

文章编号: 1000-5773(2006)02-0157-06

燃烧管内悬浮铝粉燃烧爆炸过程的研究*

陈志华, 范宝春, 李鸿志

(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏南京 210094)

摘要: 铝粉的燃烧与加速机理一直是相关部门研究的热点。为了深入研究其在受限空间内的燃烧与传播特性, 基于双流体模型、湍流 $k-\epsilon$ 模型以及铝粉燃烧等模型, 选用 SIMPLE 格式, 对大型卧式燃烧管内铝粉颗粒与空气的两相悬浮流湍流燃烧加速转爆炸现象进行了数值研究, 得到了铝粉火焰在管内的燃烧传播过程中管内各相关参数的详细变化情况, 并与相关的实验结果吻合。

关键词: 铝粉; 湍流燃烧; 数值模拟; 爆炸

中图分类号: O381; O347 **文献标识码:** A

1 引 言

20 世纪 60 年代以来, 铝粉因其特殊的工业与军事应用背景, 对其燃烧与爆炸性能的研究一直受到密切关注。其中具有代表性的工作主要有 Friedman^[1] 对不同氧浓度热气体中的铝粉颗粒的点火与燃烧进行了大量实验, 发现只有当覆盖在铝粉表面的氧化物溶解后, 铝粉才能点火燃烧, 且燃烧剧烈程度与氧浓度有关。随后, Prentice, Dreizin 也进行了相关的研究^[2-4]。Ogle^[5] 则提出了单个铝粉颗粒的燃烧模型。对铝粉火焰传播方面的研究则始于 Cassel^[6], 他设计制造了一套特殊的燃烧设备来测试金属粉尘火焰的传播, 随后, Ballal^[7]、Alekseev^[8] 等对包括铝粉在内的多种金属粉尘云浓度与其火焰传播速度的关系进行了测试。Goroshin^[9] 等则对铝粉尘云中层流火焰的淬熄距离进行了测量。然而尽管对铝粉燃烧进行了广泛的应用研究, 但对其火焰传播的基本机理却知之甚少。这主要是由于在实验研究上的困难引起, 其中主要有怎样在实验装置中较长时段内保持均匀的铝粉粉尘悬浮流^[9] 等。作者曾利用自行设计的多套喷粉与喷雾系统, 采取对各喷射装置按火焰传播方向进行顺延触发的方法, 保证管内未燃端粉尘与雾粒悬浮流在火焰阵面到来之前有良好的悬浮状态, 使火焰可在管内连续传播。并分别对管内铝粉与戊烷悬浮流在弱点火条件下的燃烧传播进行了实验, 测得了铝粉火焰在管内加速传播的总过程^[10-11], 并通过数值模拟分别对均相与两相流在管内的燃烧加速机理进行了探讨^[12-13]。

本工作在文献^[10-11, 13]的基础上, 通过双流体等模型, 对大型卧式燃烧管内铝粉悬浮流在弱点火条件下燃烧转爆炸过程进行了模拟, 数值结果与先前实验结果基本相符, 并且更详细地揭示了铝粉粉尘在管内的燃烧传播过程中、管内燃烧加速传播与两相各参数的详细变化过程。

2 数学模型

基于双流体模型和湍流 $k-\epsilon$ 模型, 两相湍流燃烧流动可以用以下守恒方程描述。对于气相

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \varphi - \Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) = S_\varphi \quad (1)$$

* 收稿日期: 2004-11-29; 修回日期: 2005-04-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(19832030); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

作者简介: 陈志华(1967—), 男, 双博士, 教授, 主要研究方向为计算燃烧学、流体力学等。E-mail: zhchen@mail.njust.edu.cn

式中:

$$\varphi = \begin{bmatrix} 1 \\ u_i \\ T \\ Y_s \\ k \\ \varepsilon \end{bmatrix}; \quad \Gamma_\varphi = \begin{bmatrix} 0 \\ \mu_e \\ \mu_e/\sigma_T \\ \mu_e/\sigma_Y \\ \mu_e/\sigma_k \\ \mu_e/\sigma_\varepsilon \end{bmatrix}; \quad S_\varphi = \begin{bmatrix} S \\ \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_e \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + u_i S + \rho_p f(u_{pi} - u_i)/\tau_r \\ n_p(\beta Q_c - q_r + Q_p) + c_p TS \\ \beta_s R_{fu} + \alpha_s S \\ G - \rho \varepsilon \\ k(c_1 G - c_2 \rho \varepsilon)/\varepsilon \end{bmatrix};$$

