

# 中大尺度管道中铝粉爆炸及抑爆实验研究\*

张曦<sup>1</sup>, 王成<sup>1</sup>, 杨龙龙<sup>1</sup>, 张如明<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 近年工贸行业铝粉尘爆炸事故频发, 严重威胁人员安全与相关行业的经济发展。为研究铝粉在工业生产除尘管道中的爆炸特性与抑爆剂对爆炸的抑制作用, 搭建了中大尺度透明管道爆炸测试系统, 开展了铝粉爆炸与抑爆实验。通过分析爆炸压力演化波形、燃爆火焰传播特征可知: 随着铝粉浓度增大, 单位体积内铝粉增多, 燃烧后释放的热量增加, 爆炸火焰在历经第二、三节管道后快速传播, 管道内各测点的爆炸压力随之增强, 同时管道外的自由场压力与压力上升速率显著升高; MgAl-CO<sub>3</sub> 双金属超分子抑爆材料的化学-物理协同抑制作用可以有效抑制铝粉爆炸, 当抑爆剂浓度为 500 g/m<sup>3</sup> 时即可降低不同浓度铝粉的爆炸自由场压力, 且抑爆后的自由场压力下降率基本一致, 抑爆剂对 300 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉爆炸的最大压力上升速率、火焰传播速度抑制效果优于 200 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉; 当铝粉浓度为 200 g/m<sup>3</sup> 时, 随着抑爆剂浓度的增大, 抑爆效果基本维持不变, 但过高浓度的抑爆剂对爆炸自由场压力的抑制效果反而降低。本文基于中大尺度测试系统, 聚焦于探究工业除尘管道内一定浓度的铝粉爆炸特性及抑爆材料的抑制效果, 研究结果能够为工贸行业除尘管道中铝粉尘爆炸的危险性评价与爆炸抑制提供科学依据与理论支撑。

**关键词:** 铝粉爆炸; 中大尺度管道; 爆炸压力; 火焰传播; 抑爆

中图分类号: O381; X932

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

## Experimental study on the explosion and effect of explosion inhibiting of aluminum powder in medium-to-large-scale pipelines

ZHANG Xi<sup>1</sup>, WANG Cheng<sup>1</sup>, YANG Longlong<sup>1</sup>, ZHANG Ruming<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Technology, State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In recent years, there have been frequent explosions of aluminum dust in the industrial and commercial enterprises, seriously threatening the personnel safety and economic development. To investigate the explosion characteristics of aluminum powder and the efficacy of explosion suppressant in industrial dust removal pipelines, a medium-to-large-scale transparent pipeline explosion testing system was constructed, and experiments on aluminum powder explosion and explosion suppression were carried out. Various parameters were measured under different influencing factors, including the explosion pressure, maximum free-field pressure rise rate, and the flame propagation speed. Through the analysis of pressure curves and deflagration flame propagation characteristics, the results showed that aluminum powder with a concentration below 100 g/m<sup>3</sup> had a relatively low explosive destructive power in medium-to-large-scale pipeline. With increasing aluminum powder concentration, the mass of aluminum powder per unit volume rose. Consequently, more heat was released upon combustion. The flame propagated rapidly after passing through the second and third sections of the pipeline. The explosion pressure at each measurement point in the pipeline increased accordingly. Simultaneously, the free-field pressure and its rise rate outside the pipeline increased significantly. A MgAl-CO<sub>3</sub> bimetallic supramolecular suppressant suppresses aluminum powder explosion via physicochemical synergy. At a suppressant concentration of 500 g/m<sup>3</sup>, the free-field pressure of aluminum powder explosion decreased across all tested powder concentrations. Furthermore, the suppressant exhibited better performance for 300 g/m<sup>3</sup> aluminum powder than for 200 g/m<sup>3</sup>, in

\*收稿日期: 2026-03-05; 修回日期: 2026-05-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3010601);

第一作者: 张曦 (1997-), 男, 博士研究生. E-mail: zhangxi\_2021@163.com;

通信作者: 王成 (1972-), 男, 博士, 教授. E-mail: wangcheng@bit.edu.cn.

terms of reducing both the maximum free-field pressure rise rate and flame propagation speed. At an aluminum powder concentration of 200 g/m<sup>3</sup>, the suppression effect remained almost unchanged with increasing suppressant concentration. However, an excessively high suppressant concentration reduced the suppression effect on the explosion free-field pressure. The suppression effect of the suppressant interacts with the reaction acceleration caused by its high concentration, thereby reducing the overall suppression efficacy. Based on the engineering-scale pipeline testing system, these findings can provide scientific and theoretical support for the risk assessment and explosion suppression of aluminum powder explosions in industrial dust removal systems.

**Keywords:** aluminum dust explosion; medium-to-large-scale pipelines; explosion pressure; flame propagation; explosion suppression

铝粉作为一种活性较高的金属粉，燃烧时热释量大，在许多领域都有广泛应用<sup>[1][2]</sup>。同时，金属铝制品在生产加工时由除渣、切削、抛光打磨等工艺中产生的微米级铝粉在工业除尘管道中形成的粉尘云，易被火花或热源引燃发生爆炸，造成极大的破坏。通过研究铝粉的爆炸及抑制特性，可以有有效的预防爆炸的产生，降低工业生产中可燃性金属粉尘爆炸引发重大事故的概率。

国内外学者主要采用 20 L 球形爆炸装置、哈特曼管等实验装置研究金属粉尘的爆炸特性。其中，李庆钊等<sup>[3]</sup>针对微米级铝粉的爆炸特性进行了研究，揭示了粒径对其爆炸特性的影响规律。王秋红等<sup>[4]</sup>则探讨了微米级镁铝合金粉的爆炸特性参数，发现粉尘云的最低着火温度随分散压力的增大呈先减小后增加的趋势，而爆炸压力则随浓度的增加先增大后减小。陈晓坤等<sup>[5]</sup>利用 20 L 近球形装置，考察了不同点火延迟时间和粒径等因素下铝粉的爆炸特性，结果表明爆炸压力随点火延迟时间先增大后减小，且不同粒径粉尘对应的最佳点火延迟时间存在差异。沈世磊等<sup>[6]</sup>进一步通过 20 L 球研究了湍流对铝粉爆炸特性的影响，指出点火延迟时间对最大爆炸压力和爆炸压力上升速率均有显著影响，同样存在一个最佳点火延迟时间。

