

文章编号: 1001-1455(2008)05-0385-06

甲烷/空气预混气体火焰的传播特征*

陈东梁^{1,2}, 孙金华², 刘 义^{2,3}, 马晔风¹, 韩学斌¹

(1. 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029;

2. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026;

3. 中国石油大学化学化工学院, 山东 东营 257061)

摘要: 利用高速纹影摄像等技术探讨了密闭管道内不同当量比的甲烷/空气预混气体火焰的传播特征。结果表明, 当甲烷含量接近当量值时, 预混气体火焰传播中会发生火焰阵面由向未燃区弯曲到向已燃区弯曲的转折过程, 逐渐由层流燃烧转变成湍流燃烧, 并形成 Tulip 火焰结构; 当甲烷含量偏离当量值一定程度时, 预混火焰呈现出典型的层流燃烧特征, 不会发生火焰阵面由向未燃区弯曲到向已燃区弯曲的转折过程。Tulip 火焰结构形成于火焰传播速度迅速降低的区间里, 且只有当减速阶段的最大加速度的绝对值大于某一数值时才能形成; Tulip 火焰结构是预混火焰由层流燃烧向湍流燃烧转变的一个中间过程。

关键词: 爆炸力学; 湍流燃烧; 高速纹影摄像; 甲烷/空气预混火焰; Tulip 火焰

中图分类号: O381

国标学科代码: 130·3510

文献标志码: A

1 引 言

由可控燃烧的失控而导致火灾爆炸的发生通常经过湍流燃烧及其加速过程。湍流燃烧的发生能在瞬间内增大燃烧面积, 使单位时间内的能量释放速度增大, 压力升高, 最终导致燃烧失控并引发火灾爆炸等事故^[1-3]。因此, 有效地控制燃烧过程, 充分认识由层流燃烧向湍流燃烧发展的条件及其成长的过程, 对防止火灾爆炸等灾难事故的发生非常重要。

C. de C. O. Ellis^[4]在管道内的预混气体火焰中拍摄到了火焰阵面的不规则传播。他在一个内径为 5 cm、长 19.5 cm 的密闭管道中做 CO 和 O₂ 预混燃烧实验时, 发现了传播过程中火焰阵面由向前弯曲到向后形成尖点的转变过程。G. D. Salamandra 等^[5]把这种火焰命名为 Tulip 火焰, 此后, 众多学者对这一有趣的火焰结构进行了实验研究和数值模拟研究。D. Dunn-Rankin 等^[6]把实验结果和非粘性数值模拟进行比较, 发现 Tulip 结构在火焰接触到管道壁面时开始形成, 由于 Landau-Darrieus 不稳定性, 造成了火焰阵面前面的压缩未燃气体和管道壁面之间的相互作用, 从而产生的扰动促使了 Tulip 火焰结构的形成。M. Matalon 等^[7]研究了封闭管道内预混气体火焰的传播, 认为在火焰的传播过程中火焰阵面会形成一系列的旋涡, 从而引起了已燃气体的涡旋状态, 促成了 Tulip 火焰结构的形成。B. Zhou 等^[8]通过数值模拟研究认为, 在火焰的传播过程中, 火焰阵面和火焰引起的流动之间的相互作用是形成 Tulip 火焰的原因。C. Clanet 等^[9]在一端开口的直径分别为 2.5 和 5 cm、长为 0.6~6 m 的管道内的预混丙烷/空气火焰中发现了 Tulip 火焰结构。L. Kagan 等^[10]对一个细绝热管道内的预混气体燃烧进行了二维数值计算, 认为爆轰首先发生在流体阻力效应较强的边界层中, 此后迅速传过管道内部。

如上所述, 众多学者对预混气体中的火焰传播过程进行了研究, 特别是对 Tulip 火焰结构进行了分析, 但对 Tulip 火焰结构的形成条件和影响因素还有不太清晰的地方。本文中运用高速纹影等技术对闭口管道内不同当量比的甲烷/空气预混气体火焰的传播过程进行研究, 分析火焰的传播特征。

