

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.05.003

硬脂酸粉尘爆炸过程中火焰传播试验及数值模拟^{*}

刘静平^{①②} 赵金刚^① 潘峰^{①②} 秋珊珊^{①②}

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②国家民用爆破器材质量监督检验中心(江苏南京,210094)

[摘 要] 采用试验和数值模拟相结合的方法研究了硬脂酸粉尘火焰在上端开口的圆柱形垂直燃烧管道的传播过程。试验利用高速摄影系统和红外热成像仪记录了火焰的传播过程和温度分布情况,结果表明:火焰传播速度和火焰温度均呈现先增大后减小的趋势。采用 Fluent 软件计算得到的模拟结果与试验值吻合较好,模拟结果揭示了硬脂酸粉尘爆炸过程中气流速度的变化情况,分析结果表明:在同一时刻,气流速度高于粉尘火焰传播速度,是造成粉尘二次扬尘,进而产生持续爆炸的重要因素之一。

[关键词] 硬脂酸粉尘爆炸;火焰传播;火焰温度;数值模拟;气流速度

[分类号] X932;O381

引言

随着现代工业的高速发展,超细粉尘颗粒在各行各业中的应用越来越广泛,也导致众多行业发生粉尘爆炸的可能性急剧上升。2014 年 4 月 16 日,江苏如皋市某化工企业发生硬脂酸粉尘爆炸;2014 年 8 月 2 日,江苏昆山市某汽车轮毂抛光企业发生金属粉尘爆炸;2015 年 6 月 27 日,台湾新北市八里派对活动中发生粉尘爆炸。这些事故均造成了大量的生命和财产损失。因此,对粉尘爆炸现象的研究和控制就显得十分必要。

火焰传播是粉尘爆炸过程研究的重要参数之一,国内外学者对粉尘爆炸过程中的火焰传播过程进行了大量的试验研究。Gao 等^[1-3]利用高速摄影技术对常见多元醇类同系物粉尘的火焰传播以及粒径对火焰的影响进行了研究,结果表明:随着粒径的逐渐减小,存在一个临界点,使得粉尘燃烧过程中的火焰由连续传播变为离散传播现象;曹卫国等^[4-6]通过将微观机理和宏观试验相结合的方法对煤粉的火焰传播过程进行了大量的研究,结果表明:煤粉的点燃过程与煤粉中的官能团变化以及煤粉中挥发分的含量有着重要的联系;Proust、Amyotte、孙金华、闫兴清等国内外学者^[7-10]对粉尘爆炸的燃烧过程也进行了大量的试验。以上工作主要基于粉尘爆炸过程中火焰传播规律的试验研究,然而,由于粉尘爆炸通常是一种发生在复杂环境中的物理化学现象,单纯依

靠试验研究很难捕捉到直接证据。为了从机理上解决问题,采用试验和数值模拟相结合的技术来探讨粉尘爆炸机理成为近年来的研究热点。

本文中,选取江苏如皋市某企业粉尘爆炸的原料硬脂酸作为研究对象,采用试验和数值模拟相结合的方法,研究了在垂直燃烧管道中粉尘爆炸过程中的火焰传播行为,并将数值模拟结果与试验数据进行对比,以期在生产此类有机物粉尘的企业提供有价值的信息。

1 试验装置与材料

1.1 试验装置

试验装置主要部分为垂直燃烧管、高压喷粉系统、点火系统、高速摄影装置、红外热成像装置和控制系统(图 1)。燃烧管是一个内径 68 mm、高 300 mm 的上端开口的半封闭圆柱形玻璃管^[11]。利用高压喷粉系统将均匀铺放在燃烧管底部的硬脂酸粉尘喷起,点火位置距燃烧管底部 100 mm,点火电极间距 6 mm,充电电压 8 kV,点火能量 100 mJ。

