

预混火焰微小尺度燃烧传播机制研究*

曲忠伟, 颜事龙¹, 马宏昊²

(1. 安徽理工大学理学院, 安徽 淮南 232001;
2. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 采用实验与数值模拟相结合的方法对预混气体火焰在平板狭缝中传播进行了研究, 利用高速数字摄像系统对传播过程进行抓取。结果表明, 当狭缝高度一定时, 火焰的熄灭常数与临界火焰速度呈现的是近似直线关系。并对化学反应放热、壁面散热等与预混气体火焰传播与淬熄有关因子之间的内在联系进行分析, 总结出预混气体火焰在平板狭缝中的传播与熄灭规律。对判断火焰在狭缝中是否淬熄提供参考, 对选用阻火器及设计阻火芯提供一定的理论依据。

关键词: 预混火焰; 微小尺度; 燃烧传播; 机制

中图分类号: O382^{+.1} **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)04-0029-08

Research on Small-Scale Flame Propagation Combustion Mechanism

QU Zhongwei¹, YAN Shilong¹, MA Honghao²

(1. School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
(2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Using a combination of experimental and numerical simulation methods to study the premixed gas deflagration flame propagation in the flat slit. In this paper, the use of high-speed digital camera system for catching the propagation principle, and the result shows that the extinguish length and the critical flame propagation speed displays approximately linear when there is a certain slot height. By studying the intrinsic link of the propagation exothermic chemical reaction, Wall heat dissipation and so on with the flame propagation and extinguish states, looking the inherent propagation and extinguish laws of premixed flame propagation in a flat slit. Judging whether the flame quenching slit to provide a reference. To provide theoretical support for the selection and design of the flame arrester core.

Key words: premixed flame; small scale; combustion propagation; mechanism

微尺度燃烧是指微型燃烧器中的微尺度的燃烧现象, 与常规动力系统中的火焰现象相比, 其物理实质定性不同。从上世纪中期至今, 国内外很多专家和学者深入研究预混气体火焰在圆管或者平板管道中的传播情况, 并且从一维解析推导到二维数值模拟^[1~6]。Spalding^[1]和Alder^[4]是最先研究预混气体火焰微小尺度燃烧理论; Linan等^[7]在计算当中引入高反应活化能的假设, 得到更为系统化的预混气体火焰传播研究结论; Karman和Millan^[8]较早利

用二维模型对预混火焰进行研究; Benkhaldoun等^[9]针对预混火焰在非绝热的无限长板通道中传播而研究了二维模型, 得到了临界热损失和反应活化能两者之间的关系。周凯元^[10~12]对预混气体火焰在狭缝中传播与熄灭进行了理论研究。此外, 预混气体微小尺度燃烧的不稳定行也有不少专家进行过深入的研究^[13~17]; 火焰微小尺度传播通常会两种典型的火焰形状^[18], 后文的实验也证实了这一点。

* 收稿日期: 2014-08-22

基金项目: 安徽省自然科学基金面上资助项目(1508085ME85)

作者简介: 曲忠伟(1979年生), 男; 研究方向: 预混气体爆轰波传播特性; E-mail: wzqu@mail.ustc.edu.cn

本文对理想绝热壁面条件下二维预混气体火焰在封闭——开放系统中的平板狭缝中传播的规律进行了实验及数值模拟研究, 实验中预混气体的初始压强值等于 1.33 322 kPa, 设定单位狭缝高度内的预混未燃气体具有恒定的质量。本文实验的点火方式分别为平面点火和点点火两种情况, 前者主要讨论的是动力黏度、狭缝高度、质量扩散系数等不同因素对预混气体火焰在狭缝中传播情况的影响; 后者研究的是不同点火方式对火焰传播及形状的影响。本文为讨论方便, 分别取平面点火时用符号 APL 表示, 点点火时用 ASK 来表示。

1 二维预混气体火焰在绝热平板狭缝中的传播机理

数值方法的使用在近四五十年得到了突飞猛进的发展, 已应用到各个学科领域。其中, 在传热和流动问题上, 已经发展出很多的数值解法。它们的主要区别在于离散方式和离散方程的求解方法不同。本文使用的数值模拟软件是 Fluent 软件, 该软件是一个用于模拟和分析复杂几何区域内的流体流动与传热现象的专业软件。目前, 应用比较广泛的数值方法主要有有限差分法 (finite difference method, FDM), 有限容积法 (finite volume method, FVM), 有限元法 (finite element method, FEM)。

本文使用的数值模拟方法是有限容积法。有限容积法是将所要计算的区域划分为一系列控制容积, 并用节点代表每个控制容积。只要将守恒型的控制方程在控制容积内进行积分, 进而导出所需的离散方程。但是在导出过程中, 必须对每一个控制容积界面上的被积函数及其一阶导数的构成方式作出一定的假设, 不同的假设就可以形成不同的格式。用这种方法导出的离散方程既可以保证具有守恒特性 (只要界面上的差值方法对位于界面两侧的控制容积是一样的即可), 也可以适应区域形状。

