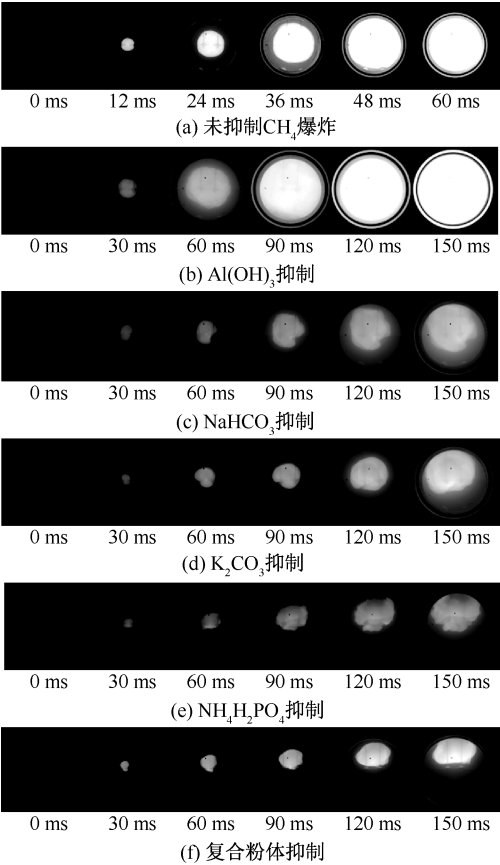


图5 复合与单粉体抑制下的火焰发展
Fig. 5 Flame propagation of methane explosion inhibited by composite powder and single powder

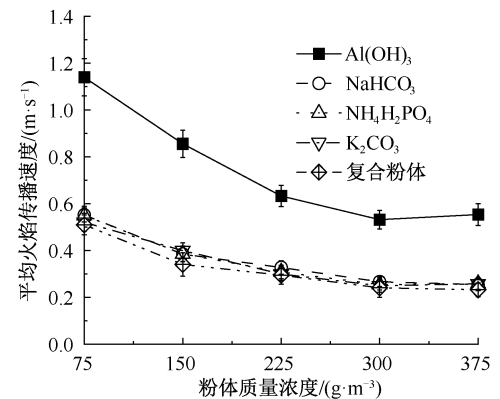


图6 不同粉体质量浓度下的平均火焰传播速度
Fig. 6 u_H of methane explosion with various powder mass concentrations

由基产生数量下降主要可以归结为相当一部分 CH_4 并没有参与到燃烧反应中或只发生了不完全燃烧, 以及 CH_4 燃烧反应过程中产生的自由基与复合粉体的热分解产物的化学反应; 复合粉体抑制下, U 值明显低于单粉体, 且到达最大值 $U_{\max}$ 的时间明显延长, 即自由基产生速率与数量均明显降低。复合粉

体的抑爆协同增效提升了粉体对自由基产生的抑制作用, 增强了复合粉体抑爆能力。

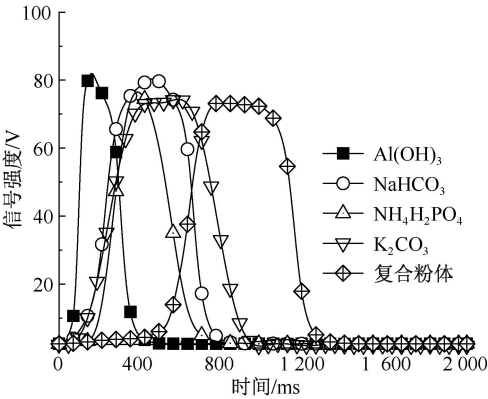


图7 复合与单粉体抑制下自由基发射光谱信号
Fig. 7 U of methane explosion inhibited by single powder and composite powder

