

惰性粉末对氢气爆燃诱发的堆积锆粉二次爆炸的抑制效果*

吴张君¹, 宋先钊², 邓树新², 王明洋³

1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 南京理工大学 安全科学与工程学院, 江苏 南京 210094;

3. 陆军工程大学 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007

摘要: 粉尘二次爆炸是可燃粉尘受爆炸作用后再次引发燃爆, 采用惰性粉末惰化可燃粉尘云是常见的抑爆手段之一。选取三种常用惰性抑爆粉末: NaHCO_3 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 NaCl , 针对不同抑爆粉尘浓度 (33.3 wt%、50 wt%、60 wt% 以及 75 wt%), 开展开放空间内氢气爆燃诱发地基锆粉二次爆炸抑制效果试验研究。试验结果表明: 掺入浓度 60 wt% 的 NaCl 粉末时能够较好地抑制堆积锆粉燃爆, 其次是掺入 50~60 wt% 的 NaHCO_3 粉末。掺入 NaHCO_3 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 以化学抑制作用为主的抑爆剂时, 其抑制效果并不随着掺入浓度的增加而增强。掺入 NaCl 以物理抑制作用为主的抑爆剂是更加稳健且有效的抑爆手段。该研究结果对工业生产等领域的高活性金属粉尘材料的防火防爆具有参考意义。

关键词: 锆粉; 堆积粉尘爆炸; 惰性粉末; 抑爆; 粉尘二次爆炸

中图分类号: X932 国标学科代码: 13035 文献标识码: A

Inhibition effect of inert powder on secondary explosion of accumulated zirconium powder induced by hydrogen deflagration

Wu Zhangjun¹, Song Xianzhao², Deng Shuxin², Wang Mingyang³

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2 School of Safety Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

3. State Key Laboratory of Explosion & Impact and Disaster Prevention & Mitigation, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China.

Abstract: Secondary dust explosion is a typical and hazardous disaster phenomenon in industrial dust safety, which is defined as the secondary combustion and explosion behavior of suspended combustible dust clouds excited and induced by the shock wave and thermal effect of the primary explosion. The inert powder suppression technology is recognized as one of the most efficient and feasible measures to mitigate and restrain dust explosion hazards. To reveal effective suppression routes for secondary explosions of high-reactivity metal dust, three typical inert suppressants including sodium bicarbonate (NaHCO_3), ammonium dihydrogen phosphate ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) and sodium chloride (NaCl) were selected. A series of contrastive experiments were carried out to investigate the suppression characteristics of four different mass fractions (33.3 wt%, 50 wt%, 60 wt%, and 75 wt%) of inert powders on hydrogen deflagration-induced secondary explosion of accumulated zirconium dust in an open space. The explosion overpressure, flame morphology evolution, flame propagation velocity and flame temperature duration characteristics were systematically analyzed. Experimental results demonstrate that inhibitors dominated by physical effects such as NaCl are

* 收稿日期: 2026-03-05; 修回日期: 2026-07-21;

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 12402432); 南京理工大学研究生教育教学改革课题 (NO. KT2024_C14);

第一作者: 吴张君 (1999—), 女, 博士研究生. E-mail: 222101024660@njust.edu.cn;

通信作者: 宋先钊 (1995—), 性别, 学位, 职称. E-mail: songxianzhao@njust.edu.cn。

more efficient and reliable for active zirconium dust. In contrast, chemically based inhibitors exhibit inconsistent concentration-dependent suppression performance. Specifically, NaCl powder relies on pure physical suppression mechanisms including heat absorption and flame blocking; it does not participate in chemical combustion reactions or generate secondary harmful by-products, thereby delivering outstanding suppression stability. The 60 wt% NaCl condition achieves the optimal comprehensive suppression effect, which can markedly reduce explosion overpressure, limit flame propagation range, lower flame temperature and shorten the duration of high-temperature zones. The suppression capacities of NaHCO_3 and $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ cannot be continuously enhanced with the increase of doping mass fraction. Moreover, thermal decomposition products of $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ even exert a certain catalytic effect on the combustion of zirconium dust. By comparison, 50–60 wt% NaHCO_3 presents relatively balanced suppression performance, whereas $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ is not applicable to the suppression of zirconium dust explosion. Distinctions between physical and chemical inhibition mechanisms governing zirconium dust secondary explosions are identified, supplying reliable experimental datasets and technical support for explosion prevention and safety control of highly reactive metal dust in industrial production and storage processes.

Keywords: Zirconium powder; Dust accumulation explosion; Inert powder; Explosion suppression; Secondary dust explosion

1 引言

粉尘爆炸对工业生产有较大的安全威胁。在煤矿生产、木材加工、食品工业等工业生产环节中都容易发生粉尘爆炸。粉尘初次爆炸后产生的冲击波和火焰会卷扬并点燃粉尘云形成更猛烈的大规模的系统爆炸,即“二次爆炸”^[1,2]。相较于主爆炸,二次爆炸的作用机制更为复杂且更具有危险性^[3]。锆粉是一种高致热性金属粉,具有较低的着火点(约为 210 °C)、极易被氧化、燃烧速度大和释放热量高等特点,被广泛应用于民用、航天、军工及核反应堆等领域^[4,5]。核燃料的包壳中含锆,因此在乏燃料后处理过程中需要对乏燃料的外壳进行切割时会产生锆粉^[6]。粒径较小的锆粉和空气接触后极易发生氧化反应,当锆粉浓度超过一定程度后,极易发生锆粉粉尘爆炸^[7]。王秋红等人^[8]基于自行设计的粉尘云连续吹喷预混燃烧实验系统,对锆粉云喷射火焰的温度场分布开展了研究,锆粉云的连续喷射火焰最高温度大于 2100 °C。Ewald 等人^[9]基于二维有限差分模型,研究了在氧气中锆粉颗粒大小和浓度对锆粉燃烧状态的影响。邓军等人^[4]基于 20L 近球形爆炸系统开展了初始点火能量、点火延迟时间、粉尘云浓度对锆粉尘云爆炸强度的影响,揭示了锆粉尘云在密闭容器中的爆炸特性。

采用不可燃惰性粉末,惰化可燃粉尘云是一种常见的粉尘防爆手段^[10–12]。掺入足量的惰性粉末会导致粉尘燃烧所需的热量流失,从而阻止可燃粉尘被点燃。现有研究表明碳酸氢钠(NaHCO_3)、磷酸二氢铵($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)、氯化钠(NaCl)均是典型粉体抑爆剂可以有效降低可燃气体和粉尘爆炸严重程度。 NaHCO_3 干粉是一种典型粉体抑制剂,具有价格低廉、清洁有效、使用范围广、性能好等特点,以化学抑制作用为主; $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 是干粉灭火剂的主要成分,同样是以化学抑制作用为主; NaCl 则是典型的物理抑制作用粉末,不可燃、吸热性强且无毒。Wei 等人^[13]通过实验研究发现了 NaHCO_3 水雾对甲烷爆炸的火焰传播和最大爆炸压力都有显著的抑制作用。陈先锋等人^[14]建立竖直粉尘燃烧管道实验平台研究了 NaHCO_3 对铝粉燃烧火焰传播特性的抑制作用,发现 NaHCO_3 粉末能够降低火焰温度、降低铝粉燃烧反应速率,阻碍其燃烧传播。J. Amrogowicz 等^[15]发现 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉末对于火焰燃烧传播的惰化作用优于 NaHCO_3 ,而 NaHCO_3 具有更好的抑爆效果。付羽等人^[16]发现在镁粉中掺入 NaCl 可以大幅降低镁粉的爆炸猛度,甚至使镁粉不发生爆炸。此外,许多学者基于 20L 球形爆炸装置,将惰性粉尘与可燃粉尘一起抛洒形成粉尘云,发现惰性粉末对于粉尘爆炸具有较好的抑制效果,惰性粉末的浓度越高对粉尘爆炸的惰化作用越强^[17–20]。

然而堆积粉尘受激波的卷扬作用形成粉尘云,在成云过程中粉尘颗粒会发生相互碰撞,且受到激波及高温爆轰产物作用,此时粉尘爆炸威力更大、具有更强的破坏力。进一步地,有研究表明:在堆积状态的可燃粉尘中掺混惰性粉末介质有可能加剧其发生粉尘爆炸时的危险性^[21–23]。例如,