1.1 平面点火条件下预混气体火焰在平板狭缝中的传播 (APL)

本文对标准条件下的预混绝热火焰在平板狭缝中传播情况的数值模拟, 表 1 所示的是具体的算例。定义 2 mm 为狭缝的标准高度, λ_r 为导热系数, 设平板狭缝的长高比等于 50, 本文计算的雷诺数 (R_e) 是建立在一定的狭缝高度、层流火焰燃烧速度与未燃气体动力黏度基础之上的, 具体定义为:

$$R_e = S_1 b / \mu_r \quad (1)$$

式中: S_1 为狭缝中火焰传播速度; b 为狭缝高度; μ_r 为黏度系数。

由于平板狭缝结构具有对称性, 本文的算法计算区域指的是狭缝中心到壁面的空间。

1.2 标准条件下火焰在平板狭缝中的传播 (APL1)

火焰锋面前后温度的变化体现了火焰形状的发展过程, 初始时刻的预混气体燃烧火焰是因热量与燃料组发生化学反应而分布在不连续面处扩散, 进而形成了初期的预混火焰锋面, 而燃烧产物产生巨大的膨胀力使得预混火焰沿着平板狭缝朝下游传播, 近壁面处的流场因为受到了壁面摩擦力的影响形成了很大的梯度。因此, 近壁面的预混火焰也具有较大的拉伸变形。流场速度离狭缝的中心越近值越大, 这是由于狭缝中心处的预混气体火焰比近壁面传播的快, 进而逐渐形成蘑菇状的火焰。图 1 和图 2 为狭缝中心和壁面处火焰位置、火焰传播速度随时间的变化关系。从图中可以看出, 壁面和狭缝中心处的预混火焰处于不断加速的传播状态, 这与一维火焰的传播速度处于恒定值是明显不同的。

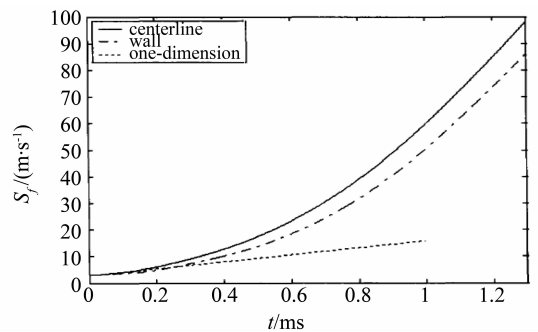


图 1 狭缝中心和壁面处火焰位置随时间的变化, APL1
Fig. 1 Variation of position of centerline and wall with time, APL1

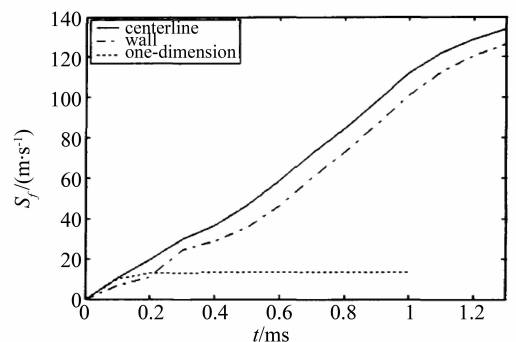


图 2 狭缝中心和壁面处火焰传播速度随时间的变化, APL1
Fig. 2 Variation of flame speed of centerline and wall with time, APL1

通过研究温度场的分布情况可以发现较大的温

度梯度仅出现在预混火焰的锋面附近，而且离已燃区的锋面越近的部分火焰温度越高，温度值约为 2 340 K，但是跨过一个火焰厚度后预混气体的温度就会迅速降低，直降到未燃气体温度即 293 K，因此预混气体火焰锋面变形最明显的区域是在近壁面位置，根据方程 (2) 给出燃料组分浓度 (y_f) 与温度在绝热的条件下关系为：

$$y_f = \frac{T_b - T}{T_b - T_u} \quad (2)$$

式中： T_b 为完全燃烧后气体温度； T_u 为未燃气体温度； T 为预混气体初始温度。

由于化学反应速率 W_m 是与温度、燃料组分浓度的分布情况关系密切，并且依据化学反应速率的计算公式可以得出局部化学反应速率和燃料组分浓度具有正比例的关系，所以预混气体火焰的化学反应速率 W_m 在火焰锋面附近存在较大的梯度，而化学反应速率反过来也会在一定程度上影响温度与燃料的组分浓度分布。局部化学反应速率较大的区域会消耗较多的燃料，局部温度也会较高。