在粉尘爆炸管道实验及抑爆效果研究方面，雷伟刚等<sup>[7]</sup>利用水平弯管道测试了铝粉的爆炸特性，发现丙烷爆炸激波扬起铝粉后引发的爆炸压力明显高于纯丙烷爆炸，而加入抑爆剂后，爆炸火焰传播时间及火焰强度显著降低。Zhang 等<sup>[8]</sup>在水平管道中研究了气流速度和铝粉浓度对铝粉爆炸特性的影响，发现管道内的气流速度对爆炸参数的影响较为显著。靳红旺等<sup>[9]</sup>同样在管道中研究了铝粉的爆炸与氧化铝的抑爆特性，结果表明氧化铝对爆炸火焰有明显的抑制作用，且小粒径（4 μm）的氧化铝抑制效果更佳。文虎等<sup>[10]</sup>采用垂直管道研究了铝粉粒径、浓度等参数对爆炸特性的影响，发现随着铝粉浓度增加、粒径减小，最大爆炸压力和爆炸压力上升速率均呈现先增加后减小的趋势，存在使爆炸威力取得最大值的条件。Pang 等<sup>[11]</sup>采用透明管道研究了沉积粉尘的质量、位置等对爆炸参数特性的影响，发现管道中的粉尘爆炸表现为多重加速燃烧。朱小超等<sup>[12]</sup>采用垂直管道研究了铝粉的爆炸特征，发现容器泄爆口的阻塞比会影响铝粉爆炸压力特性，且铝粉粒径越小，受到的影响越显著。此外，Wang 等<sup>[13]</sup>在 5 L 爆炸容器中研究了浓度对铝粉爆炸压力、压力上升速率及火焰传播速度的影响。Taveau 等<sup>[14]</sup>研究了小尺寸管道中的粉尘爆炸特征，发现在 100 mm 直径的管道中也能观察到火焰的传播。陈曦等<sup>[15]</sup>利用垂直管道粉尘爆炸实验平台研究了惰化剂粒径对爆炸火焰传播特性的影响及作用机理，结果表明，在碳酸氢钠质量分数为 30% 的条件下，30 μm 的碳酸氢钠粉体可显著抑制铝粉爆炸的火焰传播。Jiang 等<sup>[16-17]</sup>则使用球形爆炸装置研究了目前常用的几种不同抑制剂对铝粉爆炸的抑制作用。

综上所述，学者们对不同参数下铝粉的爆炸特性以及抑爆剂对其爆炸的抑制特性进行了较为全面的研究，但大都采用了 20 L 球，全钢管道或双面透明的小尺度管道，无法匹配工业除尘管道普遍大于 200 mm 的实际尺度，难以准确反映工程尺度下的管道粉尘爆炸特征。在抑爆研究方面，很多学者搭建的测试装置无法实现爆炸后的抑制，仅研究了将抑制剂与粉尘混合后的惰化抑制，难以反映实际生产中的抑爆情况，且在实验研究中普遍使用传统抑爆剂。因此，本研究搭建了中大尺度多通道半封闭透明管道粉尘爆炸测试系统，研究管道内不同浓度铝粉的爆炸火焰传播特征以及爆炸压力特性，并

测试了双金属超分子抑爆材料对铝粉爆炸的抑制效果，测试系统以工业除尘管道尺寸为基础，研究结果能为爆炸预防、系统升级等提供依据。

## 1 实验装置与方法

### 1.1 实验装置

中大尺度管道粉尘爆炸测试系统具有多功能、多通道、模块化等特点，可以根据实验需求调整管道长度。如图 1 所示，该系统由爆炸管道本体、时序控制系统与数据采集记录系统组成。其中管道本体由数节金属连接法兰、内径为 400 mm 的透明有机玻璃管道、点火装置、粉尘分散装置等构成；数据采集记录系统由压力传感器、数据采集仪、高速摄像机等构成。金属法兰、粉尘仓等部件组装后安装在可移动的支架上，通过有机玻璃管与 4 根不锈钢杆将法兰紧固连接，组成一节测试模块。每个法兰长度为 250 mm，使用 6 节法兰与 5 段 1 m 长的透明管道连接后组成整体长度为 6.5 m 的管道爆炸测试系统。管道系统其中一端为开敞出口，联通开放大气，实验中使用壁面压力传感器与自由场压力传感器采集管道内部的爆炸压力与出口外不同距离的爆炸冲击波超压，壁面压力传感器安装在每个法兰正上方的预留孔内，第一支自由场压力传感器布置在距离管道出口 3 米处，使用高速摄像机采集爆炸火焰传播全过程。以管道点火电极所在位置端为起点，壁面压力传感器的安装位置如表 1 所示，表 2 为管道外爆炸自由场压力传感器的布置位置。系统喷粉、点火、数据的采集开始时间均通过设置时序控制器的延时实现自动控制。爆炸管道测试系统如图 2 所示。

表 1 壁面压力传感器安装位置

Table 1 Positions of wall pressure sensors

编号	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>
距点火源距离/m	0	1.25	2.5	3.75	5	6.25

表 2 自由场压力传感器位置

Table 2 Positions of free-field pressure sensors

编号	p1	p2	p3	p4
距管道出口距离/m	3	4	5	6

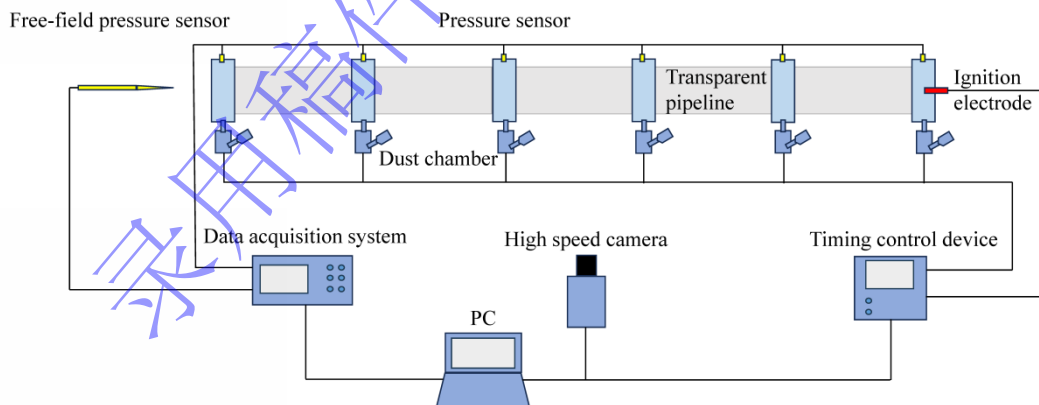


图 1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental system



图2 实验系统

Fig.2 Experimental system

## 1.2 实验方法

实验主要采用粒径为  $20\ \mu\text{m}$  的球形铝粉。使用电子天平称量一定质量的铝粉加入粉尘仓，法兰上的扩散器在点火前将铝粉喷射至法兰两端的管道内，每个扩散器喷出的铝粉可以覆盖法兰两端长度约为  $1\ \text{m}$  的管道内部区域，管道直径为  $0.4\ \text{m}$ ，因此当铝粉浓度设定为  $200\ \text{g/m}^3$  时，向粉尘仓加入  $26\ \text{g}$  铝粉，即为设定的管道内粉尘浓度。每组实验开始前，首先对管道内壁与粉尘仓进行清扫，称量充分干燥后的铝粉样品装入粉尘仓，并在封闭粉尘仓后向仓内充气至一定压力。操作遥控发出开始指令后，时序控制系统按照设置的延时触发电磁阀开启，粉尘仓内的高压气体携带金属粉尘通过粉尘扩散器喷入管道后形成粉尘云，使用时序控制系统设置在喷粉后一定的延迟时间后将粉尘云引爆，同时数据采集系统与高速摄像机开始记录采集数据。每组实验重复 3 次，最终数据一般取 3 次实验数据的平均值。

如图 3 所示，使用扫描电镜（SEM）分析球形铝粉形貌。如图 4 所示采用激光粒度仪对铝粉粒径分布进行了表征， $20\ \mu\text{m}$  铝粉的中位粒径  $D50$  为  $20.85\ \mu\text{m}$ 。