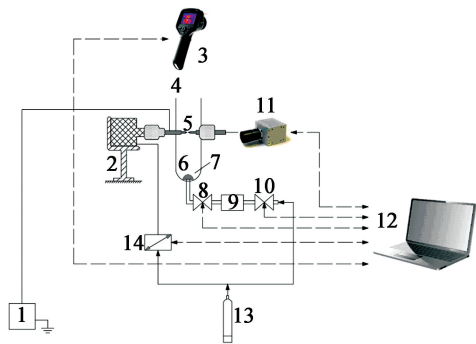
试验之前,通过高速摄影对不同点火延时条件下的粉尘云上升高度进行了分析。结果显示,当粉尘质量为 0.6 g、点火延时为 70 ms 时,粉尘云整体上升高度为 300 mm,恰好充满整个燃烧管,可认为此时的粉尘云在管内达到了均匀分布。由此,为了保证每次点火时粉尘平均浓度的一致性和减少喷粉结束后残留的湍流强度对火焰传播过程的影响,选

* 收稿日期:2016-04-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51472119);江苏高校优势学科建设工程二期项目[苏政办发(2004)37号]

作者简介:刘静平(1974-),女,博士研究生,工程师,主要从事工业炸药的分析以及粉尘爆炸等方面的研究。E-mail:liu-jingping@163.com

通信作者:秋珊珊(1981-),女,博士,工程师,主要从事粉尘爆炸以及危险化学品分类方面的研究。E-mail:ppshanshanqiu@126.com



1 - 能量存储器; 2 - 气动活塞; 3 - 红外热成像仪;
4 - 竖直燃烧管; 5 - 电极; 6 - 粉尘分散系统; 7 - 盛
粉室; 8 - 阀门; 9 - 储气室; 10 - 阀门; 11 - 高速摄影
仪; 12 - 控制系统; 13 - 高压空气; 14 - 活塞驱动阀。

图 1 粉尘云火焰传播测试装置示意图

Fig. 1 Experimental apparatus for flame
propagation of the dust cloud

用如下试验条件:当粉尘云恰好上升 300 mm 时,用电火花将其点燃,同时启动与点火系统同步进行的高速摄影和红外热成像装置,实时记录火焰在管道内的传播过程及温度分布情况。

1.2 试验材料

硬脂酸的粒径分布如图 2 所示。可以看出,硬脂酸粉尘的中位径约为 28 μm 。

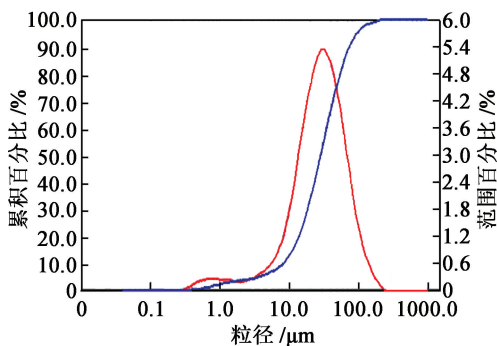


图 2 硬脂酸的粒径分布

Fig. 2 Particle diameter distribution of stearic acid

2 数学模型的建立

2.1 基本控制方程组

基于 CFD (computational fluid dynamics, 计算流体力学) 技术,采用 Fluent 软件对硬脂酸粉尘爆炸过程进行数值模拟研究。模拟过程中,假设硬脂酸粉尘为球形颗粒,以化学反应动力学和流体力学为基础,依据质量守恒、能量守恒、动量守恒和化学反应平衡建立控制方程组,主要方程如下所示^[12-13]。

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j h - \frac{\mu_e}{\sigma_h} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = \frac{dp}{dt} + S_h; \quad (2)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i u_j - \mu_e \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_e \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\delta_{ij} \left(\rho k + \mu_e \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right]; \quad (3)$$

化学反应平衡方程

$$\frac{\partial (\rho Y_{fu})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j Y_{fu} - \frac{\mu_e}{\sigma_{fu}} \frac{\partial Y_{fu}}{\partial x_j} \right) = R_{fu}. \quad (4)$$

式中: p 为压力; t 为时间; ρ 为密度; Y_{fu} 为燃料化学反应速率; u 为速度; μ 为动力黏度; k 为湍流动能; x 为位移; h 为高度; σ 为表面力; δ 为横截面积; e 为内能; R_{fu} 为化学反应率。

2.2 湍流模型

硬脂酸粉尘在燃烧过程中的燃烧速率、气流流动之间是相互耦合、相互促进的(图 3)。

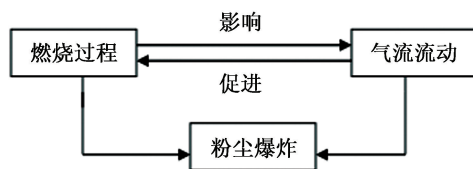


图 3 粉尘的燃烧过程与气流的相互关系

Fig. 3 Correlation between combustion
process of dust and airflow

选取适用于较多工程数据积累且计算精度合适的标准 k - ε 模型作为湍流计算模型,公式如下^[14-15]:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M; \quad (5)$$