从速度场 ν 分布来看，由于火焰锋面靠近狭缝中心处的压力大一些，且预混气体燃烧所形成的火焰膨胀力方向是朝着右上方，所以未燃气体的速度 ν 是正值。但在壁面附近的热气体受到了壁面和边界等因素的限制，使得这些壁面附近的热气体会朝着左下方的方向膨胀，因此，火焰锋面附近的已燃气体的速度 ν 是负值。另外，本文还计算了火焰锋面附近涡量的分布，涡量的定义为：

$$\dot{\omega} = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3)$$

涡量的大小反映的是流体局部转动速率，弯曲附近的预混气体火焰燃烧最为强烈，并且也是最不稳定的，因此火焰锋面附近的涡量值较大，而在较远的已燃区或者未燃区值较小。

1.3 黏度增加对火焰传播的影响 (APL2)

黏度的变化对边界层的发展和动量的传递过程产生直接的影响，并且影响预混气体火焰的传播与流场的产生机制。本算例设置了和 APL1 一致的初始条件，这里仅仅增加了一倍动力黏度。由公式 (1) 可得出当黏度增加一倍时雷诺数等于 35.5。对比 APL1 可以看出，增加黏度后预混火焰的传播速度加快，这主要是由于黏度的增加让近壁面处的流场会较为容易形成较大的速度梯度，流场对预混火焰锋面的拉伸作用也得到了增强，因此火焰面积也相应的增长；同时由于火焰面积的迅速增长也会

使得火焰得以加速传播。同样，狭缝中心处的预混火焰相对位置也随着黏度的增加而得到较快的增长。

黏度增大后的火焰锋面明显长一些，火焰锋面相对位置明显靠前，更有利于火焰的加速传播。但是增加黏度并未能对预混火焰的整体形状产生任何的影响，预混气体火焰依然呈现出蘑菇形状。类似于黏度较小的算例 APL1，在同一时刻的边界层离狭缝出口越近也会越薄；不同位置处狭缝中心火焰前流场的加速度更大；不同时刻位移厚度沿狭缝通道的变化曲线的位移厚度曲线会呈现出显著的交叉，这种现象明显与算例 APL1 的结果不相符。随着时间的推移，位移厚度不但没有增大，反而有所减小。

1.4 狭缝高度对火焰传播的影响 (APL3)

通过对狭缝高度的改变而使得狭缝的长高比也发生变化，同时也会对预混火焰的流场分布与火焰的传播情况产生影响。当狭缝高度增加一倍至 4 mm 时，狭缝长高比为 25。同长高比等于的情况相比较可以发现，温度的侧形变化情况显著：预混火焰经过一段时间的传播以后，火焰锋面的最前端却没有出现在平板狭缝的中心位置，而是出现在了平板狭缝的中心与壁面之间的某个位置。狭缝高度等于 2 mm 时得到预混火焰锋面最前端保持在狭缝的中心位置，因此狭缝中心处的预混火焰具有较快的传播速度，并且预混火焰形成的是蘑菇形状。本算例的结果是壁面与狭缝的中心位置之间产生了一个向前的“凸起”，因此该“凸起”部位的预混火焰比狭缝中心具有较快的传播速度，而狭缝中心处的火焰出现了一个指向已燃区的“尖头”，即所谓的“郁金香”状火焰。这里定义变量 Δx 为预混火焰锋面的“凸起”和平板狭缝火焰位置间的关系：当 $\Delta x > 0$ ，“凸起”处的火焰位置较狭缝中心靠前，形成的是“郁金香”火焰；当 $\Delta x < 0$ ，火焰的最前端位于狭缝中心位置，形成的是“蘑菇”形状。

图 3 为“凸起”的垂直高度随时间的变化关系，当火焰刚开始传播时，“凸起”的垂直高度先增加后减小，当预混火焰离出口很近的时候，“凸起”达到距离狭缝中心 0.70 mm 处位置。预混火焰的锋面“凸起”于近壁面形成，变化的方向是朝着狭缝中心位置传递，最后逐渐减少直到最终的稳定状态。

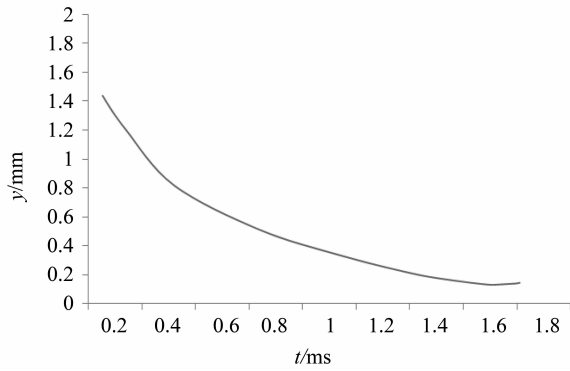


图3 “凸起”的垂直高度随时间的变化关系, APL3 - 1
Fig. 3 Vertical position of the bulge in time, APL3 - 1

当 $\Delta x > 0$ 并且趋于稳定时, 预混火焰最终形成的是郁金香状; 当 $\Delta x = 0$ 时, 预混火焰最终形成了蘑菇状。减小平板狭缝的长高比有助于形成郁金香状火焰, 并且长高比 (a/b) 越小就形成显著的郁金香状火焰。图 4 展示的是预混火焰锋面“凸起”随着狭缝的长高比 (a/b) 的关系, 很明显可以看出这两者之间是近似线性关系。当 $a/b > 40$, 预混火焰形成的是蘑菇状, 而当 $a/b < 40$ 时形成的是郁金香状。

