

# 管道内甲烷-空气预混火焰传播特性的实验与数值模拟研究

何学超<sup>1,2</sup>, 孙金华<sup>1</sup>, 陈先锋<sup>3</sup>, 袁国杰<sup>4</sup>

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230027; 2. 中国科学技术大学苏州研究院, 江苏苏州 215123;  
3. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北武汉 430070; 4. 香港城市大学建筑系, 中国香港 999077)

**摘要:**采用高速纹影摄像系统、压力传感器等对小型水平封闭管道内甲烷-空气预混燃烧火焰的传播过程进行了实验研究,得到了火焰锋面结构、传播速度和压力随时间的变化关系。研究表明,管道内预混火焰传播过程中,火焰结构会发生明显变化,即从向未燃气体凸出的球形层流火焰转变成向已燃气体凹陷的V形湍流火焰,同时伴有火焰传播速度的减小、压力的不断增大。另外运用标准 $k-\epsilon$ 模型,对非定常时的甲烷预混燃烧火焰进行数值模拟,得到了与实验结果类似的火焰传播特性和火焰结构的变化规律。

**关键词:**预混火焰; 实验研究; 数值模拟; 基元反应

**中图分类号:**TK121      **文献标识码:**A

## Experimental and numerical study on flame propagation and structure behaviors of methane-air premixed combustion in tube

HE Xue-chao<sup>1,2</sup>, SUN Jin-hua<sup>1</sup>, CHEN Xian-feng<sup>3</sup>, Richard K. K. Yuen<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230027, China;

2. Suzhou Institute for Advanced Study, USTC, Suzhou 215123, China;

3. School of Natural Resources and Environmental Engineering, WHUT, Wuhan 430070, China;

4. Department of Building and Construction, CityU, Hongkong 999077, China)

**Abstract:** The high speed Schlieren photography system and pressure sensors were used to investigate the flame propagation process of methane-air mixture in a small horizontal tube. The flame structure, propagation velocity and mixture pressure were obtained from the experiment. The results show that flame structure changes greatly in the flame propagation process, suddenly changing from a spherical laminar flame pointing forward to a V shape turbulent flame forming a cusp toward the burned gas. In this process, the velocity decreases but the pressure increases continuously. With the  $k-\epsilon$  turbulent combustion model, unsteady premixed methane flame in a 2D matrix burner was numerically simulated. The characteristics of flame propagation and flame structure variation qualitatively agree with the experimental data very well.

**Key words:** premixed flame; experimental study; numerical simulation; element chemical reaction

收稿日期:2007-04-16;修回日期:2008-05-22

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50536030)资助。

作者简介:何学超,男,1982年生,博士。研究方向:工业安全。E-mail: xche@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:孙金华,博士/教授。E-mail: sunjh@ustc.edu.cn

## 0 引言

近年来,各种矿难事故频发,尤其是瓦斯爆炸事故更是时有发生. 仅在 2006 年,由于煤矿瓦斯爆炸导致 10 人以上死亡的重大安全事故就达 14 起,累计死亡人数达到 292 人<sup>[1]</sup>,给国家带来巨大的财产损失. 瓦斯燃烧爆炸产生火焰,促使爆源附近的气体以极大的速度在巷道内传播. 因此,对火焰在管道中的传播进行研究,尤其是研究火焰结构的变化,对有效控制爆炸燃烧过程、防止灾难事故的发生有重要意义.