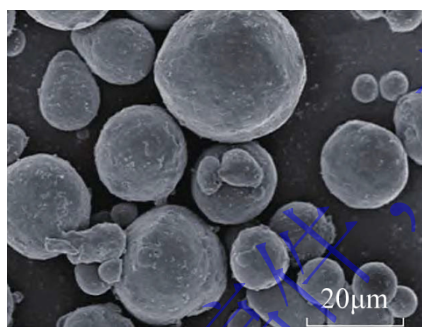


图3 球形铝粉形貌特征

Fig.3 The result of aluminum powder characteristics

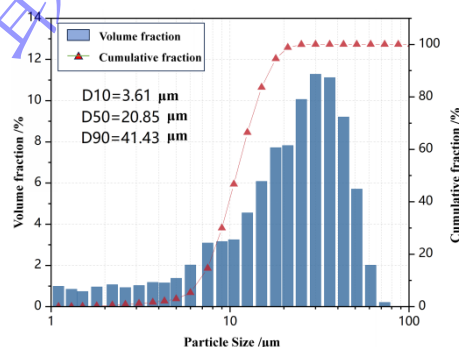


图4  $20\ \mu\text{m}$  球形铝粉粒径分布

Fig.4 Particle distribution of  $20\ \mu\text{m}$  aluminum powder

实验中使用  $\text{MgAl-CO}_3$  双金属超分子抑爆材料作为铝粉爆炸抑制剂。HAN 等<sup>[18-19]</sup>使用此类双金属超分子抑爆材料开展了金属粉尘爆炸抑制实验，并深入分析了抑制机理，发现此类材料可以实现物理-化学协同抑制，相较于传统抑爆剂具有显著优势，对金属粉尘爆炸体现出优良的抑制效能。 $\text{MgAl-CO}_3$  抑爆剂购自衢州资化海纳创新研究院有限公司，图 5 为  $\text{MgAl-CO}_3$  双金属超分子抑爆材料的粒径分布分析结果。通过体积分数及累积分数曲线可知，材料粒径分布范围较宽，呈现典型的多分散性特征， $D90$ 、 $D50$  和  $D10$  分别为  $41.81\ \mu\text{m}$ 、 $7.09\ \mu\text{m}$  和  $1.48\ \mu\text{m}$ ，表明 90% 的颗粒粒径小于  $41.81\ \mu\text{m}$ ，中位粒径 ( $D50$ ) 为  $7.09\ \mu\text{m}$ ，而 10% 的颗粒粒径小于  $1.48\ \mu\text{m}$ 。

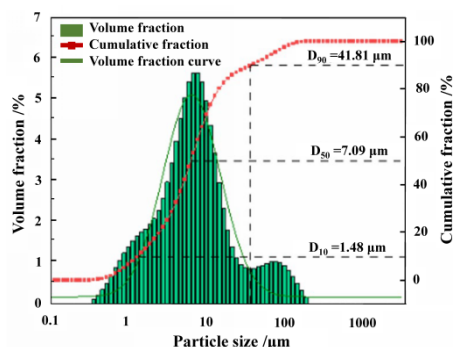


图5 抑爆剂粒径分布

Fig.5 Particle distribution of explosion suppressant

## 2 铝粉爆炸及抑制试验

### 2.1 铝粉爆炸压力与火焰传播特性

不同浓度铝粉爆炸在管道内不同位置的峰值压力如图6所示，爆炸压力曲线总体可以概括为先下降、再升高到压力峰值，并在临近出口处迅速下降三个阶段。铝粉浓度为  $100 \text{ g/m}^3$  时，管道内壁面压力较小，在接近于出口处的壁面压力基本接近于常压。铝粉浓度为  $200 \text{ g/m}^3$  时，管道内最大压力出现在爆炸起点，达到 **126 kPa**，之后管道内的压力基本保持不变，并在最后一段管道内下降至 **112 kPa**。铝粉浓度为  $300 \text{ g/m}^3$  时，在管道起始处的最大爆炸压力达到 **146 kPa**，前四节管道内的压力始终保持在 **140 kPa** 以上，临近出口处的压力下降到 **133 kPa**，由于管道出口联通开放大气，冲击波在出口处快速衰减，因此每个铝粉浓度下接近管道出口的  $P_6$  压力传感器测得的壁面压力都为最低，并且由于管道起点封闭端面的压力波反射，每个浓度下的管道内最大爆炸压力均出现在爆炸起始处。随着管道内铝粉浓度的增加，单位体积内的铝粉颗粒数量增多，颗粒间的距离相应缩短，这有利于颗粒之间进行热量交换，因此反应速度加快，更多的铝粉颗粒在充分受热燃烧后，整体释放的热量随之增加，燃烧反应变得更加剧烈，爆炸压力随之增加。在固定铝粉浓度下，分析管道内的爆炸压力沿出口方向的发展趋势可知，除尘管道泄爆口设置合适的泄爆压力的重要性，泄爆压力过大时易导致爆炸压力反射并积聚，产生更大的破坏；而对于  $90^\circ$  和 U 形弯管，应重点关注其转弯处爆炸压力的积聚。

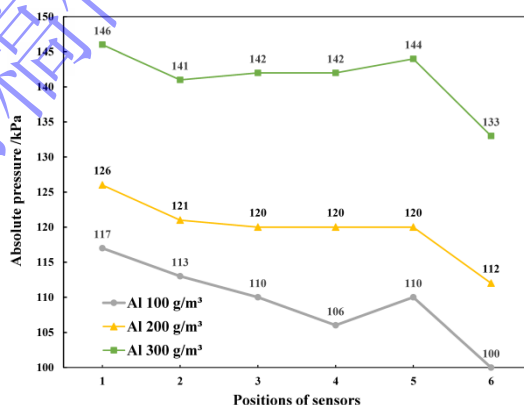


图6 管道内不同浓度铝粉爆炸压力

Fig.6 Explosion pressure of aluminum powder with different concentrations within the pipeline

图7为爆炸自由场超压曲线，峰值压力随着远离管道出口快速下降。铝粉浓度由  $200 \text{ g/m}^3$  增大到  $300 \text{ g/m}^3$  后，自由场压力随之增大， $p_1$  传感器测得的峰值压力从  $4.0 \text{ kPa}$  增大至  $8.7 \text{ kPa}$ ，上升了  $117.5\%$ ，后续其它位置传感器测得的压力增幅也超过  $80\%$ 。当铝粉浓度为  $100 \text{ g/m}^3$  时，最前方的  $p_1$  传感器测得的爆炸超压仅有  $0.8 \text{ kPa}$ ，这意味着  $200 \text{ g/m}^3$  浓度铝粉爆炸峰值增长了  $400\%$ 。铝粉浓度从

100 g/m<sup>3</sup>增加至 200 g/m<sup>3</sup>再到 300 g/m<sup>3</sup>时, 自由场峰值压力持续增大, 根本原因是单位体积内铝粉颗粒增多, 燃烧释放总能量增加。当铝粉浓度从 100 g/m<sup>3</sup>增至 200 g/m<sup>3</sup>时, 爆炸自由场压力的大幅提升尤为显著, 体现了在中大尺度管道内, 铝粉从非稳定不完全爆燃到稳定强烈爆燃的转变, 而当浓度从 200 g/m<sup>3</sup>增至 300 g/m<sup>3</sup>时, 爆炸自由场压力继续增长但增幅相对大幅减小。