复合粉体抑制下自由基的 $U_{\max}$ 值如图 8 所示, 可以看出, 随着粉体质量浓度的提升, 9 种自由基的 $U_{\max}$ 值均出现明显的下降。在火焰发展过程中, 复合粉体热分解产物对自由基的吸收与消耗作用也是导致自由基产生数量下降的重要原因。K、Na 与 P 等元素不仅吸收了 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{H}$ 与 $\cdot\text{O}$ 自由基, 其化学产物仍能抑制燃烧反应^[17]。当粉体质量浓度超过 75 g/m^3 时, $\cdot\text{H}$ 自由基信号强度的下降幅度明显高于其他自由基。作为引发 CH_4 燃烧链式反应的关键自由基, $\cdot\text{H}$ 自由基产生数量的下降表明原本快速发展的 CH_4 爆炸转变为了速度较慢的燃烧。随着粉体质量浓度的提升, 火焰核心扩散缓慢; 随着时间推移, 粉体颗粒的沉降使其抑爆效能下降, 最终向上移动的火焰核心引发速度较慢的 CH_4 燃烧。

此外, $\cdot\text{CO}$ 产生数量的减少说明更少的 CO 气体生成。部分 $\cdot\text{CO}$ 自由基没有参与到后续的 CH_4 燃烧中, 而是被复合粉体的热分解产物所消耗。同时, $\cdot\text{NO}$ 与 $\cdot\text{CN}$ 产生数量的减少说明 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 参与抑制 CH_4 燃烧反应的程度降低。此时, 复合粉体热分解过程的吸热与稀释等物理抑制在 CH_4 抑爆上起主要作用。

2.4 热分解特性分析

假设复合粉体中各单元组分在升温过程互不发生化学作用, 复合粉体的理论质量损失 m_i 为:

$$m_i = a \times m_1 + b \times m_2 + c \times m_3 + d \times m_4 \tag{2}$$

式中: m_i 为复合粉体的理论质量损失, %; a 、 b 、 c 和 d 分别为各单粉体的质量分数, %; m_1 、 m_2 、 m_3 和

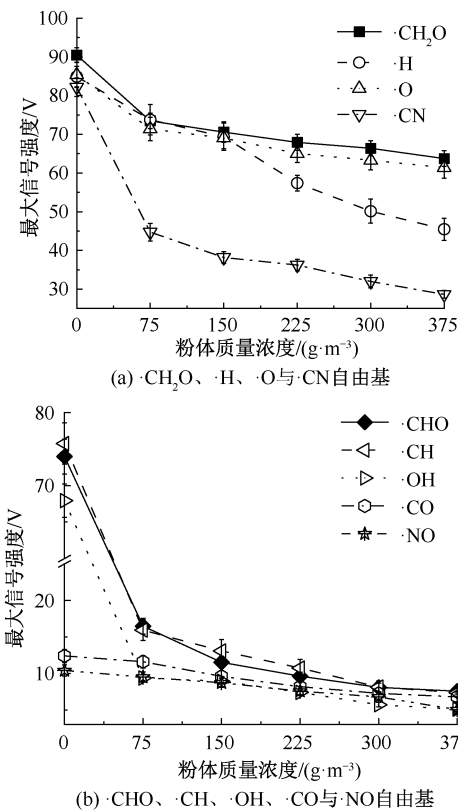


图 8 复合粉体抑制下自由基发射光谱信号最大值

Fig. 8 $U_{\max}$ of methane explosion under composite powder inhibition

m_4 为各单粉体的实际质量损失, %。复合粉体热分解特性如图 9 所示。该复合粉体主要有 4 个质量损失阶段, 实际质量损失分别为 26. 15%、3. 82%、2. 25% 与 4. 47%。在 250 ℃之前, 复合粉体实际质量损失为 26. 11%, 明显大于理论质量损失(15. 30%)。

$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与金属盐化合物之间在较低温度下发生了复分解反应, 见表 3^[18]。爆炸初期, 复分解反应使粉体释放更多气体, 更大程度稀释了 CH_4 与氧气, 并吸收了更多由爆炸产生的能量。快速分解抑制了爆炸初期火焰的发展, 提升了粉体抑爆能力。

