

中文引用格式:邱东阳,陈先锋,刘丽娟,等. 颗粒形貌对铝粉瞬态弥散与爆炸火焰的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(2): 189–198.

英文引用格式:QIU Dongyang, CHEN Xianfeng, LIU Lijuan, et al. Effects of particle morphology on transient dispersion and explosion flame propagation of aluminum powder[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(2): 189–198.

颗粒形貌对铝粉瞬态弥散与爆炸火焰的影响研究^{*}

邱东阳, 陈先锋 教授, 刘丽娟 教授, 黄楚原 副教授, 王 珺^{**} 副教授, 孙绪绪 教授
(武汉理工大学 安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉 430070)

中图分类号:X932;X928.1 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.0582

基金项目:国家自然科学基金资助(12302443);广东省自然科学基金资助(2023A1515012080);湖北省技术创新专项项目(2022BEC024);湖北省创新群体项目(2023AFA013)。

【摘要】 为探究颗粒形貌对铝粉爆炸特性的影响,以球形铝粉(SAP)和片状铝粉(FAP)为研究对象,结合粒子图像测速系统和竖直管道爆炸试验,系统分析颗粒形貌对瞬态弥散行为和爆炸火焰传播的作用。结果表明:FAP因其较大的比表面积与非对称几何结构,表现出更强的滞空能力和湍流扰动效应,在相同质量浓度下形成更均匀的弥散状态;受湍流增强、关键点火区域粒子数提升及悬浮稳定性等因素影响,FAP点火响应更快,显著促进火焰前缘皱褶发展,在350 g/m³条件下的火焰传播速度达44.1 m/s,较SAP提高32.8%;而SAP因局部团聚形成高质量浓度区,其爆炸过程中白色过曝面积占比为98.6%,反映出更集中的热释放行为。

【关键词】 铝粉; 颗粒形貌; 瞬态弥散; 湍流强度; 爆炸火焰

Effects of particle morphology on transient dispersion and explosion flame propagation of aluminum powder

QIU Dongyang, CHEN Xianfeng, LIU Lijuan, HUANG Chuyuan, WANG Jun, SUN Xuxu
(School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China)

Abstract: To investigate the influence of particle morphology on the explosion characteristics of aluminum powder, spherical aluminum powder (SAP) and flake aluminum powder (FAP) were selected as research subjects. By combining particle image velocimetry with vertical duct explosion experiments, the effects of particle morphology on transient dispersion behavior and flame propagation characteristics were systematically analyzed. The results show that FAP, due to its larger specific surface area and the asymmetric geometry, exhibits stronger suspension capability and turbulence-inducing effects, leading to a more uniform dispersion state under the same mass concentration. Influenced by enhanced turbulence, increased particle population in the critical ignition zone, and greater suspension stability, FAP demonstrates faster ignition response and significantly promoted flame front wrinkling. At a concentration of

^{*} 文章编号:1003-3033(2026)02-0189-10; 收稿日期:2025-09-29; 修稿日期:2025-12-03

^{**} 通信作者:王珺(1982—),女,湖北黄冈人,硕士,副教授,主要从事安全应急管理及国防科研管理方面的研究。E-mail: 9805@whut.edu.cn。

350 g/m³, its flame propagation velocity reaches 44.1 m/s, which is 32.8% higher than that of SAP. In contrast, SAP tends to form localized high-mass concentration regions due to agglomeration, resulting in a white overexposure area accounting for 98.6% during the explosion, indicating a more concentrated heat release behavior.

Keywords: aluminum powder; particle morphology; transient dispersion; turbulence intensity; explosion flame

0 引言

铝粉凭借高能量密度、良好燃烧性能及资源丰富性,在含能材料研究与应用中受到广泛关注^[1]。在航空航天、军事装备及新能源等领域,铝粉作为推进剂添加剂或能量增强材料常被用于提升系统能量释放效率^[2]。在储存、运输及使用过程中,一旦颗粒在空气中弥散形成可燃云团,极易被点燃并诱发粉尘爆炸事故,威胁人员生命安全和设备运行稳定。因此,深入研究铝粉在瞬态释放条件下的弥散行为及其对火焰传播特性的影响,对提升含铝储能体系的本质安全性具有重要意义。

国内外学者借助 20 L 球形容器、哈特曼管和开放空间系统等试验平台,广泛开展了关于粒径、质量浓度、氧含量等因素对铝粉尘燃爆特性影响的系统研究^[3-6]。这些传统试验手段虽能获取宏观爆炸参数,但难以捕捉颗粒在流场中的微观运动状态。近年来,粉尘颗粒的几何特征被认为在调控分散动力学过程中发挥关键作用,进而显著影响其爆炸行为^[7]。DI SARLI 等^[8]使用计算流体力学工具,探究颗粒形状因子对 20 L 爆炸球体内湍流生成及粉尘输运的影响,发现形状因子降低(由球形向纤维形转变)可提升粉尘供给效率。REDING 等^[9]通过最小点火能量装置与 Siwek 20 L 球形容器试验,发现铝粉的形貌通过改变比表面积(Specific Surface Area, SSA)和分散特性,进而显著影响爆炸敏感性和严重程度。SCHWEIZER^[10]和 PRASAD^[11]等利用数字在线全息技术,发现铝颗粒形貌通过影响粉尘云的空气动力学行为,从而显著降低点火阈值,增加爆炸风险。关文玲等^[12]基于非稳态数值模拟,探讨了不同形状系数的铝粉在 20 L 球形容器中的分散行为,揭示了颗粒形貌对粉尘空间分布、湍流动能和速度演化特性的显著影响。然而,现有研究多聚焦于弥散阶段,并普遍受限于单一的测试和分析手段,难以实现微观颗粒运动与宏观流场结构的同步获取。此外,缺乏对不同形貌颗粒在火焰传播过程中的系统对比与关联分析,限制了颗粒形貌调控铝粉

爆炸行为机制的深入理解。

因此,笔者拟以球形铝粉(Spherical Aluminum Powders, SAP)和片状铝粉(Flake Aluminum Powders, FAP)为研究对象,采用粒子图像测速系统分析 2 种颗粒在竖直管道中的瞬态弥散行为,揭示颗粒形貌对湍流输运及空间分布的影响机制,并基于竖直燃烧管道系统,对比研究 2 种铝粉的爆炸火焰传播特性。通过关联弥散动力学与火焰行为,阐明颗粒形貌对铝粉爆炸灾害的调控机制,以期为铝基材料的安全生产与爆炸防护提供科学依据。

