

# 障碍物和管壁导致火焰加速的三维数值模拟<sup>\*</sup>

杨宏伟, 范宝春, 李鸿志

(南京理工大学, 江苏 南京 210094)

摘要: 基于  $K-\epsilon$  模型和改进的 EBU-Arrhenius 燃烧模型, 考虑了障碍物对流动的附加作用, 通过修改方程的源项, 建立了湍流加速火焰现象的理论模型。选用 Simple 格式, 壁面边界层采用壁面函数法处理, 模拟了障碍物和摩擦管壁在三维空间中导致火焰加速的现象, 结果表明障碍物和管壁对火焰都有明显的加速作用, 且障碍物的加速作用更明显, 最后分析了导致火焰加速的机理。

关键词: 湍流; 燃烧; 障碍物; 数值模拟

中图分类号: O357.2; O351.2 文献标识码: A

## 1 引言

实践证明, 障碍物对加速燃烧和诱导爆炸具有非常重要的影响。而工业部门发生的爆炸灾害常与燃烧火焰在有障碍物群(例如, 通风设备、机械设备、测试仪器、各种管道、门窗和人员物品等)的通道中传播有关。可燃气体被点燃后, 燃烧产物膨胀会压缩周围的气体而产生流动, 设置障碍物易诱发湍流, 大大提高燃烧速率。因此, 为预防工业中的爆炸事故, 人们加强了对火焰在有障碍物的管道中传播和加速机理的研究。J.H.Lee 和 I.O.Moen 等的实验结果初步揭示了障碍物作用下的火焰加速过程。同时, 也开展了一些数据模拟研究, 如 B.H.Hjertager<sup>[1]</sup> 利用 SIMPLE 格式模拟了通道内重复设置的障碍物对火焰传播的加速作用, 但仅限于二维轴对称情况, 而实际燃烧常是复杂的三维流动。

本文中, 为使数值模拟的结果更能逼近实际情况, 基于  $K-\epsilon$  模型和改进的 EBU-Arrhenius 燃烧模型, 考虑了障碍物对流动的附加作用, 通过修改方程源项, 建立了湍流加速火焰现象的理论模型, 模拟了有/无障碍物时燃烧的火焰阵面形状和火焰加速情况, 分析了导致火焰加速的机理。

## 2 数学模型

本文中, 采用  $K-\epsilon$  模型来描述湍流, 即将瞬时 Navier-Stokes 方程取时均值, 再引进湍流脉动动能  $K$  和湍流耗散率  $\epsilon$  使方程封闭。为描述障碍物对流场的影响, 在时均方程组中添加适当的源项

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j - \mu_e \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu_e \frac{\partial u_j}{\partial x_j}) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_j} [\hat{q} (\mathcal{K} + \mu_e \frac{\partial u_k}{\partial x_k})] + R_{u_i} \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h - \frac{\mu_e}{\sigma_h} \frac{\partial h}{\partial x_j}) = \frac{Dp}{Dt} + S_h + R_h \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho Y_{fu})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j Y_{fu} - \frac{\mu_e}{\sigma_{fu}} \frac{\partial Y_{fu}}{\partial x_j}) = E_T R_{fu} \tag{4}$$

\* 收稿日期: 2000-09-18; 修回日期: 2001-03-30  
基金项目: 国家自然科学基金项目(19832030)  
作者简介: 杨宏伟(1963—), 男, 博士, 讲师。

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j K - \frac{\mu_e}{\sigma_h} \frac{\partial K}{\partial x_j}) = G - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon - \frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) = C_1 G \frac{\epsilon}{K} - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{K} \quad (6)$$

式中:  $R_{u_i}$ 、 $R_h$  和  $G$  为与障碍物附加阻力有关的源项

$$R_{u_i} = -0.5 f_i A_w \rho |u_i| u_i, \quad R_h = \alpha A_w (T - T_w)$$

$$G = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} [\mu_e (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho K + \mu_e \frac{\partial u_k}{\partial x_k})] \sum_{i=1}^n C_s \mu_e \mu_i^2 A_w^2$$