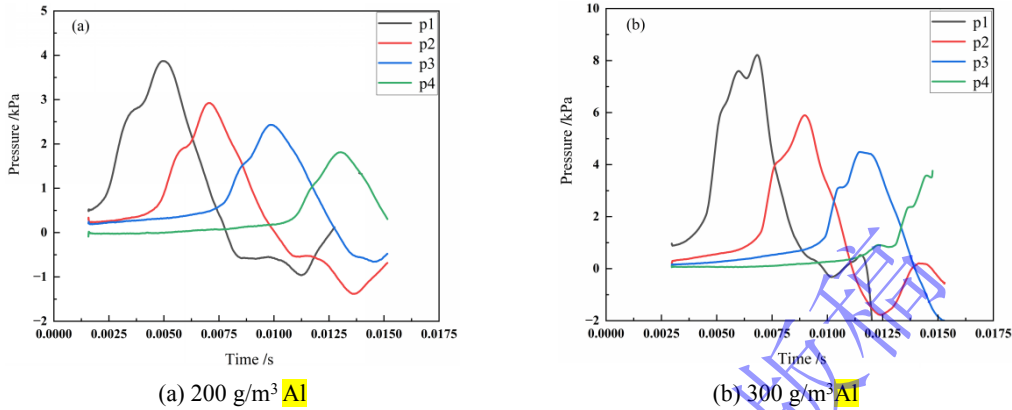


图 7 不同浓度铝粉爆炸自由场压力

Fig.7 Explosion free-field pressure of aluminum powder with different concentrations

表 3 为爆炸自由场压力最大上升速率, 铝粉浓度从 200 g/m<sup>3</sup> 增加至 300 g/m<sup>3</sup> 时, 最大压力上升速率从 13.3 bar/s 上升到 31.1 bar/s, 增幅达到 133%, 爆炸压力在 4 ms 内达到峰值, 更高的铝粉浓度代表单位体积内的铝粉质量更大, 燃烧表面积更大, 此时在氧气充足的情况下, 铝粉爆燃反应充分而迅速。

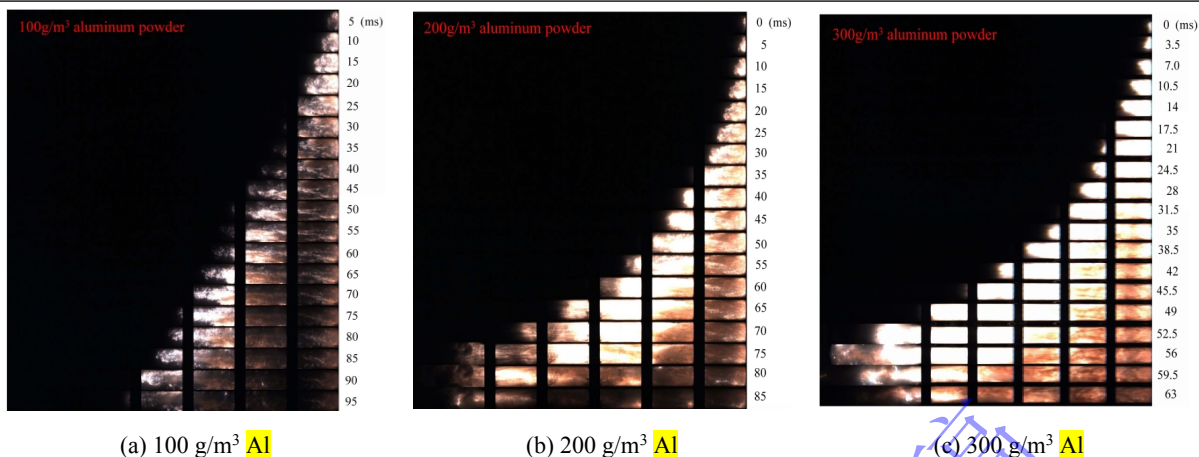
表 3 最大自由场压力上升速率

Table 3 The maximum free-field pressure rise rate

铝粉浓度/(g·m <sup>-3</sup> )	上升速率/(bar·s <sup>-1</sup> )
200	13.3
300	31.1

利用高速摄像机记录了不同浓度铝粉爆炸火焰传播过程, 如图 8 所示。铝粉尘云被点火头引燃后, 爆炸火焰在传播初期经历了较长发展, 逐步接触管壁及右端面, 受其限制转而沿管道出口方向传播。不同浓度下的火焰形态差异显著, 锋面褶皱程度各异, 铝粉浓度越低, 爆炸火焰锋面的褶皱越明显。此外, 高压喷粉在管道内形成的湍流及粉尘分散器对火焰的阻碍, 共同导致了火焰传播形态的不规则。低浓度下单位体积内铝粉较少, 化学反应速率低导致预热区变宽, 较厚的火焰锋面更易受到管道内流场不均匀性的影响, 火焰前锋不同位置受到的拉伸和扭曲程度差异更大, 褶皱就更为明显。

截取爆炸火焰图像间隔时间为 5 ms, 铝粉浓度为 100 g/m<sup>3</sup> 时, 颗粒分布相对较为稀疏, 受热不充分, 颗粒甚至不完全燃烧, 爆炸火焰难以稳定传播, 传播速度慢且几乎没有冲出管道出口, 整体火焰亮度偏暗, 印证了前文所述 100 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉极低的爆炸自由场压力。铝粉浓度为 200 g/m<sup>3</sup> 时, 爆炸起始阶段火焰呈现暗红色, 经过 32 ms 到达第二个法兰, 火焰经过约 70 ms 后喷出管道, 传播速度远大于 100 g/m<sup>3</sup> 铝粉。铝粉浓度增大到 300 g/m<sup>3</sup> 时, 爆炸火焰传播速度再次增大, 截取图像间隔为 3.5 ms, 火焰到达第二个法兰的时间为 17.5 ms, 并在历经 49 ms 后喷出管道。300 g/m<sup>3</sup> 与 200 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉相比, 单位体积内的铝粉增多, 预热区铝粉密度较高, 燃烧释放热量增加且传播稳定性增强, 火焰更加明亮。当火焰前锋喷出管道出口后, 火焰开始向管道的径向发展扩散, 呈现蘑菇云状, 如图 9 所示。



(a) 100 g/m<sup>3</sup> Al

(b) 200 g/m<sup>3</sup> Al

(c) 300 g/m<sup>3</sup> Al

图 8 不同浓度铝粉爆炸火焰传播过程

Fig.8 Explosion flame propagation images of aluminum powder with different concentrations



图 9 300 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉爆炸管道外火焰传播形态

Fig.9 Explosion flame development images outside the pipeline of 300 g/m<sup>3</sup> aluminum powder

图 10 为铝粉爆炸火焰前锋传播速度，浓度为 100 g/m<sup>3</sup> 时，铝粉颗粒间传热效果差，燃烧不稳定。由于燃烧较慢，压力上升速率低，因此爆炸火焰在管道内的传播速度增长率较低，并且传播速度最大不超过 100 m/s；铝粉浓度为 200 g/m<sup>3</sup> 时，爆炸火焰在第四节管道内的传播速度较 100 g/m<sup>3</sup> 铝粉提高了 191%；铝粉浓度增加至 300 g/m<sup>3</sup> 时，爆炸火焰在第五节管道内的平均传播速度达到了 285.71 m/s。当铝粉在第一节管道内被引燃时，大量未燃粉尘仍处于爆炸过程中的预热期，管道中整体反应进行较慢，不同浓度的铝粉在第一、二节管道内的火焰前锋传播速度相差较小，中后期管道内热量得以积累，当火焰前锋经过第二节管道进入第三节管道后反应加快，火焰前锋传播速度大大增加，铝粉尘云浓度越大，单位体积内的铝粉更多，燃烧后释放的热量增加，火焰传播速度更快。