1 铝粉粒径与形貌表征

试验所用的 SAP 和 FAP 粒径分布见表 1。索特平均直径 $D[3,2]$ 能更准确地表征粉体的粒径分布特性及其爆炸危险性^[13]。SAP 和 FAP 的 $D[3,2]$ 分别为 14.1 和 12.9 μm,二者的体积平均粒径 $D[4,3]$ 和中位粒径 $D(0.5)$ 粒径相近。与 SAP 相比, FAP 具有更大的 SSA。2 种铝粉的微观形貌差异如图 1 所示,所有样品均无明显团聚现象,可以看出, SAP 表面光滑且呈规则球形结构,而 FAP 则呈二维平面结构,表面附着鳞状碎屑。

表 1 SAP 和 FAP 的粒径分布

Table 1 Particle size distribution of SAP and FAP		
样品	SAP	FAP
$D[3,2]/\mu\text{m}$	14.1	12.9
$D[4,3]/\mu\text{m}$	29.8	26.5
$D(0.5)/\mu\text{m}$	21.4	20.9
$\text{SSA}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	0.2	0.5

2 粉尘弥散与爆炸火焰传播试验

2.1 粉尘弥散试验

粒子图像测速系统由粉尘弥散管道、脉冲激光器、电荷耦合器件(Charge-Coupled Device camera, CCD)相机、同步控制器及图像处理系统构成,如图 2 所示。测试主体为全透明亚克力方管(50 cm×8 cm×8 cm),底部安装储粉底座和蘑菇形喷嘴,顶部密封以减少环境气流干扰。脉冲激光器前端配备

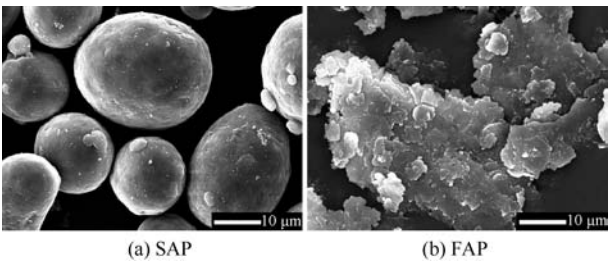


图 1 SAP 和 FAP 的微观形貌

Fig. 1 Micromorphologies of SAP and FAP

焦距为-10 mm 的凹柱面镜,用于形成片光源。CCD 相机配备 532 nm 带通滤光片,以 15 Hz 帧率记录流场图像。同步控制器联动喷粉系统与 CCD 相机。预试验表明:当喷粉气压为 0.14 MPa、持续 0.1 s 时,粉尘云能有效达到管道顶端,满足试验需求。

调节激光与 CCD 相机位置,使片光源精准投射至管道中心截面;称取不同质量浓度铝粉末,将其均匀分布于喷嘴基座,调节空气瓶减压阀至目标压力值;同步启动喷粉与拍摄,捕获粉尘云瞬态流场。由瞬态流场图像可得到颗粒运动矢量场特征参数。

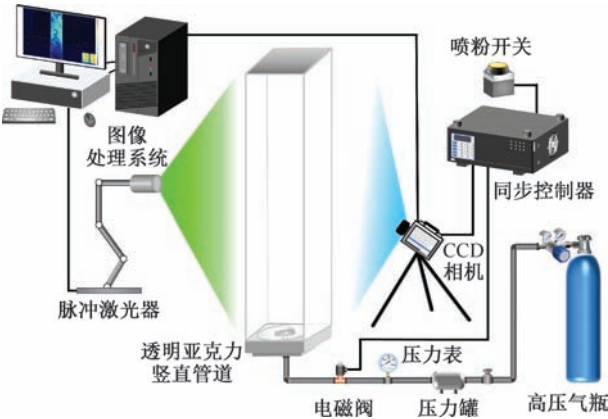


图 2 粒子图像测速系统

Fig. 2 Particle image velocimetry system

2.2 爆炸火焰传播试验

竖直接管道爆炸火焰传播测试系统由燃烧管道、喷粉装置、点火模块组成,如图 3 所示。燃烧管道与粉尘弥散试验管道等比设计,前后侧配置可拆卸石英玻璃观测窗,左右两侧设置 10 mm 厚不锈钢耐压加固板。管道顶端中部布置直径 20 mm 泄爆口,采用低压聚氯乙烯薄膜密封。喷粉系统延续粉尘弥散试验参数,喷粉压力与持续时间保持恒定。点火模块由 14 kV 高压发生器与钨针电极组成,电极直径 0.5 mm,尖端间距 2 cm,安装于距管底 8 cm 处对称位置。采用高速摄像机观测火焰,摄像机搭载 50 mm 定焦镜头与中心波长 484 nm 带通滤光片,以捕

捉中间产物气相一氧化铝的特征光谱。

将铝粉均匀分布于喷嘴基座,并向储气罐充入 0.14 MPa 压缩空气,设置高速摄像机为触发状态;触发电磁阀执行 0.1 s 喷粉,待粉尘云在管道内均匀扩散 0.2 s 后,启动高压电火花引燃可燃混合物。点火瞬间,同步控制模块联动触发高速摄像机,以 3 000 帧/s 采样率记录火焰传播动态演化过程。