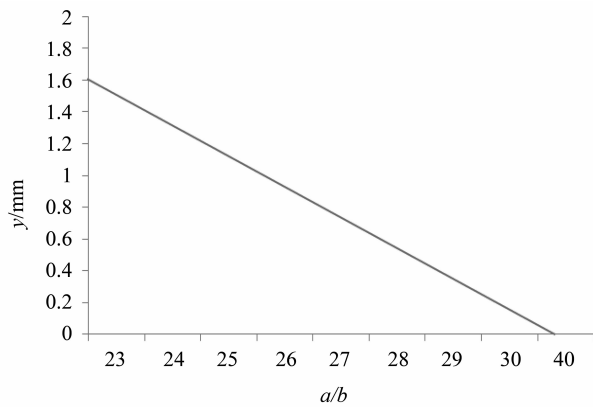


图 4 火焰到达狭缝出口时锋面“凸起”随狭缝长高比的变化

Fig. 4 Variations of “bulge” with length height ration of narrow channels

总结上述的实验可以得到如下的结论: 预混火焰在近壁面处的“凸起”是经过拉伸的过程形成, 能够展示预混火焰的力学非稳定特性, 而这也正好促进了火焰形成“郁金香”形状, 不过, 火焰形成“郁金香”状最主要的决定性因素是狭缝的长高比 (a/b)。

1.5 质量扩散对火焰传播的影响 (APL4)

本节的算例设置和 APL1 是相同的, 狭缝的几何尺寸一致, 长高比等于 50, 这里主要研究的是质量扩散对预混火焰的形状和传播特性的影响。因 Lewis 数定义的是热扩散系数与质量扩散系数间的比值, 即:

$$L_e = \frac{\lambda}{\rho c_p D} = \frac{\lambda_r}{D_r} \quad (4)$$

式中: ρ 为预混气体密度; D 为质量扩散系数; D_r 为参考质量扩散系数。

当导热系数 λ 一定时, 增加或减小质量扩散系数会直接影响到 Lewis 数值, 研究质量扩散系数对预混火焰的传播和形状, 在特定的质量扩散条件下研究 Lewis 数对预混火焰的传播特性及形成的火焰形状的影响, 当降低质量扩散系数至一半时会影响平板狭缝中火焰的传播及形状, 此时的质量扩散参考系数为 $0.5 \times 6.93 \times 10^{-6} = 3.465 \times 10^{-6}$, Lewis 数为 2。

图 5 展示的是预混火焰在平板狭缝中传播的过程情况, 和算例 APL1 的情况相类似, 这里的火焰最终形成的是蘑菇状, 但是, 预混火焰的锋面附近温度与 APL1 却有明显的不同, 在这里的预混火焰靠近壁面的火焰锋面“尖端”处温度要高于其他的区域, 这是因为受到了质量扩散系数减小的影响。减小质量扩散系数会减弱组分扩散, 因此热量的传递就会加强。预混火焰锋面上“凸起”会促进热量朝着未燃气体释放而降低附近的高温区温度, 进而会对“凸起”的快速传播产生一定程度的抑制作用。然而, 避免“凹陷”限制热量的传播会使得热量集中区域形成高温区, 促进预混气体

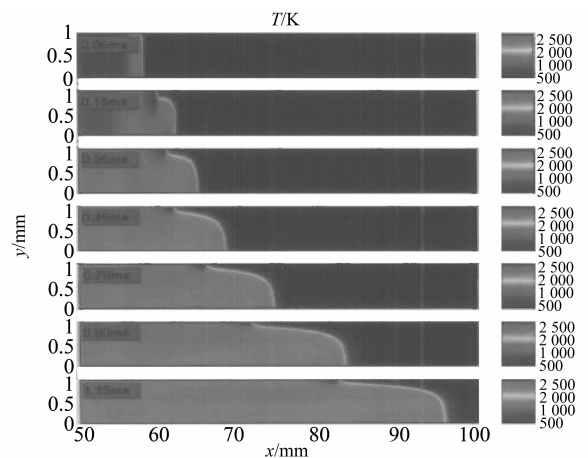


图 5 蘑菇状火焰的形成过程, APL4 - 1

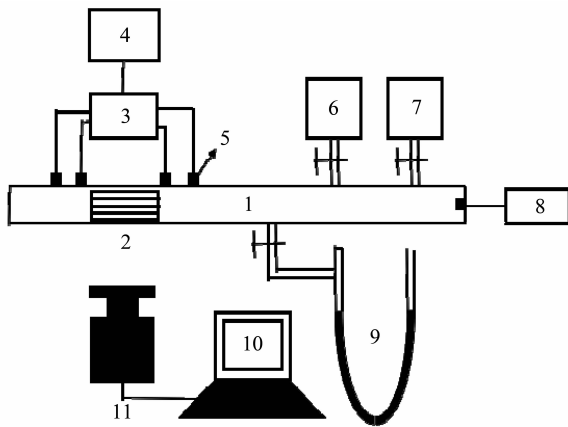
Fig. 5 The process of mushroom-shaped flame formation, APL4 - 1