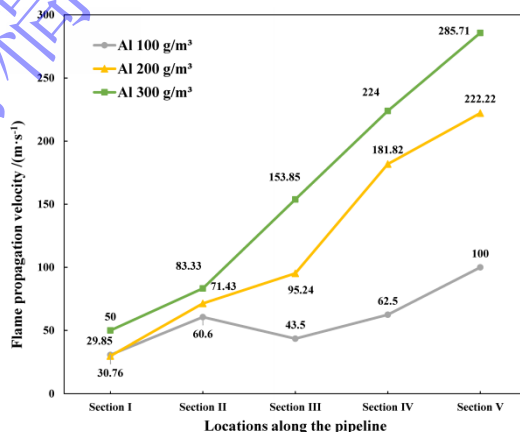


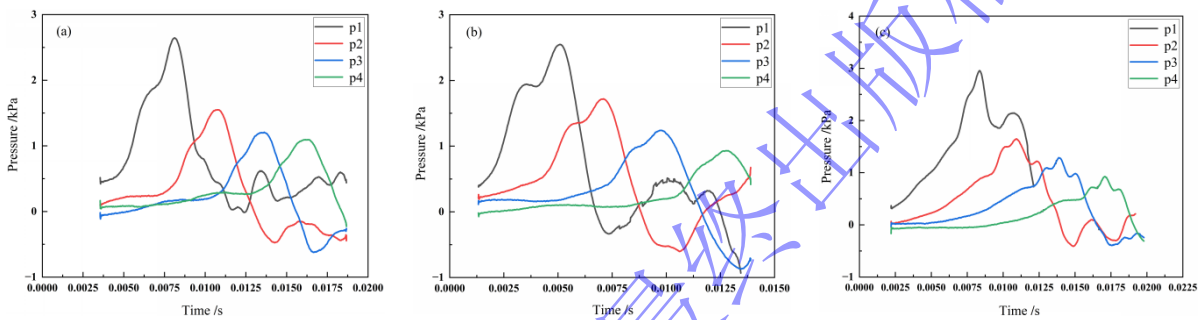
图 10 火焰前锋传播速度

Fig.10 The propagation velocity of the flame front

## 2.2 抑爆剂对铝粉爆炸压力的影响

为了比较不同浓度 MgAl-CO<sub>3</sub> 抑爆材料对 200 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉爆炸压力的抑制效果，将 MgAl-CO<sub>3</sub>

抑爆材料加入位于管道接近出口端的4#与5#粉尘仓,进行管道内铝粉爆炸后的抑爆实验。图11为抑爆后的 $200\text{ g/m}^3$ 浓度铝粉爆炸自由场压力曲线图,对比图7(a)未抑爆自由场压力曲线图,可以发现峰值压力均明显下降,体现出良好的抑制作用。随着抑爆剂浓度增加至 $600\text{ g/m}^3$ ,爆炸自由场压力并未继续下降,当抑爆剂浓度增加至 $800\text{ g/m}^3$ 时,爆炸自由场压力峰值与使用较低浓度抑爆剂抑爆时的峰值相比反而出现了小幅回升。分析认为,在高浓度、小粒径的抑爆材料条件下,其粉体颗粒间极易发生“团聚”现象,发生反应的铝粉向抑爆剂的热量传递受阻,限制了反应热向抑爆剂内部区域扩散,从而导致抑爆颗粒不能充分有效分解,限制了抑爆剂分解发挥抑制作用<sup>[20-22]</sup>。同时,结合中大尺度管道内的复杂流场分析,过高浓度的抑爆剂扰乱了管道内的流场,增强了湍流强度,导致了火焰面更多的褶皱和更大的铝粉颗粒燃烧表面积,其造成的反应加速在一定程度上抵消了一部分抑爆剂的抑制效果,从而体现出在高浓度抑爆剂下爆炸自由场压力的回升。如图11(c)所示,此时抑爆剂抑制作用与其造成的反应加速的相互作用导致了自由场压力曲线的震荡与二次峰值的产生,使其抑制效果低于较低浓度抑爆剂。



(a)  $200\text{ g/m}^3\text{ Al}+500\text{ g/m}^3\text{ Suppressant}$  (b)  $200\text{ g/m}^3\text{ Al}+600\text{ g/m}^3\text{ Suppressant}$  (c)  $200\text{ g/m}^3\text{ Al}+800\text{ g/m}^3\text{ Suppressant}$

图11 不同抑爆剂浓度下的 $200\text{ g/m}^3$ 浓度铝粉爆炸自由场压力

Fig.11 Explosion free-field pressure of aluminum powder ( $200\text{ g/m}^3$ ) with different concentrations of suppressants

由图12可以得出抑爆前后位于管道出口不同距离位置处的自由场压力下降率,当抑爆剂浓度为 $600\text{ g/m}^3$ 时,位于管道出口 $3\text{ m}$ 位置的p1自由场传感器的压力峰值下降了35%;当抑爆剂浓度为 $500\text{ g/m}^3$ 时,距出口 $4\text{ m}$ 的p2处下降了46.7%,距出口 $5\text{ m}$ 的p3处下降了48%;当抑爆剂浓度为 $600\text{ g/m}^3$ 时,距出口 $6\text{ m}$ 的p4处下降了44.4%。因此当铝粉浓度为 $200\text{ g/m}^3$ ,抑爆剂浓度为 $500\text{ g/m}^3$ 或 $600\text{ g/m}^3$ 时,可以有效抑爆。

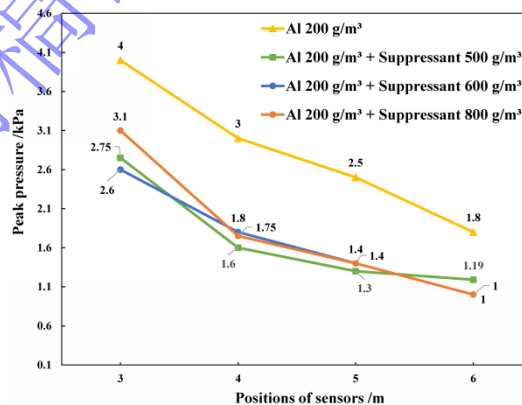


图12 不同浓度抑爆剂抑爆前后的 $200\text{ g/m}^3$ 浓度铝粉爆炸自由场峰值压力

Fig.12 Explosion peak free-field pressure of aluminum powder ( $200\text{ g/m}^3$ ) with or without different concentrations of suppressants

图13为使用 $500\text{ g/m}^3$ 浓度抑爆剂抑爆后的 $300\text{ g/m}^3$ 浓度铝粉爆炸自由场压力曲线图,图14为使用抑爆剂前后爆炸峰值压力对比,可以得出使用抑爆剂后,p1处自由场压力峰值下降了37.4%;p2

处下降了 45.5%；p3 处下降了 40.2%；p4 处下降了 41.34%，抑爆后的自由场压力下降率较上文 200 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉爆炸抑爆后的下降率基本一致，均在 30%以上。综合来看，在当前实验条件下，抑爆剂浓度为 500 g/m<sup>3</sup> 时，基本可以达到对中大尺度管道内一定浓度铝粉爆炸自由场压力的最佳抑制效果。

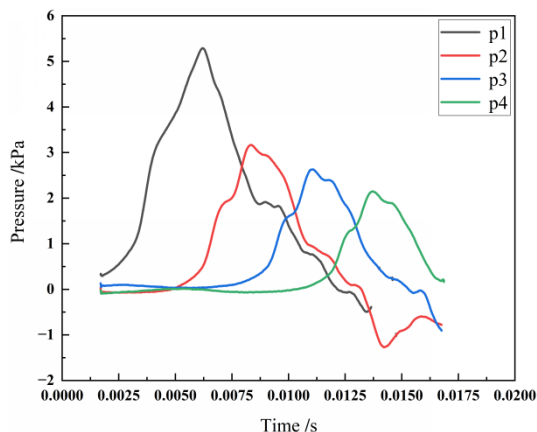


图 13 抑爆后的 300 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉爆炸自由场压力  
Fig.13 Explosion free-field pressure of aluminum powder (300 g/m<sup>3</sup>) with suppressant