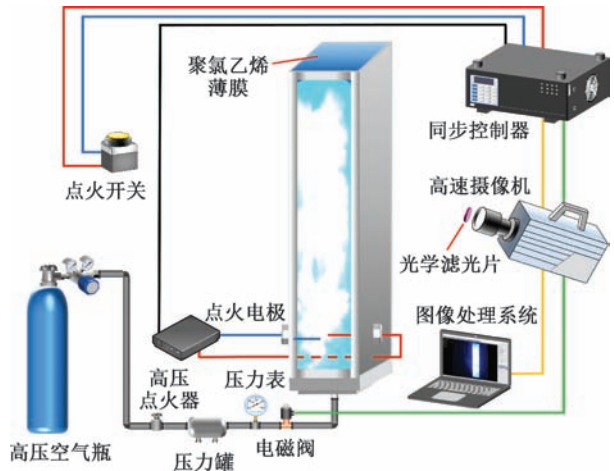


图 3 竖直接管道爆炸火焰传播测试系统

Fig. 3 Vertical pipeline explosion flame propagation test system

3 颗粒形貌对弥散与爆炸火焰的影响

3.1 颗粒形貌对瞬态流场分布的影响

图 4 和图 5 分别为 150 ~ 400 g/m³ 质量浓度下 SAP 与 FAP 在竖直接管道中的瞬态弥散行为,整个弥散过程可划分为上升阶段、悬浮阶段与沉降阶段,呈现出典型的气固两相流演化特征。在上升阶段(0 ~ 268 ms),2 类粉尘均受到脉冲气流的驱动,从储粉凹槽迅速进入竖直接管道内部,沿轴向形成向上的粉尘羽流,并到达管道顶部;在悬浮阶段(268 ~ 536 ms),粒子在惯性和空气阻力的共同作用下,进入短暂的准静态,在管道中形成相对稳定的云团结构;在沉降阶段(536 ms 后),随着气流动能衰减,粒子逐渐克服浮力而发生重力驱动下的沉降,粉尘云质量浓度逐步下降。然而,SAP 和 FAP 在各阶段展现出显著差异。在上升阶段初期,SAP 尘云表现为近似对称的羽流形态,其前沿中轴区域局部凹陷,并伴随两侧扩展。同时,由于 SAP 间存在一定程度的范德华力与静电力,在短时间内产生显著的团聚效应,使得颗粒在空间中形成密集团簇,导致云团质量浓度局部增强^[14]。然而,FAP 由于几何形状不规则、姿态易变,受气流扰动后运动轨迹不稳定,颗粒间相

相互作用复杂,未呈现明显轴对称羽流结构,云团边界较为模糊、颗粒分布相对松散。在悬浮阶段,FAP 因其比表面积大、空气阻力高,可在空气中维持更久的滞留时间,形成均匀连续的悬浮云团,显示出良好的稳定性;相比之下,SAP 因团聚效应显著,导致悬浮分

布出现不均,空间一致性差。在沉降阶段,FAP 受到的空气阻力显著高于 SAP,颗粒沉降速度较慢,云团边界下移缓慢,展现出更长的悬浮持续时间;而 SAP 因阻力系数较小、团聚质量增大,导致整体沉降速度加快,表现为云团迅速下降、边界扰动增强的特征。

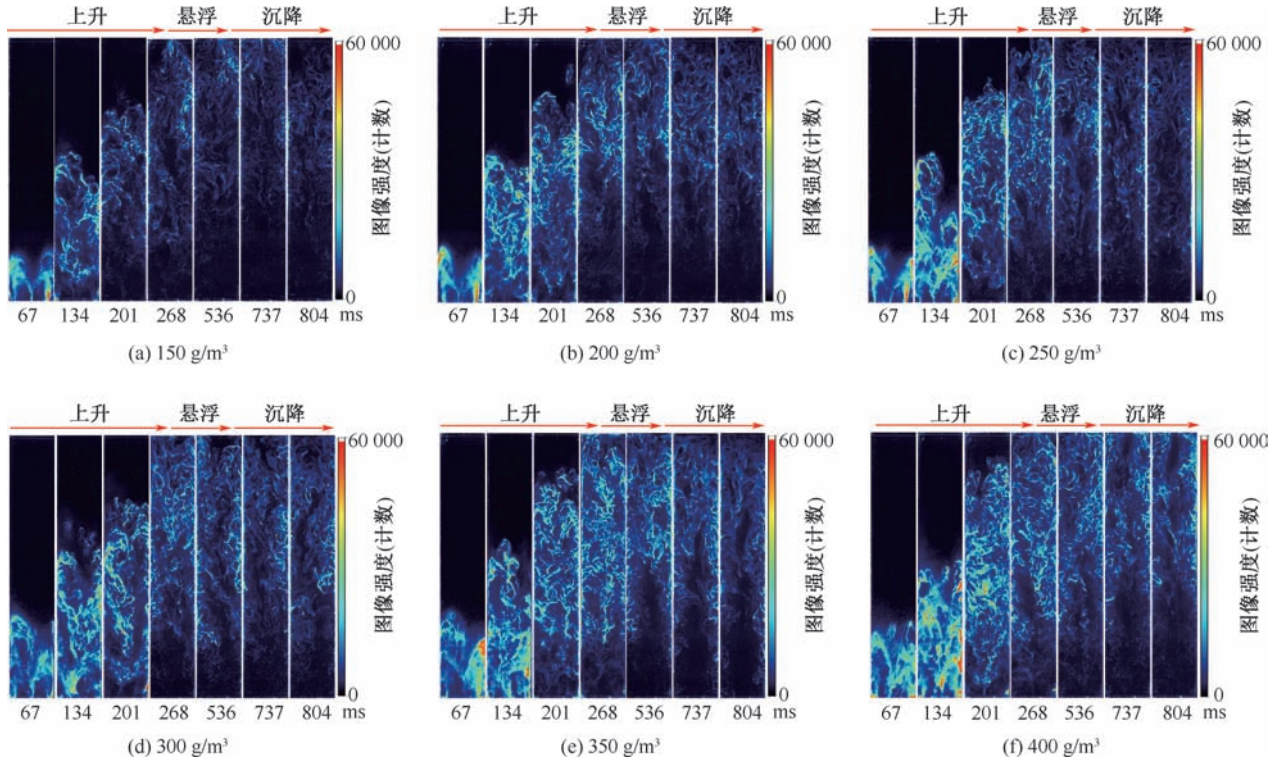


图4 不同质量浓度 SAP 尘云的瞬态弥散演化

Fig. 4 Transient dispersion evolution of SAP dust clouds with different mass concentrations