表 3 复合粉体的复分解反应

Table 3 Metathesis reactions of composite powder	
序号	反应式
1	$\text{K}_2\text{CO}_3 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{K}_3\text{PO}_4$
2	$\text{NaHCO}_3 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{Na}_3\text{PO}_4$
3	$\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 \rightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{AlPO}_4$

2.5 微观结构特征分析

利用扫描式电子显微镜-X 射线能谱仪 (Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectrometer, SEM-EDS) 分析参与抑爆前后的粉体颗粒微观结构特征, 放大倍数 10 000 倍。参与抑爆

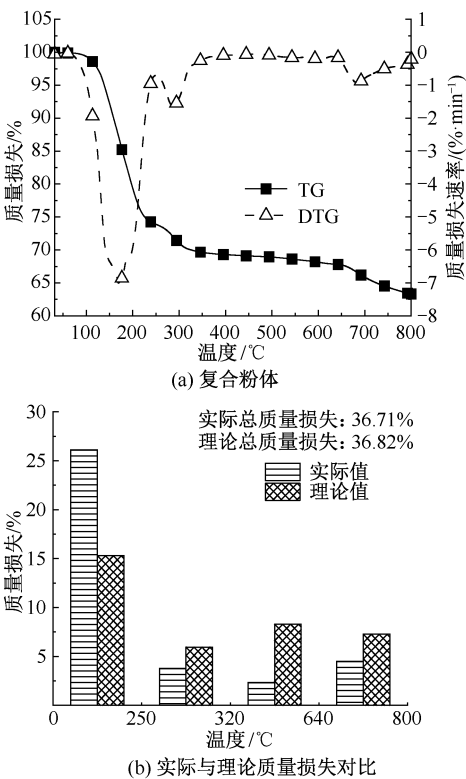


图 9 复合粉体的热分解特性分析

Fig. 9 TG/DTG analysis of composite powder

前后单粉体颗粒表面微观特征如图 10 所示。对于 NaHCO_3 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 与 K_2CO_3 , 参与抑爆前后表面元素质量分数基本相同。对于 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, 参与抑爆后的颗粒表面检测出 C 元素。 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的热分解产物能够与 CH_4 燃烧产物发生化学作用。这种对 C 元素的消耗实质上是 NH_3 与 CH_4 燃烧产生的自由基之间的化学作用, 见表 4^[6, 12]。

表 4 复合粉体对含 C 自由基的消耗作用

Table 4 Consumption effect of composite powder on C-containing free radicals	
序号	反应式
1	$\text{CO}_2 + \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4\text{HCO}_3(\text{CO}_2 \text{ 过量})$
2	$\text{CO}_2 + \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3(\text{NH}_3 \text{ 过量})$
3	$\text{CO}_2 + \text{NH}_3 \rightarrow \text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O}$
4	$\text{CO} + \text{NH}_3 \rightarrow \text{HCONH}_2$
5	$\text{HCONH}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4\text{HCO}_2$

复合粉体颗粒微观结构特征如图 11 所示。O 元素在参与抑爆前后质量分数基本相同, K、Na、Al 与 P 元素质量分数明显降低, N 元素质量分数小幅度的上升。值得注意的是, 参与抑爆后复合粉体颗粒表面 C 元素质量分数明显提升, 数值为 10. 56%, 明显大于参与抑爆后 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 颗粒表面的 C 元素质量分数。复合粉体条件下, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 对含 C