$\mu_e = \mu + \mu_T$; $\mu_T = C_\mu \rho k^2/\varepsilon$; $S = -n_p \dot{m}_p$; $\dot{m}_p = dm_p/dt$; $\tau_r = d_{p0}^2/\rho_p/18\mu$; $\beta = 1 - (d_p/d_{p0})^3(1 - T_p/T)$;
 $f = 1 + 0.15R_{ep}^{2/3}$; $R_{ep} = \rho |u - u_p| d_p/\mu$.

湍流生成率 G 由三部分组成:第一部分 $G_R = 2Sk$, 为因燃烧引起的颗粒与气相之间的传质;第二部分 $G_k = \mu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$ 涉及剪切流;最后一部分 $G_p = \sum \frac{\rho_p}{\tau_r} \left[(c_k \sqrt{kk_p} - 2k) - \frac{u_{pi} - u_i}{n_p} \frac{\nu_p}{\sigma_p} \frac{\partial n_p}{\partial x_i} \right]$ 为颗粒相湍流与气相湍流的相互作用。 n_p 和 m_p 分别是颗粒相数密度和颗粒质量。

对于颗粒相

$$\frac{\partial(n_p \varphi_p)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (n_p u_{pj} \varphi_p - \Gamma_{\varphi p} \frac{\partial \varphi_p}{\partial x_j}) = S_{\varphi p} \quad (2)$$

式中:

$$\varphi_p = \begin{bmatrix} 1 \\ m_p \\ u_{pi} \\ T_p \end{bmatrix}; \quad \Gamma_{\varphi p} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ n_p \nu_p \\ n_p \nu_p / \sigma_p \end{bmatrix}$$

$$S_{\varphi p} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_p}{\sigma_p} \frac{\partial n_p}{\partial x_j} \right) \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{m_p \nu_p}{\sigma_p} \frac{\partial n_p}{\partial x_j} \right) + n_p \dot{m}_p \\ (u_i - u_{pi}) \left(\frac{f}{\tau_r} + \frac{\dot{m}_p}{m_p} \right) n_p + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[n_p \nu_p \left(\frac{\partial u_{pi}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{pj}}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\nu_p}{\sigma_p} \left(u_{pj} \frac{\partial n_p}{\partial x_i} + u_{pi} \frac{\partial n_p}{\partial x_j} \right) \\ n_p \frac{m_p(1-\beta)Q_c - Q_p + (c_{pp}T - c_p T_p) \dot{m}_p}{m_p c_p} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_p}{\sigma_p} \frac{\partial n_p T_p}{\partial x_j} \right) \end{bmatrix}$$

式中: c_p 和 c_{pp} 分别为气相定压比热与颗粒相比热。

颗粒湍流粘性 ν_p 的值可采用 Hinze-Tchen 模型,有以下表达式

$$\frac{\nu_p}{\nu_T} = \left(\frac{k_p}{k} \right)^{1/2} = \left(1 + \frac{\tau_r}{\tau_T} \right)^{-1}$$

式中: $\nu_T = \mu_T/\rho$, $\tau_T = \sqrt{3/2} C_\mu^{3/4} k/\varepsilon$ 。

单个颗粒和气相之间的对流传热为

$$Q_p = \frac{\pi d_p^2}{4} h_t (T_p - T_f)$$

式中: h_t 为平均对流膜层散热系数, T_f 为对流膜层的温度。颗粒的辐射传热可由 Stefan-Boltzmann 定律计算

$$q_r = \frac{\pi d_p^2}{4} \tilde{\varepsilon} \sigma T_p^4$$

式中: $\tilde{\varepsilon}$ 为发射率,对于铝粉 $\tilde{\varepsilon} = 0.4$ 。而 σ 为 Boltzmann 常数。