NaHCO_3 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的分解物质中有水蒸气, 水蒸气作为氧化剂反而会增加堆积金属粉尘燃烧爆炸的危险性^[24-26]。无论是堆积金属粉尘还是金属粉尘云都需要掺混较高的不燃惰性抑爆粉末介质才能起到有效的惰化作用。尤其是对于低熔点金属粉末, 少量添加抑爆粉末反而会增加粉尘爆炸的危险性^[27]。

目前对于可燃金属粉尘抑爆的研究主要集中在常见的分散金属粉末, 即粉尘云, 如铝粉、镁粉等, 对于堆积状态下的锆金属粉尘爆炸燃烧特性的研究较少。而锆比镁、钛更具有危险性, 是一种危险性金属。在较低的温度下, 锆粉就能在 O_2 、 N_2 、 H_2O 等气体中燃烧并自爆^[28]。因此, 研究堆积状态下惰性粉末对锆粉燃爆的抑制作用具有重要意义。本文系统开展了不同浓度的碳酸氢钠

(NaHCO_3)、磷酸二氢铵 ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) 和氯化钠 (NaCl) 粉末抑制锆粉燃爆强度的试验研究, 对比分析了三种常用惰性粉末对堆积状态下锆粉燃爆的抑制效果和机理, 为含锆粉云爆弹防窜火技术、锆粉相关工业生产领域提供参考。

2 试验

2.1 试验设置

样品 1#到 10#的组成成分如表 1 所示。试验采用易燃易爆金属粉末锆粉和抑爆粉末: 碳酸氢钠 (NaHCO_3) 粉末、磷酸二氢铵 ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) 粉末、氯化钠 (NaCl) 粉末, 所有粉末颗粒形状规则、粒径均匀。为减少实验误差, 所有样品使用前均过筛 (400 目) 并在 50°C 烘箱中干燥 24h。实验时, 分别向锆粉中添加抑爆粉末, 制成试验样品。考虑到已有研究指出需要较高的抑爆粉末介质添加浓度, 实验设置抑爆粉末浓度为 33.3wt%、50wt%、60wt%、75wt%。

表 1 样品成分表

Table 1 Sample Composition

Sample/#	Zr/g	NaHCO_3/g	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4/\text{g}$	NaCl/g	Total weight/g
1	5	2.5			7.5
2	4	4			8
3	3	4.5			7.5
4	2	6			8
5	5		2.5		7.5
6	4		4		8
7	3		4.5		7.5
8	5			2.5	7.5
9	4			4	8
10	3			4.5	7.5

2.2 实验设备

实验系统由直立激波管、高速摄影系统、红外摄影系统、高压点火系统和数据采集系统组成, 如图 1 所示。本次实验主要采用直立圆柱形小型激波管, 激波管内径为 56mm, 长度为 1m, 两端可以用法兰和螺丝密封, 底端法兰可安装电阻丝进行点火。共布置有 8 个 PCB 压力传感器 (型号: PCB113B26)。PT1 和 PT2 间隔 15mm; PT3 和 PT4 间隔 15mm, 布置于激波管出口附近; 泄爆膜通过中空法兰固定于激波管顶部出口; PT5, PT6, PT7 和 PT8 间隔 100mm, 位于激波管出口外, 其中 PT5 距离激波管出口 50mm。

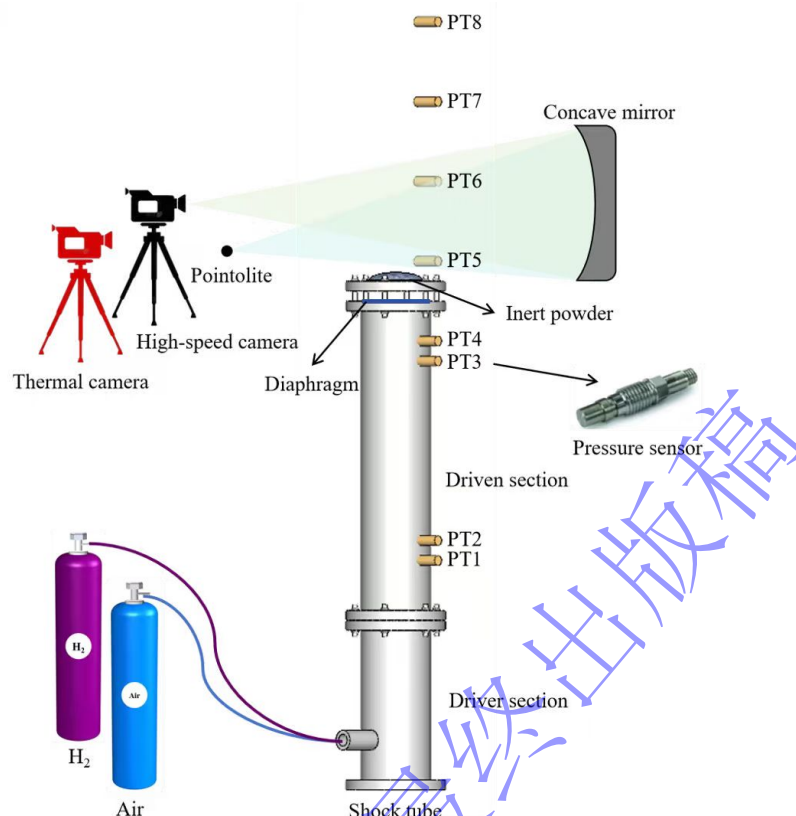


图 1 堆积锆粉燃爆试验系统

Fig.1 Zirconium Powder Accumulation Explosion Test System

3 试验结果与分析

3.1 惰性粉末抑制堆积锆粉燃爆超压强度的试验结果与分析

典型堆积粉末在氢气爆炸作用下的超压-时程变化曲线如图 2 所示，PT1~PT4 记录了激波管内的超压变化规律，PT5~PT8 记录了激波管外的超压变化规律。激波传播至出口外有明显的扩散衰减，所以 PT5~PT8 记录到的超压远小于 PT1~PT4。

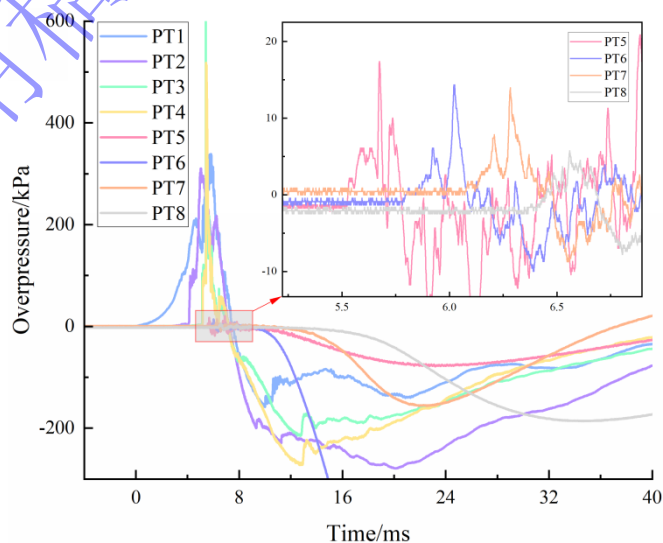


图 2 典型超压-时程变化曲线

Fig.2 Typical overpressure-time history curve

在堆积粉末中掺入不同浓度的抑爆粉末 NaHCO_3 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 NaCl ，在竖直激波管开放口部测得的抑爆剂种类浓度与最大爆炸压力的关系如表 2、图 3 所示。

现有研究指出抑爆粉末对有限空间内粉尘云的抑爆效果随着掺混浓度的增加而提升。但是，本文试验结果表明，对于 NaHCO_3 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 这两类抑爆剂，对堆积铝粉燃爆超压强度的抑制效果并不随抑爆粉末的浓度增加而提升。这是因为这 NaHCO_3 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 抑爆剂均属于以化学抑制作用为主的抑爆剂，主要通过吸热分解反应和分解惰性气体降低可燃气体浓度实现抑爆效果，但在极端高温的试验条件下这两类抑爆剂粉末受热分解产物能够与活泼金属铝粉发生二次反应，且分解产生的气体进一步卷扬铝粉，增大铝粉与可燃气体接触的比表面积加剧铝粉的氧化反应，使其燃烧爆炸程度提升。