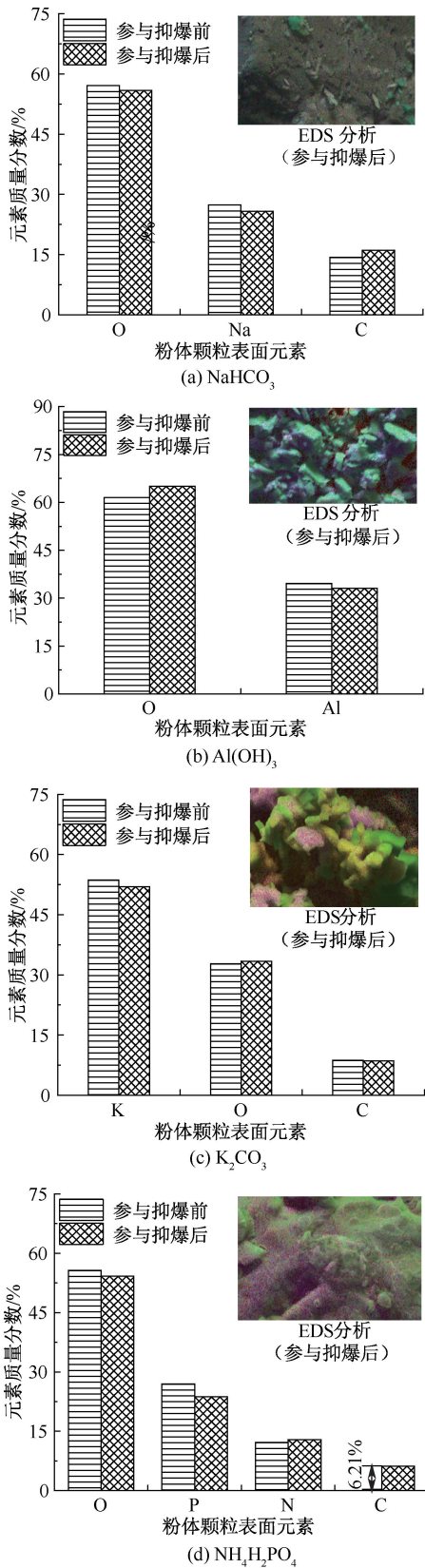


图 10 参与抑爆前后单粉体表面微观结构特征
Fig. 10 SEM-EDS parameters of single powder before and after explosion

自由基的吸收作用被增强。这主要是由于粉体间的复分解反应为含 C 自由基的吸收提供了更多的反应物;这些反应物在爆炸初期与更多含 C 元素自由基发生化学作用,生成更多含 C 元素的固态产物沉降。

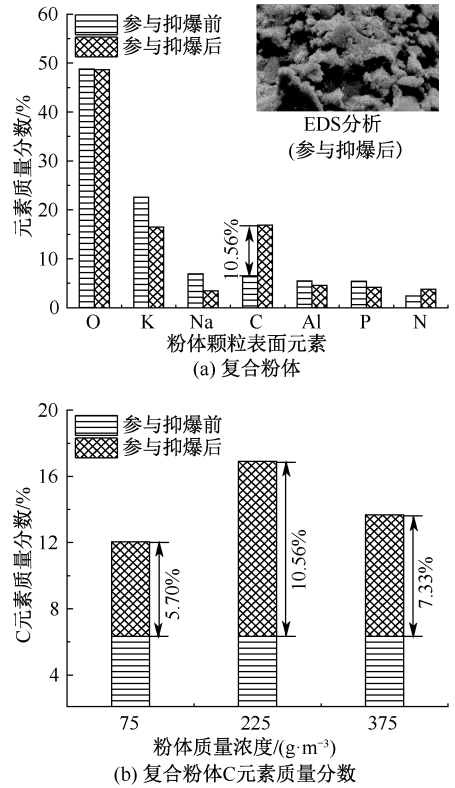


图 11 参与抑爆前后复合粉体表面微观结构特征
Fig. 11 SEM-EDS parameters of composite powder before and after explosion

除此之外,随着粉体质量浓度由 $75 \text{ g}/\text{m}^3$ 提升至 $375 \text{ g}/\text{m}^3$,复合粉体参与抑爆前后颗粒表面的 C 元素质量分数呈现出现上升后下降的趋势。当粉体质量浓度较低时, CH_4 燃烧反应较强烈,产生的含 C 元素自由基数量更多;这些自由基与复合粉体热分解产物发生化学作用,产生大量含 C 元素固态产物。然而,当粉体质量浓度提升至一定程度时, CH_4 燃烧反应程度与速率均降低;此时,含 C 元素自由基产生数量降低,能够与复合粉体发生化学作用反应物减少,产生的含 C 元素固态产物数量下降。

