

# 基于 CE/SE 方法的铝粉尘爆轰一维两相数值计算

韦 伟<sup>1,2</sup>, 翁春生<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094)

(2. 江苏海事职业技术学院, 江苏 南京 211170)

**[摘要]** 建立了铝粉—空气两相爆轰的一维模型, 采用 CE/SE 方法对铝粉燃烧转爆轰过程进行数值模拟. 分析了铝粉尘爆轰管内流场, 研究了不同位置处铝粉颗粒半径随时间的变化规律. 讨论了点火能量对铝粉燃烧转爆轰过程的影响. 结果表明: 点火能量越低, 形成稳定爆轰距离越长. 本文的数值计算结果对铝粉尘爆轰研究具有重要的理论指导意义.

**[关键词]** 铝粉尘, 爆轰, CE/SE 方法, 数值计算

**[中图分类号]** TJ011. +1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-4292(2012)02-0053-04

## Unidimensional Two Phase Flow Numerical Computation of Aluminum Dust Detonation Based on CE/SE Method

Wei Wei<sup>1,2</sup>, Weng Chunsheng<sup>1</sup>

(1. National Key Lab of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(2. Jiangsu Maritime Institute, Nanjing 211170, China)

**Abstract:** Uni-dimension two-phase model of aluminum dust-air detonation is created. Deflagration to detonation transition process of aluminum dust is numerical computed by using CE/SE method. Internal flow field of aluminum dust detonation tube is carried out. The variations of aluminum particle radius with time at different positions are studied. And the effects of ignition energy on deflagration to detonation transition process of aluminum dust are discussed. The results show that the lower the ignition energy, the longer distance to form a stable detonation. All the numerical results here provide some theoretical foundations for aluminum dust detonation research.

**Key words:** aluminum dust, detonation, CE/SE method, numerical computation

铝粉因其特殊的工业与军事应用背景, 其燃烧与爆炸性能一直受到密切关注. 铝粉原材料丰富, 在常温下无挥发性, 具有稳定的理化性能, 因此容易获得和储存. 在相同当量比的条件下, 铝粉比碳氢燃料释放出更多的能量, 且价格便宜, 是研制固体燃料的重要材料. 铝粉也被作为能量材料的添加剂, 广泛应用于推进剂和火炸药中. 而铝粉燃烧转爆轰 (DDT) 性能的研究, 对提高武器的威力及性能具有重要意义.

关于铝粉爆轰性能的研究, 国内外做了较多的研究. Strauss 和 Tulis<sup>[1]</sup> 等采用雷管、爆炸帽和爆炸银线等强爆轰驱动点火方式研究铝粉在氧气中的爆轰现象. 刘晓利<sup>[1]</sup> 等采用结合在火焰加速段使用加速片的弱点火方式来研究铝粉-空气混合物的爆轰现象. 李小东<sup>[1]</sup> 等采用结合喷粉扬尘系统的弱点火方式来研究大型水平爆轰管中铝粉爆轰过程. 同时 P Wolanski<sup>[2]</sup> 等用两相流体力学模型研究粉尘爆轰波的结构. B Veyssiere<sup>[2]</sup> 等用两相流体力学模型研究在碳氢气体与空气混合气体中散布着悬浮铝颗粒的爆轰波结构问题. A V Fedorov<sup>[2]</sup> 等用两相流体力学模型研究铝粉尘与氧形成的两相系统的爆轰波. 以上研究的均是铝粉尘爆轰波的定常问题. 在非定常问题上, 洪涛<sup>[2]</sup> 用二阶精度的 MacCormack 差分格式加上 FCT 技术求解铝粉尘爆轰波的一维问题. 本文根据铝粉的爆轰特性, 应用捕获爆轰波较强的 CE/SE 方法, 对铝粉的燃烧转爆轰过程进行数值计算, 分析点火条件对铝粉燃烧转爆轰的影响.