$A_w$  为湿壁面积,  $f_i$  为气流沿障碍物壁面的摩擦系数,  $T_w$  为壁面温度,  $\alpha$  为障碍物的传热系数,  $C_s$ 、 $C_{T_{k,i}}$  为常数, 通常  $C_s = 2.0$ ,  $C_{T_{k,i}} = 0.025$ ,  $E_T$  为障碍物导致的燃烧强化因子, 通常取  $0 \sim 1.5$ , 这里  $E_T = 1.1$ 。

管内燃烧反应主要包含层流反应机制和湍流脉动机制, 若采用 J. B. Bakke 等<sup>[2]</sup> 提出的改进的 EBD-Arrhenius 燃烧模型, 则定义  $\tau_e = K/\epsilon$ ,  $\tau_{ch} = A_{ch} \exp(E/RT) \cdot (Y_{fu})^a (Y_{O_2})^b$ 。当  $\tau_{ch}/\tau_e > D_{ie}$  时  $R_{fu} = 0$ ; 当  $\tau_{ch}/\tau_e \leq D_{ie}$  时,  $R_{fu} = A \rho \epsilon / K \cdot \min(Y_{fu}, Y_{O_2}, Y_{fu, O_2})$ 。其中,  $Y_{fu}$ 、 $Y_{O_2}$ 、 $Y_{fu, O_2}$  分别代表燃料、氧气和燃烧产物的质量分数。  $a$  和  $b$  为反应级数,  $A$  和  $E$  分别为诱导反应常数和诱导反应活化能。

在近壁面处, 由于速度和输运性质发生陡峭的变化, 选取 B. E. Launder 等<sup>[3]</sup> 的壁面函数法计算管壁附近的流场

$$\text{壁面剪应力} \quad \tau_w = \frac{\rho C_\mu^{0.25} k_p^{0.5} k (u_p - u_w)}{\ln(E y_p^+)} \quad (7)$$

$$\text{热流密度} \quad q_w = \frac{C_p \rho C_\mu^{0.25} k_p^{0.5} (T_p - T_w)}{\sigma_T [\ln(E y_p^+) / k + p \Delta]} \quad (8)$$

式中:  $y_p^+ = \rho C_\mu^{0.25} k_p^{0.5} y_p / \mu$ ,  $p \Delta = 9.24 [(\sigma_L / \sigma_T)^{0.75} - 1]$ 。  $C_p$  为混合气体的平均定压比热;  $u_p$ 、 $T_p$  分别为混合气体在粘性支层附近  $P$  点的速度和温度;  $u_w$ 、 $T_w$  分别为混合气体在壁面上的速度和温度;  $y_p^+$  为格点  $P$  到壁面的无量纲距离; Von Kaman 常数  $k = 0.42$ ;  $\sigma_L$ 、 $\sigma_T$  分别为层流与湍流 Prantl 数。

将固壁边界, 看成是绝热型的、无质量渗透的。

### 3 初、边值条件

如图 1 所示, 在长为 9.0m、宽和高都为 2.0m 的方管中, 充入燃料与氧气的混合气体, 初始温度为 298K, 管道点火端(左端)封闭, 另一端(右端)开口。对有障碍物的情形, 管内距点火端 3.0m 处, 放置宽为 2.0m、高  $h$  为 0.50m 的障碍物, 设点火前气体分布均匀, 且处于静止状态, 点火瞬间封闭端 10% 的燃料被消耗。本文中计算了有/无障碍物两种情况下管内的燃烧情况。

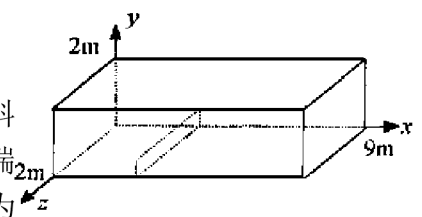


图 1 计算区域示意图

Fig. 1 Schematic of calculation domain

### 4 计算方法

本文中选用 Simple 格式。首先, 对计算区域进行离散,  $x$  方向采用由密到疏指数分布的网格布置,  $y$ 、 $z$  方向采用边界密中间疏的非均匀网格, 网格总数为  $30 \times 20 \times 17$ 。

其次, 将上述方程(1)~(6)写成通式<sup>[4]</sup>

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) = S_c + S_p \phi \quad (9)$$

