

甲烷/空气预混湍流火焰的离子电流信号特征分析

张灏¹, 高忠权¹, 高煦尧¹, 寇梦玄¹, 杜增晖¹, 洪流²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 液体火箭发动机技术重点实验室, 710100, 西安)

摘要: 为推动离子电流法用于甲烷燃烧状况的实时检测, 提高燃烧精细度, 对初始温度为 293 K, 初始压强为 100 kPa, 湍流装置转速系数分别为 0(层流)和 1 650(湍流), 过量空气系数分别为 1.0、1.1、1.2、1.4 和 1.6 时定容燃烧弹内的甲烷/空气预混湍流火焰的离子电流信号进行了测量并加以分析。通过对过量空气系数为 1.0、转速系数分别为 0 和 1 650 时的火焰离子电流信号进行对比, 并结合纹影系统记录的火焰传播图像分析可得甲烷/空气预混湍流火焰离子电流信号波动特征形成的原因; 通过对转速系数分别为 0 和 1 650, 过量空气系数分别为 1.0、1.2、1.4 和 1.6 时的燃烧压强和离子电流信号进行对比, 发现随着过量空气系数减小, 湍流火焰和层流火焰的压强信号和离子电流信号的特征值变化一致——峰值变大, 峰值时刻提前且离子电流信号上升沿数量增加; 当过量空气系数相同时, 湍流火焰的峰值大于层流火焰, 峰值时刻比层流火焰提前, 离子电流信号上升沿数量大于或等于层流火焰; 当转速系数为 1 650, 过量空气系数分别为 1.0、1.1 和 1.2 时, 火焰离子电流信号与火焰传播速度之间存在正线性相关, 相关性系数的平方分别为 0.977 6、0.938 3 和 0.831 9。

关键词: 离子电流法; 甲烷; 预混湍流火焰; 离子电流信号

中图分类号: TK438.9 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202105002 **文章编号:** 0253-987X(2021)05-0010-08



OSID 码

Characteristic Analysis on the Ion Current Signal of Methane/Air Premixed Turbulent Flame

ZHANG Hao¹, GAO Zhongquan¹, GAO Xuyao¹, KOU Mengxuan¹, DU Zenghui¹, HONG Liu²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Key Laboratory of Liquid Rocket Engine Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to promote the use of ion current method for real-time detection of methane combustion status and increase the combustion precision, the ion current signal of methane/air premixed turbulent flame in the constant volume combustor was measured and analyzed under the conditions that the initial temperature is 293 K, the initial pressure is 100 kPa, the speed coefficients of turbulence device are 0 (laminar flow) and 1 650 (turbulent), the excess air coefficients are 1.0, 1.1, 1.2, 1.4 and 1.6. By comparing and analyzing the flame ion current signals with the flame propagation images recorded by schlieren system when the excess air coefficient is 1.0 and the rotational speed coefficients are 0 and 1 650, the causes resulting in the fluctuation of the ion current signal of methane/air premix turbulent flame are obtained. By

收稿日期: 2020-10-09。 作者简介: 张灏(1993—),男,硕士生;高忠权(通信作者),男,副教授。 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(xzy032020011);中央高校特色发展资金资助项目(PY3A077);液体火箭发动机技术重点实验室资助项目。

网络出版时间: 2020-12-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20201215.1604.006.html>

comparing the combustion pressure signals and the ion current signals under the conditions that the speed coefficients are 0 and 1 650 and the excess air coefficients are 1.0, 1.2, 1.4 and 1.6, it is found that the changes of eigenvalues of the turbulent flame's pressure signals and ion current signals are the same as that of the laminar flame with the decrease of excess air coefficient; the larger the peak value is, the earlier the peak time will be, and the number of rising edges of ion current signal is increased. When the excess air coefficients are the same, the peak value of turbulent flame is bigger than that of laminar flame, the peak time is earlier than that of laminar flame, and the number of ion current signal rising edges is greater than or equal to that of laminar flame. It is also found that when the rotational speed coefficient is 1 650 and the excess air coefficients are 1.0, 1.1 and 1.2, there is a positive linear correlation between flame ion current signal and flame propagation velocity, and the squares of the correlation coefficients are 0.977 6, 0.938 3 and 0.831 9 respectively.

