

障碍物结构对管道中预混火焰加速的影响

余立新, 孙文超, 吴承康

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要: 在一端封闭、一端开口的火焰传播管中均匀布置障碍物, 研究了障碍物结构对管道中预混火焰传播的影响。结果表明, 由于障碍物的扰动, 火焰不断加速, 在阻塞比相同的条件下, 最终的火焰稳态速度与障碍物的形状和间距基本无关, 其中障碍物间距仅仅影响火焰的加速速率, 在障碍物间距约等于火焰传播管内径 ($W/D = 1.0$) 时, 平均火焰速度达到最大值, 火焰到达稳态传播的距离最短。同时, 本文用一维简化模型模拟了火焰在障碍物管道中的加速过程, 计算结果与实验测试结果在定性上比较吻合, 说明在管内火焰速度较低的情况下, 用一维可压缩流动近似处理能初步揭示管内火焰的加速机制。

关键词: 障碍物结构; 预混火焰; 火焰加速

中图分类号: O643.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-8740(2002)06-0483-04

Influence of the Configuration of Obstacles on Premixed Flame Acceleration in a Tube

YU Li-xin, SUN Wen-chao, WU Cheng-kang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The influence of the configuration of obstacles on premixed flame acceleration in a tube has been studied in this paper. The experiment has been carried out in a flame propagation tube with repeated obstacles and with one end closed and the other opened. It is found that the flame accelerates due to turbulence produced by the obstructions and the steady flame

speed is independent on the shape of obstacles when the blockage ratio is the same. The spacing of obstacles plays a role only in determining the flame acceleration rather than the steady flame speed. The highest mean flame speed is obtained when the spacing of obstacle is about equal to the inner diameter of flame tube. In addition, the flame acceleration in the obstacles-filled tube has been described with a one-dimensioned model. The comparison of predicted pressure and flame speeds with measured values shows good qualitative agreement. There is an indication that in the case of low flame speed, it can preliminary delineate the mechanics of the flame acceleration to consider flame propagation as one-dimension compressible flow.

Keywords: configuration of obstacles; premixed flame; flame acceleration

对某一可燃混合气而言, 在非常粗糙的、充满障碍物的管道中的火焰传播, 其火焰速度可以跨越 3 个量级, 即从最低的层流火焰速度直到最终的 Chapman-Jougeut 爆轰^[1~3], 其稳态火焰速度受管道的边界条件控制, 即管道几何尺寸和障碍物结构。应该指

出, 这里所谓的稳态火焰速度是指火焰穿过多个障碍物或火焰传播一段距离时的平均速度, 在火焰阵面的三维瞬态结构中, 可以观察到局部存在强烈的振荡。很显然, 在火焰经过的通道中排列障碍物会增强扰动, 而燃烧和湍流的耦合又会激发正反馈机制, 导致火焰速

* 收稿日期: 2001-11-22。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金资助项目 (G1999022305)。

作者简介: 余立新 (1968—), 男, 博士, 副研究员。E-mail: ylxin@imech.ac.cn。

度不断上升。而另一方面,太强的扰动会引起火焰前沿局部熄灭,从而最终抑制火焰传播。如 Abdel-Gayed 和 Bradley^[4] 在实验中发现存在一阈值,当湍流强度超过此阈值时,随着湍流强度的增大,燃烧速度反而降低,甚至可能导致火焰熄灭。

在有关湍流扰动对火焰传播的影响研究的文献中,绝大部分都是用圆环片作为障碍物,另有一部分则使用挡板,且都仅仅局限于障碍物的阻塞比对火焰传播的影响。本文通过改变障碍物的形状以及不同的排列间距,探索障碍物结构对预混湍流火焰加速的影响,从而了解障碍物的结构是如何影响反馈机制的本质和强度的。同时应用简化的数学模型,分析了半开口管道中的火焰加速过程和瞬态压力,将实验测量值和数值模拟进行了比较。