当掺入的 NaHCO_3 浓度为 33.3wt% 时，PT5 的最大爆炸超压最小，为 53.42 kPa；75wt% NaHCO_3 的堆积粉末，PT5 的最大爆炸超压为 75.57 kPa，明显高于其余浓度的 NaHCO_3 。这说明掺混过高浓度的 NaHCO_3 粉末会加剧堆积铝粉的燃爆反应。结合高速和纹影，可以认为氢气爆炸作用下铝粉燃爆的核心反应区位置大概位于 PT5 和 PT6 附近。因此，为更全面地评价抑爆粉末对堆积铝粉燃爆的超压强度抑制效果，需要进一步比较 PT5 和 PT6 记录到的最大爆炸超压的平均值。33.3wt% NaHCO_3 堆积粉末 PT5 和 PT6 平均最大爆炸超压和总平均超压均最小，分别为 46.04 kPa 和 34.45 kPa；60wt% NaHCO_3 的堆积粉末 PT5 和 PT6 平均最大爆炸超压和总平均超压均最大，分别为 63.20 kPa 和 43.63 kPa；50wt% 和 75wt% NaHCO_3 的 PT5 和 PT6 平均最大爆炸超压分别为 61.68 kPa 和 61.46 kPa，总平均最大超压分别为 43.41 kPa 和 43.59 kPa。

对于掺入了 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的堆积粉末，在浓度为 33.3 wt%、50 wt% 时 PT6 的最大爆炸超压值大于 PT5。当 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 浓度为 33.3wt% 时，PT5 的最大爆炸超压为 58.2 kPa，PT6 的最大爆炸超压为 60.81 kPa，增加了 2.81 kPa；当浓度为 50 wt% 时，PT5 和 PT6 的最大爆炸超压分别为 55.59 kPa 和 59.50 kPa，增加了 3.91 kPa。这是因为掺混浓度较低的 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉末受热分解产生 H_2O 和 NH_3 不足以实现窒息和降温作用，反而在氢气爆炸诱导的极端高温条件下，进一步分解成 H_2 、 N_2 以及自由基，参与到尚未完全反应的流场中，形成二次爆轰。 N 与 Zr 在高温下发生强烈的放热反应生成 ZrN ，放热反应释放的热量为系统注入了能量，导致铝粉燃爆反应更加剧烈。此时， $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉末与铝粉的核心反应区更靠近 PT6 的位置，因此 33.3wt% 和 50wt% $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的 PT6 记录到的最大超压均大于 PT5。当 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的浓度增加至 60 wt% 时，PT5 的最大爆炸超压与 50 wt% 浓度相近为 56.0 kPa，但 PT6 的最大爆炸超压明显下降，为 42.6 kPa。60 wt% $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的 PT5 和 PT6 平均最大爆炸超压和总平均超压均最小，分别为 49.30 kPa 和 35.57 kPa；33.3 wt% $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的 PT5 和 PT6 平均最大爆炸超压最大，为 59.51 kPa；50 wt% $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的总平均最大爆炸超压最大，为 42.08 kPa。

NaCl 粉末对堆积铝粉燃爆超压的抑制效果明显随着浓度的增加而提升。因为 NaCl 是一种物理作用抑爆剂，抑制机理是通过吸收热量和稀释反应物浓度，并不参与燃烧化学反应。当掺入 60 wt% NaCl 时，堆积铝粉燃爆超压显著降低。高浓度的 NaCl 粉末对堆积铝粉燃爆超压的抑制效果明显。60 wt% NaCl 的 PT5 和 PT6 平均最大爆炸超压和总平均超压均最小，分别为 50.82 kPa 和 37.00 kPa；33.3 wt% NaCl 的 PT5 和 PT6 平均最大爆炸超压和总平均超压均最大，分别为 78.83 kPa 和 58.83 kPa；50 wt% NaCl 的 PT5 和 PT6 平均最大爆炸超压为 59.29 kPa，总平均最大爆炸超压为 39.41 kPa。

综上所述，在堆积铝粉中掺入 33.3wt% NaHCO_3 粉末对燃爆超压的抑制效果最好，总平均超压为 34.45 kPa；掺入 60 wt% $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉末次之，总平均超压为 35.57 kPa；掺入 60 wt% NaCl 粉末再次之，总平均超压为 37.00 kPa。

表 2 不同工况的最大爆炸超压

Table 2 Maximum explosion overpressures under different working conditions

Sample/#	Maximum Overpressure	Maximum Overpressure	Average Maximum	Maximum Overpressure	Maximum Overpressure	Average Maximum
----------	----------------------	----------------------	-----------------	----------------------	----------------------	-----------------

		of PT5/kPa	of PT6/kPa	Overpressure of PT5 & PT6/kPa	of PT7/kPa	of PT8/kPa	Overpressure of PT5- PT8/kPa
NaHCO ₃	33.3%	53.42	38.66	46.04	26.87	18.86	34.45
	50%	67.76	55.59	61.68	28.96	21.33	43.41
	60%	63.41	62.98	63.20	29.67	18.45	43.63
	75%	75.57	47.34	61.46	29.31	22.15	43.59
NH ₄ H ₂ PO ₄	33.3%	58.20	60.81	59.51	30.36	18.86	42.06
	50%	55.59	59.50	57.55	29.84	23.38	42.08
	60%	56.03	42.56	49.30	24.43	19.27	35.57
NaCl	33.3%	91.21	66.45	78.83	31.41	26.25	53.83
	50%	64.28	54.29	59.29	22.68	16.40	39.41
	60%	54.73	46.91	50.82	23.38	22.97	37.00