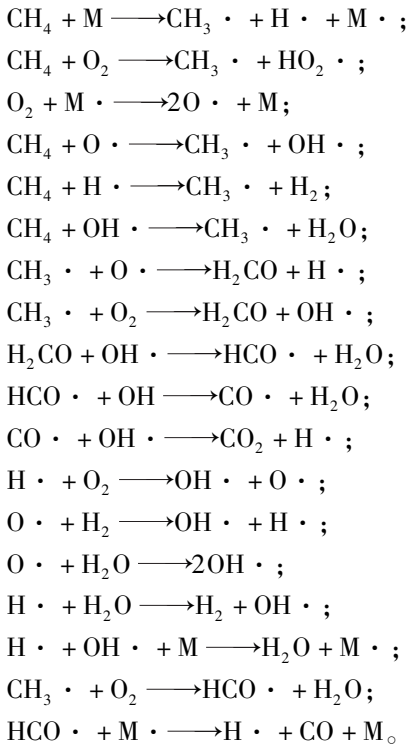
$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{u_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (6)$$

式中: k 指湍流脉动动能; ε 指湍流脉动动能耗散率; dk/dt 为 k 随 t 的变化率; $d\varepsilon/dt$ 为 ε 随 t 的变化率; G_k 是由平均速度梯度引起的湍动能; G_b 是由浮力影响引起的湍动能; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响; μ_t 为湍流黏性系数; ρ 表示密度; t 表示时间; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 是默认值常数; k 与 ε 的湍流普朗特数分别为 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

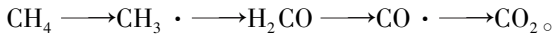
2.3 燃烧模型

硬脂酸在初始燃烧阶段受热分解会产生大量的小分子有机物,如甲烷、乙烯等。以甲烷为例,甲烷

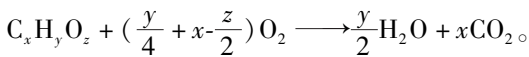
燃烧主要包括链的引发、链的传递、链的终止等阶段^[16],其主要特点是在反应过程中单个自由基可以生成两个或更多的自由基,完整的反应为:



上述反应链表明,甲烷在高温环境中发生氧化反应的进程一般为:



为合理简化,硬脂酸粉尘的整个燃烧过程中的数值模拟采用一步不可逆反应:



常用的适用于燃烧过程的模型主要有层流有限速率模型与涡旋耗散(EBU)模型。考虑到湍流在整个硬脂酸粉尘燃烧过程中的作用,选用 EBU 模型进行描述。EBU 模型方程如式(7)所示^[17-18]。

$$R_{fu,T} = -\frac{C_R \rho g_{fu}^{\frac{1}{2}} \varepsilon}{k}. \quad (7)$$

式中: k 为湍动能; ε 为湍动能耗散率; $R_{fu,T}$ 为湍流燃烧速率; C_R 为常数; $g_{fu}^{1/2}$ 为燃料质量分数的脉动均方根; ρ 为密度。