* 收稿日期: 2007-03-08; 修回日期: 2007-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(50576093);

中国科学院“百人计划”和北京化工大学青年教师科学研究基金项目(QN0807)

作者简介: 陈东梁(1979—), 男, 博士。

2 实验设计

2.1 实验装置

实验系统由密闭燃烧管道、点火系统、高速纹影摄像系统、控制系统等组成,如图 1 所示。

燃烧管道是一个正方形截面的管状容器,长 500 mm,宽 80 mm,高 80 mm。为了便于观察燃烧管道内火焰的传播以及 Tulip 火焰的形成发展过程,容器的两侧为玻璃,上下为不锈钢。纹影系统由一个功率为 50 W 的卤钨灯光源、两个焦距为 2 m 的凹面镜和一个刀口组成,其光路系统见图 1。在距离管道左端 5 cm 处安装了一对点火电极,同时为确保实验过程的安全性,在距离管道右端 7 cm 处的上壁面设置了一个泄爆口。

2.2 实验过程及条件

首先,按图 1 所示调试系统的仪器设备,连接高速摄像机、高压点火系统和控制器,用隔膜密封泄压口。然后,开启真空泵将管道抽至真空,再充入甲烷、空气预混气体至管道内压力为 100 kPa。调整好高压点火器和高速摄像机的参数和状态,一切处于待令状态后启动控制器。控制器将按预定时间来启动各个仪器。实验条件如下:点火电压为 30 kV,点火时间为 1 ms,高速像机拍摄速率为 $2\,000\text{ s}^{-1}$,隔膜材料为厚 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的涤纶膜。

3 实验结果及分析

3.1 不同含量甲烷/空气预混火焰的传播特征

图 2(a)为高速纹影拍摄的甲烷含量为 6%(当量比 $\Phi=0.61$)的甲烷/空气预混火焰在管道内传播的图像,由图中可以看出,初始时刻,火焰前沿以球面的形式向前传播,随着传播的进行,火焰前沿的形状逐步发生倾斜,上部火焰传播快于下部。图 2(b)为甲烷含量为 8%($\Phi=0.83$)的甲烷/空气预混火焰传播过程的纹影图像,和甲烷含量为 6%的火焰传播过程不同,火焰呈现出较对称的结构。初始的火焰以半球面的形状向前传播,约从 45 ms 开始,火焰前沿的半球面的曲率逐步减小,之后逐步形成一个平面,60 ms 时火焰面由开始的向未燃区弯曲转变成向已燃区弯曲,此后火焰面向已燃区弯曲的程度逐步增大,火焰面中出现小尺度的湍流燃烧。图 2(c)为甲烷含量为 10%($\Phi=1.06$)的甲烷/空气预混火焰传播过程的纹影图像,它的传播过程和甲烷浓度为 8%的类似,中间也发生了火焰面由开始的向未燃区弯曲转变成向已燃区弯曲的过程。图 2(d)为甲烷含量为 12%($\Phi=1.30$)的甲烷/空气预混火焰传播过程的纹影图像,由图中可以看出,初始火焰也以大致半球面向前传播,在 150 ms 左右也发生了火焰面的转折,此后火焰面向已燃区弯曲的程度有所增大,但很快上部的火焰传播远快于下部的,火焰面的向已燃区弯曲结构逐步被破坏。从图 2(e)甲烷含量为 14%($\Phi=1.55$)的甲烷/空气预混火焰传播过程的纹影图像可以看出,在这种情况下,火焰面呈现出不规则的形状且火焰主要分布于管道的上部。

3.2 甲烷/空气预混火焰的速度特征及 Tulip 火焰的形成

图 3 为不同甲烷含量 w 的甲烷/空气预混火焰前沿位置 l 和火焰瞬时传播速度 v 与时间 t 的关系。从图 3(a)中可以看出,对于甲烷含量为 6%的预混火焰来说,从点火开始到 37 ms 的时间内,火焰传播速度呈现一个小幅的下降,从 0.5 下降到 0.4 m/s,37 到 177 ms 之间,火焰传播速度持续增大,177 ms 时达到 1.25 m/s,之后火焰传播速度开始缓慢降低。从图 3(b)中可以看出,对于甲烷含量为 8%的预混火焰,在初始的 5 ms 中,火焰初始速度也有一个小幅的下降,在此后的 5~50 ms 之间,火焰的传播速