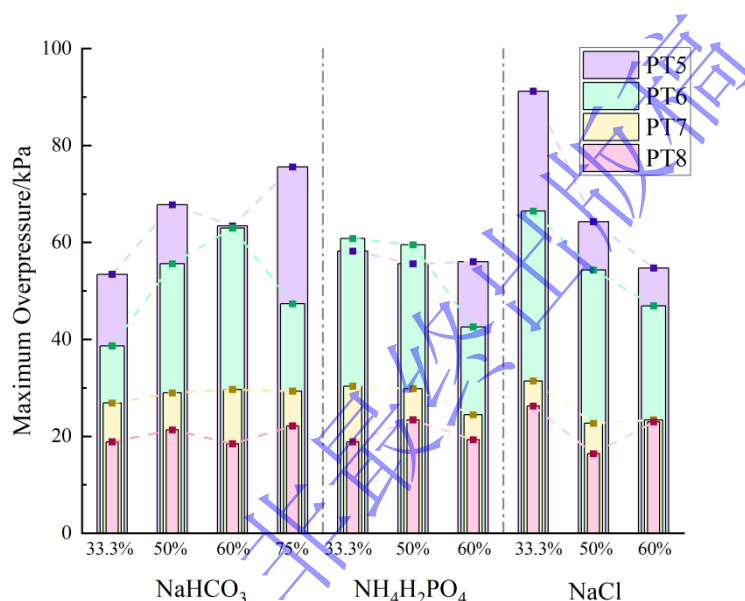


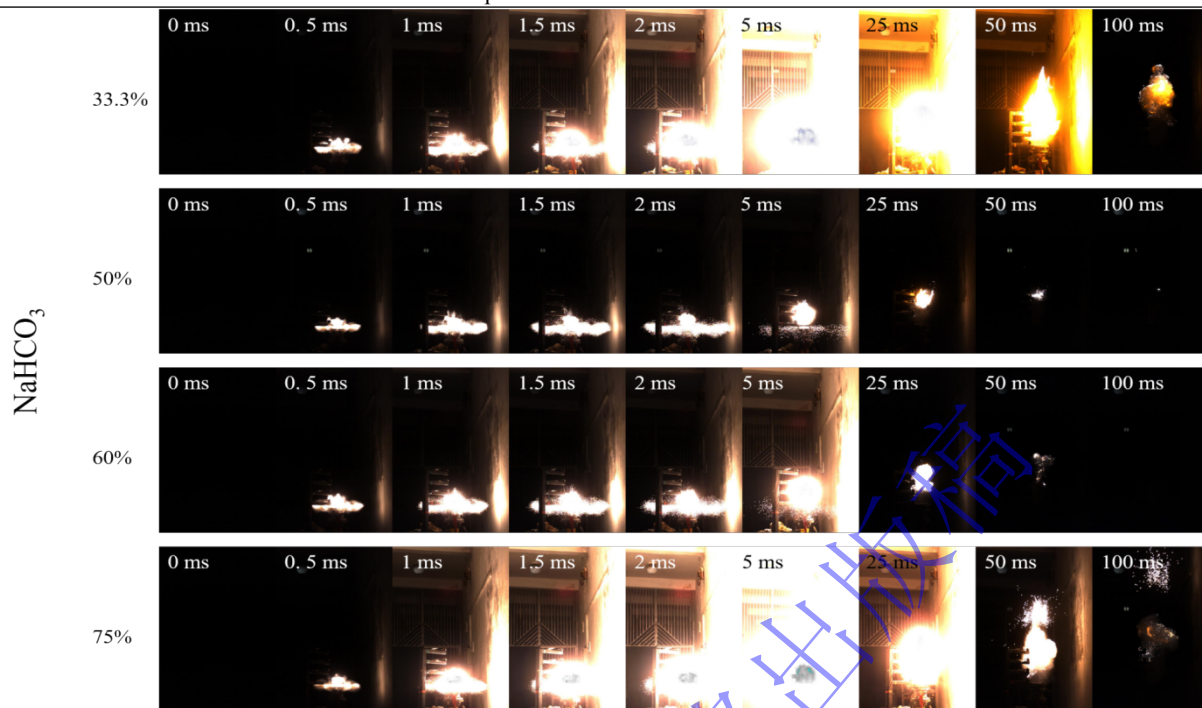
图 3 不同工况的最大爆炸超压对比

Fig.3 Comparison of maximum explosion overpressures under different working conditions

3.2 惰性粉末抑制堆积铝粉燃爆火焰传播的试验结果与分析

图 4 和图 5 分别展示了堆积粉末在爆炸作用下的粉尘卷扬和火焰传播发展过程的高速摄像图片及纹影图片。从图中可以明显看出，50 wt%、60 wt%的 NaHCO₃ 和 60 wt%的 NaCl，火焰尺寸和持续时间均明显小于其他工况，尤其是 60 wt%的 NaCl 工况在 25 ms 时已无明显火光，该结果表明 NaCl 作为纯物理抑制剂在抑制堆积铝粉燃爆火焰传播时的高效性。NaCl 粉末迅速且大量的吸收热量且不参与复杂的化学副反应，使得流场温度快速下降无法维持火焰传播，在 25ms 时已无明显火光。50 wt%、60 wt%的 NaHCO₃ 在 50 ms 时无明显火光。在 50 wt%到 60 wt%浓度区间，NaHCO₃ 发挥了相对出色的物理化学协同抑爆功能，同时说明了对于堆积态高活性金属粉末只有掺入较高浓度抑爆粉末才能有较好的抑爆效果。33.3 wt%和 75 wt%的 NaHCO₃ 以及 60 wt%的 NH₄H₂PO₄ 在 100ms 仍有较明显的火光。此外，75 wt%的 NaHCO₃ 和 60 wt%的 NH₄H₂PO₄ 证明了抑爆粉末添加量并非浓度越高抑爆效果越好。当浓度过高时，氢气爆炸产生的激波和高温燃烧产物会使其瞬间大量分解，NaHCO₃ 分解产生 H₂O 和 CO₂，NH₄H₂PO₄ 分解产生 H₂O 和 NH₃，这些分解产物在极端高温条件下反而成为了铝粉的强氧化剂，生成 H₂、ZrO₂、C 等导致剧烈的二次燃烧。33.3 wt%浓度的 NaHCO₃ 在 100ms 时的火焰最明显，是因为浓度过低时分解吸收的热量不足以将流场温度降低至铝粉的着火点以下，且其分解产生的气体进一步扬起铝粉，并额外提供了 H₂O 和 CO₂ 作为高温氧化剂，加剧了铝粉尘云的燃烧程度。

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves

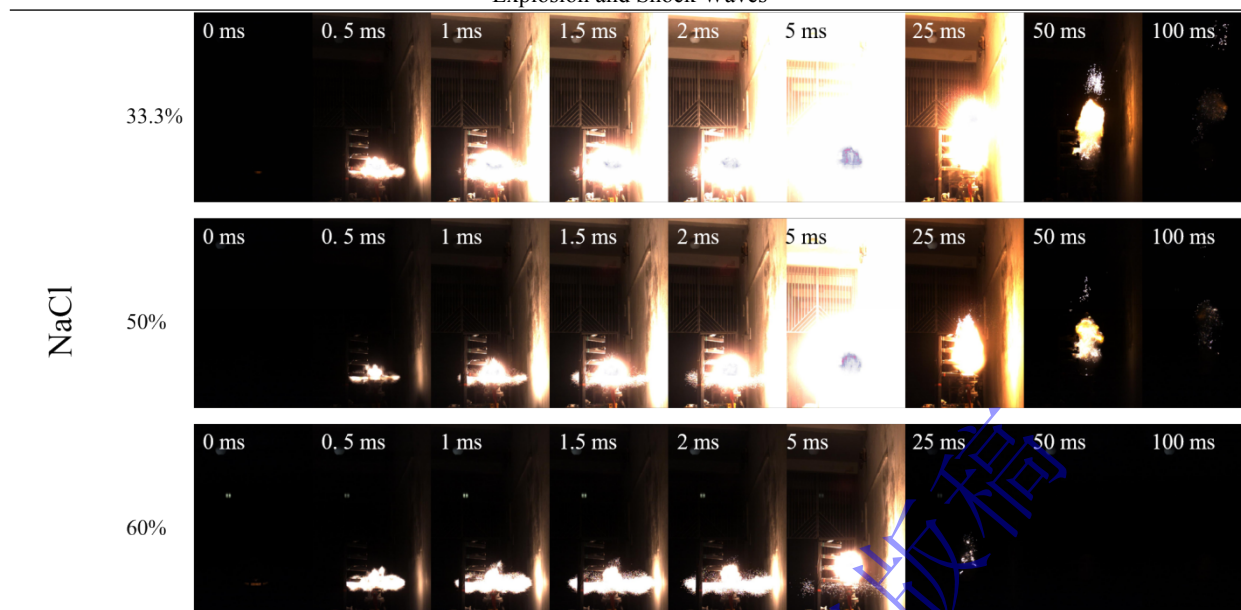


(a) NaHCO_3



(b) $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves



(c) NaCl

图 4 堆积粉末在爆炸作用下火焰传播过程

Fig.4 Flame propagation process of accumulated powder under explosion



(a) NaHCO₃

(b) NH₄H₂PO₄

(c) NaCl

图 5 堆积粉尘在爆炸作用下的纹影图片

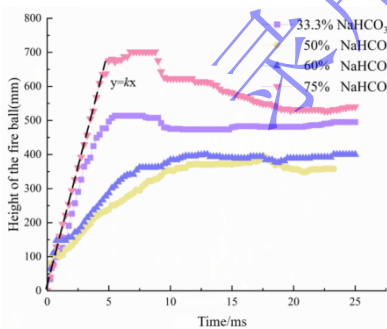
Fig.5 Schlieren images of accumulated dust under explosion