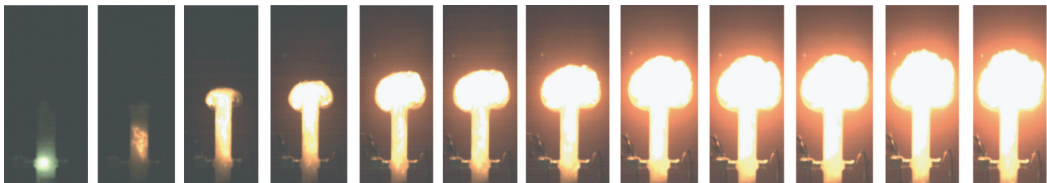


图5 硬脂酸粉尘云火焰传播高速摄影图

Fig. 5 High-speed photographs of flame propagation of stearic acid dust cloud

2.4 计算模型

假设硬脂酸颗粒为规则球体,选取粒径为 28 μm 的硬脂酸粉尘作为模拟对象,计算网格图如图 4 所示。计算模型包括两个部分,分别为竖直燃烧管和燃烧管上方外部流场计算域。竖直燃烧管的内径为 68 mm、管长为 300 mm;为了对管外的火焰变化进行仿真,在管外部建立直径 300 mm、高 360 mm 的圆柱体计算域。管壁为无滑移壁面边界条件,由于整个燃烧时间较短,假定该过程与外界无热交换、热对流等,整个燃烧过程固定在边界网格之内,管上端的大圆柱体与外界大气连通。以 Fluent 软件中自带的涡旋耗散燃烧模型为基础,设定点火能量为 100 mJ,对硬脂酸燃烧过程进行三维数值模拟。

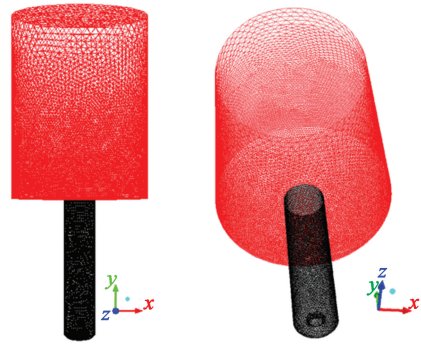


图4 不同视角下的计算网格图

Fig. 4 Computational grid graph at different perspectives

3 结果与讨论

3.1 火焰传播过程

图 5 显示了采用高速摄影装置记录的硬脂酸粉尘云火焰在燃烧管中的传播过程。硬脂酸颗粒被点燃后,初始阶段火焰传播速度迅速上升至最高,此阶段为火焰快速加速阶段,随着反应的进行,火焰传播速度逐渐减小。

由图 6 可以看出数值模拟过程中不同时刻计算域火焰面发展情况。模拟计算区域包括垂直燃烧管和管口外部流场区域,在初始时刻,火焰从点燃位置向四周缓慢发展,火焰锋面形状近似为球形,随着爆炸的发展,火焰从管口喷射到周围环境中。

3.2 火焰传播特征分析

图 7 为试验和模拟条件下,硬脂酸粉尘云燃烧过程的火焰前锋阵面高度 h 和火焰传播速度 v 随时间变化的关系图。火焰前锋阵面高度逐渐上升,点火 110 ms 后,火焰前锋面分别上升至 605 mm 和 632 mm,试验和模拟值的最大误差在 5% 以内。试验和模拟条件下,火焰传播速度整体上都呈现先增大后减小的趋势,且硬脂酸粉尘云火焰在 15 ms 后达到最大值,分别为 11.9 m/s 和 12.4 m/s,这主要是因为点火端封闭时,燃烧产物的膨胀作用使得火焰传播速度逐渐加快,随着火焰传播到燃烧管口,由于上端口属于开放空间,燃烧管对火焰失去了约束作用,燃烧管口处的未燃颗粒泄放,导致火焰速度逐渐降低。此外,图 7(a) 还显示,在试验过程中,随着燃烧过程的持续,火焰传播速度呈现振荡传播,在点火后 65 ms,火焰传播速度达到最小值 0.5 m/s,之后火焰传播速度又有小幅上升,并在 95 ms 达到一

个极大值 3.0 m/s 后,火焰传播速度再次下降。其主要原因在于无约束条件下,燃烧颗粒的存在导致热辐射和热传递之间的不匹配^[6]。模拟条件下火焰传播速度始终高于试验值,且火焰传播速度在 65 ms 后也未出现图 7(a) 中出现的小幅度振荡,这与模拟结果基于理想条件,未能完全考虑粉尘实际燃烧过程中复杂的两相流过程有关。

图 8 是粉尘云火焰在燃烧管管口中心处的最高温度随时间变化的关系图。可以看出,燃烧过程中火焰温度和火焰传播速度具有相似的规律,即火焰温度呈现先上升后下降的趋势,且火焰温度的模拟值均略高于试验值,粉尘云的火焰温度在点火 60 ms 后达到最大值,相对于火焰传播速度达到最大值时所需的时间 15 ms 要滞后。最高温度点的试验和模拟值分别为 1 152 ℃ 和 1 208 ℃ (相对误差小于 5%),这主要是由于粉尘云燃烧的环境温度较低,燃烧产生的热量要用来加热周围的环境温度,而且