收稿日期: 2011-12-29.

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20093219110037)、国家部委基金(KX21358)、南京理工大学自主科研专项计划资助项目(2111XQTR05).

通讯联系人: 翁春生, 教授, 博士生导师, 研究方向: 推进技术. E-mail: wengcs@126.com

# 1 铝粉爆轰的数理模型

铝粉在空气中燃烧、爆轰的过程是极其复杂的物理化学过程. 基于文献[1-3,4]所提实验条件, 为了简化问题, 对其进行如下假设: 1) 爆轰管壁绝热, 爆轰过程为一维非定常; 2) 铝粉颗粒为球形; 3) 忽略铝粉颗粒间的相互作用; 4) 燃烧产物氧化铝粉末作为气相或液相产物, 但不考虑其对压力的影响. 基于上述假设, 铝粉、空气管内燃烧、爆轰的数学模型如下:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = H, \quad (1)$$

$$U = \begin{bmatrix} \varphi_g \rho_g \\ \varphi_g \rho_g u_g \\ \varphi_g \rho_g E_g \\ \varphi_s \rho_s \\ \varphi_s \rho_s u_s \\ \varphi_s \rho_s E_s \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} \varphi_g \rho_g u_g \\ \varphi_g (\rho_g u_g^2 + p) \\ \varphi_g \rho_g u_g (E_g + p/\rho_g) \\ \varphi_s \rho_s u_s \\ \varphi_s (\rho_s u_s^2 + p) \\ \varphi_s \rho_s u_s (E_s + p/\rho_s) \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} I \\ I u_s - F \\ -Q_{con} + Q_{com} - F u_s + I(E + p/\rho_s) \\ -I \\ F - I u_s \\ Q_{con} + F u_s - I(E_s + p/\rho_s) \end{bmatrix},$$

其中, 下标  $g, s$  分别表示气相与固体颗粒相.  $\varphi_g, \varphi_s$  分别是气相与颗粒相的体积分数, 满足归一化条件  $\varphi_g + \varphi_s = 1$ .  $\rho, \mu, p, E$  分别表示密度、速度、压力和总能, 且有  $E_i = e_i + \frac{1}{2}u_i^2$  ( $i = 1, 2, 3$ ),  $e_i$  是内能.

$I$  为单位体积内铝粉颗粒因燃烧引起的质量变化率, 其表达式为<sup>[2]</sup>:

$$I = -N \rho_s 4\pi R^2 \frac{dr}{dt}, \quad (2)$$

其中,  $\frac{dr}{dt}$  为燃烧过程中铝粉颗粒半径的变化率, 满足<sup>[2]</sup>:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{r \varphi^{0.9}}{k d_0^m}, \quad (3)$$

式中  $k, m$  为常数,  $r$  为铝粉颗粒半径,  $\varphi$  为气相中氧气的体积百分比,  $d_0$  为铝粉颗粒初始直径,  $N$  为单位体积内铝粉颗粒数.  $F$  为气相与铝粉颗粒间的相互作用力, 其表达式为<sup>[2]</sup>:

$$F = N \frac{1}{2} \pi r^2 C_D \rho_g |u_g - u_s| (u_g - u_s), \quad (4)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.6667}), & Re < 1000, \\ 0.44, & Re \geq 1000. \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $C_D$  为阻力系数,  $Re$  为雷诺数, 有<sup>[2]</sup>:

$$Re = \frac{2\rho_g |u_g - u_s| r}{\mu}. \quad (6)$$

$Q_{con}$  为气相与铝粉颗粒间的对流传热, 有<sup>[2]</sup>:

$$Q_{con} = 4\pi R^2 N \lambda Nu (T_g - T_s) / 2r, \quad (7)$$

其中  $\lambda$  为空气的导热系数,  $Q_{com}$  为铝粉燃烧释放的热量.