将上式在以  $Q$  点为代表的主离散网格的主控体积内, 作时间与空间的积分, 整理后, 可得到如下的离散化方程<sup>[4]</sup>

$$A_Q \phi_Q = \sum_{i=1}^6 A_i \phi_i + b \quad (10)$$

式中： $A_Q = \sum_{i=1}^6 A_i \phi_i + A_Q^0 - S_Q \Delta x \Delta y \Delta z$ ； $A_i = \text{Max}(|C_i/2|, D_i) - C_i/2$ ； $C_i = (\rho \bar{v} A)_i$ ， $D_i = \Gamma A_i \delta$ ； $b = S_c \Delta x \Delta y \Delta z + A_Q^0 \phi_Q^0$ ； $A_Q^0 = \rho_Q \Delta x \Delta y \Delta z / \Delta t$ 。i = 1, 2, ..., 6, 表示 Q 点周围的 6 个面，右上角标 0 表示上时刻，A 为面积， $\delta$  为相邻二网格中心点的距离， $\bar{v}$  为混合气体平均速度， $\Delta x$ 、 $\Delta y$  和  $\Delta z$  为空间步长， $\Delta t$  为时间步长。

采用对角阵算法(TDMA)求解方程(10)，速度求解采用交错网格。其求解步骤如图 2。并根据以上理论，编制了计算程序。

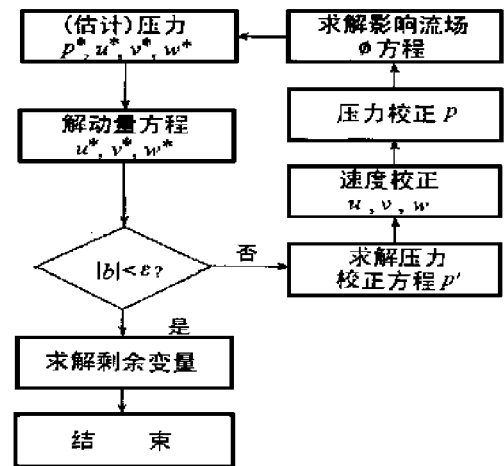


图 2 SIMPLE 算法流程图

Fig.2 Flow chart of SIMPLE arithmetic

### 5 模拟结果与分析

图 3 显示了点火后不同时刻在燃烧区域内 z 方向上不同位置 x-y 截面上的火焰阵面图。

由图可见，当管内无障碍物(h=0)时，无论是同一时刻不同切面的火焰阵面，还是同一切面的不同时刻火焰阵面，都呈现出对称性。就同一切面而言，靠近管壁处的火焰较靠前。对同一时刻不同切面而言，也有同样性质，即靠近管壁的切面火焰变形较严重，火头较靠前，而在管中间处，火焰阵面较落后。这是由粘性流在管壁附近形成的边界层造成的，火焰在边界层附近，燃烧速率较大，流动速度比靠近管道中心处小，这两个速度都影响火焰传播速度。

从同一时刻的 z 方向三个不同位置的切面可看出，靠近管壁处，火焰阵面较短，随着 z 增加，火焰阵面逐渐变长，再逐渐变短，使火粉阵面形成“3”字的形状。

点火后，燃烧产物因膨胀产生压缩波。因此，火焰阵面如活塞推动火焰两侧质点流动，由于管壁附近边界层与其它的地方的燃烧速度和流动速度的差异，从而使火焰阵面发生褶皱，使其与未燃区流场的接触面积和扩散速度提高，从而使燃烧速率得到提高。而燃烧速率的提高，导致燃烧产物膨胀加速，产生的压缩波强度更大，同时提高推动其阵面前未燃区流场的流动速度，从而导致更高的湍流动能和燃烧速率。这一正反馈机理使火焰不断加速向前燃烧。

当管内有障碍物时，除了管壁附近形成的粘性边界层对火焰加速外，朝前燃烧的火焰突然遇到障碍物的阻挡时，该处燃烧的火焰阵面受到限制，这时流动将在障碍物附近形成高梯度的粘性边界层，从而导致湍流。湍流使火焰加速，加速火焰又增加湍流，这种正反馈作用使火焰不断加速，且在障碍物附近，有障碍物产生的加速度明显高于无障碍物的情形。比较有/无障碍物时同一时刻同一切面上的火头位置就可明显看出这一特点。