在已有的文献中,陈志华等<sup>[2]</sup>研究了在楔形障碍物的情况下甲烷-空气预混火焰卧式燃烧在方管内传播与变形的详细过程;Fairweather 等<sup>[3]</sup>采用甲烷-空气混合物,在半封闭管道内进行了爆炸实验,得到了爆炸过程中火焰位置、形状和产生的超压值;李宇红等<sup>[4]</sup>通过数值模拟得到了燃烧过程中基元组分的浓度分布;徐景德等<sup>[5]</sup>模拟了激波诱导瓦斯气体爆燃的过程;Kuzuu 等<sup>[6]</sup>采用扩展的 MAC 方法和一步不可逆反应,对封闭管道中甲烷-空气预混火焰传播数值模拟,得到了由火焰引起的漩涡在火焰传播过程中的变化规律. 但是火焰发展初期,针对火焰结构的变化以及层流向湍流转变的研究却相对较少. 本文以常见的甲烷燃料(瓦斯和天然气的主要成分)作为研究对象,对它在管道燃烧中的传播过程进行了实验研究和数值模拟,观测了甲烷-空气预混燃烧中的火焰传播过程,分析了火焰锋面的变化原因,并将火焰的传播速度和管道内测量的压力变化与计算结果进行了比较.

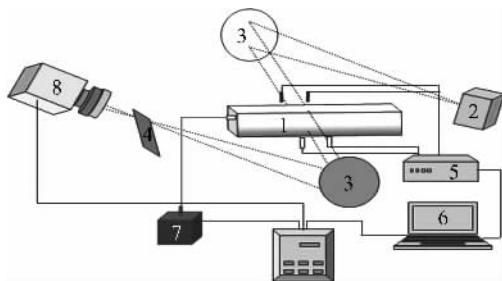
## 1 实验研究

### 1.1 实验系统

所用实验系统的结构简图如图 1 所示. 实验系统由密闭燃烧容器、点火系统、数据采集系统、纹影光学系统、高速摄像系统、控制系统等组成. 燃烧器是一个截面为正方形的长方体管道,其尺寸为 50 cm×8 cm×8 cm. 为了便于观察火焰在管道中的传播,管道的两个侧面为钢化玻璃,上下为钢板. 其剖面如图 2 所示. 为了确保实验过程的安全,在管道的上方设置了一个泄压口.

### 1.2 实验过程

首先按照图 1 所示调整好实验系统的各仪器设备,然后用真空泵将燃烧管抽成真空状态,充入 8%



1. 管道 2. 碘钨灯 3. 纹影凹面镜 4. 纹影刀口 5. 数据采集仪  
6. 计算机 7. 高压点火器 8. 高速摄像机 9. 同步控制器

图 1 实验系统结构示意图

Fig. 1 Sketch map of the experimental system

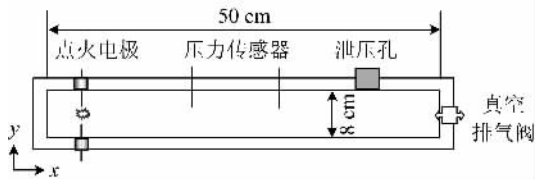


图 2 燃烧容器剖面图

Fig. 2 Section map of the combustion chamber

体积比的甲烷-空气预混可燃气,使其内部达到一个大气压. 泄压口用厚度约为 0.4 mm 的塑料薄膜封闭. 打开高压点火器电源,电火花点燃预混气后,火焰便在管道中传播. 火焰波阵面变化的整个细微动态过程及流场特性的变化分别用高速纹影摄像系统和高频动态压力传感器等来记录和测量. 高速摄像机、高速数据采集仪和高压点火器的点火时间控制均由同步控制装置来实现.

## 2 数值模拟

### 2.1 计算方法

为了简化问题,使用二维可压缩形式的  $N-S$  方程,采用 SIMPLE 格式求解有限差分方程. 对于燃烧管内的湍流流动,本文采用标准  $k-\epsilon$  模型进行描述,有以下方程<sup>[7]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i}) = G - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\epsilon} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}) = C_1 G \frac{\epsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

湍流燃烧中的燃烧反应速率,同时受到化学反应速率和流动参数的影响,目前还没有普遍适用的湍流燃烧反应模型,应用较多的有 EBU 模型、拉切滑模型、 $k-\epsilon-g$  模型、PDF 输运方程模型等. 由于 EBU 模型过分突出了湍流混合对燃烧速率的决定