对铝粉燃烧可基于以下假设:(1) 铝粉颗粒表面的氧化薄膜由于燃烧过程中的热膨胀和铝滴的变形等原因造成破裂,因而不阻碍铝粉燃烧;(2) 铝液滴通过一系列连续或平行的均相和非均相反应生成铝的氧化物,且只有一个在铝滴表面的非均相反应是非平衡的。则总反应速率可写成质量分数的 Arrhenius 形式^[14]

$$R_{fu,A} = -\alpha S_{Al} A \exp(-E/RT) \rho_m^{3/2} Y_{Al} Y_{O_2}^{1/2}$$

式中: S_{Al} 为单位体积内的铝粒表面积。对于铝粉燃烧有以下参数: 点火温度 $T_{ig} = 1350$ K, 其氧化物融化温度 $T_{Al_2O_3} = 3350$ K^[15], 密度 $\bar{\rho}_{Al} = 2.7 \times 10^3$ kg/m³, 比热 $c = 987$ J/(kg · K), 燃烧热 $Q_c = 3.7$ MJ/kg, 活化能 $E = 82$ MJ/mol, 指数因子 $A = 3.8 \times 10^5$ (m³/kg)^{1/2}/s。

湍流脉动机制所控制的燃烧速率为

$$R_{fu,T} = C_{EBU} \rho \frac{\epsilon}{k} \min(Y_{Al}, Y_{O_2}, Y_{Al_3O_2}) \quad (3)$$

根据 EBU-Arrhenius 燃烧模型, 数值计算中的管内铝粉燃烧速率由下式决定

$$R_{fu} = -\min(|R_{fu,A}|, |R_{fu,T}|) \quad (4)$$

3 计算方法

上述守恒方程(1)式和(2)式具有统一形式, 可选用 SIMPLE 格式来进行求解。但对颗粒相, 因忽略颗粒相热运动对压力的贡献, 其连续方程与动量方程不像均相(气相)一样含有压力梯度项, 因而不像 SIMPLE 格式那样需推导压力修正方程, 它们可以在离散后直接用 TDMA 法求解。其求解过程如下:

- (1) 预估气相与颗粒相场;
- (2) 用 SIMPLE 算法求解无颗粒的气相各方程, 达到粗收敛;
- (3) 由以上气相流场解颗粒相流场, 求出颗粒数密度与速度, 达到粗收敛;
- (4) 求解颗粒相其它参数;
- (5) 计算气相各方程中颗粒作用源项;
- (6) 求解含有颗粒作用项的气相方程组, 若不收敛, 返回到第 4 步, 直至求得收敛解。

另外, 由于壁面附近由于湍流 Reynolds 数很低, 必须考虑分子粘性的影响, 因而多流体模型中包含的高 Reynolds 数 $k-\epsilon$ 模型不再适用, 此时可选取由 Launder 和 Spalding 给出的标准壁面函数来给定管壁面附近内部流场的边界条件。

4 计算实例

以文献[11]中铝粉燃烧传播的实验为算例来进行数值模拟。则有以下已知参数: 卧式燃烧管长 12 m, 内径为 0.14 m。点火从管的初始封闭端开始, 管的另一端开口。假设点火时的初始火焰为平面火焰, 管内铝粉均匀分布, 其表观密度为 500 g/m³, 初始湍流动能 $k^* = 1.5$ (m/s)²。本研究采用高纯度铝粉, 则其最终燃烧产物绝大部分为直径小于 1 μ m 的 Al₂O₃ 微细球形颗粒^[16], 因而可视作为气相的一部分。其主要数值结果如下。

管内各点压力随时间变化曲线的计算结果如图 1 所示, 反映了管内铝粉火焰加速燃烧传播诱导激波时, 管壁各点压力值的成长过程, 并与文献[10]的实验结果基本吻合。图中虚线为火焰阵面在管中的传播轨迹。火焰阵面以燃烧 75% 的氧料为基准。由此图可知, 刚点火时, 由于燃烧不太剧烈, 压力与火焰传播速度的增加较缓, 经一段时间的燃烧加速后, 压力与火焰传播速度增长幅度大大提高, 其燃烧加速机理的研究详见文献[13]。点火后, 管内气相密度沿轴线方向随时间的变化情况如图 2 所示。由