3.2 颗粒形貌对初始湍流强度的影响

不同质量浓度下 2 类铝粉在 268 ms 的水平速度矢量 v_x 、垂直速度矢量 v_y 、瞬时速度标量 $|V|$ 、平均瞬时速度标量 $|\bar{V}|$ 和涡度 ω_z 参数见表 2 和表 3。正值 v_x 和 v_y 分别表示颗粒向右和上运动,负值为向左和下运动; ω_z 正值表示顺时针旋转,负值表示逆时针旋转。随着粉尘质量浓度由 150 g/m^3 增加至 400 g/m^3 ,SAP 的 $|\bar{V}|$ 由 0.4 m/s 提升至 0.6 m/s ,FAP 从 0.5 m/s 增至 0.9 m/s ;相同质量浓度下,FAP 的 $|\bar{V}|$ 始终高于 SAP。SAP 的 v_x 和 v_y 范围随质量浓度增加呈非单调变化;FAP 的速度分量范围随质量浓度显著扩大, 400 g/m^3 时, v_x 和 v_y 分别达到 $-6.8 \sim 6.8$ 和 $-12.1 \sim 6.8 \text{ m/s}$,表明 FAP 颗粒的运动差异性更大。随着质量浓度增加,2 类铝粉颗粒的 ω_z 范围均逐渐扩大。 400 g/m^3 时,SAP 的 ω_z 范围为 $-232.0 \sim 284.9 \text{ s}^{-1}$,FAP 为 $-586.9 \sim 452.0 \text{ s}^{-1}$,表明 FAP 更易产生高强度局部旋涡。这种差异

主要源于 FAP 较大的比表面积和非对称结构,在流场中易受到更大的阻力矩和姿态扰动,从而增强其剪切敏感性和旋涡生成能力。

湍流强度通常通过评估冷态流场中颗粒速度波动的均方根 V_R 来定量表征^[15]:

$$V_R = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (2)$$

式中: N 为速度矢量数量; V_i 为第 i 个颗粒的瞬时速度; $\bar{V}$ 为颗粒瞬时速度的平均值。

不同质量浓度下 SAP 和 FAP 湍流强度随时间的演化过程如图 6 所示。整体而言,2 种铝粉在各质量浓度下的湍流强度均呈现“波动递减”的演化特征。在粉尘云初始上升阶段,高速喷粉气流与铝颗粒之间发生剧烈能量交换,诱发显著湍流强度。随着时间推移,气流动能因黏性耗散作用逐渐衰减,

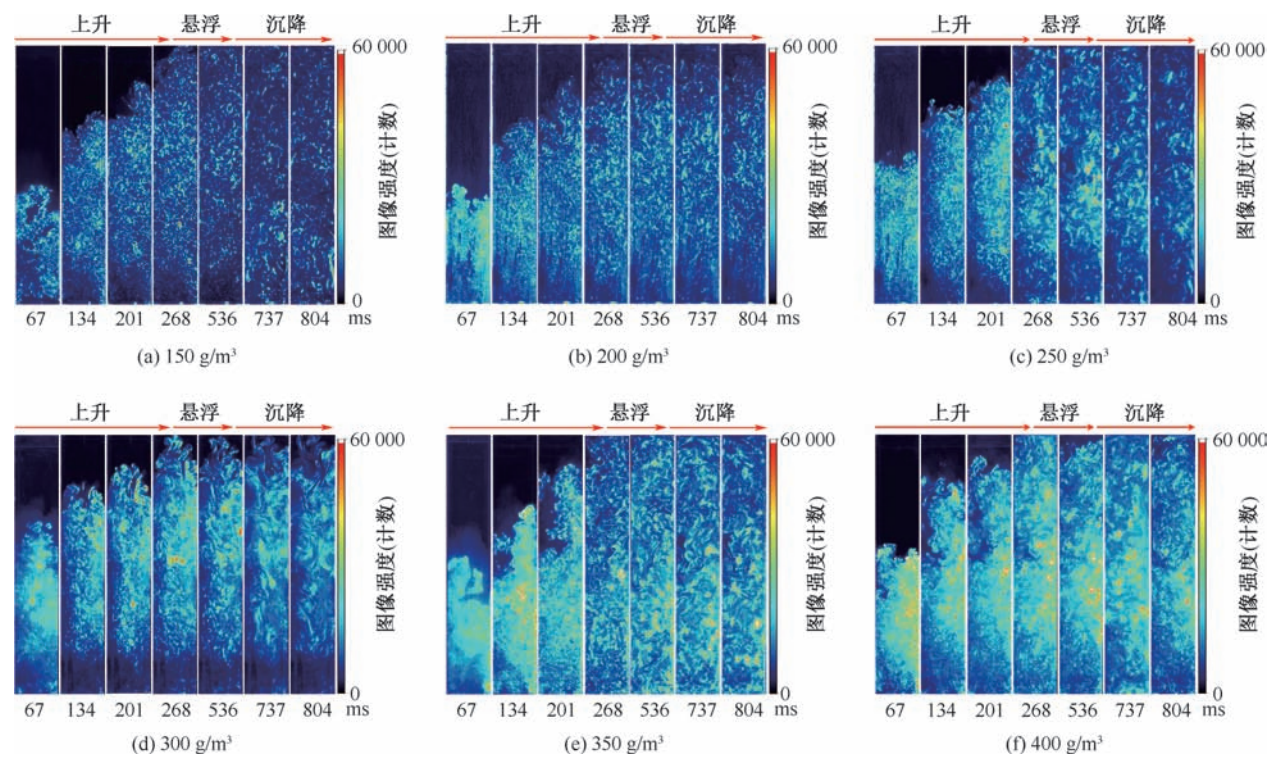


图 5 不同质量浓度 FAP 尘云的瞬态弥散演化

Fig. 5 Transient dispersion evolution of FAP dust clouds with different mass concentrations

表 2 SAP 尘云的瞬态速度

Table 2 Transient velocity of SAP dust clouds

参数	粉尘云质量浓度/(g·m ⁻³)					
	150	200	250	300	350	400
$v_x/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	-2.3-1.8	-3.8-2.5	-1.7-4.4	-5.2-2.8	-2.4-5.8	-4.4-5.5
$v_y/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	-2.7-3.7	-3.4-3.8	-4.0-4.4	-3.3-4.0	-2.9-5.7	-4.8-6.3
$ V /(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0-2.5	0-2.8	0-3.0	0-3.3	0-4.6	0-5.0
$ \vec{V} /(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6
$\omega_z/(\text{s}^{-1})$	-141.2-75.4	-150.0-114.8	-162.4-161.2	-107.1-194.1	-113.2-245.2	-232.0-284.9

表 3 FAP 尘云的瞬态速度

Table 3 Transit velocity of FAP dust clouds

参数	粉尘云质量浓度/(g·m ⁻³)					
	150	200	250	300	350	400
$v_x/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	-2.6-4.2	-2.9-4.4	-6.2-6.1	-8.4-6.0	-6.3-6.1	-6.8-6.8
$v_y/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	-2.7-4.6	-4.0-4.4	-6.9-5.4	-6.4-7.6	-8.7-7.6	-12.1-6.8
$ V /(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0-3.3	0-4.3	0-6.2	0-9.2	0-11.1	0-12.3
$ \vec{V} /(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.5	0.5	0.6	0.8	0.8	0.9
$\omega_z/(\text{s}^{-1})$	-122.7-119.3	-331.7-190.9	-135.9-213.8	-335.3-346.5	-278.4-380.1	-586.9-452.0