火焰的快速传播。从这里可以看出，减弱质量扩散能够抑制火焰的拉伸变形，也有利于形成平面火焰，进而对火焰也起到了稳定的作用。

2 预混气体火焰在平板狭缝中的传播实验

2.1 实验装置说明

本文实验的装置由点火系统、管路、抽真空系统和数据采集系统等几部分组成，图 6 所示，其中点火系统由起爆箱、计算机和带 I/O 口的板卡组成；火焰加速段是由 6 个长度均为 0.3 m、内径为 81 mm 的短管连接而成；数据采集系统的主体部分是由 York 公司所生产的 Phantom V5.0 高速数字摄像系统组成，该系统像素高（1 024 × 1 024）、摄影速度快（1 000 帧/s ~ 6 000 帧/s），因此可以快速地捕捉到预混气体火焰在狭缝中的传播和熄灭状态。



1.实验管道 2.观察窗 3.电荷放大器 4.示波器 5.光电传感器 6.混气罐
7.真空泵 8.高压放电装置 9.水银压力计 10.计算机 11.高速摄影机

图 6 实验装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of Experimental device

实验的过程分为充气、点火和数据采集等三个步骤：

首先，充气过程即将管道抽为真空状态，再充入化学计量比为 1 的甲烷 - 空气预混气体到常压状态；

其次，点火过程即在准备工作完成后启动点火程序，与此同时高速数字摄像机也会同时启动，点火是通过火花塞打火将预混气体点燃，燃烧的火焰由点火端传播至平板狭缝；

最后，数据采集即火焰到达可视窗口时由高速数字摄像机在平板狭缝中捕捉火焰的整个传播过程。

2.2 点点火条件下预混绝热火焰在平板狭缝中的传播 (ASK)

点点火条件下的模拟算例和初始设置如表 1 - 3 所示，几何模型如表 3 所示，Lewis 数和 Prandtl 数都等于 1。具体算例如表 3 所示 (ASK)。

表 1 平面点火时绝热火焰模拟算例
Table 1 Adiabatic wall studies: Plane ignition

算例	狭缝高度 b	狭缝长高比 a/b	参考动力黏度 $\mu_r \times 10^{-6} / (\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	参考质量扩散系数 $D_r \times 10^{-6} / (\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	雷诺数 R_e	路易斯数 L_e
APL1	2	50	6.930	6.930	71.0	1.0
APL2	2	50	13.860	6.930	35.5	1.0
APL3	4	25	6.930	6.930	142.0	1.0
APL4	1	100	6.930	6.930	35.5	1.0
APL4	2	50	6.930	4.465	71.0	2.0
APL4	2	50	6.930	13.860	71.0	0.5

表 2 所示的是本章节实验的初始条件，本文通过研究火焰的前后场速度 u 和 v 、密度 ρ 、温度 T 、化学反应速率 W_m 和焓量 $\dot{\omega}$ 在不同时刻的空间分布情况，此外，本文还研究了预混气体火焰燃烧所形成的形状发展与变化的过程。

表 2 初始条件设置
Table 2 Initial condition

	未燃区	已燃区
T_0 (K)	293	2 344 (3 000)
P_0 (Pa)	13 332.2	13 332.2
Y_{f0}	1	0
U_0 (m/s)	0	0
V_0 (m/s)	0	0

表 3 点点火时绝热火焰模拟算例

Table 3 Adiabatic Wall Studies: Spark Ignition

算例	狭缝高度 b / mm	狭缝长高比 a/b	雷诺数 R_e
ASK1	2.0	50	71.0
ASK2	4.0	25	142.0
	1.0	100	35.5

预混气体能被点燃与点火能量有很大的关系，实验表明，当预混气体浓度一定时，只有点火能量大于某个特定能量值时，才能使预混气体被点燃，这个特定能量值定义为最小点火能量：

$$E_{\min} = \frac{4}{3} \pi r_m^3 \rho_b c_p (T_b - T_u) \quad (5)$$

式中： r_m 为临界点火半径，即最小点火半径；临界点火半径 r_m 和火焰的厚度 δ_f 的关系为

$$r_m = 1.85 \delta_t \quad (6)$$

参考前文的计算结果得到 $\delta_t = 0.2 \text{ mm}$, 进而可以求得最小的点火半径等于 0.37 mm , 为了确保点火顺利, 设置 0.40 mm 作为点火半径, 初始的点火温度设置为 $3\,000 \text{ K}$ 。

2.3 标准条件下预混火焰在平板狭缝中的传播 (ASK1)