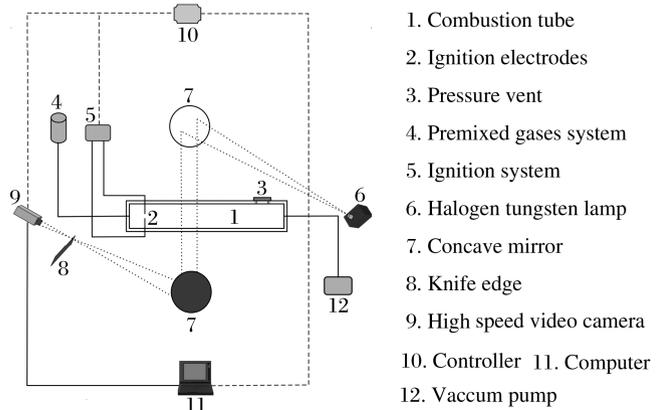


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

度快速增大,由 5 ms 时的 2.6 m/s 增大到 50 ms 时的 8.4 m/s;在此后的 30 ms 中,火焰速度迅速降至 80 ms 时的 2.6 m/s,和传播火焰的纹影照片(见图 2(b))比较可以发现,火焰阵面由向未燃区弯曲转变为向已燃区的转折过程发生在这个区域;80 ms 以后火焰传播速度呈现小幅震荡,火焰阵面上开始呈现湍流燃烧的特征。可以看出 50 ms 时是火焰的传播速度由增大到减小的转折,此时火焰前沿距离管道左端 30 cm。