根据自由基与火焰发展分析结果,当粉体质量浓度较低时, CH_4 燃烧程度高,此时复合粉体的化学作用能够有效抑制关键自由基的产生,延缓火焰扩散速度,使爆炸转变为速度较慢的燃烧,爆炸危害降低。当粉体质量浓度较高时,复合粉体间的复分解反应使爆炸初期火焰发展与能量积聚被快速抑制,

火焰无法有效扩散直至完全熄灭。

3 结 论

1) 复合粉体对 CH_4 爆炸的抑爆效能明显好于单粉体。当粉体质量浓度达到 600 g/m^3 时,复合粉体抑制下的 CH_4 爆炸被完全抑制,而单粉体抑制下的 CH_4 爆炸仍会发生。

2) 复合粉体有效抑制了火焰的发展,随着粉体质量浓度由 0 g/m^3 提升至 375 g/m^3 , CH_4 (9.5%) 爆炸初期平均火焰传播速度由 1.19 m/s 降低至 0.23 m/s ,火焰更容易在浮力效应影响下向上移动。

3) 复合粉体的协同增效主要归因于较低温度下粉体间的复分解反应。 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 能够与 NaHCO_3 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 以及 K_2CO_3 发生复分解反应,产生大量 NH_3 、 H_2O 与 CO_2 等气体。快速分解可有效抑制 CH_4 爆炸初期火焰的发展。

4) 复合粉体能够优化 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 对含 C 元素自由基的吸收作用。 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 能够在 CH_4 爆炸中吸收并消耗含 C 元素自由基,有效阻止燃烧反应。复合粉体间的化学作用加强了 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 对 C 元素的吸收作用,使 CH_4 的快速爆炸转变为缓慢燃烧。

参 考 文 献

- [1] YU Minggao, LI Shanshan, LI Haitao, et al. Numerical evaluation of the influence of initial pressure/temperature on the explosion properties and soot formation of methane/coal volatiles mixtures[J]. Fuel, 2023, 331(1): DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125698.
- [2] 张莉聪, 李斯曼, 周振兴. 煤矿瓦斯多相协同抑爆的研究进展与展望[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(增1): 97-104.
ZHANG Licong, LI Siman, ZHOU Zhenxing. Research progress and prospect of multi-phase synergistic explosion suppression of coal mine gas[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S1): 97-104.
- [3] 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.
LI Min, WANG Dan, HE Shan, et al. Research review and progress of coal mine gas explosion risk assessment[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(2): 127-136.
- [4] LIANG He, YAN Xingqing, SHI Enhua, et al. Flame evolution and pressure dynamics of premixed stoichiometric ammonia/hydrogen/air in a closed duct [J]. Fuel, 2024, 363(1): DOI: 10.1016/j.fuel.2024.130983.
- [5] 王晓玲, 刘震起. 甲烷-空气预混区外含钾细水雾抑爆特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1): 150-157.
WANG Xiaoling, LIU Zhenqi. Study on explosion suppression characteristic of water mist containing potassium compounds outside methane-air premixed area[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(1): 150-157.
- [6] 王燕, 李忠, 张一民, 等. 不同磷酸氢盐作用下的乙烯抑爆特性及机制[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(5): 48-54.
WANG Yan, LI Zhong, ZHANG Yimin, et al. Suppression characteristics and mechanism of different hydrogen phosphates on ethylene explosion[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(5): 48-54.
- [7] DAI Huaming, LIANG Guangqian, YIN Hepeng, et al. Experimental investigation on the inhibition of coal dust explosion by the composite inhibitor of carbamide and zeolite[J]. Fuel, 2022, 308(2): DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121981.
- [8] ZHU Yujian, MENG Xxiangbao, YU Xiaozhen, et al. Study on inhibition of titanium powder explosion by melamine polyphosphate/iron modified carbon nanotube composite powder[J]. Advanced Powder Technology, 2025, 36(4): DOI: 10.1016/j.appt.2025.104833.
- [9] 张延松, 徐畅, 秦江, 等. 纳米复合抑爆粉体抑制甲烷煤尘混合爆炸动力学机理研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(11): 4296-4305.
ZHANG Yansong, XU Chang, QIN Jiang, et al. Study on the dynamic mechanism of nanocomposite explosion suppression powder in mitigating the combined explosion of methane and coal dust[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(11): 4296-4305.
- [10] ZHANG Shuqi, ZHAO Jiangping, YANG Yong, et al. Suppression effect and mechanism of melamine polyphosphate /