本算例设置的平板狭缝具有 APL1 相同的几何尺寸, 长高比 (a/b) 等于 50。图 7 与图 8 所展示的是火焰和压力的传播在 0.5 ms 前的有关情况, 这与平面点火存在着显著的区别: 首先, 火焰从最初时刻开始沿着最初不连续面的外法线向未燃区域延伸, 并且朝着壁面, 即 Y 方向和向狭缝出口即 X 方向传播; 因 X 方向压力梯度较大使得出口位置火焰传播具有更快的速度; 因 Y 方向压力梯度要比点火端大而使出口位置的火焰锋面受到的推力, 因此预混火焰在点火端会出现一个“凹陷”区域。预混火焰靠近出口位置的部分会最先到达壁面位置, 这会导致“凹陷”部分被断开而使得火焰锋面在壁面位置分成了两个部分: 其中的主体部分会沿着平板狭缝的出口进行传播, 而另外的火焰处于孤立状态, 并且位置也会比主体部分要靠后一些, 这样的传播过程被称作“分枝”现象。孤立部分的未燃火焰会被高温已燃气体慢慢包围而被消耗掉, 孤立部分在 0.25 ms 时就消失掉了, 而主体部分会继续朝着出口方向传播, 并且形成蘑菇形状。

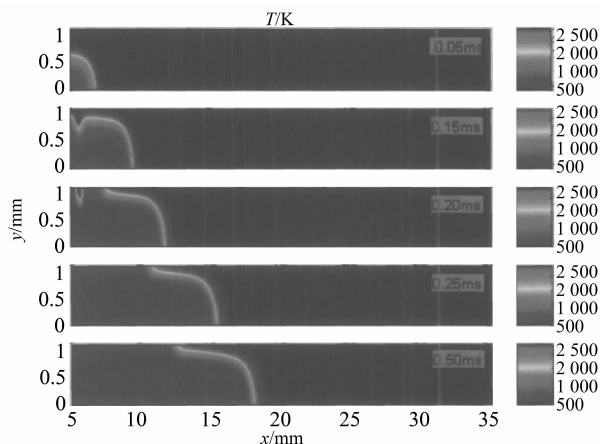


图 7 0.50 ms 之前, 火焰传播时温度侧形的变化, ASK1

Fig. 7 Temperature profiles on initial flame development, ASK1

与平面点火的情况进行比较发现, 点点火条件下的火焰传播具有以下的特点: 首先, 火焰传播速度相对于平面点火要快; 其次, 点点火的预混火焰

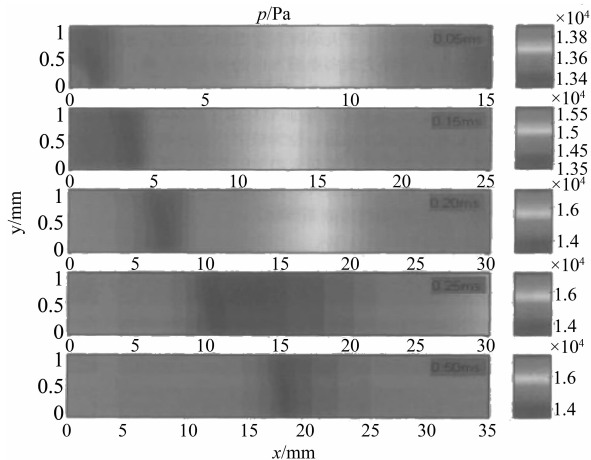


图 8 0.50 ms 之前, 火焰传播时压力场的变化, ASK1

Fig. 8 Pressure profiles of initial flame development, ASK1

相对面积增长迅速, 瞬间超过平面点火, 因较大的相对火焰面积会使得传播速度也较快; 最后, 点点火条件下的火焰在狭缝中心位置具有一个显著的起伏过程, 这也和相对火焰面积的变化情况相对应。在预混火焰到达锋面之前, 因相对火焰面积增加而使得火焰传播速度增长, 一旦预混火焰接触到壁面, 就会产生火焰的“分枝”现象: 主体火焰的面积处于不断增长的趋势, 而孤立火焰的面积却在不断的“萎缩”直至消失。因此, 预混火焰总的面积处于缓慢增长的趋势, 而且加速度也在不断变小, 一旦孤立火焰消失后, 预混火焰的面积又随着主体部分的继续传播而增长较快, 预混火焰的传播速度也开始增加。

2.4 狭缝高度对火焰传播的影响 (ASK2)

将狭缝的高度值增加至 4 mm , 雷诺数和狭缝长高比的值分别等于 142.0 和 25, 这与算例 APL3-1 是相同的。

图 9 展示的是蘑菇状火焰的形成过程, 演示的是火焰形状在传播过程中的变化情况, 预混火焰从最初状态的四分之一圆形状开始朝着周围传播, 同时还处于不断变形的状态, 其中也看到了火焰的“分枝”现象, 但是明显区别于 APL3-1 的是预混火焰在达到出口前的形状一直是蘑菇状, 而不是郁金香状。当降低平板狭缝的高度至 1 mm 时, 预混火焰传播所形成的是蘑菇形状, 如图 10 所示, 但是预混火焰在达到壁面的时候却没有出现“分枝”现象, 这和之前的算例不同。这是由于预混火焰在较短的时间内传播到平板狭缝的壁面位置, 而此时的预混火焰在传播过程中却没有发生太大的变形现象。因此, 火焰一旦传播到壁面位置则其平面点火

