

# 大型通道中粉尘爆炸的数值模拟

范宝春 王伯良

(华东工学院化工学院)

**摘要** 将火焰阵面视作无限薄的内边界,流场被分为两部分。根据火焰阵面的守恒方程,火焰两侧的特征线方程以及湍流燃烧公式可求出火焰两侧的参数。再根据管道两端的边界条件,利用 Rubin-Lax-Wendroff 格式进而求得不同时刻管内流场的结构。本文凭此对大型通道中的粉尘爆炸进行了数值模拟和讨论。

**关键词** 粉尘爆炸 数值模拟

## 引言

工业上许多粉尘爆炸灾害常常发生在大型通道中,如矿山坑道中或充满粉尘悬浮物的管道中所发生的粉尘爆炸。实验室常采用几米甚至几十米长的激波管对这类现象进行研究,讨论火焰的传播、激波的生成与发展以及波系相互作用等。由于这类试验设备投资大、费用极高、操作困难及其它各方面的技术原因,所采集的数据也极为有限,故对这类问题进行适当的数值模拟,不但对进一步揭示粉尘爆炸的发生发展机制具有价值,而且对工业安全生产也具有一定指导意义。

在几十米的范围内模拟两相介质中火焰的传播以及火焰前的激波生成与发展,不经过适当的简化,在当前几乎是不可能的。

本文将火焰阵面视作无限薄的间断面,以其为内边界将管内流场划为两个部分,采用适当的计算格式可以获得流场的解,以描述大型通道中粉尘爆炸的机制。

## 1 守恒方程

与管长(36 m)相比,若忽略火焰阵面的宽度,则火焰阵面成为内边界,将流场分为两部分,并将两部分流体视作具有不同  $\gamma$  值的理想气体。若进一步假设流动为一维流动,且将管壁的动量与能量损失在截面上均化,则有守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial m}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{m^2}{\rho} + P \right) - \rho F \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{m}{\rho} (E + P) \right] + \rho q \quad (3)$$

其中:  $m = \rho u$ ,  $E = \rho \left( \frac{1}{2} u^2 + e \right)$ ,  $e$  为比内能,  $F = \frac{4f}{D} \frac{u^2}{2}$ ,  $D$  为管径,  $f$  为管壁摩擦系数;  $q$  为截面上均化处理后, 单位质量的流体从管壁获得的能量。

该方程的外边界条件为: 封闭端  $x=0$  处,  $u=0$ ; 敞开端  $x=L$  处,  $p(L,t) = p_0$ ; 内边界即火焰阵面应满足守恒方程:

$$\rho_u S_u = \rho_b S_b$$

$$p_u + \rho_u S_u u_u = p_b + \rho_b S_b u_b$$

其中: 脚标  $u$  表示火焰阵面前, 脚标  $b$  表示火焰阵面后,  $S_u = S_f - u_u$ ,  $S_b = S_f - u_b$ ,  $S_f$  表示火焰传播速度。

如果令  $\chi = \frac{\rho_u}{\rho_b}$  称为燃烧膨胀系数, 则有:

$$u_u = u_b + (\chi - 1) S_u \quad (4)$$

$$p_u - p_b = \frac{\gamma_b}{a_b^2} \chi (\chi - 1) S_u^2 p_b \quad (5)$$

式中:  $a$  为声速,  $S_u$  为相对于火焰前的质点火焰的传播速度。

## 2 辅助方程

为了使方程封闭, 首先必须建立关于火焰传播速度的方程。

文献[1]给出的层流火焰传播速度的方程为:

$$S_u^2 - S_u \frac{\sigma}{\rho C_p} \frac{T_f - T_i}{T_i - T_0} - \frac{\kappa}{\rho C_p} \frac{T_f - T_i}{T_i - T_0} \frac{d\epsilon}{dt} = 0 \quad (6)$$

其中:  $\frac{d\epsilon}{dt} = K \exp\left(-\frac{E_c}{RT_f}\right)$ ,  $\sigma$  为火焰阵面前的粉尘浓度,  $\kappa$  为热传导系数,  $T_f$ ,  $T_i$  和  $T_0$  分别为火焰温度、点火温度和初始温度,  $\epsilon$  为化学反应速率。