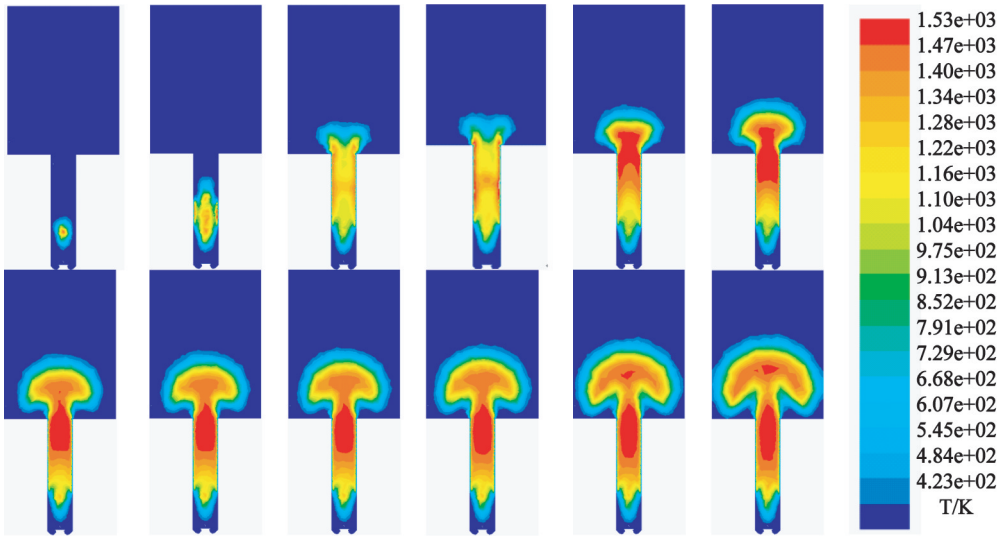


图 6 硬脂酸粉尘云火焰传播模拟图

Fig. 6 Simulation photographs offlame propagation of stearic acid dust cloud

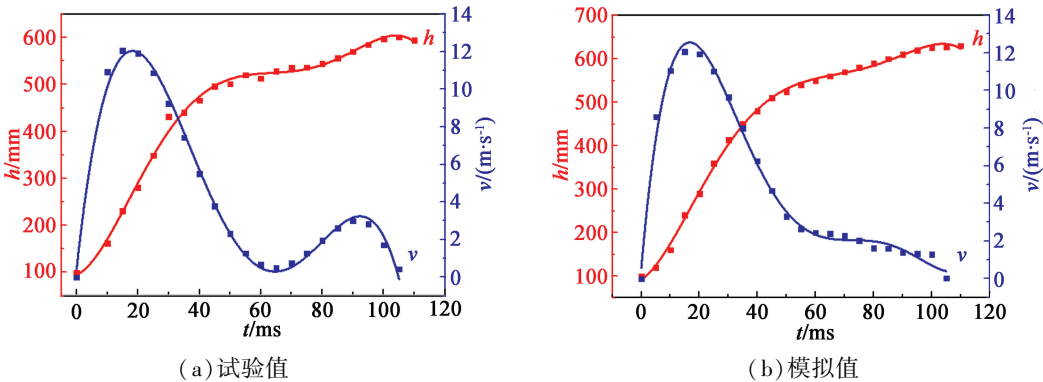


图 7 硬脂酸粉尘燃烧的火焰前锋阵面高度和火焰传播速度

Fig. 7 Flame front position and flame propagation velocity in combustion of stearic acid dust