作用,而忽略了分子输运和化学反应动力学过程的作用,为了综合考虑层流反应机制和湍流脉动机制对管道内燃烧过程的影响,选用修正的 EBU-Arrhenius 混合反应模型,有时均反应率方程:

$$R_{fu} = -\min(R_{fu,A} - R_{fu,T}) \quad (3)$$

其中,

$$R_{fu,A} = B\rho^2 Y_1 Y_2 \exp\left[-\frac{E}{RT}\right] \quad (4)$$

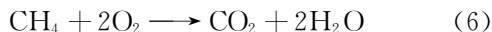
$$R_{fu,T} = C_{EBU}\rho(\epsilon/k)\min(Y_1, Y_2, Y_3) \quad (5)$$

式中, $x, t$  分别为空间和时间坐标; $\rho, Y_1, Y_2, Y_3$  分别为密度,燃料、氧和燃烧产物的质量分数; $k$  和  $\epsilon$  分别湍流动能和湍流耗散率; $u_i$  为  $i$  方向的速度分量; $\mu_{\text{eff}}$  和  $R_{fu}$  分别为有效粘性系数和时均燃烧速率; $\sigma$  为 Prandtl 数; $C_1, C_2$  为常数; $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t, \mu_t = \frac{C_D \rho k^2}{\epsilon}, C_D$  为经验常数;

$$G = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left[ \left[ \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \right],$$

$\delta_{ij}$  为克罗内克符号; $B$  为频率因子, $E$  为活化能, $R$  为普适气体常数, $C_{EBU}$  为经验常数,通常取为 0.35~0.4.

对于甲烷空气反应系统,前人<sup>[8]</sup>已经得到了详细的化学反应动力学机理,但研究主要针对燃烧化学反应对流动的影响,因此采用了简单化学反应模型,即:



## 2.2 初始条件和边界条件

燃烧管为以  $x$  轴为底边的长方形.密封的容器内充满 8% 体积比的甲烷-空气预混气体,初始压力与环境压力相同(101.325 kPa).与实验装置相似,在距离燃烧管底部 5 cm 处放置一 2 000 K 高温气团以引燃,其余部分温度为 300 K.初始时,流体处于静止状态.管道固壁均作绝热处理.在近壁面区域,由于输运参数发生剧烈变化,选取由 Launder 等<sup>[9]</sup>给出的壁面函数来处理.

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 火焰结构分析

图 3 为实验过程中拍摄到的一组典型的火焰传播高速纹影图片.高速摄像机的拍摄速率是 2 000 帧/s.