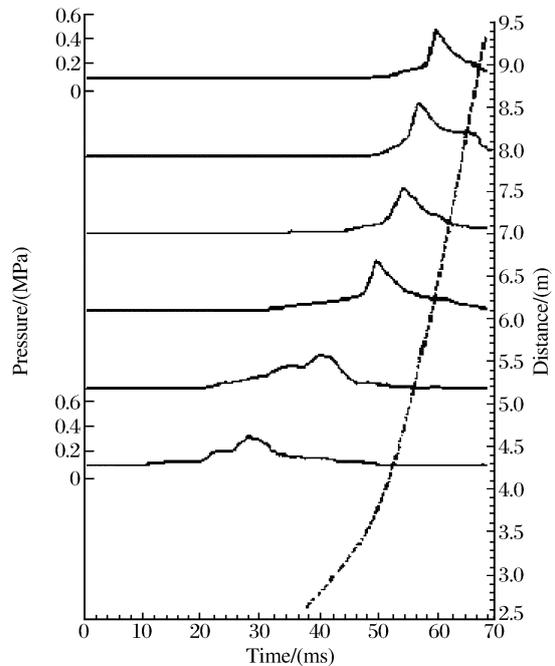


图 1 管内各点压力随时间的变化及火焰传播轨迹
Fig. 1 Computational pressure histories at various point and flame trajectory along the tube

于混合物的反应膨胀,使火焰像活塞一样作用火焰附近的已燃与未燃混合物,从而导致火焰阵面前的气相密度增加。不同时间段内,气相与颗粒相的速度沿管轴线方向的分布如图3所示,其中实线和虚线分别代表气相和颗粒相。在火焰阵面附近的已燃与未燃区,气相与颗粒相的速度由于两相间的弛豫,使颗粒相的速度比气相速度小,并且颗粒相在已燃区完全消耗掉。在火焰燃烧传播过程中,两相传播速度刚开始时为加速流动,在管的后半段因受末端开口的影响,传播速度开始下降。火焰阵面前三个不同位置上的气固两相速度分布如图4所示。可知由于粘性的影响,在近壁外存在剪切层,且离火焰阵面越近,两相速度越大,这意味着由湍流燃烧引起的流体膨胀在火焰阵面附近较剧烈。不同时间段内,湍流动能在管内沿轴向的分布见图5。图6为不同时间段内,管对称面内的火焰阵面与压力的传播等值线分布。可见在初始端内,管内火焰与压力波较为平坦,随后由于壁面的作用而出现变形,同样反映了铝粉在管内燃烧加速传播的过程。

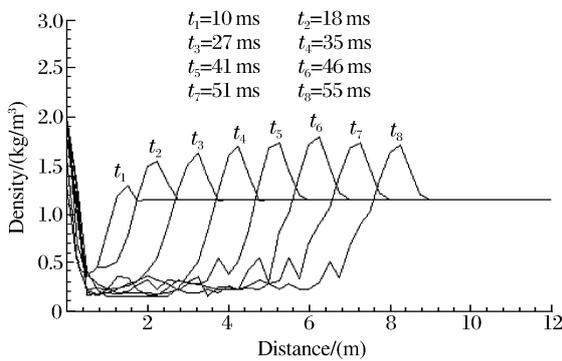


图2 不同时间段内、管内气相密度沿轴线方向的分布

Fig. 2 Gas density distribution along the axis of the tube at different time

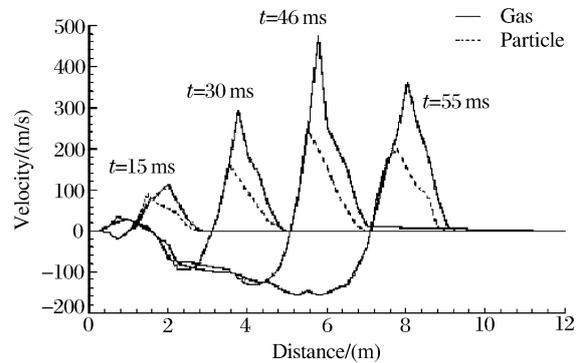


图3 不同时间段内、气相与颗粒相的速度沿管轴线方向的分布

Fig. 3 Velocity of gas and particle phases along the axis of the tube at different time