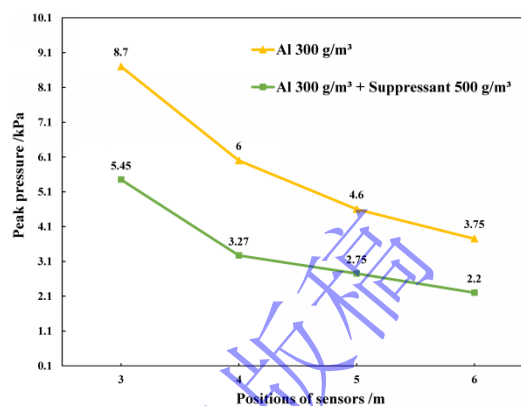


图 14 抑爆前后的 300 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉爆炸自由场峰值压力  
Fig.14 Explosion peak free-field pressure of aluminum powder (300 g/m<sup>3</sup>) with or without suppressant

表 4 为使用不同浓度抑爆剂抑爆后的铝粉爆炸自由场压力最大上升速率，随着抑爆剂浓度的增大，压力上升速率随之降低。对于 200 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉，当抑爆剂浓度增加至 800 g/m<sup>3</sup> 时，最大压力上升速率降低了 67.6%；当铝粉浓度为 300 g/m<sup>3</sup>，抑爆剂浓度为 500 g/m<sup>3</sup> 时，最大压力上升速率降低了 62.7%。可知 500 g/m<sup>3</sup> 浓度抑爆剂对 300 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉的爆炸压力上升速率抑制效果优于对 200 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉的抑制。

表 4 不同浓度抑爆剂下的铝粉爆炸最大自由场压力上升速率

Table 4 Maximum rate of explosion free-field pressure rise of aluminum powder with different concentrations of suppressants

工况	上升速率/(bar·s <sup>-1</sup> )
铝粉 (200 g/m <sup>3</sup> )	13.3
铝粉 (200 g/m <sup>3</sup> ) + 抑爆剂 (500 g/m <sup>3</sup> )	9.17
铝粉 (200 g/m <sup>3</sup> ) + 抑爆剂 (600 g/m <sup>3</sup> )	8.67
铝粉 (200 g/m <sup>3</sup> ) + 抑爆剂 (800 g/m <sup>3</sup> )	4.31
Al (300 g/m <sup>3</sup> )	31.1
铝粉 (300 g/m <sup>3</sup> ) + 抑爆剂 (500 g/m <sup>3</sup> )	11.6

### 2.3 抑爆剂对爆炸火焰传播特性的影响

图 15 (b) 为使用浓度 500 g/m<sup>3</sup> 抑爆剂抑爆后的 200 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉爆炸火焰传播情况，火焰前锋历经 65 ms 经过 4#法兰，此时抑爆剂持续经由粉尘分散器喷出，由于抑爆剂的作用，爆炸火焰锋面被打破，火焰变暗且呈现出不连续传播特征。

300 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉在 500 g/m<sup>3</sup> 浓度的抑爆剂作用下的爆炸火焰传播如图 16 (b) 所示，可以看出中后期的火焰传播速度较未抑爆前的速度明显降低，在 45 ms、50 ms 与 55 ms 的图像中显示出持续喷出的抑爆剂对铝粉爆炸火焰的抑制作用，并且与 200 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉爆炸抑爆后的传播情况类似，出现了管道上部分火焰领先于下部分火焰的现象，整个火焰前锋被抑爆剂扰乱、阻碍。由于抑爆剂经由

管道下部的扩散器喷入管道，其进入管道时会与正在快速向管道出口扩散的爆炸火焰的下半部分相遇，此时抑爆剂将先作用于下半部分火焰，继而发展到整个管道截面。

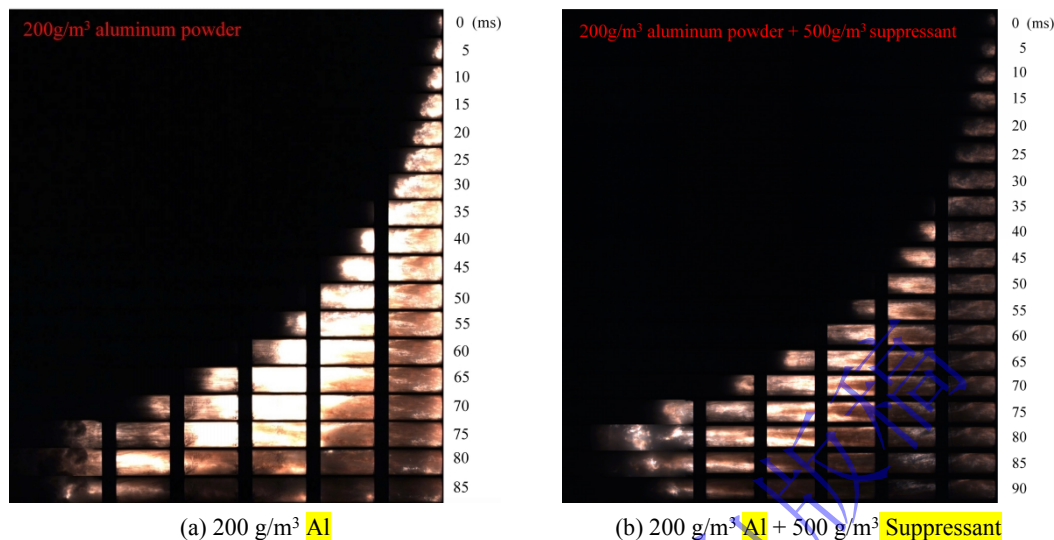


图 15 抑爆前后的 200 g/m³ 浓度铝粉爆炸火焰

Fig.15 Explosion flame propagation images of aluminum powder (200 g/m³) with or without suppressant

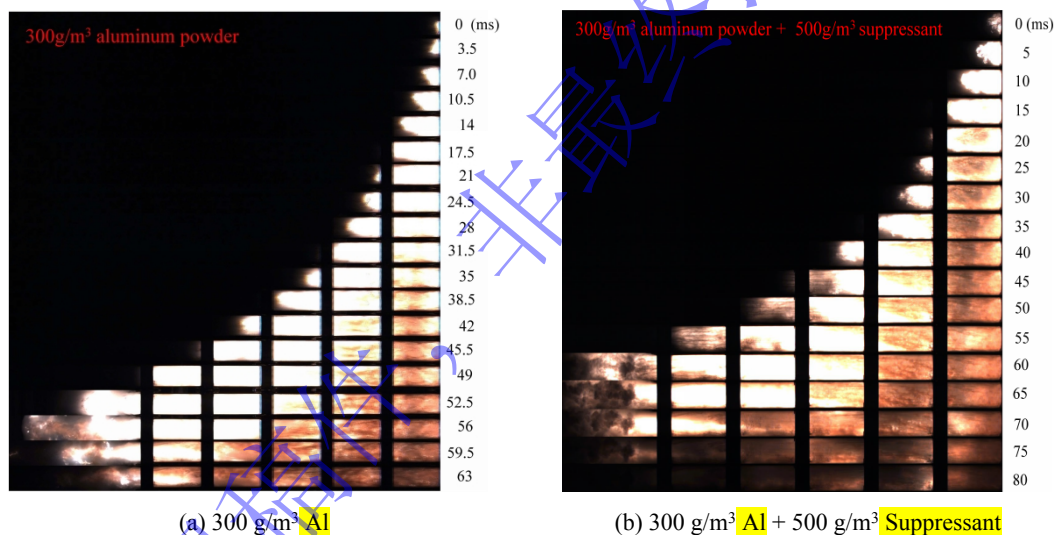


图 16 抑爆前后的 300 g/m³ 浓度铝粉爆炸火焰

Fig.16 Explosion flame propagation images of aluminum powder (300 g/m³) with or without suppressant