1 实验方案

为了探索障碍物的结构特性对火焰加速的影响。在火焰传播管中均匀布置了一系列障碍物,障碍物间距 W 分别为 $0.75D$ 、 $1.25D$ 、 $2.5D$ 和 $5.0D$ (D 为火焰传播管内径)。在实验中使用了 3 种不同形状的障碍物,见图 1。

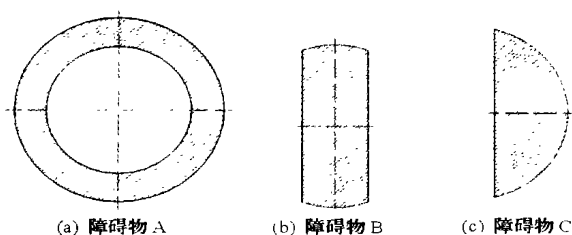


图 1 障碍物形状示意图

2 实验结果

导致火焰传播加速的主要因素有:1) 由于火焰传播区的气体比容的上升而导致的未燃气体的流动;2) 由于边界层和/或障碍物的存在而引起的流体微团的畸变和扰动;3) 火焰与流体微团的畸变和扰动的相互作用。

如果在火焰所到之处预先设置障碍物,则可增强流场中流体微团的畸变和扰动,由于障碍物布置的不同而产生的尾流流型将影响未燃气体的流动,尾流流型取决于障碍物的形状和尺寸以及流动速度。进入障碍物扰动区后,火焰阵面将扭曲并产生皱褶,火焰表面积显著增加,其结果使燃烧速率增大,并相应增加了能量释放速率。在障碍物的下游,流场中的扰动和变形将

会减弱,除非火焰能自持地保持湍流传播,否则其必自适应于当地流场。当然,如果在管道中重复设置障碍物,则流场中的扰动和畸变将得以保持,从而可能激发上述的正反馈机制,因此,如果管道中重复布置了足够数量的障碍物,则火焰最终必然达到一最大速度。

2.1 障碍物形状对火焰速度的影响

实验中使用了 3 种不同形状的障碍物。3 种障碍物的阻塞比 R_B 相同, $R_B = 0.438$; 障碍物间距相同, $W/D = 2.5$ (D 为火焰传播管内径)。其中 A 和 B 两种障碍物为中心对称,障碍物 A 为圆环型,阻塞部分在管道壁面附近,障碍物 B 的阻塞部分是在流场中心,而障碍物 C 则是布置在管道底部。实验结果见图 2。

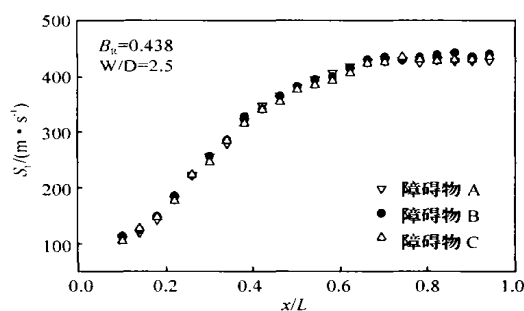


图 2 障碍物的形状对火焰速度的影响

从图中可以看出,3 种障碍物都导致火焰急剧加速,尽管障碍物形状不同,但在 3 种不同条件下的火焰加速规律基本相同,忽略测量误差的影响,可以认为,火焰的加速速率基本不受障碍物形状差别的影响。

2.2 障碍物间距对火焰加速的影响

图 3 为同一障碍物不同间距下的火焰加速规律,由图可以看出,障碍物的间距只影响火焰的加速度,但对最终的火焰稳态速度影响很小。当火焰在重复布置障碍物的管道中传播时,可看作是预混气在一个接一个的燃烧室中的连续爆炸过程,在每一个燃烧室中,由于没有障碍物的存在,火焰加速很小^[5],可以近似为匀速传播,只有在燃烧室的出口,由于障碍物的节流作用,火焰才急剧变形加速。显然,此时燃烧室出口的预混气爆炸速度只与障碍物内径有关,而与燃烧室长度无关。因此,在障碍物内径相同的条件下,如果障碍物的个数足够多,火焰传播管足够长,足以使火焰达到一稳态传播速度,则该稳态火焰速度应该与障碍物的个数和间距无关。