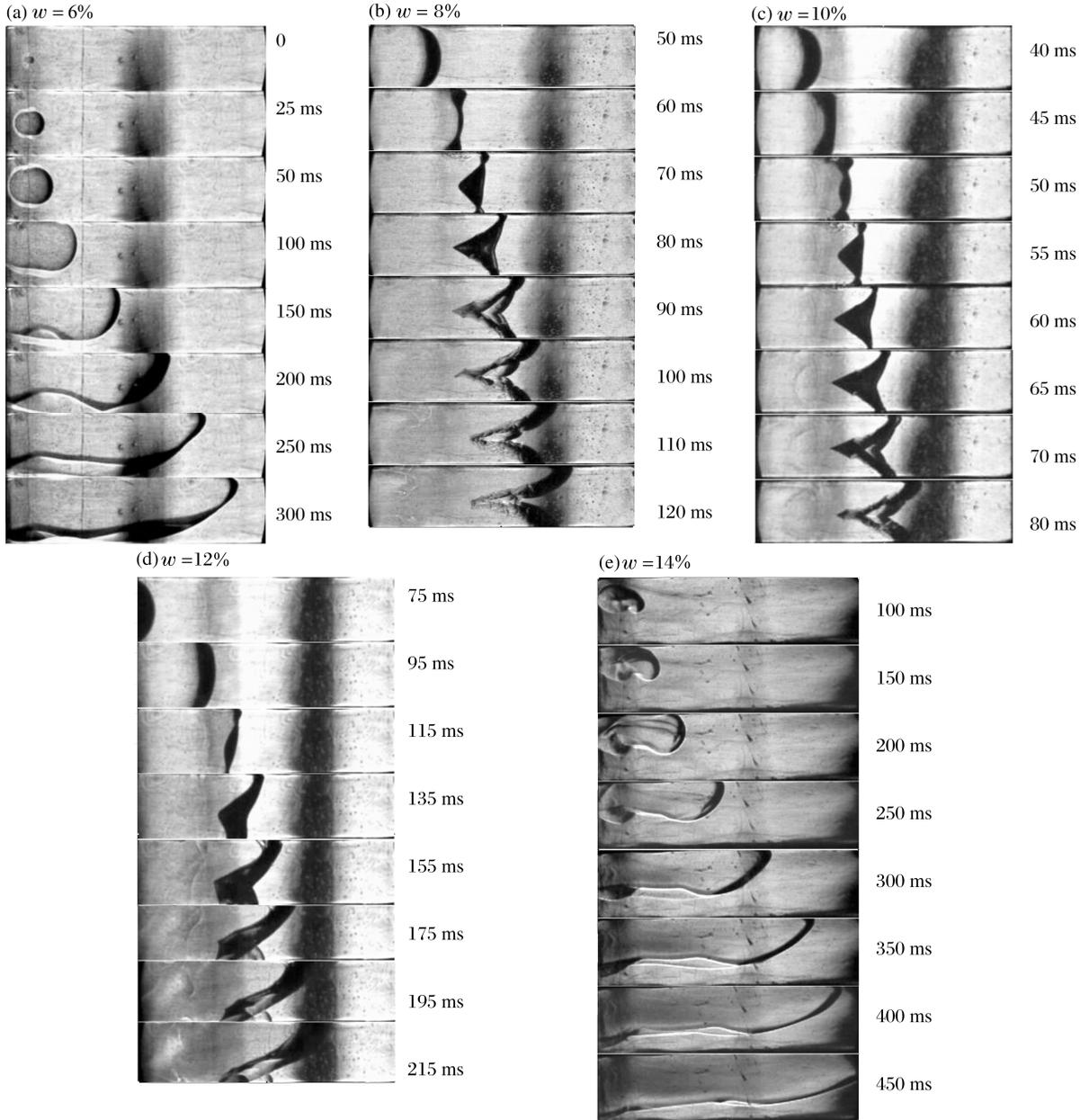


图 2 不同甲烷含量的甲烷/空气预混火焰高速纹影照片

Fig. 2 High-speed schlieren photographs of premixed methane-air flame in case of different methane concentrations

对于甲烷含量为 10% 的预混火焰(见图 3(c)),其传播的速度特征和甲烷含量为 8% 时的类似;图 2 (c)是用高速纹影摄像系统拍摄到的甲烷含量为 10% 的照片,它充分展示了密闭管道内甲烷/空气预混气体火焰的传播以及典型 Tulip 火焰的形成、发展过程。可以看出,从点火开始火焰阵面以半圆形向右传播直到 40 ms,此后,火焰阵面形状开始发生变化,火焰阵面前端的曲率半径逐渐变大,到 45 ms 时几乎成为一个平面,此后再进一步的发展,在 50 ms 时形成了一个类似纺槌体的结构。55 ms 以后,火焰面向已燃区弯曲程度持续加强,火焰面前端和后部的尖点之间的距离也逐渐增大;90 ms 以后火焰阵面上

呈现较明的湍流燃烧。由以上的分析可知,甲烷含量为10%的预混火焰在密闭管道内传播时,初始火焰是典型的层流火焰,在发生火焰阵面由向未燃区弯曲到向已燃区弯曲的转折过程中(Tulip火焰结构的形成过程),火焰面的湍流程度仍然不大,具有清晰的火焰结构。此后,随着火焰的进一步传播,火焰的湍流燃烧特征不断加强,呈现较典型的湍流特征。

图3(c)是甲烷含量为10%预混气体火焰前沿位置和火焰瞬时传播速度与时间的关系。从图中可以看出,点火后初始阶段火焰的传播速度为2~3 m/s;在5~40 ms火焰的传播是一个加速过程,到40 ms时火焰达到最大传播速度8.6 m/s;从40~60 ms火焰的传播速度迅速下降,从8.6 m/s降到了约1.5 m/s;在60~130 ms,火焰速度一直处于0.7到2 m/s之间,并有小幅振荡。与传播火焰的纹影照片相对照(见图2(c))可以发现,火焰阵面由向未燃区弯曲转变为向已燃区弯曲的转折过程同样也发生在火焰迅速降低的区间内。同时可以看出40 ms时为火焰的传播速度由增大到减小的转折,此时火焰前沿距离管道左端22 cm。