由爆炸火焰传播图像可以计算出爆炸火焰前锋在每节管道内传播的平均速度。图 17 为使用抑爆剂抑爆前后的火焰前锋传播速度，可见两种浓度铝粉的爆炸火焰传播速度均在经过第四、五节管道时明显下降。当铝粉浓度为 200 g/m³ 时，速度分别下降了 15.38%，10%；浓度为 300 g/m³ 时，火焰传播速度下降较为显著，分别下降了 33.68%，31.05%。由以上可知，500 g/m³ 浓度抑爆剂对 300 g/m³ 浓度铝粉爆炸火焰传播的抑制效果优于对 200 g/m³ 浓度铝粉的抑制。

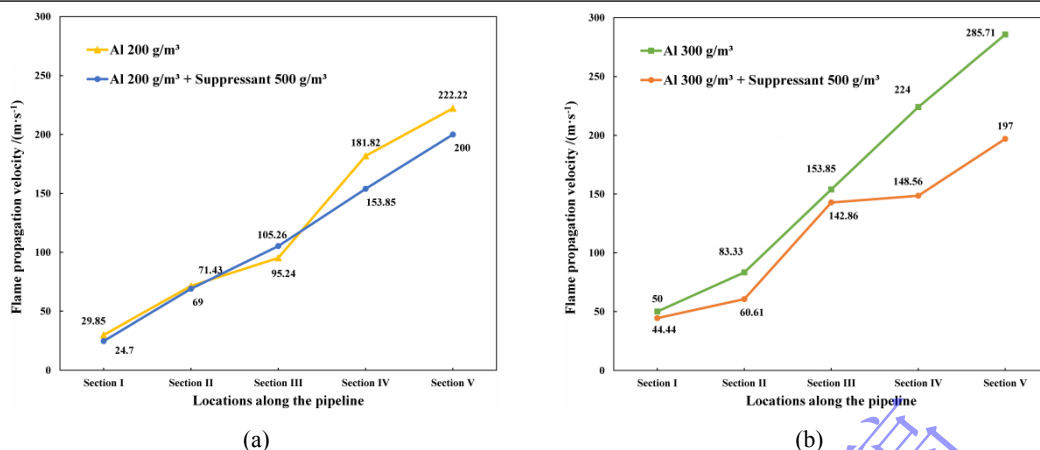


图 17 抑爆前后的火焰前锋传播速度

Fig.17 The propagation velocity of the flame front with or without suppressant

## 2.4 中大尺度管道内抑爆机制分析

MgAl-CO<sub>3</sub> 抑爆材料对管道内铝粉爆炸的抑制机理总体可分为物理抑制作用和化学抑制作用。其物理作用表现为：铝粉在管道中被引燃发生爆炸后，爆炸火焰与经由法兰分散器喷出的 MgAl-CO<sub>3</sub> 抑爆剂颗粒相遇，片层结构的抑爆剂颗粒大量散射和吸收燃烧热量并发生热分解反应，失去板层间的水分子产生水蒸气，同时层间的碳酸根产生的 CO<sub>2</sub> 也使得管道内的氧气含量降低，隔绝了铝颗粒与氧气的接触，降低了燃烧区的温度。同时，分解后生成的 MgO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧化物颗粒吸附在铝粉颗粒表面，阻碍了已燃铝粉颗粒与未燃铝粉颗粒之间的热辐射与热量释放。其化学作用表现为：分解生成的两种金属氧化物具有丰富的表面缺陷，能高效捕获、吸附并淬灭爆炸链式反应中的 OH, O 自由基，从而降低铝粉颗粒的活性并终止链式反应<sup>[23]</sup>。

在中大尺度管道内，MgAl-CO<sub>3</sub> 抑爆剂颗粒发生的物理和化学反应协同阻碍、破坏了铝粉颗粒燃烧和爆炸的链式反应，从而起到抑爆作用。当抑爆剂浓度为 500 g/m<sup>3</sup> 或 600 g/m<sup>3</sup> 时，可以达到对一定浓度铝粉爆炸的最佳抑制效果，并且 500 g/m<sup>3</sup> 浓度抑爆剂对 300 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉的爆炸压力上升速率与火焰传播速度的抑制效果优于对 200 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉的抑制。

不同于惰化抑爆研究中低浓度抑爆剂的加入导致的 SEEP (Suppressant Enhanced Explosion Parameter) 现象<sup>[24-25]</sup>，本研究搭建的多通道中大尺度测试系统可以实现管道内铝粉爆炸后再抑制，实验研究发现当抑爆剂浓度达到 800 g/m<sup>3</sup> 时，抑爆效果有所降低并产生了二次峰值。在高浓度抑爆剂环境中，铝粉燃烧释放的热量难以有效传导至抑爆颗粒云内部，导致颗粒无法充分受热分解，从而削弱了抑爆剂应有的抑制效能。与此同时，在中大尺度管道内复杂的流场背景下，过高浓度的抑爆剂持续经由扩散器喷出会加剧管道内的湍流，由此带来的反应加速，部分抵消了抑爆剂的抑制作用。

## 3 结论

本研究搭建了中大尺度透明管道粉尘爆炸测试系统，研究了不同浓度铝粉的爆炸参数特征以及抑爆前后的爆炸压力特性及火焰传播特征。主要结论如下：

(1) 中大尺度管道内铝粉爆炸火焰传播速度、爆炸压力以及压力上升速率均随着铝粉浓度的增大而增加。爆炸火焰在历经第二、三节管道后快速传播，浓度为 300 g/m<sup>3</sup> 时的火焰传播速度明显更快，在出口处的第五节管道内平均速度接近 300 m/s；当铝粉浓度从 100 g/m<sup>3</sup> 增至 200 g/m<sup>3</sup> 时，爆炸自由场压力的增长幅度尤为显著，而当铝粉浓度从 200 g/m<sup>3</sup> 增至 300 g/m<sup>3</sup> 时，压力继续增长但增幅相对减小；同时由爆炸壁面压力沿管道出口方向的发展趋势可知，工业生产中除尘管道设置合适的泄爆压力的重要性，泄爆压力过大时易导致爆炸压力的反射并积聚，产生更大的破坏；100 g/m<sup>3</sup> 浓度的铝粉爆炸火焰亮度低且爆炸压力极小，因此可以得出在中大尺度管道内低于此浓度的铝粉爆炸破坏力较低。