# 2 计算方法及源项处理

本文采用了新近发展起来的 CE/SE 方法. 该方法把流场变量及其时间偏导数作为独立变量求解, 无需黎曼分解, 具有计算格式简单、精度高、捕获爆轰波等强间断能力强的优点. CE/SE 的具体计算格式为<sup>[5]</sup>:

$$(U)_j^n = \frac{1}{2} [(U)_{j-1/2}^{n-1/2} + (U)_{j+1/2}^{n-1/2} + (S)_{j-1/2}^{n-1/2} - (S)_{j+1/2}^{n-1/2}] + \frac{\Delta t}{2} H_j^n, \quad (8)$$

$$(S)_j^n = \frac{\Delta x}{4} (U_x)_j^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (Q)_j^n + \frac{\Delta t^2}{4\Delta x} (Q_t)_j^n, \quad (9)$$

$$(\mathbf{Q}_t)_j^n = \mathbf{A}(\mathbf{H} - \mathbf{A}(\mathbf{U}_x)_j^n), \quad (10)$$

$$(\mathbf{U}_x)_j^n = W((\mathbf{U}_x^-)_j^n, ((\mathbf{U}_x^+)_j^n, \theta)), \quad (11)$$

$$(\mathbf{U}_x^\pm)_j^n = \pm [(\mathbf{U})_{j\pm 1/2}^n + (\mathbf{U})_j^n] / (\Delta x/2), \quad (12)$$

$$(\mathbf{U})_{j\pm 1/2}^n = (\mathbf{U})_{j\pm 1/2}^{n-1/2} + (\Delta t/2)(\mathbf{U}_t)_{j\pm 1/2}^{n-1/2}. \quad (13)$$

式(10)中  $\mathbf{A}$  为雅克比矩阵, 式(11)中加权函数  $W$  定义为<sup>[5]</sup>:

$$W(x_-, x_+, \theta) = \frac{|x_+|^\theta x_- + |x_-|^\theta x_+}{|x_+|^\theta + |x_-|^\theta}, \quad (14)$$

其中  $\theta$  是一个可调整的常数, 本文计算中取  $\theta = 1$ .

由于化学反应特征时间相对于对流特征时间要小得多, 方程(1)中源项是刚性的. 具体处理思路是: 先不考虑源项对方程组的影响, 用 CE/SE 方法求解  $(\mathbf{U})_j^n$ , 再将  $(\mathbf{U})_j^n$  作为初值, 用四阶 Runge-Kutta 法求解常微分方程组  $\frac{d\mathbf{U}}{dt} = \mathbf{R}$ . Runge-Kutta 法中时间步长可取:

$$\Delta t_{R-K} = \frac{\Delta t_{CE}}{2N}, \quad (15)$$

式中  $\Delta t_{R-K}$  为四阶 Runge-Kutta 法的时间步长,  $\Delta t_{CE}$  为 CE/SE 方法计算的时间步长, 一般取  $N = 5 \sim 20$ .

### 3 计算结果及分析

本文研究的爆轰管长 1.2 m, 计算网格取为 1 200. 初始时刻, 取局部小区域为高温高压区域, 作为初始点火起爆区域, 其压力、温度分别取  $p = 20p_0$ ,  $T = 20T_0$ , 即强点火条件. 其余位置取  $p = p_0$ ,  $T = T_0$ ,  $p_0$ ,  $T_0$  是标准状况下气体的压力和温度. 计算中, 取化学当量比为 1, 铝粉颗粒初始直径为 10  $\mu\text{m}$ . 爆轰管封闭端取固壁边界条件, 开口端取出口边界条件.