图 6 是基于高速摄影图片使用图像处理软件读取测量的火焰尺寸发展变化, 图 6(d-f)中部分数据出现长平台段是由于拍摄视窗有限无法进一步测量读取。为了量化分析不同工况火焰尺寸发展规律, 根据火焰尺寸快速发展到第一个极值时拟合直线得到的斜率, 如图 6(a)所示。该斜率即火焰尺寸发展速度, 所得值如表 3 所示。受冲击波传播方向影响, 火焰在竖直方向, 即火焰高度的发展速度更快。对于 NaHCO_3 粉末, 其对火焰尺寸的抑制效果与掺入浓度呈现复杂的非单调性关系, 最佳抑爆浓度工况为 50 wt% 和 60 wt%, 在这两工况条件下火焰高度均被控制在 400 mm 以下, 且火焰宽度在经历初期的膨胀后迅速回落收缩。其中 60 wt% NaHCO_3 的火焰高度和宽度的斜率分别为 47.86 和 45.52。此时, NaHCO_3 热分解吸热及其分解产物对自由基的捕获起到了主导的抑制作用, 对火焰尺寸发展的抑制效果明显。33.3 wt% NaHCO_3 的火焰高度峰值约为 510 mm。此时, 化学抑制能力无法抵抗爆轰能量释放, 铝粉燃爆程度相对剧烈。75 wt% NaHCO_3 的火焰高度迅速发展并超过 700 mm, 并能在较长一段时间内维持在 500 mm 以上。75 wt% NaHCO_3 的火焰高度和宽度均明显高于其余工况, 而且火焰发展速度快, 火焰高度和宽度的斜率分别为 136.73 和 127.07。掺入 75 wt% 的 NaHCO_3 加剧了堆积铝粉燃爆火焰尺寸及其发展速度。

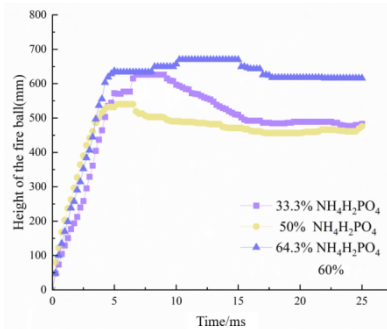
对于 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉末, 各工况水平的火焰尺寸均较大。其中, 60 wt% $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的最大火焰高度约为 670 mm, 火焰发展速度快, 且火焰宽度的收缩速率明显更慢。60 wt% $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉末并没有表现出高浓度抑爆剂的抑制优势。因为在爆轰波冲击作用下, 高浓度 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 迅速分解形成大量的 NH_3 和 H_2O , 对铝粉产生气动抛撒作用, 增加了铝粉弥散范围和燃烧比表面积, 使得铝粉燃爆反应更加剧烈, 火焰前锋扩张速度快。

三者中唯一的物理抑制剂 NaCl 粉末, 也是唯一一种对火焰尺寸的抑制效果呈现浓度单调性的, 掺入浓度越高抑制效果越好的抑爆剂粉末。随着掺入的 NaCl 浓度增加, 火焰的最大高度和宽度均有显著下降。特别是在 60 wt% 时, 火焰高度和宽度是所有工况的最低值, 火焰高度最大不超过 350 mm, 火焰宽度最大不超过 130 mm, 火焰发展速度慢, 火焰高度和宽度的斜率分别为 47.79 和 41.34。此外, 60 wt% NaCl 粉末的火光持续时间仅有 25.5 ms。 NaCl 作为惰性物理抑爆剂, 在流场中通过熔化、气化等反应吸收大量热量, 不参与化学反应, 不存化学副反应的干扰, 因此掺入浓度越高其抑制效果越强, 能够在短时间内阻断铝粉燃爆反应, 阻止火焰的进一步膨胀与维系。

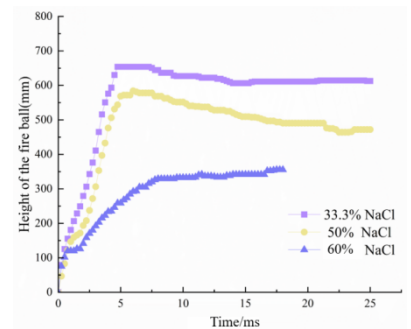
综合对比所有工况, 结合火焰发展尺寸及速度, 60 wt% NaCl 对堆积铝粉燃爆火焰传播的抑制效果最好, 最大火焰高度约为 350 mm, 最大火焰宽度为 130 mm, 整体火焰尺寸最小; 且整体火焰发展速度最慢, 火焰高度发展速度为 47.79 m/s, 火焰宽度发展速度为 41.34 m/s。60 wt% NaHCO_3 的抑制效果次之, 最大火焰高度约为 370 mm, 最大火焰宽度约为 200 mm; 火焰高度发展速度为 47.86 m/s, 火焰宽度发展速度为 45.52 m/s。50 wt% NaHCO_3 的抑制效果再次之, 最大火焰高度约为 350 mm, 最大火焰宽度约为 390 mm; 火焰高度发展速度为 36.30 m/s, 火焰宽度发展速度为 156.56 m/s。



(a) Flame height-time history curve of NaHCO_3



(b) Flame height-time history curve of $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$



(c) Flame height-time history curve of NaCl

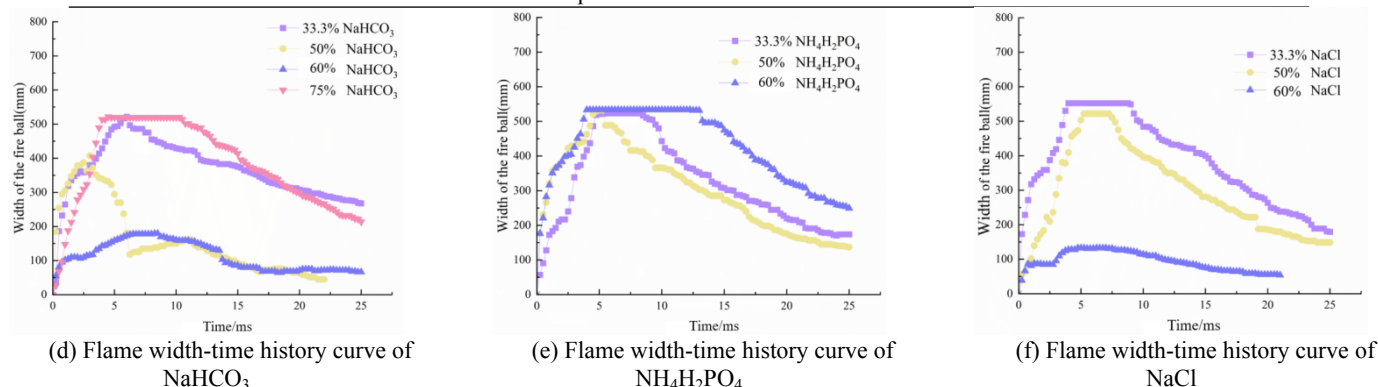


图 6 火焰尺寸发展规律

Fig.6 Evolution of flame size

表 3 火焰尺寸发展速度

Table 3 Slope of flame size

	NaHCO_3				$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$			NaCl		
	33.3%	50%	60%	75%	33.3%	50%	60%	33.3%	50%	60%
Slope of flame height	97.14	36.30	47.86	136.73	113.55	127.42	136.51	140.25	105.09	47.79
Slope of flame width	91.18	156.56	45.52	127.07	113.30	145.69	206.90	203.09	102.69	41.34

3.3 惰性粉末抑制堆积锆粉燃爆火焰温度的试验结果与分析

掺入惰性粉末的堆积粉尘在氢气爆炸诱导作用下燃爆过程的红外热成像图如图 7 所示。在红外热成像仪的拍摄下，火焰前锋扩张演化规律和火焰核心高温区的形态更加明显。所有工况的火焰高温区都经历了由初始的出口处附近的小范围着火向出口方向移动膨胀的过程，但膨胀速率和最终火焰核心高温区的形态受到抑爆剂的种类和浓度影响各有区别。对于 NaHCO_3 粉末，33.3 wt% 时火焰高温区扩张迅速，整个观测时间内其火焰高温区面积一直维持在较高水平。随着浓度增加，50 wt% 和 60 wt% 的火焰高温区面积明显缩小。尤其是 50 wt% NaHCO_3 的火焰高温区始终较小，最高温度约为 560 °C，持续时间 8.6 ms；60 wt% NaHCO_3 的火焰高温区较大，但其最高温度更低，仅有 500 °C，持续时间约为 10 ms。然而，掺入 75 wt% NaHCO_3 粉末后火焰反而出现了多个不均匀高温核心的扩散态。进一步揭示了掺入 75 wt% NaHCO_3 堆积锆粉粉末在高温高压条件下， NaHCO_3 的抑制效果差，其分解产物参与二次反应催化锆粉燃爆，形成多个高温反应区。此时，火焰温度高、持续时间长。

对于 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉末，三种浓度工况均呈现出燃烧程度剧烈、弥散度极大的火焰形态。