部分颗粒在重力作用下沉降,导致悬浮颗粒质量浓度降低,气固两相间的相互作用减弱,使湍流强度呈现出下降趋势。此外,由于颗粒运动对局部流场产生周期性扰动,导致涡量场发生动态变化,从而引起湍流强度的短时波动。相同质量浓度下,FAP 湍流强度始终高于 SAP。FAP 具有较大比表面积和

几何不对称性,在气流中易产生更强的剪切作用,显著增强流场扰动;而 SAP 因其几何对称性和流线型结构,在气流中运动时产生的流动分离较弱,对周围流场的扰动程度相对较小。这种形貌效应导致 FAP 在悬浮和沉降过程中仍能维持更强的湍流强度。

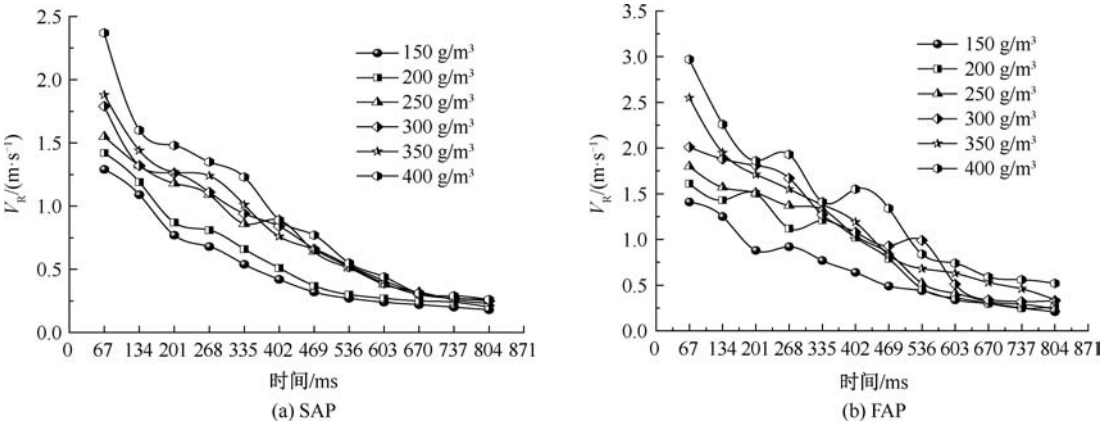


图 6 不同质量浓度的 SAP 和 FAP 尘云的湍流强度随时间变化过程
Fig. 6 Temporal variation of turbulence intensity for SAP and FAP dust clouds at different mass concentrations

3.3 颗粒形貌对关键点火区域粉尘迁移的影响

以竖直燃烧管道点火位置为中心,划定 8 cm×8 cm 的正方形观测区域,利用 DaVis 软件计算该区域内每个像素点平均粒子数,从而获得不同质量浓度下,关键点火区域内粉尘云瞬态粒子数的时序演化,如图 7 所示。可以看出,SAP 在关键点火区域的瞬态粒子数均呈现“先升后降”的变化趋势。喷粉初期,大量 SAP 颗粒受强气流驱动,自下而上进入点火区域,导致该区域粒子数迅速上升。随着喷粉过程结束,颗粒间发生团聚形成较大颗粒,加速其沉

降,导致粒子数迅速下降。随后,由于管道上端颗粒回落补充减少,区域内的粒子数逐渐趋于稳定值。相比之下,FAP 在关键点火区域的粒子数则表现为“先降后波动”的特征,并整体粒子数水平明显高于 SAP。初期粒子数的下降可能与局部流场扰动及喷粉非均匀性有关。然而,FAP 由于具有较大的比表面积和更高的阻力系数,在气流中受到更大阻力,可在悬浮状态下停留更长时间,难以快速沉降,从而在气流扰动下形成持续的粒子数波动现象。

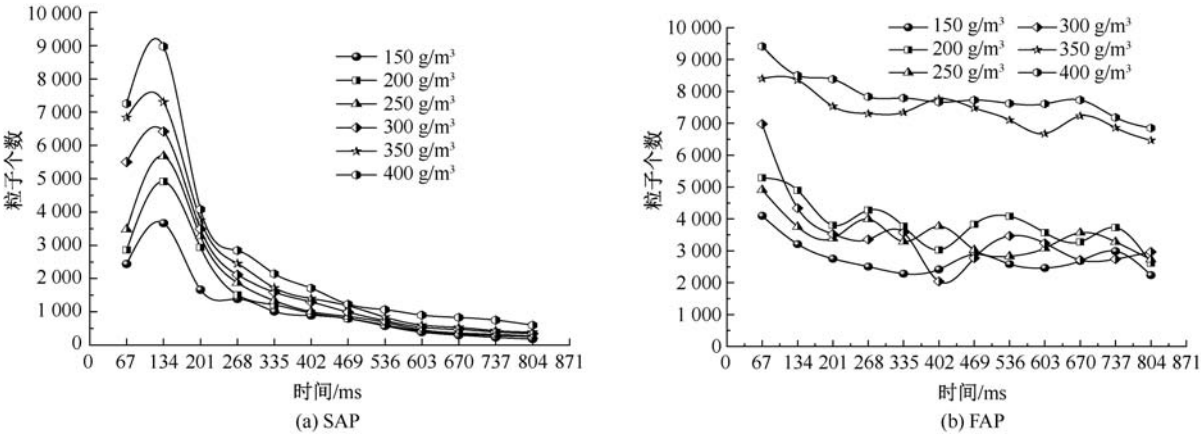


图 7 不同质量浓度下 SAP 和 FAP 尘云在关键点火区的粒子数量随时间演化特征
Fig. 7 Temporal variation of particle number in critical ignition zones for SAP and FAP dust clouds at varying mass concentrations

3.4 颗粒形貌对爆炸火焰传播特性的影响

图 8 和图 9 为 150~400 g/m³ 质量浓度范围内,SAP 和 FAP 尘云在竖直管道中的火焰传播图像。总体来看,2 种铝粉的火焰传播行为具有一定相似性,均可划分为 3 个阶段:①点火阶段,铝粉颗粒在