同时,图 4 表明,当障碍物间距约等于障碍物内径时 ($W/D = 1.0$),平均火焰速度达到最大值,这意味着火焰到达稳态传播的距离最短,而与文献[1]的结

果 $W/D = 0.8$ 基本相同。

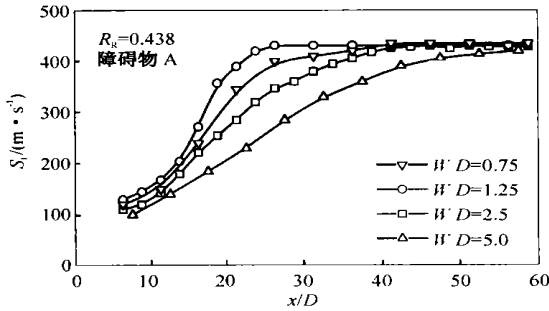


图 3 障碍物间距对火焰加速的影响

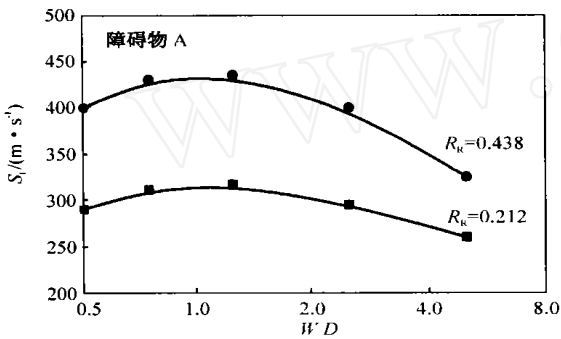


图 4 障碍物间距对火焰平均速度的影响

3 简化理论分析

为了能定量地描述重复布置的障碍物引起的火焰加速现象,必须模拟瞬态湍流反应流场。这就需要了解障碍物和流场的相互作用以及扰动对燃烧过程的影响。由实验结果可知,当火焰穿过障碍物时,由于障碍物引起的湍流扰动,火焰沿着管道逐渐加速,并最终到达一准稳态速度。在这种情况下,火焰传播可近似看作是管道中的一维可压缩流动。由于火焰加速速率基本不受障碍物形状变化的影响,为方便起见,在下述简化计算模型中,障碍物设定为园环型。图 5 所示,障碍物的存在使火焰变形,阵面分为两部分:引导阵面和变形阵面。则已燃气体质量变化率为

$$\frac{dm_b}{dt} = u \int_0^{X_f} \frac{1}{r_f^2} S + 2 \int_0^{X_f} S_p r_p dx \quad (1)$$

式中:脚标 u 和 b 分别表示未燃和已燃部分; S_p 为变形阵面半径为 r_p 处的燃烧速率 ($dr_p/dt = S_p$, $r_p = r_D$ 时, $S_p = 0$); S 是引导阵面的燃烧速率; X_f 为引导阵面位置; $m_b = \int_0^{X_f} \rho_b V_b$; V_b 为已燃产物的体积。

$$\frac{dV_b}{dt} = r_f^2 X_f + 2 \int_0^{X_f} r_p S_p dx \quad (2)$$

式中: X_f 为火焰引导阵面的传播速度。

火焰速度远小于声速的条件下,管道中各处的压力基本相同,只随时间变化而无空间分布^[6], $p_u = p_b = p$, 假定燃烧产物满足等熵方程, $p/\rho^{\gamma} = \text{const}$, 则有

$$\frac{d(\rho_b V_b)}{dt} = \rho_b \frac{dV_b}{dt} + \frac{V_b}{\rho_b} \frac{d\rho_b}{dt} \quad (3)$$

由上述方程可得

$$\dot{X}_f = \frac{u}{\rho_b} S + \left(\frac{u}{\rho_b} - 1 \right) \frac{2}{r_f^2} \int_0^{X_f} S_p r_p dx - \frac{V_b}{r_f^2} \frac{1}{\rho_b} \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} \quad (4)$$