图 1 是不同时刻管内的压力分布曲线. 可以看出, 在封闭端点火后, 高温高压的气体向爆轰管开口端流动, 点燃爆轰管内悬浮的铝粉颗粒. 随着铝粉颗粒的燃烧, 爆轰管内压力、温度升高, 燃烧加速, 从封闭端附近压力逐渐增大到管中部压力的急剧增大, 最后形成稳定的压力尖峰, 说明管内形成了稳定传播的爆轰波. 图 2 给出了管内不同位置处压力随时间的变化曲线. 由图 2 可知, 在爆轰波传播的过程中, 管内保持着 0.74 MPa 大小的平台压力, 距离开口端越远, 平台压力的持续时间越长. 在开口端附近, 压力因为爆轰波的作用迅速升高, 但很快就下降至环境压力. 在形成爆轰达到压力峰尖的相应时刻, 也达到了速度峰值. 管内不同时刻的速度分布如图 3 所示.

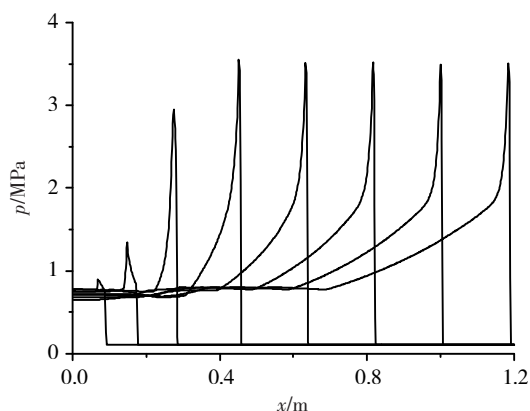


图 1 不同时刻管内压力分布曲线

Fig.1 The pressure distribution curve at different times

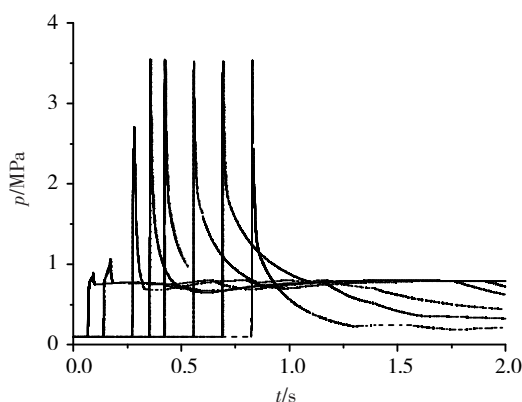


图 2 不同位置处的  $p-t$  曲线

Fig.2 The variation of pressure with time at different position

如图 4 所示, 随着爆轰波向爆轰管开口端传播, 越靠近开口端, 铝粉颗粒半径变化越快, 即铝粉燃烧速率越快, 而且不同曲线间差别越来越小, 在形成稳定爆轰波后, 变化情况基本相同.

通过计算表明, 不同的点火起爆条件对稳定爆轰波形成有较大影响. 将初始温度和压力分别为 5 倍、20 倍和 40 倍标况的 3 种点火起爆条件进行比较发现, 用于点火的局部小区域压力、温度越大, 管内压力