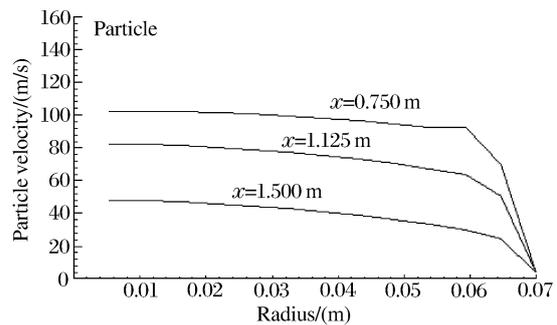
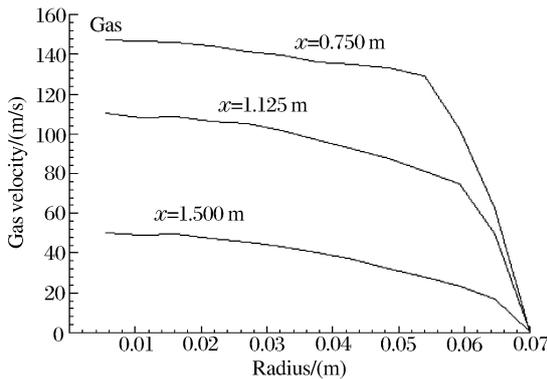


图4 火焰阵面前三个不同位置上的气相和颗粒相的径向速度分布
Fig. 4 Radial variation of tangential velocity of gas and particle at different distances from the flame front

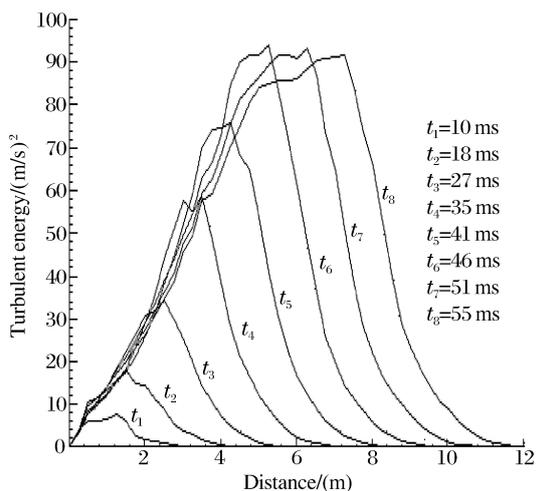


图5 不同时间段内、湍流动能沿轴向的分布

Fig. 5 Distribution of kinetic energy of turbulence along the axis of the tube at different time

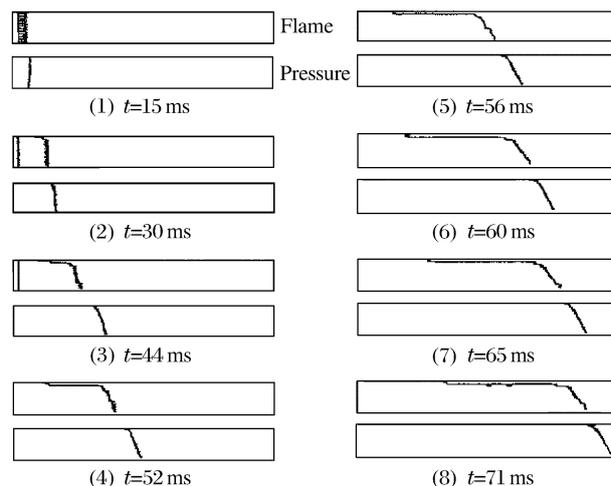


图6 不同时间段内、管对称面内的火焰阵面与压力等值线的分布

Fig. 6 Propagation process of flame front and pressure at different time

5 结果与讨论

本工作的目的在于通过数值模拟来研究管内铝粉燃烧爆炸的整个过程。其相应的实验研究见文献[10-12]。数值模拟与实验同时揭示了弱点火条件下,铝粉在大型卧式燃烧管内的燃烧膨胀,推动质点流动,导致湍流动能加强,进一步提高燃烧速率,加剧燃烧膨胀的正反馈传播机理。实际上,铝粉燃烧与传播是一个非常复杂的现象。一些过程至今还没有完全明白,如在湍流情况下铝粉颗粒与气体两相燃烧时相互之间的作用等。在推导控制方程时,使用了相对较为简单的假设与模型,仅描述了燃烧与流动现象中的主要特性。另外一些可能影响铝粉燃烧加速的因素如铝粉颗粒形状和大小分布、铝滴的变形以及氧料对燃烧速率的影响等没有考虑。

References:

- [1] Friedman R, Macek A. Ignition and Combustion of Aluminium Particles in Hot Ambient Gases [J]. Combustion and Flame, 1962, 6: 9-19.
- [2] Prentice J L. Combustion of Pulse-Heated Single Particles of Aluminum and Beryllium [J]. Combustion Science and Technology, 1970, 1: 385-398.
- [3] Dreizin E L. Experimental Study of Stages in Aluminum Particle Combustion in Air [J]. Combustion and Flame, 1996, 105: 541-556.
- [4] Dreizin E L. Experimental Study of Aluminum Particle Flame Evolution in Normal and Micro-Gravity [J]. Combustion and Flame, 1999, 116: 323-333.
- [5] Ogle R A, Chen L D, Butler P B. An Investigation of Aluminum Dust Explosions [J]. Combustion Science and Technology, 1988, 61: 75-99.
- [6] Cassel H M. Some Fundamental Aspects of Dust Flames [R]. Washington: US Bureau of Mines, 1964.
- [7] Ballal S R. Flame Propagation through Dust Clouds of Carbon, Coal, Aluminum and Magnesium in an Environment of Zero Gravity [J]. Proceedings of Royal Society London A, 1983, 385: 21-51.
- [8] Alekseev A G, Sudakova I V. Flame Propagation Rate in Air Suspensions of Metal Powders [J]. Fizika Goreniya I Vzryva, 1983, 19(5): 34-36.
- [9] Goroshin S, Bidabadi M, Lee J H S. Quenching Distance of Laminar Flame in Aluminum Dust Clouds [J]. Combustion and Flame, 1996, 105: 147-160.

- [10] Chen Z H, Fan B C, Liu Q M, et al. Shock Wave Induced by Turbulent Combustion in Suspension [A]. //7th Int Colloquium on Dust Explosions [C]. Bergen, Norway, 1996:23-26.
- [11] Chen Z H, Fan B C, Liu Q M, et al. Experimental Study on Two-Phase Explosion in a Large Tube [J]. *Experimental and Measurement in Fluid Mechanics*, 1998, 12(1):44-50. (in Chinese)
陈志华, 范宝春, 刘庆明, 等. 大型管中两相爆炸现象的实验研究 [J]. *流体力学实验与测量*, 1998, 12(1):44-50.
- [12] Chen Z H, Fan B C, Li H Z. Numerical Simulation of the Flame Acceleration for Homogeneous Turbulent in a Large Tube [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(4):337-342. (in Chinese)
陈志华, 范宝春, 李鸿志. 管内均相湍流燃烧加速的数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(4):337-342.
- [13] Chen Z H, Fan B C, Li H Z. Study on Mechanism of Combustion of Combustion Acceleration of Gas-Particle Flow [J]. *J Ballistics*, 1998, 10(2):33-37. (in Chinese)
陈志华, 范宝春, 李鸿志. 大型管中气粒两相湍流燃烧加速机理的研究 [J]. *弹道学报*, 1998, 10(2):33-37.
- [14] Crowe C T, Troutt T R, Chung J N. Numerical Models for Two-Phase Turbulent Flows [J]. *Annu Rev Fluid Mech*, 1996, 28:11-43.
- [15] Veysiere B, Khasainov B A. A Model for Steady Plane-Double Front Detonations in Gaseous Detonable Mixtures with Aluminium Particles in Suspension [J]. *Combustion and Flame*, 85:241-253.
- [16] Hertzberg M, Cashdollar K L. Introduction to Dust Explosions [R]. ASTMSTP 958, Philadelphia, 1986:5-32.

Investigations on Combustion and Explosion Process of Suspended Aluminum Particles in a Large Combustion Tube

CHEN Zhi-Hua, FAN Bao-Chun, LI Hong-Zhi

(*National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

Abstract: The combustion and acceleration mechanism of aluminum particles has always been the focus of some related research institutes, due to its potential application value. In the present paper, to further the investigation of combustion and propagation characteristics of aluminum particles in a limited space, the two-fluid model, turbulent $k-\epsilon$ model and combustion model of aluminum particles have been introduced to simulate the combustion propagation of aluminum suspension flow in a large horizontal tube. The SIMPLE scheme has been adopted as the main calculating method to simulate the whole propagation process of two-phase, aluminum particles-air flow in a large and long horizontal tube. The time history of all parameters of two-phase flow during the combustion and propagation process has been revealed based on our calculated results, which agrees well with our previous experimental results.

Key words: aluminum particles; turbulent combustion; numerical simulation; explosion