同样,对于未燃气体,有

$$\dot{X}_f = S + \frac{V - V_b}{r_f^2} \frac{1}{\rho_u} \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} + \frac{1}{\rho_u} \frac{dm}{dt} \quad (5)$$

式中: dm/dt 为气体的排放率; V 为管道的总体积; S 和 S_p 可以表示为^[7]

$$\frac{S}{S_0} = 1 + C_1 u \quad (6)$$

$$\frac{S_p}{S_0} = 1 + C_2 u \quad (7)$$

式中: C_1 和 C_2 为常数。

当 $u_b = 0$ 时,根据火焰两侧质量守恒方程,有

$$u = X_f \left(\frac{u}{\rho_b} - 1 \right) / \left(\frac{u}{\rho_b} \right) \quad (8)$$

引进无量纲量

$$\bar{x} = \frac{x}{L}, \bar{X}_f = \frac{X_f}{L}, \bar{t} = \frac{t}{t_0}, t_0 = \frac{L}{S_0}, \bar{S} = \frac{S}{S_0}, \bar{S}_p = \frac{S_p}{S_0},$$

$$\bar{X}_f = \frac{X_f}{S_0}, \bar{P} = \frac{P}{P_a}$$

式中: S_0 为层流燃烧速度; P_a 为大气压。

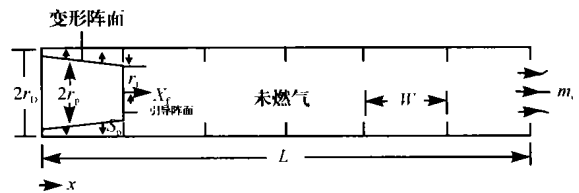


图 5 计算模型示意图

则式(4)和式(5)可改写为

$$\dot{\bar{X}}_f = \frac{u}{\rho_b} \bar{S} + \left(\frac{u}{\rho_b} - 1 \right) \left[\left(\frac{L}{D} \right) \frac{4}{r_f^2} \int_0^{\bar{X}_f} \bar{S}_p r_p d\bar{x} - \frac{V_b}{r_f^2} \frac{1}{\rho_b} \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} \right] \quad (9)$$

$$\dot{\bar{X}}_f = \bar{S} + \left[\left(\frac{r_D}{r_f} \right)^2 - \bar{X}_f \left(\frac{r_p}{r_f} \right)^2 \right] \frac{1}{\rho_u} \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} +$$

$$\left(\frac{r}{r_f}\right)^2 \cdot C_D \cdot \frac{a_u}{S_0} \cdot M \quad (10)$$

式中： r_D 为管子半径， $r_D = D/2$ ； r 为敞开端开口半径； $C_D = 0.7$ 为漏气系数； a_u 为未燃气体声速； M 取决于压力比 p/p_a ^[8,9]，对于亚声速排气，即 $P < P_c$ ，则

$$M = \left\{ \frac{2}{u-1} \left[\left(\frac{1}{P}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{1}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

对于声速排气，即 $P > P_c$ ，则

$$M = \left(\frac{2}{u+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (12)$$

式中： $P_c = \left[\frac{\gamma+1}{2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ 。由方程(9)和(10)，用龙格-库塔法即可求得火焰速度 X_f 和压力 p 。

图 6 和图 7 为计算结果。由图可以看出，在一维近似假设的条件下，计算出的火焰加速规律和管内瞬态压力波形与测量结果在定性上比较吻合。由于在计算中忽略压力的空间分布，导致在火焰初始阶段的测量值大于计算值，而在管道出口处，此时压力已达到最大值，压力对速度的影响得到比较真实的反映，因此计算结果和测量值相差不大。由此可见，在管内火焰速度较低的情况下，将火焰传播作一维可压缩近似处理能初步揭示管内火焰的加速机制。