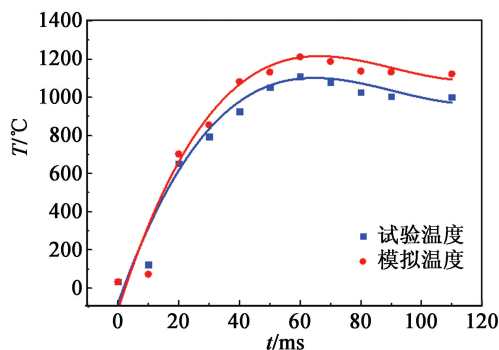


图8 燃烧管管口中心处最高火焰温度的变化

Fig. 8 The highest flame temperature in the center of combustion tube mouth

整个燃烧过程中还与周围空气存在着热交换,火焰温度的上升需要一定时间。

3.3 火焰传播过程中的气流分析

通过模拟,还得到了粉尘云燃烧过程中周围气流的最大流动速度 v_{\max} (图9),而这个结果在试验中是很难直接测得的。

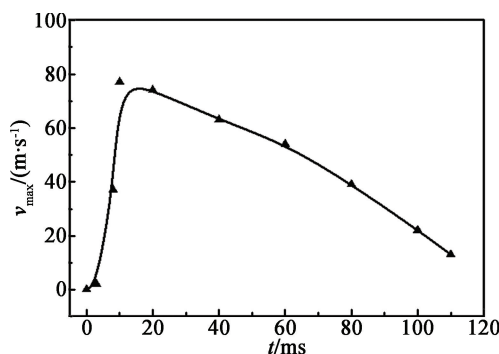


图9 最大气流速度随时间的变化趋势

Fig. 9 Varying trend of the highest airflow velocity with time

由图9可以看出,点火后10 ms,气流速度达到最大值78 m/s;之后,气流的速度逐渐减低。可能是由于管内左右侧以及底部为壁面,对气流传播有加速作用,因此,气流速度上升较快;点火后10 ms,气流开始逸出燃烧管管口向四周扩散,造成气流速度降低,火焰在管外部形成了典型的蘑菇云形状(图5和图6);随着燃烧反应的进行,蘑菇云火焰进一步扩大,此时硬脂酸粉尘进一步燃烧;此后,由于燃料浓度逐渐降低,气流速度也相应地不断衰减。

此外,对比图7(a)和图9可知,在同一时刻,气流的速度均高于同一时刻的火焰传播速度。由此可以看出,气体的流动是形成粉尘爆炸的一个重要因素,粉尘初始燃烧过程中产生的气流会使周围粉尘层扬起,在新的空间内形成有效浓度的粉尘云;而飞散的火花和辐射热可提供点火源,形成连锁爆炸,最

终导致粉尘存在的整个场所受到爆炸破坏。

4 结论

采用竖直燃烧管进行试验,并对其进行了数值模拟研究,揭示了硬脂酸粉尘爆炸过程的火焰面上升阶段的传播规律,结果如下:

1)采用标准 $k-\varepsilon$ 模型较好地重现硬脂酸粉尘火焰传播速度和火焰温度的变化规律。试验和模拟结果均表明,随着燃烧过程的进行,粉尘云的火焰传播速度和火焰温度均呈现先增大后减小的趋势。硬脂酸粉尘云火焰在15 ms后达到最大值,试验和模拟值分别为11.9 m/s和12.4 m/s。试验结果表明,粉尘云火焰的传播速度存在振荡现象;火焰温度达到最高所需时间(60 ms)明显滞后于火焰传播速度达到最大值时所需时间(15 ms),粉尘云的火焰温度在点火60 ms后达到最大值,试验和模拟值分别为1152 °C和1208 °C(相对误差小于5%)。

2)模拟结果揭示了在试验过程中很难直接测得的粉尘火焰传播过程中气流速度的变化规律,即在同一时刻,气流的流动速度明显高于火焰传播速度。这说明气体流动是造成粉尘层扬尘,进而使粉尘产生持续爆炸的一个重要原因。因此,在硬脂酸的生产过程中,应该时刻注意生产车间或厂房的粉尘堆积情况,及时清理粉尘,使得车间内的粉尘量达到最低程度,这样就切断了粉尘连锁爆炸的条件,使得企业生产能够更加安全。

参考文献

- [1] GAO W, DOBASHI R, MOGI T, et al. Effects of particle characteristics on flame propagation behavior during organic dust explosions in a half-closed chamber [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25(6): 993-999.
- [2] GAO W, MOGI T, Sun J H, et al. Effects of particle thermal characteristics on flame structures during dust explosions of three long-chain monobasic alcohols in an open-space chamber [J]. Fuel, 2013, 113: 86-96.
- [3] GAO W, MOGI T, Sun J H, et al. Effects of particle size distributions on flame propagation mechanism during octadecanol dust explosions [J]. Powder Technology, 2013, 249: 168-174.
- [4] CAO W G, CAO W, PENG Y H, et al. Experimental study on the combustion sensitivity parameters and pre-combusted changes in functional groups of lignite coal dust [J]. Powder Technology, 2015, 283: 512-518.
- [5] CAO W G, GAO W, LIANG J Y, et al. Flame-propagation behavior and a dynamic model for the thermal-radiation effects in coal-dust explosions [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,