将实验结果综合分析,可以把管道内甲烷含量为10%的预混气体火焰的传播过程分为3个阶段。划分如图3(c)所示,从开始点火到 C_1 之间的时间段为预混气体的层流燃烧阶段,在这一阶段中,甲烷/空气预混气体火焰呈现典型的层流燃烧状态,具有清晰的燃烧界面,火焰面呈现规则的球面形状。 C_1 到 C_2 时间段为Tulip火焰结构的形成阶段,在此区内火焰面由向未燃区弯曲逐渐形成向已燃区弯曲,这一典型过程在约20 ms内形成。 C_2 之后为Tulip火焰向湍流燃烧转变的阶段,在这一阶段中,火焰阵面的弯曲程度进一步增大,火焰阵面逐渐呈现湍流状态,随着传播的进行,湍流程度持续增强,但仍保持Tulip火焰结构形态且传播过程中火焰阵面不断被拉长。

对于甲烷含量为12%的预混火焰(见图3(d)),火焰传播速度的规律也和甲烷含量为8%、10%的过程类似,火焰阵面的转折也发生在火焰速度迅速降低的区间,但已不能形成对称的Tulip火焰结构;对于甲烷含量为14%(见图3(e))的预混火焰,其传播速度和火焰前沿位置的变化趋势和甲烷含量为6%时的很类似,火焰的最大传播速度为275 ms时的1 m/s,此时火焰前沿距离管道左端19 cm。

对于管道内的预混气体火焰,它的传播速度 $v_f = v_a + v_c$,其中 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;对于密闭管道中的甲烷/空气预混火焰,在其传播初期,火焰速度有一个小幅

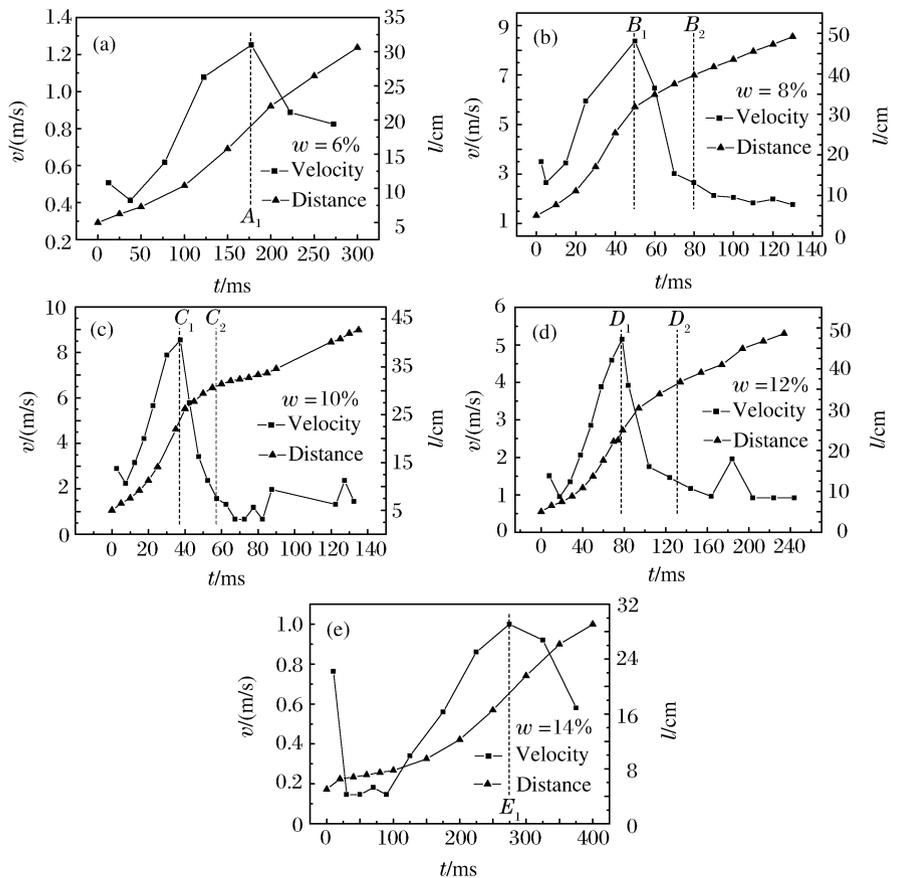


图3 不同甲烷含量的甲烷/空气预混气体中不同时刻火焰前沿到管道左端的距离和瞬态传播速度

Fig. 3 Variation of distances of flame front from the left end of the tube and flame propagation velocities with time in the premixed methane-air flame in case of different methane concentrations