文献[1]给出了层流火焰传播速度和湍流火焰传播速度之间的关系式:

$$\frac{S_{uT}}{S_u} = 1 + 0.016 (R_{u\lambda})^\beta \quad (7)$$

其中:  $\beta$  为常数,  $R_{u\lambda} = \sqrt{48.64} \frac{l\nu}{u'}$ ,  $u'$  为湍流强度,  $l$  为最大湍流尺度,  $\nu$  为动力学粘性。

从已知的火焰传播速度和火焰两侧的守恒方程仍然不能确定火焰两侧的参数。故还必须考虑火焰两侧的特征线方程:

沿  $\frac{dx}{dt} = u + a$ , 有

$$\frac{du}{dt} + \frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt} = (\gamma - 1) \frac{q}{a} - F \left[ 1 - (\gamma - 1) \frac{u}{a} \right] \quad (8)$$

沿  $\frac{dx}{dt} = u - a$ , 有

$$\frac{du}{dt} - \frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt} = -(\gamma - 1) \frac{q}{a} - F \left[ 1 + (\gamma - 1) \frac{u}{a} \right] \quad (9)$$

沿  $\frac{dx}{dt} = u$ , 有

$$\frac{dP}{dt} - a^2 \frac{dp}{dt} = (\gamma - 1)\rho(q + uF) \quad (10)$$

最后还需要一个关于  $\chi$  的方程,该方程通常是实验确定的经验方程,本文采用玉米粉作为粉尘,文献[1]提供的经验关系式为

$$\chi = 1.982 + 0.5249 \times 10^{-2}\sigma + 0.2394 \times 10^{-3}\sigma^2 - 0.1018 \times 10^{-5}\sigma^3 + 0.1064 \times 10^{-8}\sigma^4 \quad (11)$$

由方程(4)~(9)和(11)便能确定关于火焰传播的七个未知数  $S_u$ 、 $\rho_u$ 、 $\rho_b$ 、 $p_u$ 、 $p_b$ 、 $u_u$  和  $u_b$ 。

利用上述方程,通过适当的计算格式便可求得流场的解。

### 3 结果与讨论

对于流场中的守恒方程(1)~(3),本文采用二步 Rubin-Lax-Weroff<sup>[2]</sup>格式,因为该格式可以处理方程的源项。对于内边界即火焰阵面,根据火焰轨迹在计算网格中的位置,将其分为五种不同类型,并针对这些类型采用适当的计算格式。

本文讨论长 36 m,管径为 29.85 cm 的长管,其内部充满玉米粉与空气的混合物,一端点火,管部另一端敞开,粉尘初始浓度为 60 g/m<sup>3</sup>,初始火焰速度为 10 m/s。计算结果如图 1~图 4 所示。

图 1 为压力在管内的分布曲线,每幅图的时间间隔为 0.3 s。激波前,流场未受扰动,故仍保持环境压力;激波后,压力突跃,且在激波阵面与火焰阵面之间有一段高压区。火焰阵面后压力略有下降,其后的流场仍保持较高的压力。由于激波传播速度高于火焰传播速度,故两者之间的高压区愈来愈宽。激波传至开口端后,因管口稀疏波的影响,火焰阵面前的高压区衰减。

图 2 为质点速度在管内的分布曲线。仅在激波阵面与火焰阵面之间,质点才有正向运动速度。激波阵面前与火焰阵面后的一个较大区域,质点基本保持静止状态。当激波抵达开口端后,由于管口稀疏波的影响质点速度急剧上升。

图 3 为密度在管内的分布曲线。激波后密度升高,但火焰阵面后密度急剧下降,且低于初始密度即激波前未受扰动的流场密度。

图 4 为温度在管内的分布曲线。温度的突跃主要发生在火焰阵面,阵面后温度急剧上升,仅在点火端附近才有所下降。

上述结果有待实验的检验。

### 参 考 文 献

- 1 Srinath S R . Flame Propagation due to Layered Combustible Dust. Ph. D. Thesis. The University of Michigan, 1985.
- 2 Rubin E L and Burstein S. Journal of Computational Physics, 1967, 2(2): 178