高压气流推动下进入管道形成尘云,并被电火花点燃,火焰沿轴向上下传播;②发展阶段,火焰逐渐扩展并贴附于管道两侧,同时稳定地向上推进;③加速扩张阶段,前期燃烧释放的高热量使上方未燃区域被预热,粉尘迅速点燃并剧烈燃烧,在管道限制下火

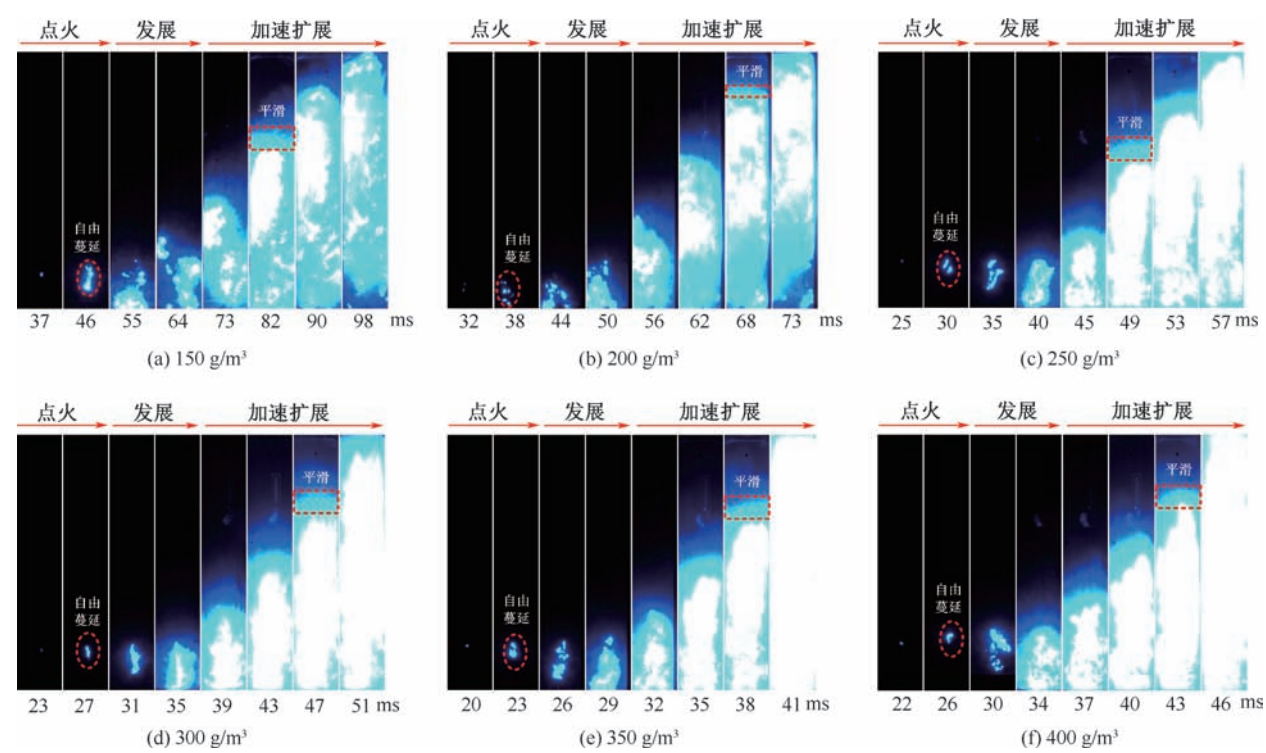


图 8 不同质量浓度下 SAP 尘云爆炸传播过程

Fig. 8 Propagation process of explosion flame in SAP dust clouds with varying mass concentrations

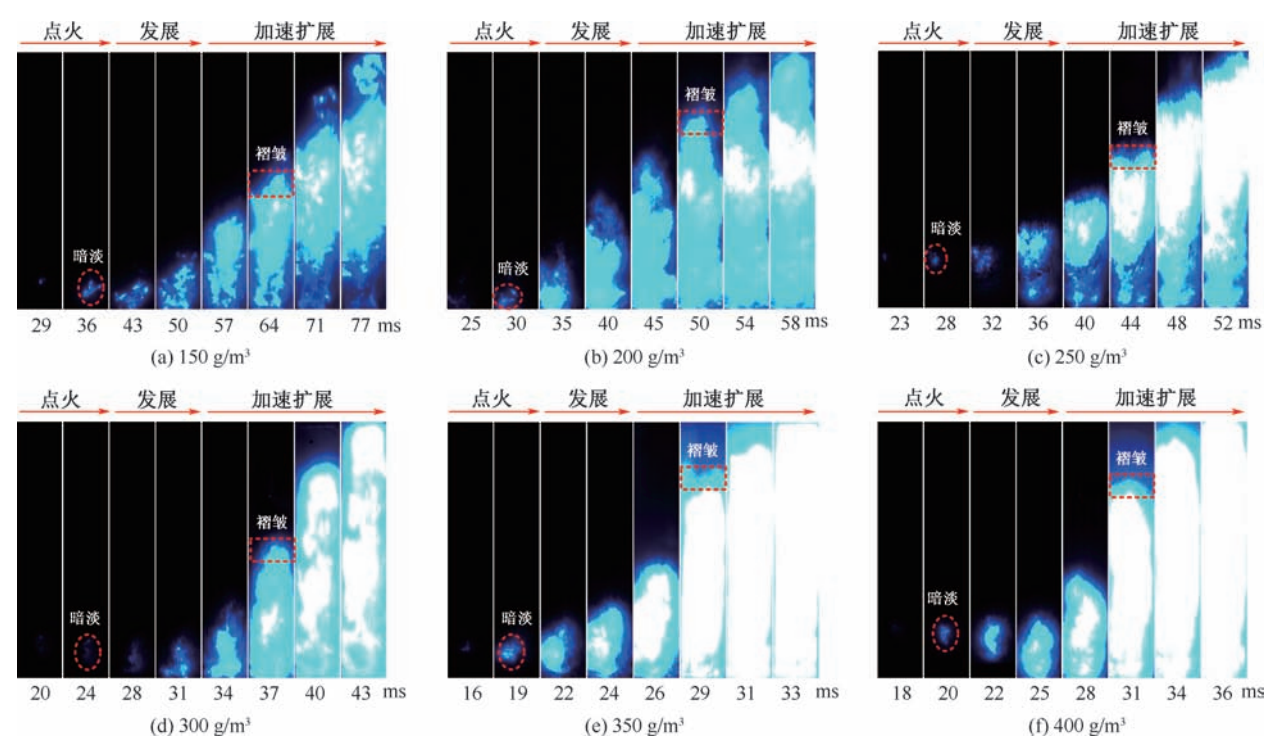


图 9 不同质量浓度下 FAP 尘云爆炸传播过程

Fig. 9 Propagation process of explosion flame in FAP dust clouds with varying mass concentrations