的下降,这主要是由于在点火燃烧时,放电火花使临近预混气体中有一定的热量积累,并且放电火花也有推动火焰向前传播的作用,在火焰传播到一定距离后,燃烧过程不再受放电火花的影响,所以火焰的传播速度在初始时有小幅的下降;火焰持续向前传播,火焰的传播速度持续增大(见图3中虚线 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 、 E_1 之前),在这个过程中传播火焰基本为层流燃烧,气体的燃烧速度基本不变,火焰传播速度的增大主要是由于燃烧放热导致燃烧产物膨胀引起的气流速度的增大造成的。在虚线 A_1 、 E_1 之后, B_1 和 B_2 、 C_1 和 C_2 、 D_1 和 D_2 之间,火焰传播速度迅速降低,这主要是由气流速度的降低引起的。在实验条件下,气流速度的降低的原因主要有:(1)已燃区域的温度下降,导致区域内的压力下降,使气体膨胀程度降低;(2)随着火焰的传播,已燃区域的气体产物不断膨胀,压力逐渐增大,推动着火焰阵面向前传播的同时,未燃区域的压力也逐渐增大,未燃区压力增大使火焰的传播速度减小。和火焰传播的纹影图片相对照,可以发现,火焰阵面由向未燃区弯曲转变为向已燃区弯曲的过程(Tulip火焰结构的形成过程)均发生在火焰传播速度迅速降低的区间(B_1 - B_2 、 C_1 - C_2 、 D_1 - D_2)。在Tulip火焰结构形成后,火焰阵面上开始出现湍流燃烧现象,同时火焰传播速度呈现小幅震荡。

从表1不同当量比 Φ 的甲烷/空气预混气体传播火焰的速度特征和结构特征可以看出,火焰的最大传播速度 v_{\max} 和最大加速度 a_{\max} (加速阶段)都随当量比的增大呈现先增大后减小的趋势,减速阶段的最大加速度的绝对值也随当量比的增大呈现先增大后减小的趋势。和图2相对照,可以发现,在甲烷/空气预混气体传播火焰中产生火焰面由向未燃区弯曲转变为向已燃区弯曲,形成Tulip火焰结构这一过程不仅与预混气体中的当量比有关,还与火焰传播过程中速度的迅速降低密切相关。由传播火焰的纹影照片可以看出,在本实验条件下,甲烷含量 w 为12%($\Phi=1.30$)是能否发生火焰面转折的一个临界状态,它对应的火焰减速度为 -156.8 m/s^2 。当减速阶段的最大加速度的绝对值大于 156.8 m/s^2 时(甲烷含量8%时的 267.9 m/s^2 ,10%时的 512.4 m/s^2),火焰传播过程中会发生火焰面由向未燃区弯曲转变为向已燃区弯曲的过程,形成Tulip火焰结构。

表1 不同当量比的甲烷/空气预混气体火焰的传播特征

Table 1 Propagation characteristics of the premixed methane-air mixture flame with different equivalence ratios

$w/\%$	Φ	$v_{\max}/(\text{m/s})$	$a_{\max}/(\text{m/s}^2)$		Tulip火焰结构
			加速阶段	减速阶段	
6	0.61	1.25	7.6	-4.7	不能形成
8	0.83	8.37	173.2	-267.9	能形成
10	1.06	8.54	293.4	-512.4	能形成
12	1.30	5.15	91.1	-156.8	临界状态
14	1.55	1.00	5.2	-6.8	不能形成