对于 NaCl 粉末，其对火焰发展的抑制效果同样随着掺入浓度增加呈现出显著的、单调的增强趋势。特别是在 60 wt% 时，其火焰区域体积小、温度低，高浓度 NaCl 的纯物理吸热抑制作用对锆粉燃爆火焰发展尺寸和核心温度的抑制作用显著。

综合对比所有工况，60 wt% NaCl 的火焰最高温度最小，仅有 358.1 °C，且高温区持续时间最短，为 7.92 s；60 wt% NaHCO_3 的火焰最高温度次之，为 508.2 °C，高温持续时间为 9.9 s；50 wt% NaHCO_3 的火焰最高温度再次之，为 558.1 °C，高温持续时间为 8.58 s。

爆炸与冲击 Explosion and Shock Waves

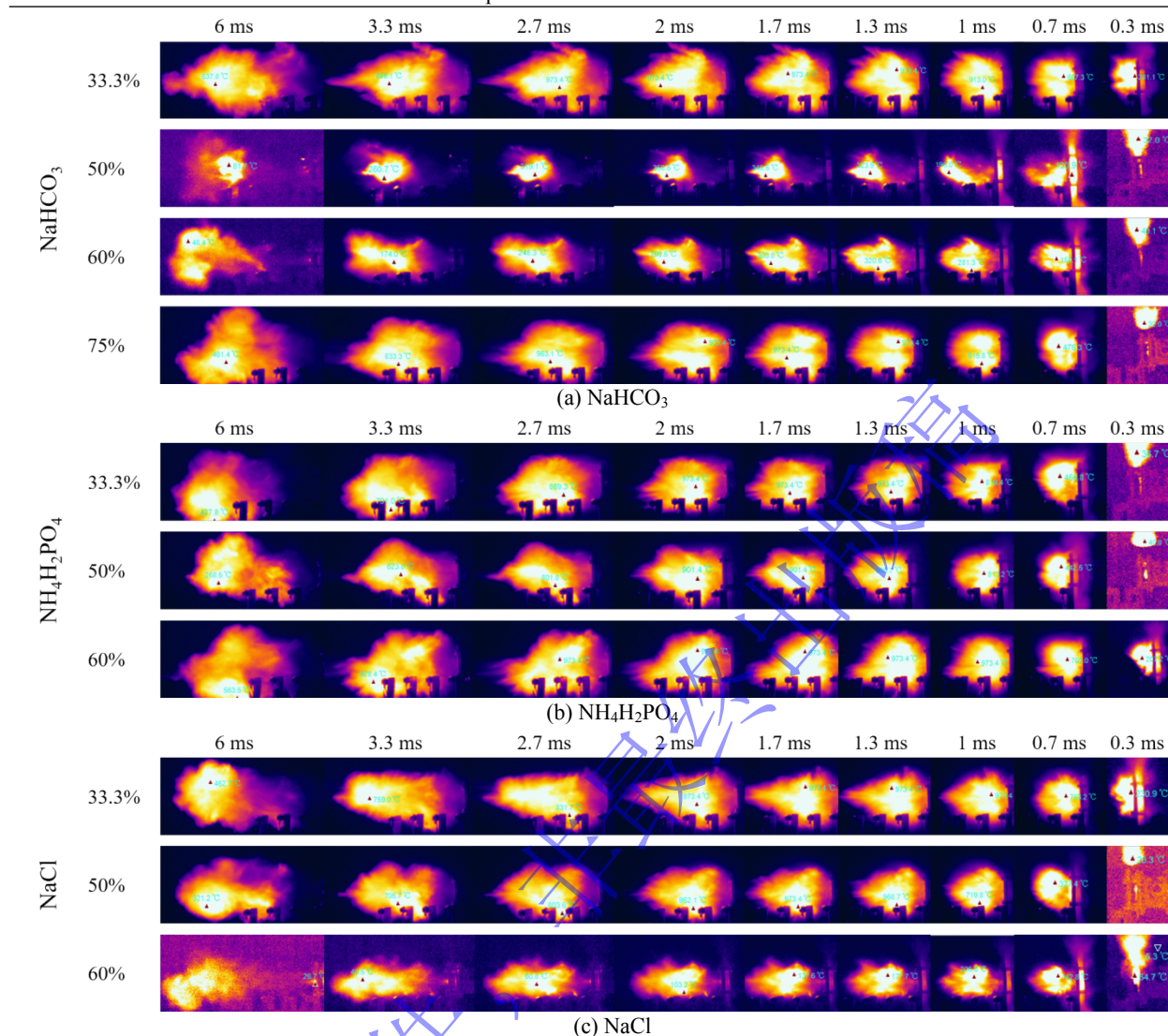


图 7 堆积粉尘在爆炸作用下的红外热成像图

Fig.7 Infrared thermal images of accumulated dust under explosion

3.4 惰性粉末抑制堆积铝粉燃爆的试验结果分析

惰性粉末对铝粉燃爆的抑制作用主要表现在对爆炸超压、火焰传播等关键参数的调节，其作用机理涉及复杂的物理化学过程^[29]。因此，需要综合比较 NaHCO_3 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 NaCl 三种惰性粉末对堆积铝粉燃爆的抑制效果，如图 8 所示。选用了 PT5 和 PT6 的最大爆炸超压平均值、火焰核心高温区持续时间、火焰最大温度、火焰传播速度（火焰宽度和高度尺寸发展斜率的平均值）这四个可量化指标比选了 10 种工况对堆积铝粉燃爆的抑制效果，所围成的面积越小表示该工况对铝粉燃爆的综合抑制效果越好。从图中可以看出，工况 10#，即 60wt% NaCl 的综合抑制效果最好，PT5 和 PT6 的最大爆炸超压平均值为 50.82 kPa，火焰核心高温区持续时间 7.92 ms，火焰最大温度 358.1 °C，火焰传播速度 44 m/s。工况 3#，即 60wt% NaHCO_3 的综合抑制效果次之，PT5 和 PT6 的最大爆炸超压平均值为 63.20 kPa，火焰核心高温区持续时间 9.90 ms，火焰最大温度 508.2 °C，火焰传播速度 46 m/s。工况 2#，50wt% NaHCO_3 的综合抑制效果再次之，PT5 和 PT6 的最大爆炸超压平均值为 61.68 kPa，火焰核心高温区持续时间 8.58 ms，火焰最大温度 558.1 °C，火焰传播速度 96 m/s。

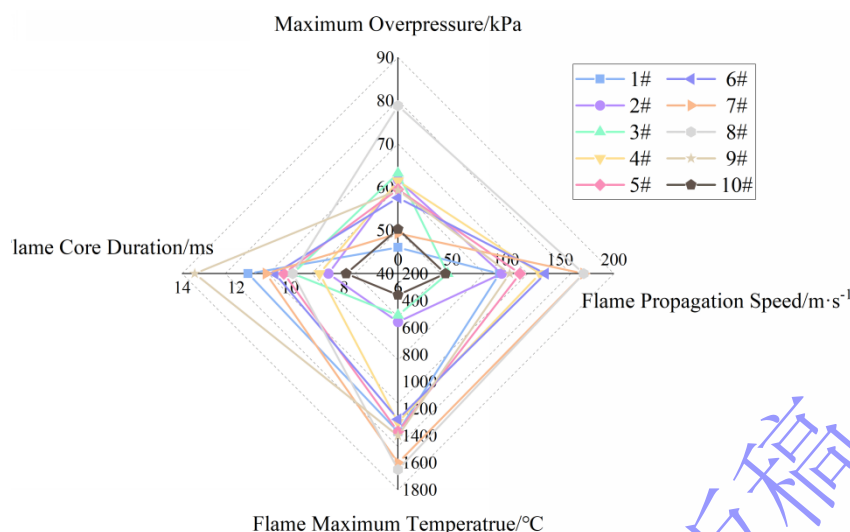
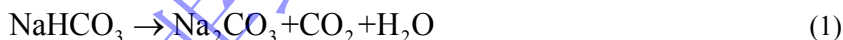


图 8 不同工况对堆积锆粉燃爆的抑制效果

Fig.8 Inhibition effect of different working conditions on combustion and explosion of accumulated zirconium powder