(2) MgAl-CO<sub>3</sub> 双金属超分子抑爆材料对中大尺度管道内的铝粉爆炸具有良好的抑制效果, 研究发现 500 g/m<sup>3</sup> 浓度的抑爆剂即可实现对 300 g/m<sup>3</sup> 以内浓度铝粉爆炸较好的抑制, 且不同浓度铝粉爆炸抑爆后的爆炸自由场压力下降率基本一致, 距离管道出口不同位置的压力下降率均在 40% 左右; 抑爆剂对 300 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉爆炸的最大压力上升速率、火焰传播速度抑制效果优于对 200 g/m<sup>3</sup> 浓度铝粉的抑制; 而当抑爆剂浓度达到 800 g/m<sup>3</sup> 时, 其抑制作用与高浓度粉体导致的反应加速相互作用, 导致了爆炸自由场压力震荡并出现了二次峰值, 对爆炸的抑制效果反而降低。

## 参考文献

- [1] GILL J R, BADIOLA C, DREIZIN L E. Combustion times and emission profiles of micron-sized aluminum particles burning in different environments [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(11): 2015-2023. DOI: 10.1016/j.combustflame.2010.02.023.
- [2] 申依林, 李鑫. 高活性金属铝粉研究进展 [J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2015, 13(2): 40-45. DOI: 10.16572/j.issn1672-2191.2015.02.027.  
SHEN Y L, LI X. Research progress of high activity metal aluminum powder [J]. *Chemical Propellants and Polymeric Materials*, 2015, 13(2): 40-45. DOI: 10.16572/j.issn1672-2191.2015.02.027.
- [3] 李庆钊, 王可, 梅晓凝, 等. 微米级铝粉的爆炸特性及其反应机理研究 [J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(1): 219-225.  
LI Q Z, WANG K, MEI X N, et al. Investigation on explosion characteristics and reaction mechanism of micro-aluminum powder [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(1): 219-225.
- [4] 王秋红, 闵锐, 孙艺林, 等. 抛光工艺中镁铝合金粉燃爆参数分析 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(5): 1211-1220. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2020.05.005.  
WANG Q H, MIN R, SUN Y L, et al. Analysis of magnesium-aluminum alloy powder burning explosion parameters in the polishing process [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(5): 1211-1220. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2020.05.005.
- [5] 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. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0101.  
CHEN X K, ZHANG Z J, WANG Q H, et al. Explosion characteristics of micro-sized aluminum dust in 20 L spherical vessel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(5): 1130-1136. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0101.
- [6] 沈世磊, 张奇, 马秋菊, 等. 湍流对铝粉爆炸特性的影响 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(3): 455-461. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.03.010.  
SHEN S L, ZHANG Q, MA Q J, et al. Effect of turbulence on explosion characteristics of aluminum dust/air [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(3): 455-461. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.03.010.
- [7] 雷伟刚, 毕海普, 王凯全. 弯管内铝粉二次爆炸及抑爆试验研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(11): 43-48. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2017.11.008.  
LEI W G, BI H P, WANG K Q. Experimental study on secondary explosion of aluminum powder in elbow pipeline and its suppression [J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(11): 43-48. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2017.11.008.
- [8] ZHANG S, BI M, YANG M, et al. Flame propagation characteristics and explosion behaviors of aluminum dust explosions in a horizontal pipeline [J]. *Powder Technology*, 2020, 359: 172-180. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.10.009.
- [9] 靳红旺, 郑立刚, 朱小超, 等. 竖直管道中氧化铝抑制铝粉爆炸特性研究 [J]. *化工学报*, 2020, 71(4): 1929-1939. DOI: 10.11949/0438-1157.20190620.  
JIN H W, ZHENG L G, ZHU X C, et al. Inhibition effect of alumina on aluminum powder explosion characteristics in vertical duct [J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(4): 1929-1939. DOI: 10.11949/0438-1157.20190620.
- [10] 文虎, 杨玉峰, 王秋红, 等. 矩形管道中微米级铝粉爆炸实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(05): 993-998. DOI:

- 10.11883/bzycj-2016-0003.
- WEN H, YANG Y F, WANG Q H, et al. Experimental study on micron-sized aluminum dust explosion in a rectangular pipe [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(05): 993-998. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0003.
- [11] PANG L, JIN X, LI G, et al. The influence of pipeline deposited dust on the explosion propagation of dust collector [J]. *Powder Technology*, 2024, 434: 119341. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.119341.
- [12] 朱小超, 郑立刚, 于水军, 等. 阻塞比对竖直管道中铝粉爆炸特性的影响研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(10): 161-170. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0006.
- ZHU X C, ZHENG L G, YU S J, et al. Effect of blocking ratio on aluminum powder explosion's characteristics in vertical duct [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(10): 161-170. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0006.
- [13] WANG W, HU Z, PAN W, et al. Simulation and experimental study on the explosion characteristics of aluminum dust in the 5-L explosion container [J]. *Combustion Science and Technology*, 2025, 197(17): 4532-4549. DOI: 10.1080/00102202.2024.2371892.
- [14] TAVEAU J, LEMKOWITZ S, HOCHGREB S, et al. Dust explosion propagation in small diameter pipes [J]. *Process Safety Progress*, 2019, 38(3): 12033. DOI: 10.1002/prs.12033.
- [15] 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(04): 759-765. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0759-07.
- CHEN X, CHEN X F, ZHANG H M, et al. Effects of inerting agent with different particle sizes on the flame propagation of aluminum dust [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(4): 759-765. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0759-07.
- [16] JIANG H P, Bi M S, Li B, et al. Flame inhibition of aluminum dust explosion by NaHCO<sub>3</sub> and NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> [J]. *Combustion and Flame*, 2019, 200: 97-114. DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.11.016.
- [17] JIANG H P, Bi M S, Li B, et al. Inhibition evaluation of ABC powder in aluminum dust explosion [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 361: 273-282. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.07.045.
- [18] HAN Z Y, YANG K, WANG H T, et al. Magnesium powder explosion suppression: high-performance carbonate-intercalated calcium-iron layered double hydroxide as an advanced suppressant [J]. *Fuel*, 2026, 415: 138459. DOI: 10.1016/j.fuel.2026.138459.
- [19] HAN Z Y, ZHANG X R, WANG C, et al. Inhibitory effects of phosphorus-containing layered double hydroxides on flame characteristics and overpressure in aluminum dust explosion [J]. *Powder Technology*, 2026, 469(1): 121727. DOI: 10.1016/j.powtec.2025.121727.
- [20] RANGANATHAN S, ROCKWELL R S, PETROW D, et al. Radiative fraction of dust entrained turbulent premixed flames [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, 51: 65-71. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.11.009.
- [21] ZHENG L G, LI G, WANG Y L, et al. Effect of blockage ratios on the characteristics of methane/air explosion suppressed by BC powder [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 355: 25-33. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.04.070.
- [22] 郑立刚, 李刚, 王亚磊, 等. 开口阻塞比对粉体抑制甲烷爆炸的影响研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(11): 144-153. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0228.
- ZHENG L G, LI G, WANG Y L, et al. Effect of blockage ratios on the characteristics of methane/air explosions suppressed by dry chemicals [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(11): 115403. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0228.
- [23] 姜海鹏. 固态抑爆剂抑制铝粉尘爆炸机理研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2019.003574.
- JIANG H P. Suppression mechanism of Al dust explosion by solid suppressants [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2019.003574.
- [24] BU Y, AMYOTTE P, LI C, et al. Effects of dust dispersibility on the suppressant enhanced explosion parameter (SEEP) in flame propagation of Al dust clouds [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 404: 124119. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124119.

- [25] LI X, CHEN H, ZHANG Y, et al. Aluminum dust explosion suppression performance and mechanism of a new mesoporous composite explosion suppressant [J]. ACS Omega, 2024, 9(45): 44942-44955. DOI: 10.1021/acsomega.4c03871.

录用稿件，  
非最终出版稿