由图 3 可以看出,点火后的火焰传播初始,火焰面以球形阵面向四周扩张,燃烧产生的高温气体均

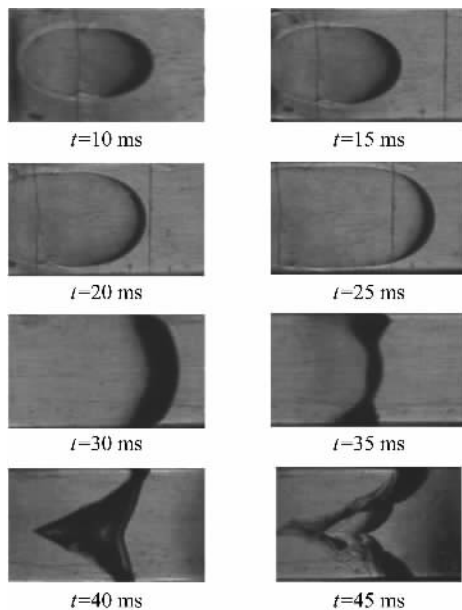


图 3 火焰前锋随时间变化图

Fig. 3 High speed Schlieren photographs of flame front

匀地向外膨胀;随后由于上下侧壁的限制,径向传播速度明显小于向右的轴向传播速度.到  $t=30$  ms 左右时,球形火焰的前沿逐渐变平,火焰面积也随之减小,进而形成中部向已燃气凹陷的火焰阵面结构;随着火焰的向前传播,凹陷的深度也不断加大,直至形成近似 V 形火焰.到  $t=45$  ms 时,可以看到火焰阵面出现了明显的褶皱和分层现象,表明强烈的湍流已经形成,并开始影响火焰阵面结构<sup>[10]</sup>.火焰面从球面变成向内凹陷的 V 型火焰,也称为 Tulip 火焰.关于这种特殊火焰结构的形成原因和机理有诸多解释,如 Dunn-Rankin 等<sup>[11]</sup>认为火焰前方的轴向速度梯度差是形成 Tulip 火焰的主要原因;Guenoche 等<sup>[12]</sup>把 Tulip 火焰的形成原因归结为火焰面与压力波的相互作用;Markstein<sup>[13]</sup>和 Strehlow 等<sup>[14]</sup>认为当火焰传播到燃烧管侧壁时,火焰面积减小,火焰传播速度会相应减小,这是产生 Tulip 火焰的原因,也被称为 Taylor-Markstein 不稳定性;Gonzalez 等<sup>[15]</sup>认为沿管道方向的速度分布和 Darrieus-Landau 不稳定性是导致 Tulip 火焰形成的两个重要因素.本研究组根据实验结果认为,燃烧面积减小,进而降低火焰传播速度以及 Darrieus-Landau 不稳定性是 Tulip 火焰形成的主要原因.

图 4 是火焰传播过程的数值模拟结果.对比图 3 可以看出,火焰结构的变化过程与实验结果大致相符.数值模拟结果显示,在火焰传播初期,火焰结构的变化更加明显.在本文的数值模型中,将电火花

点火过程模拟成在点火瞬间,把一小团高温气体置于静止的均匀混合未燃气体中,通过扩散与对流作用发生化学反应,实现点火.实验采用电火花点火,初始阶段是一个比较缓慢的发展过程.这是数值模拟与实验结果产生差异的主要原因.

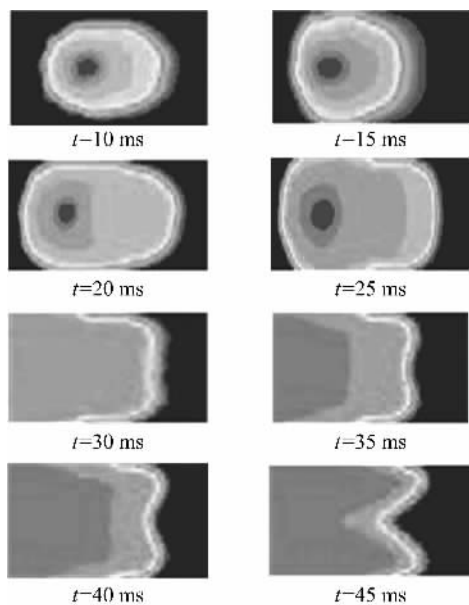


图 4 火焰传播过程数值模拟图

Fig. 4 Simulation results of flame propagation

### 3.2 火焰传播速度和流场压力分析

对于管道内预混气体火焰,它的火焰传播速度  $V_f$ :

$$V_f = V_a + V_c \quad (7)$$

式中,  $V_a$  为燃烧产物膨胀引起的气流速度,  $V_c$  为预混气体的燃烧速度. 本文中的火焰传播速度定义为轴线上火焰锋面相对于静止坐标系的速度,根据高速摄像机拍摄的纹影图像计算得出. 图 5 所示是火