NaHCO_3 粉末对堆积锆粉燃爆的综合抑制效果浓度为 60wt% 时最好, 50wt% 次之, 33.3wt% 最差。掺入 33.3wt% NaHCO_3 粉末时 PT5 和 PT6 的最大爆炸超压平均值最低, 为 46.04 kPa; 50wt% NaHCO_3 的火焰核心高温区持续时间最短, 为 8.58 ms; 60wt% NaHCO_3 的火焰最大温度最低, 为 558.1 °C; 60wt% NaHCO_3 的火焰传播速度最慢, 为 46 m/s。值得注意的是, 75wt% NaHCO_3 的火焰传播速度显著快于其余工况, 在较高的 NaHCO_3 掺混浓度下反而会加剧锆粉燃烧反应。

NaHCO_3 粉末热分解可以简单地分为以下几个阶段^[30-33]:



但是在氢气爆炸诱导的极端高温条件下, 极度活泼的过渡金属锆粉能够与 H_2O 和 CO_2 发生强烈的铝热反应, 释放大热量, 加剧锆粉的燃烧:



NaHCO_3 分解反应吸收大量反应热, 能够降低燃烧反应速率。热分解产生的 NaOH 、 $\cdot\text{NaO}$ 、 Na_2O 、 $\cdot\text{Na}$ 等自由基可以与 $\cdot\text{H}$ 、 $\cdot\text{OH}$ 等关键自由基发生反应, 消耗活性基团、降低链传播速度、减弱爆炸强度。因为 Zr 的亲氧能力极强, 当掺混浓度过高时, NaHCO_3 分解产生的大量 H_2O 在爆轰环境下能够成为 Zr 的高温氧化剂, Zr 与 H_2O 反应不仅能释放大热量, 还会生成 H_2 引发二次气相爆轰, 加剧锆粉燃烧。加之, 当抑制剂浓度达到足以与所有生成的自由基反应的平时, 进一步增加抑制剂浓度不会导致更多的自由基消耗。因此, 在堆积锆粉中掺入高浓度 NaHCO_3 能起到的抑制作用小于其分解产物与锆粉发生放热反应所释放的热量。对于堆积锆粉掺入浓度为 50~60wt% 的 NaHCO_3 能够有较好的抑燃抑爆效果。

$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉末对堆积锆粉燃爆的综合抑制效果均较差。掺入 50wt% NaHCO_3 粉末时 PT5 和 PT6 的最大爆炸超压平均值最低, 为 49.3 kPa; 33.3wt% NaHCO_3 的火焰核心高温区持续时间最短, 为 10.23 ms; 50wt% NaHCO_3 的火焰最大温度最低, 为 1278.2 °C; 33.3wt% NaHCO_3 的火焰传播速度最慢,

为 113 m/s。

$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉末热分解可以简单地分为以下几个阶段^[34-36]:



但是在氢气爆炸诱导的极端高温条件下, 铅粉能够与 H_2O 、 NH_3 以及核心抑爆成分 P_2O_5 发生强烈的放热还原反应:



$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 分解反应吸收大量反应热, 能够降低燃烧反应速率。热分解产生的 $\text{NH}_3(\text{g})$ 可以与火焰中的自由基反应, 特别是 $\cdot\text{OH}$ 反应, 生成 $\cdot\text{NH}_2$ 和 H_2O 。这个反应消耗了火焰中的氢氧自由基, 从而抑制了火焰传播, 起到了化学抑制的效果。但是通过与自由基反应的抑爆效率是有限的。

$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的主要分解产物在高温环境下, 都能与铅粉发生放热反应, 不仅不能抵消 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 分解反应吸收的热量, 新生成的 H_2 和 P (游离磷在高温下极易自燃) 还会形成二次燃爆, 导致燃烧爆炸无法得到有效抑制, 甚至维持了较长时间的燃烧反应。最重要的抑爆机制是 HPO_3 能够覆盖在可燃颗粒表面形成一层致密的玻璃态熔融膜, 隔绝氧气和热量抑制燃烧。但是受冲击波以及高速气流的气动剥离作用, 熔融态的 HPO_3 无法稳定附着在铅粉表面。因此, 在氢气爆炸诱导作用下, 该抑爆机制完全失效。面对高活性金属粉末的爆轰诱导反应, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的分解物在极高温下表现出的氧化性和产氢特性, 加上冲击波对熔融层的物理摧毁, 共同导致了其抑爆效果的大幅衰减。且相比于 NaHCO_3 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 热分解产生的 NH_3 在氢气爆炸高温高氧环境中可燃, 而 NaHCO_3 热分解产生的 CO_2 是不可燃气体。熔融态的 HPO_3 、 P_2O_5 在激波和高速气流作用下分散, HPO_3 无法稳定附着在铅粉表面阻止化学反应, 却增加了 P_2O_5 与铅粉的有效接触面积, 加速了类铝热反应的发生, 为燃爆系统注入大量能量。同样作为化学抑爆剂, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 因为其独特的酸根分解产物, 即 P_2O_5 , 在高温下具有强氧化性, 且伴随可燃气体 NH_3 的释放, 在面对高活性、强还原性的金属堆积铅粉时, 其化学促燃作用远比 NaHCO_3 猛烈, 导致其最终的抑制效果明显劣于 NaHCO_3 。

此外, NaHCO_3 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 受热分解反应均会生成气体, 在堆积状态的混合粉末内部产生微爆炸式的气动抛撒效应, 使得粉末大规模扬起, 增大了铅粉颗粒与高温气体、氧化剂的接触比表面积, 使得铅粉燃爆反应更加彻底, 形成较高的燃爆超压和较剧烈的燃烧反应。

NaCl 粉末对堆积铅粉燃爆的综合抑制效果浓度为 60wt% 时最好, 50wt% 次之, 33.3wt% 最差。60wt% NaCl 的 PT5 和 PT6 最大爆炸超压平均值最低, 为 50.82 kPa; 60wt% NaCl 的火焰核心高温区持续时间最短, 为 7.92 ms; 60wt% NaCl 的火焰最大温度最低, 为 358.1 °C; 60wt% NaCl 的火焰传播速度最慢, 为 44 m/s。

不同于化学抑制剂 NaHCO_3 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, 物理抑制剂 NaCl 主要是受高温变为熔融状态, 相态转变吸热, 降低燃烧反应速率。 NaCl 本身比热容大, 其熔化热和汽化热极高, 高浓度的 NaCl 粉体能够瞬间吸收爆轰波前释放的大量能量, 将反应区温度降低。进一步地, 熔融状态的 NaCl 挥发分解产生自由基与火焰中的自由基反应, 特别是 $\cdot\text{OH}$ 反应, 对其产生化学抑制和副催化作用形成一定的抑制作用^[37]。当掺混浓度提高时, Na 、 Cl 原子蒸气分压升高, 其与自由基的有效碰撞频率大幅上升, 对燃爆反应的抑制效果显著提升。





相比 NaHCO_3 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉末, NaCl 的热力学稳定性极高, 不会分解产生 H 原子和 O 原子, 铝粉无法与之发生化学反应; NaCl 分解时也不会产气, 且熔融后, 熔融态的 NaCl 会在铝粉颗粒表面形成一层高热阻的液体保护膜, 并且利用液桥力粘结铝粉颗粒, 降低了铝粉与高温气体、氧化剂的接触比表面积。因此, 高浓度 NaCl 粉末用于抑制堆积铝粉燃爆是一种高效且稳健的惰性粉末抑爆剂。

4 结论

本文基于自主设计的开放空间内堆积铝粉在氢气爆炸诱导作用下燃爆试验平台, 研究了三种常用惰性抑爆粉尘, 包括以化学抑制作用为主的 NaHCO_3 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, 以及以物理抑制作用为主的 NaCl 。从超压衰减、火焰传播以及火焰高温核心区等方面比较了不同掺入浓度 (33.3 wt%~75 wt%) 的三种抑爆粉尘对堆积铝粉燃爆的抑制效果, 得到以下主要结论:

1) 碳酸氢钠 (NaHCO_3) 粉末对氢气诱导堆积铝粉燃爆抑制效果较好, 但其抑爆性能不随添加质量分数的升高单调递增, 存在最优掺入浓度区间。50 wt% 和 60 wt% NaHCO_3 的综合抑爆效果较好, 火焰发展尺寸小、火焰传播速度慢、火焰最高温度低且核心高温区持续时间短。