的方式就与 APL3 - 2 一致。

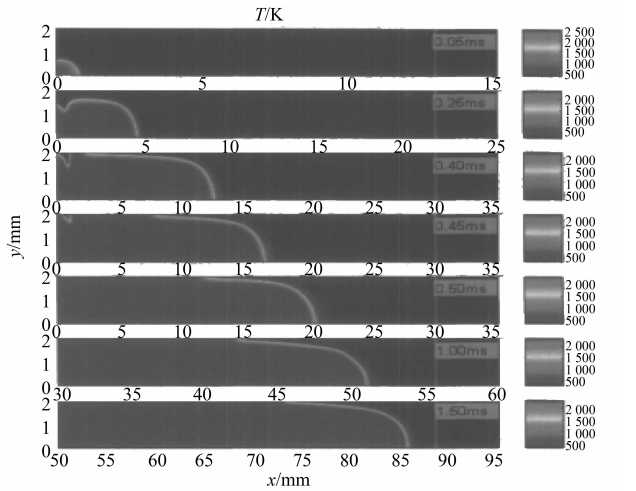


图9 蘑菇状火焰的形成过程, ASK2 - 1

Fig. 9 The process of mushroom-shaped flame formation, ASK2 - 1

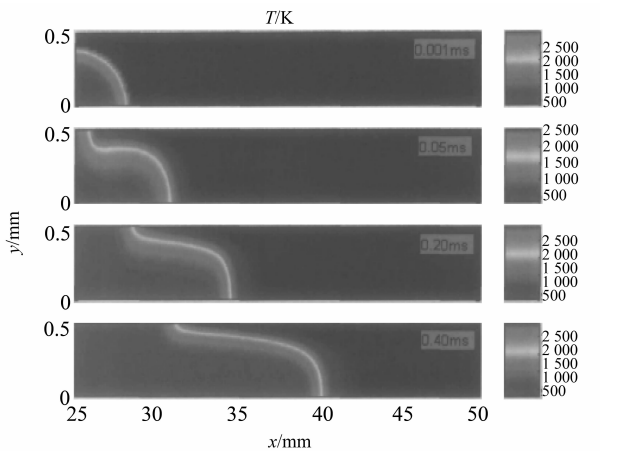


图10 蘑菇状火焰的形成过程, ASK2 - 2

Fig. 10 The process of mushroom-shaped formation, ASK2 - 2

3 结论

本文主要是研究了绝热壁面下平面点火与点点火两种情况下, 预混气体火焰在封闭——开放的平板狭缝中的传播机制。借助研究预混火焰前后流场的一些特性, 诸如密度、速度、压力、化学反应的速率和涡量等参数空间分布和边界层的发展等, 深入讨论动力黏度、狭缝高度和质量系数等不同参数对预混火焰的传播和火焰形成的形状所产生的影响。

通过总结实验结果和算例模拟, 可以得到如下结论:

1) 预混火焰的相对面积大小能够对火焰的传

播速度产生直接的影响, 当相对火焰面积较大的时候, 预混火焰就具有较快的传播速度, 而且火焰的传播速度大小与火焰的相对面积成近似的正比例关系。

2) 预混气体的绝热火焰在平面点火的条件下会在平板狭缝中生成“蘑菇”和“郁金香”两种形状的火焰。减小狭缝的长高比会使得“郁金香”火焰更易形成, 当狭缝长高比 (a/b) 的值小于 40 时, 预混火焰燃烧形成的是“郁金香”形状。

3) 增强质量扩散能够有助于预混火焰形成郁金香形状, 当质量扩散系数不大于热扩散系数的时候, 及 Lewis 数 ≥ 1 , 预混火焰更容易形成蘑菇形状; 反之, 当 Lewis 数 < 1 时, 预混火焰更容易形成郁金香形状。

4) 点点火条件下, 当狭缝高度较大时, 火焰在到达壁面的瞬间会形成火焰“分枝”现象, 而狭缝高度较小时, 火焰“分枝”不会出现, 由于相对火焰面积增长较快, 点点火时的火焰传播速度相对于平面点火要快。点点火条件下更有利于蘑菇状火焰的形成。

参考文献:

- [1] SPALDING D B. A theory of inflammability limits and flame-quenching[J]. Proc Roy Soc London A, 1957, 240: 83 - 100.
- [2] KHOKHLOV A M, ORAN E S, CHTCHELKANOVA A Y, et al. The interaction of a shock with a sinusoidally perturbed flame[J]. Combustion and Flame, 1999, 117: 99 - 446.
- [3] LEE S T, AND TSAI H T. Numerical investigation of steady laminar flame propagation in a circular tube[J]. Combustion and Flame, 1994, 99: 484 - 490.
- [4] ALDER J. One-dimensional laminar flame propagation with distributed heat losses thin-flame theory[J]. Combustion and Flame, 1963, 7: 39 - 49.
- [5] BUCKMASTER. The quenching of deflagration waves [J]. Combustion and Flame, 1976, 26: 151 - 162.
- [6] 曲忠伟, 颜事龙, 马宏昊. 预混气体爆轰胞格结构定性仿真建模[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2013, 52 (5): 31 - 38.
- [7] LINAN A. Gasification effects in the heterogeneous ignition of a condensed fuel by a hot gas [J]. Acta Astronautica, 1978, 1: 22 - 26.
- [8] VON KARNMAN T, MILLAN G. Theoretical and experimental studies on laminar combustion and detonation waves, fourth symposium (International) on combustion [M]. The Combustion Institute, Pittsburgh, 1953: 173

- 177.
- [9] BENKHALDOUN F, LARROUTUROU B, DENET B. Numerical investigation of the extinction limit of curved flames [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1989, 64:187-198.
- [10] 周凯元,李宗芬. 丙烷-空气剥燃火焰通过平行板狭缝时的淬熄研究[J]. *爆炸与冲击*, 1997, 17:111-118.
- [11] 周凯元. 气体爆燃火焰在狭缝中的淬熄[J]. *火灾科学*, 1999, 8: 22-32.
- [12] 周凯元,李宗芬,周自金. 波纹板阻火器对爆燃火焰淬熄作用的实验研究[J]. *中国科学技术大学学报*, 1997, 27: 449-454.
- [13] 宋占兵. 预混气体在狭缝中的传播机理与熄灭条件的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2005.
- [14] MINAEV S S, SERESHCHENKO E V, FURSENKO R V, et al. Splitting flames in a narrow with a temperature gradient in the walls [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2009, 45: 119-125.
- [15] 曲忠伟,颜事龙,马宏昊. 预混气体爆轰胞格结构定性仿真建模[J]. *中山大学学报:自然科学版*, 2013, 52(5):31-38.
- [16] 曲忠伟,马宏昊,林谋金. 预混气体爆轰波传播定性仿真建模研究[J]. *安徽工业大学学报*, 2013, 30(4): 430-434.
- [17] PIZZA G, FROUZAKIS C E, MANTZARAS J, et al. Dynamics of premixed hydrogen/air flames in microchannels [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 152: 433-450.
- [18] KURDYMOV V N, FERNANDEZ-TARRAZO E. Lewis number effect on the propagation of premixed laminar flames in narrow open ducts [J]. *Combustion and Flame*, 2002, 128:382-394.

(上接第 28 页)

参考文献:

- [1] 杨承恩,贾欣乐,毕英君. 船舶舵阻横摇及其鲁棒性 [M]. 大连:大连海事大学出版社, 2001.
- [2] FUAT Alarcin, KAYHAN Gulez. Rudder roll stabilization for fishing vessel using neural network approach [J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34:1811-1817.
- [3] 杨承恩,贾欣乐. 舵阻摇 H_{∞} 控制器的设计 [J]. *中国造船*, 1999, 1:21-28.
- [4] BAITIS E, WOOLAVER D A, BECK T A. Ship roll stabilization in the U S Navy [J]. *J Naval Engineers*, 1989, 2: 43-53.
- [5] 沈建清,陈家和,赖延辉. 自适应准则的舵减横摇系统的仿真研究 [J]. *海军工程学院学报*, 1994, 6:44-51.
- [6] 罗凯,李俊,许汉珍. 舵减摇系统的滑动控制 [J]. *交通部上海船舶运输科学研究所学报*, 1999, 2:130-134
- [7] LAUVDAL T, FOSSEN T I, Rudder roll stabilization of ship subject to input ratesaturation using a gain scheduled control law [C] // *Proceeding of CAMS'98*. Fukuoka, Japan, 1998: 121-126.
- [8] 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 北京:科学出版社, 2000.
- [9] 胡启庸,汪石真,魏纳新. 舵减横摇技术研究 [J]. *中国造船*, 1996, 5:25-31.
- [10] 魏纳新. 水面舰艇在高海情下的横摇运动姿态控制技术 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2006.
- [11] 李国勇. 最优控制理论及参数优化 [M]. 北京:国防工业出版社, 2006.
- [12] 张显库. 非脆弱鲁棒 PID 控制器设计 [EB/OL]. *中国科技论文在线*, 2009-03:205.
- [13] THOR I. Fossen. Guidance and control of ocean vehicles [M]. John Wiley and Sons, 1994.
- [14] FOSSEN I, STRANDJ P. Tutorial on nonlinear Backstepping: applications to ship control [J]. *Modeling Identification and Control*, 1999, 20(2):83-134.