Keywords: ion current method; methane; premixed turbulent flame; ion current signal

随着环境问题的日益严峻,清洁能源成为各国研究的重点,天然气作为一种重要的清洁燃料,主要成分为甲烷(CH_4),具有安全性高、排放性能好、成本低的优点^[1]。为了提高利用清洁燃料的精细度,燃烧检测技术成为检测燃料燃烧状况、控制燃烧工况的关键。实际应用中,甲烷多以湍流状态燃烧,国内外学者利用燃烧检测技术对甲烷的湍流燃烧特性进行了大量研究。

Sweeney 等利用分层涡流燃烧器控制分层和涡流程度,来对甲烷/空气的预混湍流火焰结构进行研究^[2-3]。Askari 等通过向容弹内喷射甲烷和空气形成局部预混的湍流混合气,改变温度、压强、添加氢气或稀释气来研究火焰燃烧速率、压强等参数^[4-5]。王金华等分别在本生灯和风扇扰动的定容燃烧弹内对甲烷/氢气与空气的湍流火焰进行了火焰结构、传播速度的测量,并探究了稀释气、Lewis 数等变量或参数对火焰的影响^[6-8]。

目前,多数实验研究是利用纹影^[4-5,8]、激光^[2-3,6-7]等光学检测技术对甲烷湍流火焰进行测定,这种检测手段多需要精密昂贵的设备,不利于实际应用,而离子电流法因具有结构简单、便于应用^[9]、采集到的信号丰富且时效性强等优点被重视,近些年来得到了国内外广大学者的关注。

因离子电流法具有极高的实用性,所以多数学者将其应用在发动机气缸内燃烧的研究上^[10-13]。但是,发动机实验在火焰直观的可视化方面太过局限,所以有部分学者将其与光学检测法结合,来对火焰进行研究。李理光等研究了电场对甲烷层流火焰离子电流的影响,并建立了数值模型^[14-15]。吴筱敏等在定容燃烧弹上,结合纹影系统研究了电极大小和

间隙等参数对甲烷层流火焰离子电流信号的影响^[16-17]。Shy 等通过设计一个十字型的定容燃烧装置,利用离子电流信号对不同当量比、不同湍流强度和不同稀释条件下的甲烷/空气预混湍流火焰的传播速度进行了测量^[18-20]。

综上,可以发现目前利用离子电流法对甲烷预混湍流火焰检测的研究较少,更是缺少对甲烷预混湍流火焰离子电流信号的分析,尤其是结合火焰可视化图像进行分析。因此,本文采用离子电流法火焰检测技术,对定容燃烧弹内初始温度 298 K,初始压强 100 kPa,湍流装置转速系数 k_n 为 0(层流)和 1 650(湍流),过量空气系数 λ 为 1.0、1.1、1.2、1.4 和 1.6 时的甲烷/空气预混湍流火焰的离子电流信号进行采集,重点分析了甲烷预混湍流火焰离子电流信号的成因,以及不同工况下燃烧压强信号和离子电流信号的峰值大小、峰值时刻和离子电流信号上升沿数量的变化规律,并进一步探究了离子电流与湍流火焰传播速度之间的关系。

1 实验装置与方法

1.1 实验装置

本文通过对贾伟东等所采用的定容燃烧弹实验台架^[21]进行改进以实现湍流场的产生,其示意图如图 1 所示。实验装置由点火系统、纹影系统、进排气系统、数据采集系统和湍流定容燃烧弹 5 部分组成,其中湍流容弹和离子电流测量系统的结构简图如图 2 所示。

湍流容弹弹体为铁制正方体装置,整体接地,内部为直径 130 mm、长 180 mm 的水平圆柱式腔室,整个腔室除湍流发生装置安装孔处有部分裸露外,

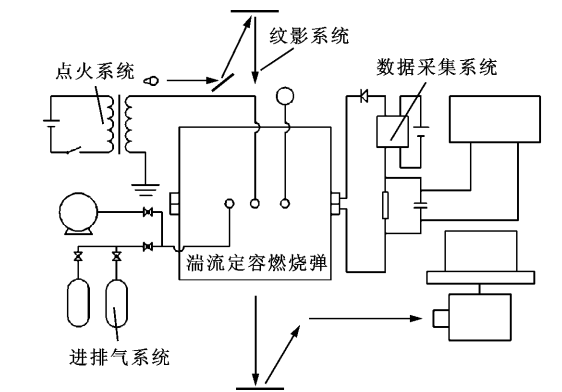


图 1 离子电流测量湍流火焰实验台架系统简图
Fig. 1 Diagram of turbulent flame experimental bench system for ion current measurement