2) 磷酸二氢铵 ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) 对堆积铝粉燃爆的抑制效果不佳, 不适用于铝粉等活泼金属的抑爆。试验结果表明, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 热分解产生的 NH_3 、 P_2O_5 产物会对铝粉氧化燃爆反应产生催化作用, 无法有效阻断燃爆链式反应。不同掺入浓度 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 工况下, 铝粉燃爆超压、火焰传播速度、火焰温度均处于较高水平。

3) 氯化钠 (NaCl) 粉末对堆积铝粉燃爆的抑制效果随着掺入浓度的增加而提升, 不参与铝粉氧化反应, 无次生反应产物生成, 抑爆稳定性较好。60 wt% NaCl 工况下, 堆积铝粉燃爆多维度参数均达到最优抑制效果, 燃爆超压小, 火焰传播被有效抑制, 同时具备较强的吸热降温能力。

4) 综合考虑超压衰减、火焰传播及火焰温度等核心燃爆参数, 在氢气爆炸诱导的堆积铝粉燃爆工况下, NaCl 粉体的抑爆稳健性、有效性显著优于 NaHCO_3 与 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 。60 wt% NaCl 可同时实现燃爆超压衰减、火焰传播抑制与快速吸热降温的多重抑爆效果, 稳定性好, 是一种高效、可靠的粉体抑爆方案。

参考文献

- [1] 罗振敏, 王思佳, 苏彬, 等. 从粉尘卷扬到二次爆炸: 可燃气体-沉积粉尘复合体系的多相流动力学与爆炸机制研究进展及展望[J]. 煤炭学报, 2025. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2025.0823.
- [2] 陈晓坤, 张自军, 王秋红, 等. 20 L 近球形容器中微米级铝粉的爆炸特性[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(5): 1130-1136.
- [3] HONG S, LIU Z, ZHAO E, 等. Comparison of behavior and microscopic characteristics of first and secondary explosions of coal dust[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 49: 382-394. DOI:10.1016/j.jlp.2017.08.005.
- [4] 邓军, 任旭刚, 王秋红, 等. 铝金属粉尘云的爆炸特性[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(3).
- [5] 苏浩. 铝粉尘的燃爆特性实验研究[D]. 南京理工大学, 2020.
- [6] 宋贵康, 王一, 查智博, 等. 乏燃料后处理用合金腐蚀行为研究进展[J]. 中国表面工程, 2024, 37(5).
- [7] 宋立健, 宋晓鹏. 氢化铝粉末的燃爆特性研究[J]. 广东化工, 2025, 52(12).
- [8] 王秋红, 孙金华, 周琪, 等. 铝粉空气预混物多管喷射燃烧的火焰温度特征[J]. 燃烧科学与技术, 2012, 18(5).
- [9] EWALD K H, ANSELMINI-TAMBURINI U, MUNIR Z A. A finite difference model for the combustion of zirconium in oxygen[J]. DOI:10.1557/JMR.2000.0278.

- [10] 冯晓美, 崔楚凝, 张轩鸣, 等. 粉尘爆炸及防护措施研究进展[J]. 山东化工, 2022, 51(12): 204-206. DOI:10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2022.12.013.
- [11] 贾进章, 田秀媛. 瓦斯爆炸抑制研究进展及发展趋势[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(1): 95-107. DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2024.1155.
- [12] 王秋红, 闵锐, 王清峰. 3种阻燃粉体抑制铝粉云爆炸强度的效果和机理[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(8).
- [13] WEI S, YU M, PEI B, 等. Experimental and numerical study on the explosion suppression of hydrogen/dimethyl ether/methane/air mixtures by water mist containing NaHCO_3 [J]. Fuel, 2022, 328: 125235. DOI:10.1016/j.fuel.2022.125235.
- [14] 陈曦, 陈先锋, 张洪铭, 等. 惰化剂粒径对铝粉火焰传播特性影响的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(4): 759-765. DOI:10.11883/1001-1455(2017)04-0759-07.
- [15] AMROGOWICZ J, KORDYLEWSKI W. Effectiveness of dust explosion suppression by carbonates and phosphates[J]. Combustion and Flame, 1991, 85(3): 520-522. DOI:10.1016/0010-2180(91)90155-5.
- [16] 付羽, 李刚, 陈宝智. 氯化钠粉末对镁粉爆炸猛度的影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(4): 5-9.
- [17] 伍毅, 袁旌杰, 蒯念生, 等. 碳酸盐对密闭空间粉尘爆炸压力影响的试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(10): 92-96. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2010.10.029.
- [18] 许加玲, 许开立, 刘博. 碳酸氢盐抑制豆粕粉尘爆炸特性实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(12): 1798-1804.
- [19] 刘天奇. 微米级玉米粉尘爆炸压力特性及抑爆实验研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(10): 1345-1349.
- [20] 蒯念生, 李建明, 陈志, 等. 镁粉爆炸特性和惰化抑爆的实验研究[J]. 工业安全与环保, 2011, 37(3): 53-55.
- [21] 孟凡一. 不燃粉末介质掺混对可燃堆积粉尘火蔓延特性的影响研究[D]. 东北大学, 2025. DOI:10.27007/d.cnki.gdbeu.2023.000650.
- [22] LOMBA R, LABOUREUR P, DUMAND C, 等. Determination of aluminum-air burning velocities using PIV and Laser sheet tomography[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(3): 3143-3150. DOI:10.1016/j.proci.2018.07.013.
- [23] 曹卫国. 褐煤粉尘爆炸特性实验及机理研究[D]. 南京理工大学, 2016.
- [24] HUANG H T, ZOU M S, GUO X Y, 等. Reactions characteristics of different powders in heated steam[J]. Combustion Science and Technology, 2015, 187(5): 797-806. DOI:10.1080/00102202.2014.973950.
- [25] YANG W, ZHANG T, LIU J, 等. Experimental researches on hydrogen generation by aluminum with adding lithium at high temperature[J]. Energy, 2015, 93: 451-457. DOI:10.1016/j.energy.2015.09.048.
- [26] 孙金华, 卢平, 刘义. 空气中悬浮金属微粒子的燃烧特性[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2005(5). DOI:10.14177/j.cnki.32-1397n.2005.05.020.
- [27] CAI J, LI C, AMYOTTE P, 等. Effect of solid inertants and sample inclination angle on fire hazard of metallic powder layers[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 129: 321-325. DOI:10.1016/j.psep.2019.06.030.
- [28] 王立平, 何敏. 铝的燃烧与防护[J]. 钛工业进展, 2012, 29(3): 41-43. DOI:10.13567/j.cnki.issn1009-9964.2012.03.016.
- [29] 周永浩, 杨哲, 刘欢, 等. 燃爆抑制粉体及其抑制机理研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(11): 15-43.
- [30] 鲁昆仑, 陈晓坤, 王媛媛, 等. 碳酸氢钠及其固态分解产物对玉米淀粉爆炸抑制实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(9): 126-131.
- [31] 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.
- [32] ROSSER W A, INAMI S H, WISE H. The effect of metal salts on premixed hydrocarbon—air flames[J]. Combustion and Flame, 1963, 7: 107-119. DOI:10.1016/0010-2180(63)90168-8.
- [33] FAN R, JIANG Y, LI W, 等. Investigation of the physical and chemical effects of fire suppression powder NaHCO_3 addition on methane-air flames[J]. Fuel, 2019, 257: 116048. DOI:10.1016/j.fuel.2019.116048.
- [34] 戴晓静. 磷酸二氢盐抑爆剂的制备与抑爆作用研究[D]. 南京理工大学, 2013.

- [35] 徐景德, 李睿德, 张延炜. 磷酸二氢铵对甲烷爆炸火焰结构影响的抑爆试验研究[J]. 华北科技学院学报, 2024, 21(2): 90-99. DOI:10.19956/j.cnki.ncist.2024.02.013.
- [36] 罗振敏, 张江, 任军莹, 等. $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 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]. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0982.
- [37] 黄凯. 抑爆剂对硫磺粉尘爆炸影响的探究[J]. 西部皮革, 2020, 42(4): 5-6. DOI:10.20143/j.1671-1602.2020.04.006.

非最终出版稿

录用稿件，