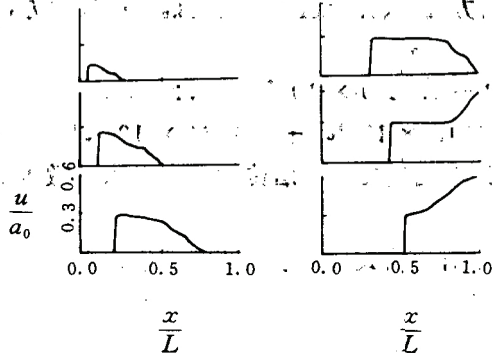


图 1

Fig. 1

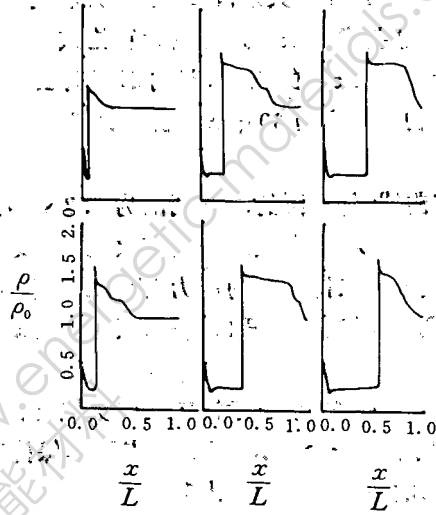


图 2

Fig. 2

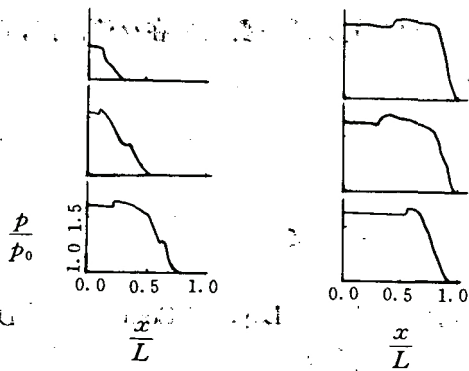


图 3

Fig. 3

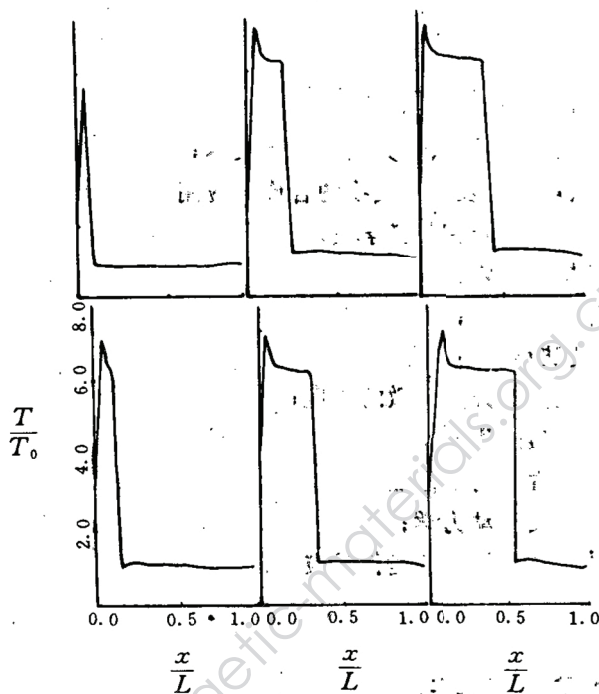


图 4  
Fig. 4

## NUMERICAL SIMULATION OF DUST EXPLOSION IN A LARGE-SCALE APPARATUS

Fan Baochun Wang Boliang

(College of Chemical Engineering, East China Institute of Technology)

**ABSTRACT** The flame front, as an inside boundary, divides the fluid field into two parts, when its thickness is infinitely thin. According to conservation equations, characteristic equations and a turbulent combustion equation, parameters of the fluid field before and behind the flame front can be obtained. The structures of the fluid field in the tube at different time are got further by using Rubin-Lax-Werdroff scheme with boundary conditions at the ends of the tube and the flame front. Based on the reason above, dust explosion in a large-scale tube apparatus have been simulated numerically and discussed in this paper.

**KEY WORDS** dust explosion, numerical simulation.