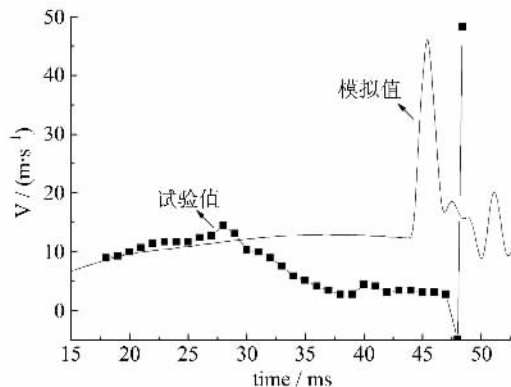


图 5 火焰传播速度随时间变化关系图

Fig. 5 Relationship between flame propagation velocity and time

焰传播速度随时间变化的实验结果和模拟结果. 实验结果显示,在点火初期,火焰传播速度迅速增加,当  $t=27$  ms 左右达到最大值;而后,火焰速度开始下降,到  $t=39$  ms 时火焰传播速度达到最小值,并维持在较小速度向前传播;当  $t=47$  ms 时,管道内压力增加到一定值导致泄压膜破裂,由于泄压口稀疏波的作用,速度急剧上升. 根据数值模拟得到的预混火焰速度,在火焰传播开始阶段,火焰传播速度逐渐增加,在 35 ms 时达到最大值;然后缓慢下降;在 43 ms 时容器泄压,气体速度瞬间上升然后急剧下降. 在  $t=30$  ms 之前,计算值与实验结果吻合较好,速度的最大值也比较接近;在  $t=30$  ms 以后,实验值逐渐下降而数值模拟的火焰传播速度变化较小. 这一方面主要是因为计算中运用标准  $k-\epsilon$  模型来描述管道内的湍流运动,该模型假设流动为完全湍流,分子粘性的影响可以忽略,只适合完全湍流的流动过程模拟,当湍流度增加时,预混火焰的传播速度、热释放速率和压缩波的强度随之增加,压力峰值出现的时间也会变短、位置前移、强度增加,但是实际的试验过程中,在点火后的一个阶段,预混火焰是以层流形式向前传播,湍流影响比较小,而且结合图 3 可知,仅在试验的最后阶段湍流的影响才比较明显. 另一方面,计算时假设气体为理想的绝热膨胀过程,没有考虑火焰传播过程中已燃区域热散失的影响;但实际上,在整个实验时间段内火焰的传播速度都较慢(大部分时间为几米每秒),显然在这样较为缓慢的传播速度下,绝热过程的假设会给计算结果带来误差:由于已燃区热散失的影响,使得已燃区的温度和压力迅速下降,对未燃区气体的热膨胀效应减弱. 因此,在今后的工作中,应该针对管道内预混火焰由层流到湍流的发展过程,对相关的控制方程和流动模型等进行修改,同时考虑湍流度对计算结果的影响.

火焰在管道的传播过程中会产生压力波,同时压力波也会反过来影响火焰的传播. 图 6 为火焰传播过程中压力随时间变化的实验与计算结果,两者较为吻合. 泄压以前,压力值均随时间不断增加. 当  $t > 35$  ms, 实验值出现小的振荡,然后达到一个峰值. 由图 3 的纹影图片结果可知,此时火焰阵面结构发生明显变化,湍流尺度不断加强,导致火焰结构变形和流场的不稳定,从而引起压力的振荡和波动;计算时由于采用标准  $k-\epsilon$  模型,湍流脉动的影响加速了动量、能量和质量的输运,使得压力以较快的速度

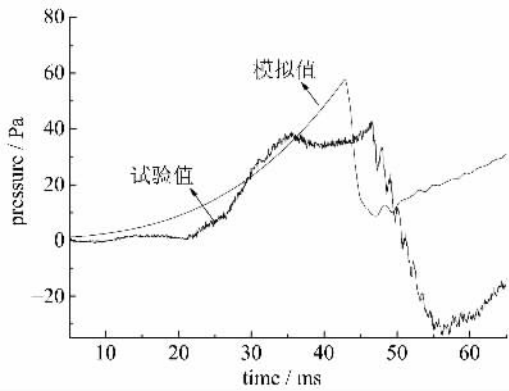


图6 预混气体压力随时间变化图

Fig. 6 Relationship between pressure and time

增加,达到的峰值更大.当管道内压力增加到一定程度后,泄压膜破裂导致管道内压力急剧下降,实验过程中由于泄压后管道内的已燃气体过度膨胀,压力骤降更为剧烈,因此实验过程中压力值比模拟值下降更加明显.