- zinc borate composite suppressant on aluminum dust explosion [J]. Powder Technology, 2025, 456(4): DOI: 10.1016/j.powtec.2025.120777.
- [11] PAN Rongkun, WANG Chensheng, ZHANG Qingsheng, et al. Experiment and mechanism of explosion suppression thermal properties of multicomponent powder [J]. Thermochimica Acta, 2025, 746(4): DOI: 10.1016/j.tca.2025.179953.
- [12] LI Manhou, JI Shijie, LI Quan, et al. Study on suppression of ABC powder and potassium bicarbonate-zeolite composite powder on explosion of hydrogen enriched compressed natural gas[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 81(9): DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.07.308.
- [13] 吉冬雨, 杨克, 纪虹, 等. 多巴胺包覆珍珠岩对抑制甲烷爆炸的试验研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(11): 1 505–1 511.
- JI Dongyu, YANG Ke, JI Hong, et al. Experimental study of dopamine-coated perlite on inhibition of methane explosion[J]. Fire Science and Technology, 2024, 43(11): 1 505–1 511.
- [14] 王涛, 孟帆, 弋伟斋, 等. 碳酸钾改性干水-六氟丙烷抑制甲烷爆炸特性[J]. 高压物理学报, 2025, 39(4): 79–90.
- WANG Tao, MENG Fan, YI Weizhai, et al. Coupling inhibition effects of dry water modified by potassium carbonate and hexafluoropropane on methane explosion[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(4): 79–90.
- [15] 刘丽, 孟祥豹, 陈记合, 等. 含磷回收物对甲烷/煤尘复合爆炸火焰传播的抑制效果及机理研究[J]. 煤矿安全, 2025, 56(3): 75–83.
- LIU Li, MENG Xiangbao, CHEN Jihe, et al. Study on suppression effect and mechanisms of phosphorus-containing recycling substance on flame propagation of methane/coal dust composite explosion[J]. Safety in Coal Mines, 2025, 56(3): 75–83.
- [16] 李孝斌, 张瑞杰, 孙婧雯, 等. 甲烷爆炸中尿素粉体浓度对典型自由基影响研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(4): 1 093–1 100.
- LI Xiaobin, ZHANG Ruijie, SUN Jingwen, et al. Experiment of typical free radical change during urea inhibition of methane explosion[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(4): 1 093–1 100.
- [17] 张莉聪, 李斯曼. 基于基元反应的气液两相协同抑爆阻燃效果分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 101–108.
- ZHANG Licong, LI Siman. Analysis of gas-liquid two-phase coordinated explosion and flame retardant effect based on fundamental reaction[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 101–108.
- [18] ZHAO Tenglong, CHEN Xiaokun, LUO Zhenmin, et al. Effect of N₂ inerting on the inhibition of methane explosions by a multicomponent powder[J]. Fuel, 2023, 337(4): DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127203.

作者简介：赵腾龙（1992—），男，辽宁抚顺人，博士，讲师，主要从事可燃气体/粉尘燃爆防控与城市公共安全方面的研究。E-mail: zhaotenglonglntu@126.com。