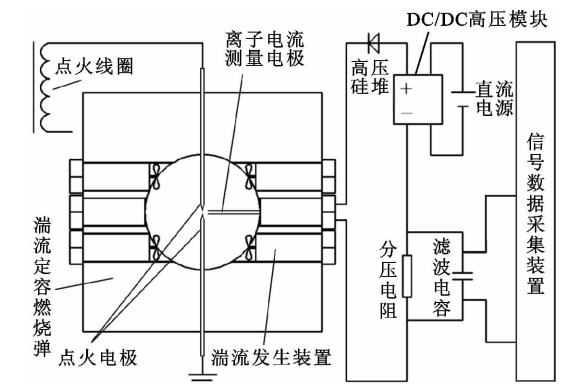


图 2 湍流容弹和离子电流测量系统
Fig. 2 Turbulent constant-volume combustor and ion current measurement system

其余部分均覆有聚四氟乙烯。点火电极位于整个腔室中心上下两侧,沿径向对称布置,放电尖端相距 2 mm,除放电尖端裸露之外,其余部分均作绝缘处理。湍流发生装置和点火电极位于同一横截面,是由电机、扇叶和安装套组成的旋转扰动式湍流发生装置,其轴线水平布置,且与腔室轴线垂直,并距离 40 mm,扇叶旋转中心基本与腔室圆柱面重合。湍流的发生就由对称安装在容弹壁内部的 4 组装置产生,并通过调节器来控制电机转速,调节器所显示的数值定义为 k_n 值。在开放空间利用热敏式风速测试仪测得湍流发生装置在 $k_n=1\ 650$ 时所产生的风速 v_{wind} 基本稳定,且 4 个湍流装置产生的风速基本一致,如图 3 所示,所以认为能够产生可控的相对稳定的湍流场。

离子电流测量系统由测量电路、测量电极和信号采集装置 3 部分组成,其中测量电极采用 $\varnothing 0.8$ mm 的不锈钢丝制作,两个测量电极对称于容弹腔水平中心面布置,轴间距为 3.8 mm,并和点火电极

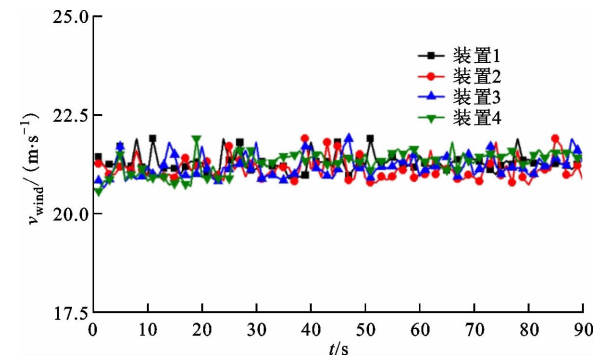


图 3 $k_n=1\ 650$ 时各湍流发生装置在开放空间测得的风速
Fig. 3 The wind speed of various turbulence generating devices measured in open space when $k_n=1\ 650$

在同一横截面,断面距点火电极轴心 5.5 mm,另一端与腔室圆柱面重合。通过高压模块将 12 V 直流电源升压至 80 V 并加载到测量电极两端,分压电阻为 900 k Ω ,滤波电容为 82 nF。

1.2 实验方法

本文实验根据甲烷/空气的化学计量燃烧反应式,结合道尔顿分压定律,通过压力变送器将甲烷和空气按照过量空气系数为 1.0、1.1、1.2、1.4 和 1.6 充入容弹腔内并静置 2 min,待其混合均匀之后启动湍流发生装置,调节电机转速控制器使 k_n 分别为 0 和 1 650,等待 2 min,使湍流场平稳,通过点火系统点燃混合气,数据采集系统采集离子电流信号和燃烧压强信号,纹影系统采集容弹内混合气燃烧图像。实验中所用到的仪器仪表如表 1 所示。