比较有/无障碍物的情况还可发现，在点火初期(t=7.5ms)，火焰较短，障碍物对火焰阵面的影响不明显，随着时间推移，可以明显看出，火焰阵面沿 z 方向逐渐越过障碍物的情况，在 t=25.0ms 时，可看出火焰阵面首先从远壁处越过障碍物。

图 4 和图 5 是与图 3 对应时刻对应切面上的湍流脉动动能 K 和湍流耗散率 ε 的等值线图。

由图可见，在火焰变化剧烈的部位，K 和 ε 也剧烈变化。在靠近管壁的切面上，由于粘性边界层的作用，火焰产生的湍流很强，所以 K 和 ε 的等值线很密，而其它切面在上下壁面处有少量等值线。靠近火焰阵面可看到相对较多的等值线，这是因为该处由于燃烧而引起的湍流相对于其它地方要激烈得多。

图 6 是图 3 对应时刻的切面 z=1.0m 上的速度矢量图。由图可见，对无障碍物情形，在火焰阵面附近区域内，速度变化剧烈，在固壁附近的边界层处，速度也有相当大的梯度。对有障碍物的情形，除了具有上述同样特性外，在障碍物附近，速度梯度变化也比较大，可清楚地看到微团越过障碍物的速度走势。

同时在障碍物前方,特别是当火焰阵面刚越过障碍物时,可以明显地看到旋涡的形成。