4 结 论

利用高速纹影仪等技术对闭口管道内甲烷/空气预混气体火焰的传播过程进行了研究,对火焰的传播过程和特征进行了分析,得到如下结论:

(1)甲烷含量接近当量值时,预混气体火焰传播中发生火焰阵面由向未燃区弯曲到向已燃区弯曲的转折过程,逐渐由层流燃烧向湍流燃烧转变并形成Tulip火焰结构。当甲烷含量偏离当量值一定程度时,预混火焰呈现典型的层流燃烧特征,不发生火焰阵面由向未燃区弯曲到向已燃区弯曲的转折过程。

(2)Tulip火焰结构形成于火焰传播速度迅速降低的区间里,且只有当减速阶段的最大加速度绝对值大于某一特定值时,Tulip火焰结构才能够形成;Tulip火焰结构是预混火焰由层流燃烧向湍流燃烧转变的一个中间过程。

参考文献:

- [1] Dobashi R. Experimental study on gas explosion behavior in enclosure[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1997,10(2):83-89.
- [2] Tsuruda T, Hirano T. Local flame front disturbance development under acceleration[J]. Combustion and Flame,

1991,84(1-2):66-72.

- [3] SUN Jin-hua, LIU Yi, WANG Qing-song, et al. Experimental study on interference effect of rarefaction wave on laminar propagating flame[J]. Chinese Science Bulletin, 2005,50(9):919-922.
- [4] Ellis C de C O. Flame movement in gaseous explosive mixtures[J]. Journal of Fuel Science, 1928,7:502-508.
- [5] Salamandra G D, Bazhenova T V, Naboko I M. Formation of detonation wave during combustion of gas in combustion tube[C]//Seventh Symposium(International)on Combustion. London; Butterworths, 1959;851-855.
- [6] Dunn-Rankin D, Barr P K, Sawyer R F. Numerical and experimental study of tulip flame formation in a closed vessel[C]//Twenty-First Symposium (International) on Combustion. Pittsburgh; The Combustion Institute, 1986; 1291-1301.
- [7] Matalon M, Metzener P. The propagation of premixed flames in closed tubes[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997,336:331-350.
- [8] Zhou B, Sobiesiak A, Quan P. Flame behavior and flame-induced flow in a closed rectangular duct with a 90° bend [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006,45(5):457-474.
- [9] Clanet C, Geoffrey S. On the tulip flame phenomenon[J]. Combustion and Flame, 1996,105:225-238.
- [10] Kagan L, Sivashinsky G. The transition from deflagration to detonation in thin channels[J]. Combustion and Flame, 2003,134:389-397.

Propagation characteristics of premixed methane-air flames

CHEN Dong-liang^{1, 2}, SUN Jin-hua^{2*}, LIU Yi^{2,3}, MA Ye-feng¹, HAN Xue-bin¹

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;*

2. *State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;*

3. *College of Chemistry and Chemical Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong, China)*

Abstract: The techniques of the high-speed schlieren photography, etc. were used to investigate the characteristics of the premixed methane-air flames with different equivalence ratios propagating through a closed tube. Based on the experimental results, the combustion behaviors and characteristics of the premixed flames were analyzed. Analyzed results show as follows: (1) the transformation process of the flame front bending to the unburned zone turning into bending to the burned zone during the flame propagation happens while the equivalence ratio volume approaches to 1, thus the typical tulip flame structure forms during the transformation; (2) the transformation process of the flame front does not happen while the equivalence ratio volume deviates from 1 to a certain extent, and the premixed flame shows the typical laminar combustion. (3) the tulip-flame structure forms in the period of the flame propagation velocity decreasing greatly and it can form only while the maximum deceleration is larger than a certain quantity; (4) the tulip-flame structure is a middle stage during the transformation of the premixed flame from the laminar combustion to the turbulent combustion.

Key words: mechanics of explosion; turbulent combustion; high-speed schlieren photography; premixed methane-air flame; tulip flame

* Corresponding author: SUN Jin-hua
E-mail address: sunjh@ustc.edu.cn
Telephone: 86-551-3606425