焰传播速度显著提升,并形成大面积高亮度的白色过曝区域。尽管火焰传播阶段相似,但二者在具体传播行为上存在明显差异。点火初期,SAP 火焰核亮度较高,呈自由蔓延态势,而 FAP 火焰核则相对

暗淡,表现为扩散型传播。在火焰向未燃区推进过程中,SAP 火焰前沿相对平滑;而 FAP 因其特殊几何结构易在气流中诱导局部涡旋,使得火焰前沿出现明显的褶皱结构。此外,在相同质量浓度条件下,

FAP 往往更易被引燃,火焰传播至管道顶部所需时间更短,这主要归因于其在点火区域内形成更高的局部质量浓度,以及较大的空气阻力系数延长了悬浮时间,从而增强了湍流与颗粒的相互作用,促进了火焰的加速传播。同时,片状颗粒由于壳层薄且易破裂,更容易暴露活性金属核心,缩短点火延迟并加快燃烧进程。

火焰到达管道顶端后的白色过曝区域面积占比见表 4。所有质量浓度条件下,SAP 的白色过曝区域面积均明显大于 FAP。这一现象归因于 SAP 颗粒在弥散过程中更易形成高质量浓度的团聚区域,团聚颗粒在燃烧时加速了铝粉的金属蒸气释放,提升了燃烧温度和热释放强度,增强了火焰的辐射能力,从而使高速摄影图像中呈现更大范围的白色过曝光区域。质量浓度为 350 g/m³ 时,SAP 和 FAP 均表现出最优的燃烧特性,点火时间分别为 20 和 16 ms,对应的白色过曝区域面积占比分别达 98.6%和 97.9%。这表明:350 g/m³ 时 2 种铝粉颗粒与空气之间形成了较为理想的混合状态,不仅提高了点火的敏感性,还强化了燃烧反应的连续性和强度,从而推动火焰迅速传播并释放大量能量。总体而言,颗粒形貌通过调制湍流与燃烧耦合机制,影响火焰传

播动力学和能量释放效率,进而调控 SAP 和 FAP 燃烧特性。

3.5 颗粒形貌对爆炸火焰速度的影响

图 10 为 150~400 g/m³ 质量浓度范围内 SAP 和 FAP 尘云的火焰传播速度变化趋势。可以看出,2 种铝粉的火焰传播速度均随质量浓度变化呈非线性趋势,但其演化阶段与峰值表现存在明显差异。SAP 的传播过程可分为缓慢增长阶段与加速阶段。初期火焰传播速度较低,但随着颗粒被引燃数量增加,大量热量被传递至预热区,使铝颗粒吸热、熔化、蒸发并释放大量金属蒸气,从而形成强烈的气相燃烧,推动火焰加速传播^[16]。SAP 质量浓度为 350 g/m³ 时,达到最大传播速度 33.2 m/s。尽管 SAP 在燃烧过程中易团聚形成局部高质量浓度区域,产生更剧烈的热释放和火焰辐射,但其沉降速度快、空间分布不均,火焰传播速度受到限制。FAP 的传播过程包括缓慢增长、加速、衰减 3 个阶段。在初期,由于颗粒尚未充分预热,火焰传播速度较缓;随着点火源周围颗粒数量增多,湍流扰动增强,火焰迅速加速扩展;进入后期,因氧气体积分数逐步降低,可燃混合物质量浓度下降,

表 4 火焰达到管道顶端后的白色过曝光区域占比

Table 4 Proportion of white overexposed areas when flame reaches pipe top

铝粉	粉尘云质量浓度/(g·m ⁻³)					
	150	200	250	300	350	400
SAP/%	27.9	39.2	79.8	83.3	98.6	95.9
FAP/%	8.9	29.6	45.7	61.5	97.9	94.5

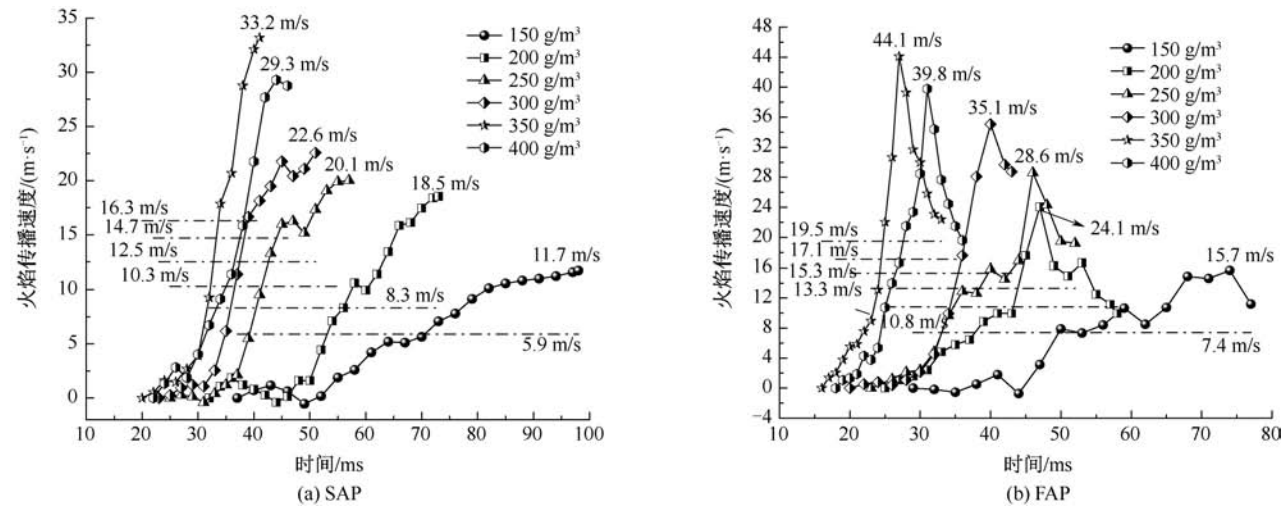


图 10 不同质量浓度 SAP 和 FAP 尘云的火焰传播速度随时间变化

Fig. 10 Flame propagation velocity with time for different mess concentrations of SAP and FAP dust clouds