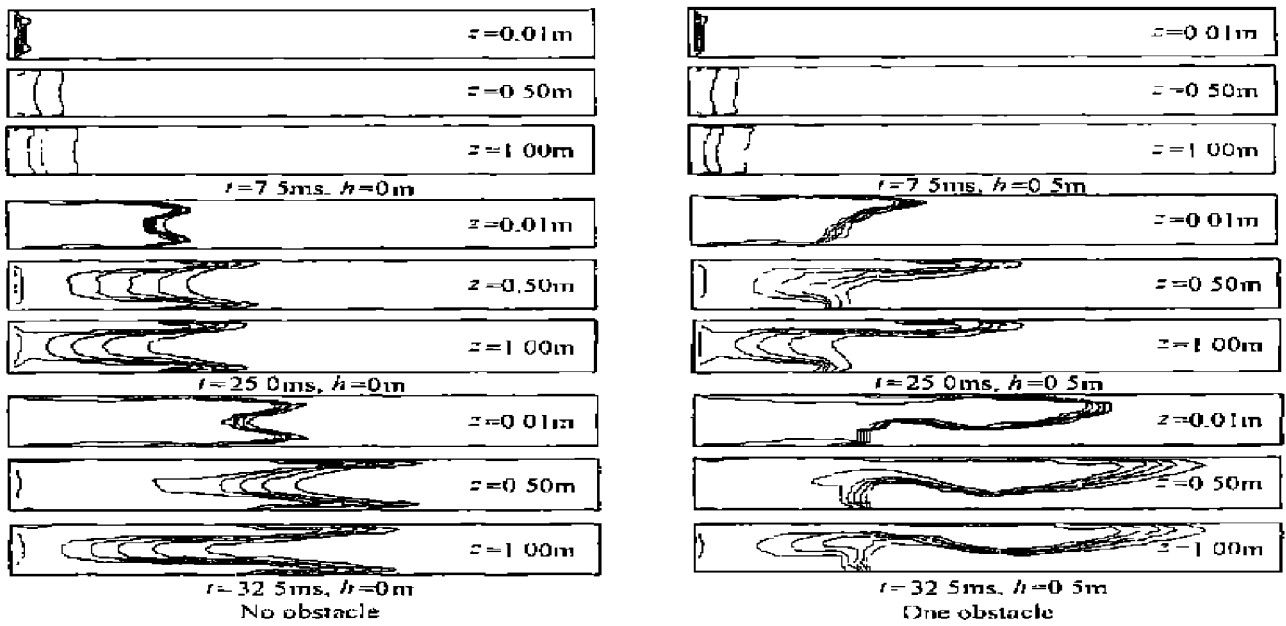


图 3 火焰阵面结构

Fig. 3 Flame front

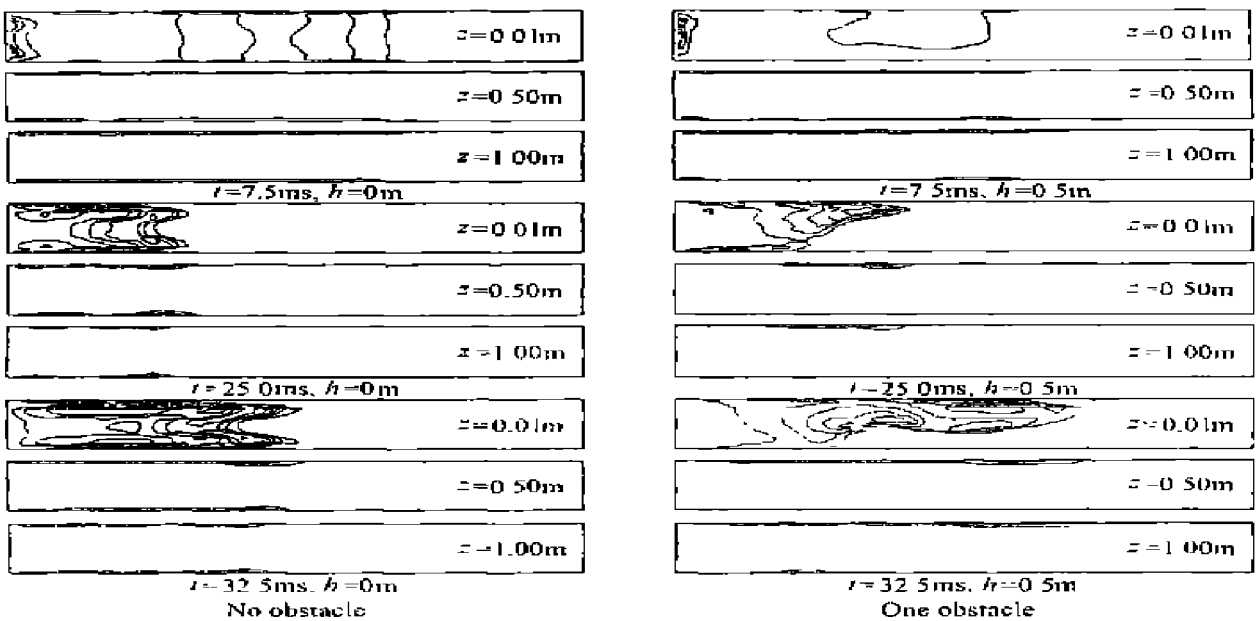


图 4 湍流脉动动能的分布

Fig. 4 Kinetic energy of turbulence

图 7 为  $z$  方向中 ( $z=1.0\text{m}$ ) 切面上的火焰阵面位置和传播速度的关系图。由图可见,在点火阶段,不论管道中无障碍物,火焰阵面位置基本一致,快到障碍物时,火焰阵面位置出现分叉,同一时刻,有障碍物时火焰阵面靠前,且随时间的推移这种情形更明显。

从图 7 还可明显看出有/无障碍物时火焰阵面速度变化情况。在点火阶段,不论有/无障碍物,火焰阵面的速度和加速度都基本一致,此段大约有  $1.0\text{m}$  的距离。因为此时火焰阵面与障碍物相距还比较远,所以障碍物对火焰还无加速作用。之后,无障碍物时,火焰的加速只能靠壁面作用。有障碍物时,除