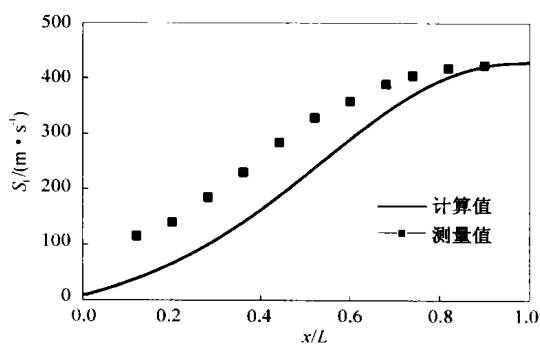


图 6 火焰速度的变化规律

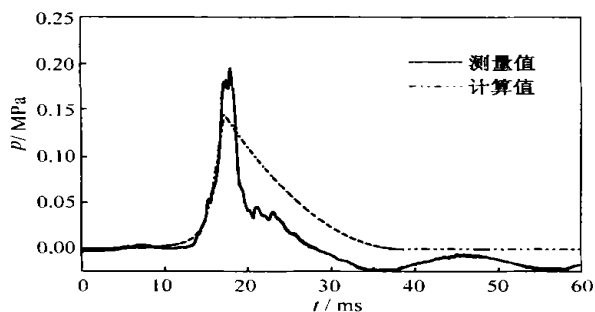


图 7 管道中超压的发展过程

3 结 论

障碍物管道中预混火焰的传播过程是一种复杂的燃烧过程，流动和燃烧强烈耦合，文中通过改变障碍物的形状和间距，探索了障碍物结构对预混火焰传播的影响，并用一维简化模型模拟了火焰在障碍物管道中的加速过程。结果表明：

1) 在相同的障碍物阻塞比条件下，不同形状的障碍物导致的火焰加速规律基本相同。

2) 障碍物间距的变化仅仅影响火焰的加速度，并不影响最终的稳态火焰速度。当障碍物间距约等于火焰传播管内径 ($W/D = 1.0$) 时，平均火焰速度达到最大值，火焰到达稳态传播的距离最短。

3) 用一维简化模型模拟的火焰加速度过程与实验测试在定性上比较吻合，说明在火焰速度较低的情况下，用一维可压缩流动近似处理能初步揭示管内火焰的加速度机制。

参考文献：

- [1] Hjertager B H, Fuhre K, Parker J K *et al.* Flame acceleration of propane-air in a large-scale obstructed tube[A]. *Dynamics of Shock Waves, Explosions, and Detonations* [C]. Poitiers, France: 9th ICODERS, 1984, 94:504—522
- [2] Lee J H, Knystautas R, Freiman A. High speed turbulent deflagrations and transition to detonation in H₂-air mixtures[J]. *Combustion and Flame*, 1984, 56:227—239
- [3] Teodorczay A, Lee J H S, Knystautas R. Propagation mechanism of quasi-detonations[A]. *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion* [C]. Pittsburgh: the Combustion Institute, 1988, 1723—1731
- [4] Abdel-Gayed R D, Bradley D. The influence of turbulence upon the rate of turbulent burning[A]. *Proceedings of the First Specialist Meeting on Fuel-Air Explosions* [C]. Montreal, Canada, 1981
- [5] 余立新. 障碍物扰动对半开口管道中火焰传播特性的影响[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2001
- [6] 余立新, 孙文超, 吴承康. 半开口管道中的氢/空气火焰加速和压力发展过程[J]. *工程热物理学报*, 2001, 22(6):637—640
- [7] Lefebvre A H, Reid R. The influence of turbulence on the structure and propagation of enclosed flames[J]. *Combustion and Flame*, 1966, 10:355—366
- [8] Bradley D, Mitcheson A. The venting of gaseous explosions in spherical vessels. —theory[J]. *Combustion and Flame*, 1978, 32:221—236
- [9] Bradley D, Mitcheson A. The venting of gaseous explosions in spherical vessels. —theory and experiment[J]. *Combustion and Flame*, 1978, 32:237—255