火焰传播速度出现衰减^[17]。FAP 中存在更多的小粒径颗粒,具有更高的比表面积和气动阻力,在气流扰动下可长时间悬浮这一特性不仅提升了粉尘云的均匀性和反应区尺度,也增强了火焰的点火概率与传播速率。350 g/m³ 时,FAP 的火焰传播速度达到最大值 44.1 m/s,远高于 SAP。此外,所有质量浓度条件下,FAP 的最大火焰速度与平均速度均高于 SAP,反映出其更强的火焰扩展能力。

4 结 论

1) 颗粒形貌对瞬态弥散行为具有显著影响。FAP 因其比表面积大、气动阻力高,在竖直管道中展现出更强的滞空能力与空间分布均匀性,易形成稳定连续的悬浮云团;而 SAP 因颗粒间团聚效应,易形成局部高质量浓度区,导致弥散过程中空间分

布不均。

2) FAP 在弥散过程中的湍流扰动效应更显著。FAP 在 400 g/m³ 时速度矢量范围扩大至 -6.8 ~ 6.8 m/s,流场中产生更高的湍流强度和速度波动,增强了粉尘云与气流的相互作用。结合关键点火区域粒子数的动态演化分析,FAP 在点火阶段呈现更高的局部质量浓度,显著提升了点火敏感性与初始火焰发展速率。

3) 颗粒形貌通过改变弥散与湍流,进而影响燃烧过程,使火焰传播特性呈现显著差异。FAP 因悬浮稳定性与湍流扰动增强,促进了火焰前缘皱褶发展,在 350 g/m³ 条件下火焰传播速度达 44.1 m/s,较 SAP 提高 32.8%。而 SAP 因局部团聚导致热释放集中,白色过曝区域面积占比达 98.6%,辐射能量释放更为剧烈。

参 考 文 献

- [1] THIRUVENGADATHAN R, WANG Anqi. Nanoenergetic materials: from materials to applications[J]. *Nanomaterials*, 2024, 14(19): DOI: 10.3390/nano14191574.
- [2] 谢佩霓, 廖雪钦, 张文科, 等. 铝含量对 HTPB 推进剂点火燃烧特性的影响[J]. *火炸药学报*, 2025, 48(3): 238-245.
XIE Peini, LIAO Xueqin, ZHANG Wenke, et al. Effect of aluminum content on the ignition and combustion characteristics of HTPB propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2025, 48(3): 238-245.
- [3] 石永国, 贾波, 牟杰. 金属铝粉尘粒径特性参数对其爆炸后果影响机理研究[J]. *工业安全与环保*, 2025, 51(3): 25-29.
SHI Yongguo, JIA Bo, MU Jie. Research on mechanism of influence of particle size characteristic parameters of metal aluminum dust on its explosion consequences[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2025, 51(3): 25-29.
- [4] 张术琳, 严翔, 龙睿基, 等. 微米铝粉在氢气/水蒸气氛围下燃烧机制研究[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(增1): 196-202.
ZHANG Shulin, YAN Xiang, LONG Ruiji, et al. Study on combustion mechanism of micron-sized aluminum powder in hydrogen/water vapor atmosphere[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(S1): 196-202.
- [5] SERRANO J, RATKOVICH N, MUNOZ F, et al. Explosion severity behavior of micro/nano-sized aluminum dust in the 20 L sphere: influence of the particle size distribution (PSD) and nozzle geometry[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 152: 1-13.
- [6] CHANG P J, MOGI T, DOBASHI R. An investigation on the dust explosion of micron and nano scale aluminum particles[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 70: DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104437.
- [7] BU Yajie, ADDO A, AMYOTTE P, et al. Classification of dispersibility for combustible dust based on Hausner ratio[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2023, 81: DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104925.
- [8] DI SARLI V, DANZI E, MARMO L, et al. CFD simulation of turbulent flow field, feeding and dispersion of non-spherical dust particles in the standard 20 L sphere[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019, 62: DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103983.

[9] REDING N S, FARRELL T M, VERMA A, et al. Effect of particle morphology on metal dust deflagration sensitivity and severity[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021, 70: DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104396.

[10] SCHWEIZER C, MASHUGA C V, KULATILAKA W D. Investigation of aluminum dust cloud dispersion characteristics in an explosion hazard testing device using laser-based particle and flow diagnostics[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 166: 310–319.

[11] PRASAD S, SCHWEIZER C, BAGARIA P, et al. Effect of particle morphology on dust cloud dynamics[J]. Powder Technology, 2021, 379: 89–95.

[12] 关文玲, 金美华, 董呈杰. 形状系数对 20 L 球内铝粉分散特性的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(8): 120–127.

GUAN Wenling, JIN Meihua, DONG Chengjie. Study on effect of shape factor on dispersion characteristics of aluminum powder inside 20 L sphere[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(8): 120–127.

[13] CASTELLANOS D, BAGARIA P, MASHUGA C V. Effect of particle size polydispersity on dust cloud minimum ignition energy[J]. Powder Technology, 2020, 367: 782–787.

[14] WANG Shuyan, LU Huilin, SHEN Zhiheng, et al. Prediction of flow behavior of micro-particles in risers in the presence of van der Waals forces[J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 132(1/2/3): 137–149.

[15] DAHOE A, CANT R, SCARLETT B. On the decay of turbulence in the 20-liter explosion sphere[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2001, 67(3): 159–184.

[16] 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.

JIANG Haipeng. Suppression mechanism of Al dust explosion by solid suppressants[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.

[17] QIU Dongyang, CHEN Xianfeng, DONG Zhangqiang, et al. Application of microencapsulated fibrous carrier inhibitors in suppressing flake aluminum dust explosion: performance and mechanism[J]. Combustion and Flame, 2024, 261: DOI: 10.1016/j.combustflame.2024.113291.

作者简介： 邱东阳 （1997—）,男,湖南怀化人,博士研究生,研究方向为可燃粉尘爆炸防治等。E-mail: qdy@ whut. edu. cn。