## 4 结论

本文利用高速纹影摄像等手段,对封闭管道内甲烷-空气预混气体火焰传播过程中的火焰结构、传播速度以及压力特性进行了实验研究,并结合  $k-\epsilon$  模型和修正的 EBU-Arrhenius 混合反应模型进行了数值模拟,得到如下结论:

(I) 点火初期,火焰以稳定的球面波向前加速传播,当  $t=27$  ms 左右达到最大值.而后,火焰速度开始下降,到  $t=39$  ms 时火焰传播速度达到最小值,并维持在较小速度向前传播.但整个过程的流场压力不断增大.

(II) 在火焰传播速度下降的过程中,即从  $t=27$  ms 到  $t=45$  ms 之间,不仅火焰结构形态发生了改变,而且火焰阵面的燃烧状态也发生了改变.火焰结构由向未燃区凸出的球面结构变成了向燃烧产物侧凹陷的 V 型火焰结构,火焰面的燃烧状态也由层流燃烧逐渐发展成湍流燃烧.

(III) 运用标准  $k-\epsilon$  模型,对非定常时的甲烷预混燃烧火焰进行了数值模拟,得到了火焰阵面结构、传播速度和压力随时间的变化过程,与实验值较为吻合.

在下一步工作中,需要对相关控制方程和流动模型进行适当修正,同时深入分析湍流度对实验和数值计算结果的影响,使计算值更加吻合实验结果.

## 参考文献(References)

- [1] 国家安全生产监督管理局[EB/OL]. <http://www.chinasafety.gov.cn/>.
- [2] 陈志华,叶经方,范宝春,等. 方形管内楔形障碍物对火焰结构与传播的影响[J]. 爆炸与冲击, 2006, 2(3): 208-213.
- [3] Fairweather M, Hargrave G K, Ibrahim S S, et al. Studies of premixed flame propagation in explosion tubes[J]. Combustion and Flame, 1999, 116(4): 504-518.
- [4] 李宇红,祁海鹰,张宏武. 甲烷预混燃烧火焰的详细数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(1): 119-122.
- [5] 徐景德,张莉聪,杨庚宇. 激波诱导瓦斯气体爆燃的三维数值模拟[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(6): 22-25.
- [6] Kuzuu K, Ishii K, Kuwahara K. Numerical simulation of premixed flame propagation in a closed tube[J]. Fluid Dynamics Research, 1996, 18(3): 165-182.
- [7] Wiekema B J. Vapour cloud explosion mode[J]. Journal of Hazardous Material, 1980, 3(3): 221-232.
- [8] 董刚,黄鹰,陈义良. 不同化学反应机理对甲烷射流湍流扩散火焰计算结果影响的研究[J]. 燃料化学学报, 2000, 28(1): 49-54.
- [9] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2): 269-289.
- [10] Chen X F, Sun J H, Liu Y, et al. Microstructure of premixed propane/air flame in the transition from laminar to turbulent combustion[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(5): 685-691.
- [11] Dunn-Rankin D, Barr P K, Sawyer R F. Numerical and experimental study of tulip flame formation in a closed vessel[C]// Proceedings of the 21st Symposium (International) on combustion. Pittsburgh: Pergamon, 1986: 1 291-1 301.
- [12] Guenoche H. Non-steady Flame Propagation[M]. New York: Pergamon, 1964.
- [13] Markstein G H. A shock tube study of flame front-pressure wave interaction[C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Combustion. Reinhold, New York: Pergamon, 1956: 387-398.
- [14] Strehlow R A. Combustion Fundamentals[M]. New York: McGraw-Hill, 1985.
- [15] Gonzalez M, Borghi R, Saouab A. Interaction of a flame front with its self-generated flow in an enclosure: the "tulip flame" phenomenon[J]. Combustion And Flame, 1992, 88(2): 201-220.