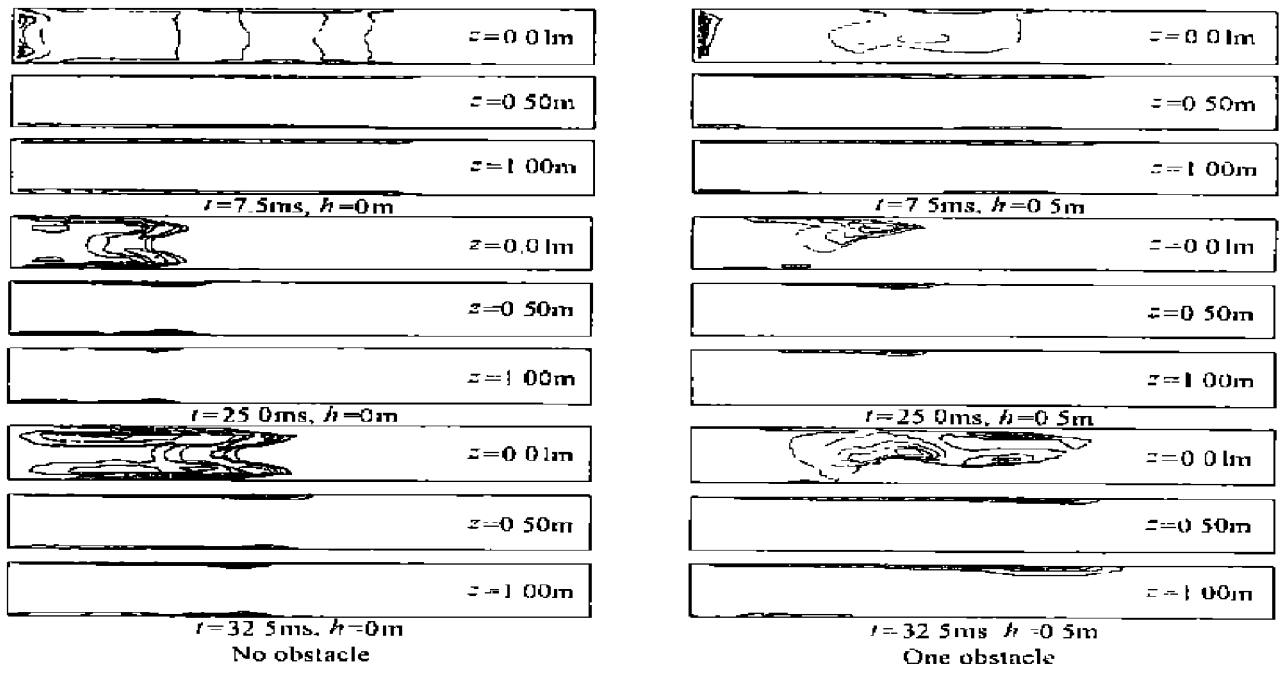


图 5 湍流耗散率的分布

Fig.5 Rate of dissipation

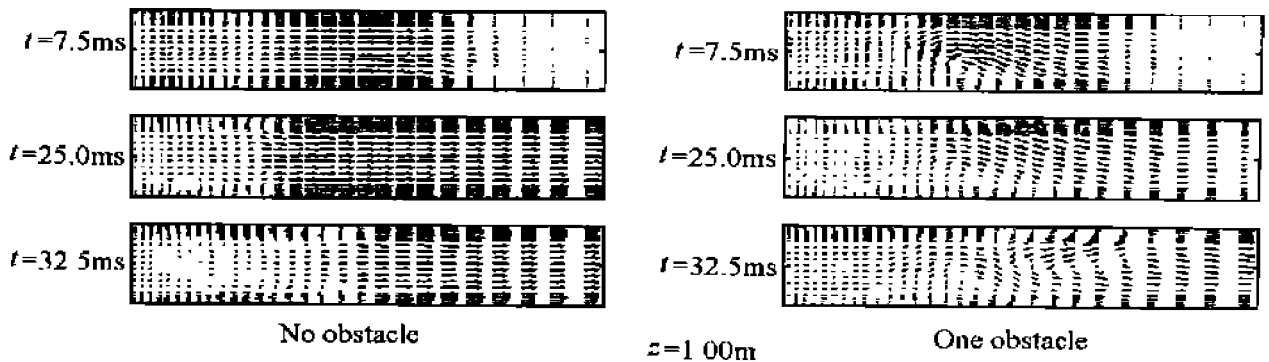


图 6 速度矢量图

Fig.6 Velocity field

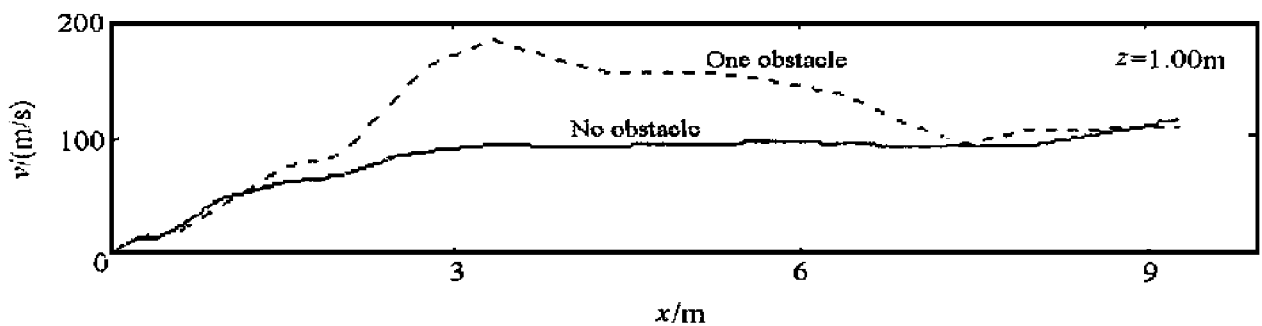


图 7 切面上火焰阵面速度分布

Fig.7 Flame front velocity

了壁面作用外，障碍物加速了火焰的燃烧，使火焰速度明显高于无障碍物的情况，在火焰阵面到达障碍物之前的一段距离时，火焰就已经开始加速，这是因为此时气流已经受到了障碍物的影响。而当火焰越

过障碍物之后,由于失去了障碍物这一重要的加速条件,火焰的加速变缓。在距离点火端的 7.5m 的地方,不论有/无障碍物,燃烧速度都有所提高,这时火焰阵面已经很接近燃烧管的开口端,而靠近管壁的火焰已经跑出,外开放的环境易使燃烧膨胀,所以燃烧速度又会升高。

## 6 结 论

本文中,计算并讨论了方形管道中有/无障碍物两种情况下的燃烧导致火焰加速的现象,结果表明:

- (1) 障碍物和管壁对火焰都有加速作用,且障碍物的加速作用更明显;
- (2) 障碍物的存在对火焰的形状影响很大,无障碍物时火焰阵面成“3”字的形状,有障碍物时火焰阵面因障碍物的存在而变形;
- (3) 在三维空间中沿与火焰传播方向垂直的不同切面上,火焰阵面有明显的区别。

本文中对燃烧火焰传播与障碍物关系的研究,有助于人们对火焰传播的认识。而且在火灾与安全方面,有助于人们对火灾现场中的火焰走势作出正确的判断。在过火通道内,火焰沿着通道表面附近前进得比较快,障碍物可以对火焰起到明显的加速作用。因此在过火通道内,尽可能少放或不放障碍物,从而防止或降低火焰的加速。同时也降低了湍流的波阵面朝前的加速。在正常工作中需要经常性地保持通道畅通,一方面可以有利于工作,有利于火灾的扑灭,另一方面也可避免了人为的火焰加速和过火区的蔓延。

## 参考文献:

- [1] Hjertager B H. Simulation of Transient Compressible Turbulent Reactive Flows [J]. *Combustion Science and Technology*, 1982, 27: 159—170.
- [2] Bakke J B, Hjertager B H. Quasi-laminar/Turbulent Combustion Modeling: Real Cloud Generation and Boundary Conditions in the FLACE-ICE Code [R]. *Chmichelsen Institute, CMI No 865402-2*, 1986.
- [3] Launder B E, Spanding D B. The Numerical Computation of Turbulent Flows [J]. *Comp Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, 3: 269—289.
- [4] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.

## Numerical Investigation on Three-dimensional Flame Acceleration Induced by an Obstacle and Tube Internal Walls

YANG Hong-wei, FAN Bao-chun, LI Hong-zhi

(*Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China*)

**Abstract:** Based on  $k-\epsilon$  turbulence model and an improved EBU-Arrhenius combustion model, the theoretical model of flame acceleration by turbulence is established by modifying the source term in the equations. The additional influence of obstacle is considered. In this paper, SIMPLE algorithm is adopted to solve the governing equations. The wall-function is chosen to deal with the boundary near the wall. The Phenomena that flame is accelerated by an obstacle and tube wall are investigated numerically. The results show that both obstacles and tube internal wall could accelerate the flame. The acceleration effect by an obstacle is more obvious. The mechanism of flame acceleration is explored in this paper too.

**Key words:** turbulence; combustion; obstacle; numerical simulation