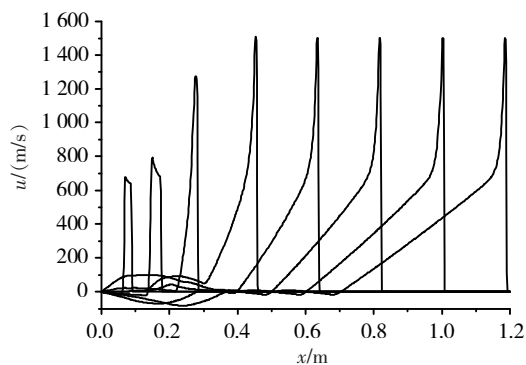


图3 不同时刻管内速度分布曲线

Fig.3 The speed distribution curve at different times

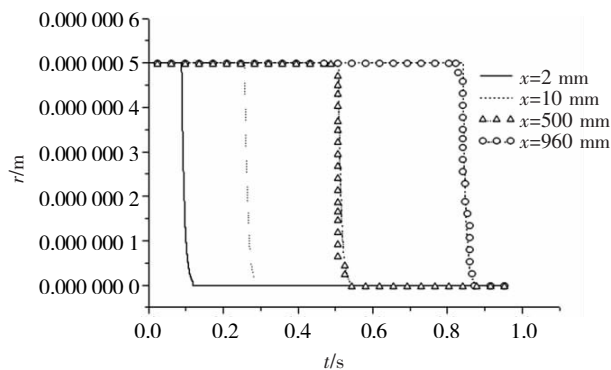


图4 管内不同位置处铝粉粒径随时间变化曲线

Fig.4 The variation of aluminum particle radius with time at different position

上升到相同压力所需的距离越短.但在达到一定的点火条件后,继续提高点火温度和压力对加快管内压力上升速度的影响减弱.图5是局部区域压力、温度为4倍标况点火起爆条件下管内不同时刻的压力分布曲线,管内最终没能形成爆轰波.

#### 4 结论

(1) 本文用 CE/SE 方法可成功对铝粉爆轰一维两相模型进行数值模拟.

(2) 数值计算结果表明,在一定条件下,铝粉燃烧可以达到稳定爆轰.局部区域

的点火起爆压力、温度越大,管内压力上升到爆轰压力所需的距离越短.随着爆轰波向爆轰管开口端传播,越靠近开口端,铝粉颗粒半径变化越快,即铝粉燃烧速率越快.

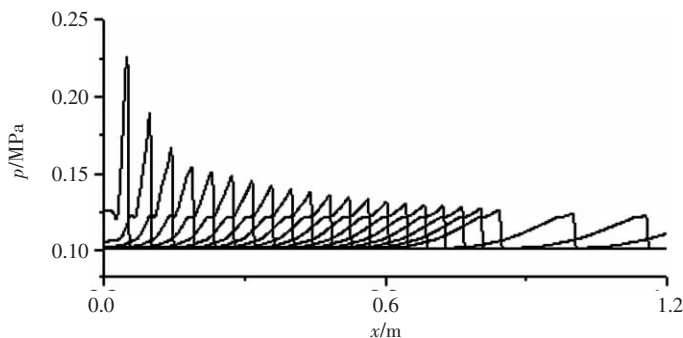


图5 未成功点火起爆时管内不同时刻的压力分布曲线

Fig.5 The pressure distribution curve at different times without success ignition initiation

#### [参考文献] (References)

- [1] 陈志华, 范宝春, 李鸿志. 燃烧管内悬浮铝粉燃烧爆炸过程的研究[J]. 高压物理学报, 2006, 20(2): 157-162.  
Chen Zhihua, Fan Baochun, Li Hongzhi. Investigations on combustion and explosion of Suspended aluminum particles in a large combustion tube[J]. Journal of High Pressure Physics, 2006, 20(2): 157-162. (in Chinese)
- [2] 洪涛, 秦承森. 爆轰波管中铝粉尘爆轰的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(3): 193-200.  
Hong tao, Qin Chengsen. Numerical simulation of dust detonation of aluminum powder in explosive tubes [J]. Journal of Explosion and Shock Waves, 2004, 24(3): 193-200. (in Chinese)
- [3] 李小东, 刘庆明, 白春华, 等. 铝粉-空气混合物的燃烧转爆轰过程[J]. 火炸药学报, 2009, 32(6): 58-61.  
Li Xiaodong, Liu Qingming, Bai Chunhua, et al. Deflagration to detonation transition process in aluminum dust-air mixture [J]. Journal of Explosives and Propellants, 2009, 32(6): 58-61. (in Chinese)
- [4] Zhang F, Murray S B, Gerrard K B. Aluminum particles air detonation at elevated pressures[J]. Shock Waves, 2006, 15: 313-324.
- [5] 翁春生, 王浩. 计算内弹道[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 85-90.  
Weng Chunsheng, Wang Hao. Computational Interior Ballistics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 85-90. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]