- 2014, 29: 65-71.
- [6] 曹卫国, 徐森, 梁济元, 等. 煤粉尘爆炸过程中火焰的传播特性 [J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(5): 586-593.
CAO W G, XU S, LIANG J Y, et al. Characteristics of flame propagation during coal dust cloud explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(5): 586-593.
- [7] AMYOTTE P R, PEGG M J, KHAN F I. Application of inherent safety principles to dust explosion prevention and mitigation [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2009, 87(1): 35-39.
- [8] PROUST C. A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(2/3): 104-120.
- [9] SUN J H, RITSU D, TOSHISUKE H. Velocity and number density profiles of particles across upward and downward flame propagating through iron particle clouds [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(2/3): 135-141.
- [10] YAN X Q, YU J L. Dust explosion venting of small vessels at the elevated static activation overpressure [J]. Powder Technology, 2014, 261: 250-256.
- [11] 曹卫国, 郑俊杰, 彭于怀, 等. 玉米淀粉粉尘爆炸特性及火焰传播过程的试验研究 [J]. 爆破器材, 2016, 45(1): 1-6.
CAO W G, ZHENG J J, PENG Y H, et al. Experimental study on explosion characteristics and flame propagation process of corn starch dust [J]. Explosive Materials, 2016, 45(1): 1-6.
- [12] 周力行. 燃烧理论和化学流体力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [13] 杨宏伟, 范宝春, 李鸿志. 障碍物和管壁导致火焰加速的三维数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(4): 259-264.
YANG H W, FAN B C, LI H Z. Numerical investigation on three-dimensional flame acceleration induced by an obstacle and tube internal walls [J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(4): 259-264.
- [14] 陈翠梧, 苏亚欣. 高温空气燃烧的模型比较数值研究 [J]. 工业加热, 2010, 39(3): 11-14.
CHEN C W, SU Y X. A numerical comparison of the combustion model for high temperature air combustion [J]. Industrial Heating, 2010, 39(3): 11-14.
- [15] 张晓东, 张培林, 傅建平, 等. $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型对制退机内流场计算的适用性分析 [J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(5): 516-520.
ZHANG X D, ZHANG P L, FU J P, et al. Applicability analysis of $k-\varepsilon$ turbulence models on numerical simulation of internal flow field of recoil brake [J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(5): 516-520.
- [16] 董冰岩, 彭旭. 柱形压力容器开口泄爆过程数值模拟研究 [J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(11): 29-34.
DONG B Y, PENG X. Numerical simulation on venting explosion process of flammable gas in closed cylindrical vessel [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(11): 29-34.
- [17] 章诚, 叶桃红, 陈义良, 等. 三维加力燃烧室两相湍流燃烧的数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2000, 15(4): 397-400.
ZHANG C, YE T H, CHEN Y L, et al. Numerical simulation of two-phase turbulent combustion in a 3-D afterburner [J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(4): 397-400.
- [18] 常峰, 索建秦, 梁红侠, 等. EBU 和 PDF 模型在燃烧室上的应用 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12(15): 3699-3702.
CHANG F, SUO J Q, LIANG H X. The application of the PDF and EBU models using in combustor's development [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(15): 3699-3702.

Experiment and Numerical Simulation on Flame Propagation in Stearic Acid Dust Explosion

LIU Jingping^{①②}, ZHAO Jin'gang^①, PAN Feng^{①②}, QIU Shanshan^{①②}

①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②National Quality Supervision and Inspection Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] Flame propagation behavior of stearic acid dust explosion in semi-enclosed vertical combustion tube was studied by experiment and numerical simulation. The results were recorded by a high speed video camera and a thermal infrared imaging device, from which it is observed that the flame propagation velocity and flame temperature both increased at first and then decreased. Simulation results obtained by Fluent software show a good agreement with test results. Simulation results also indicate that flow velocity is higher than flame propagation velocity during the combustion process, which is the main reason for secondary dust formation and successive explosion.

[KEYWORDS] stearic acid dust explosion; flame propagation; flame temperature; numerical simulation; flow velocity