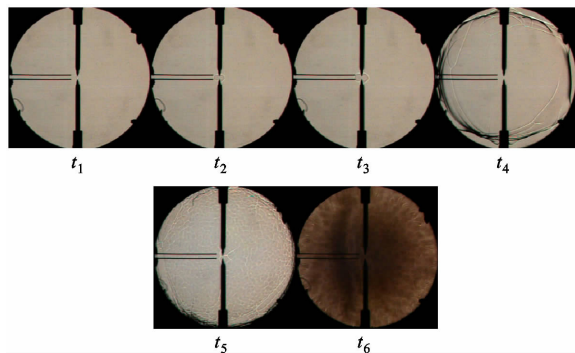
表 1 实验所用仪器仪表

Table 1 Instruments used in the experiment		
实验仪器	型号	参数
高速摄像机	Redlake HG-100 K	5 000 帧/s
压力传感器	Kistler7061B、压电式	0~25 MPa
电荷放大器	Kistler5011 型	$\pm 10\sim\pm 999\ 000$ pC
数据采集仪	日本横河 DL750	采样频率 10 kHz
DC/DC 高压模块	KDHM-E-12S1000P-2	输入 12 V、输出 0~1 kV/2 mA
湍流电机	豹子内转无刷电机 1625	12 000 kV
扇叶	ECO 专用 CNC 铝浆	中心孔直径 2 mm 扇叶直径 28 mm

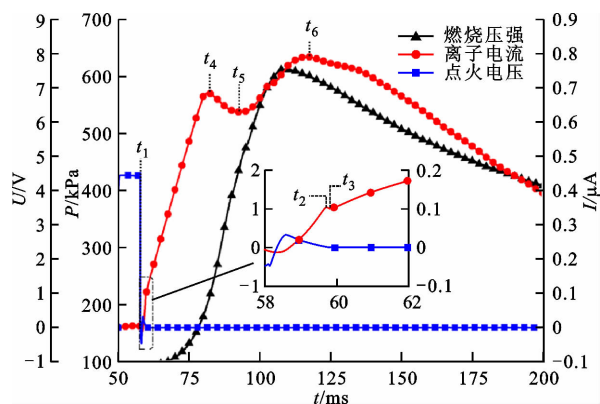
2 结果与分析

2.1 甲烷预混层流火焰离子电流信号的特征和形成机理
基于离子电流法检测火焰的基本原理,在甲烷/

空气的预混层流火焰($k_n=0$)中测得过量空气系数 $\lambda=1.0$ 时的燃烧压强和离子电流信号,以及用高速摄像机记录的离子电流信号转折时对应的火焰燃烧状态,如图4所示。



(a)不同时刻的火焰燃烧状态



(b)燃烧压强信号和离子电流信号

图4 $\lambda=1.0$ 、 $k_n=0$ 时甲烷/空气预混层流火焰的燃烧压强信号和离子电流信号

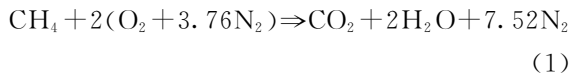
Fig. 4 The combustion pressure signal and the ion current signal of methane/air premixed laminar flame when $\lambda=1.0$ and $k_n=1\ 650$

从图4可以看出,燃烧压强信号仅有一个上升沿,而离子电流信号包含3个上升阶段,这3个阶段分别对应火花点火阶段($t_1\sim t_2$)、火焰前锋区离子电流($t_3\sim t_4$)和焰后区离子电流($t_5\sim t_6$)。

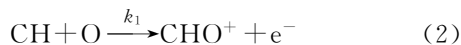
火花点火阶段($t_1\sim t_2$)产生的离子电流信号主要是因点火时混合气被击穿放电产生的感应电势所引起的。测量电极与点火电极分离能够有效避免点火时离子电流信号的产生^[22],本实验为更全面地测得火焰发展过程的离子电流信号,测量电极尖端距点火电极放电尖端较近,故造成在点火时产生了一个较小的离子电流信号,如图4中放大部分所示。

火焰前锋离子电流($t_3\sim t_4$)产生的离子电流是火焰前锋面接触测量电极产生的。甲烷燃烧时,火

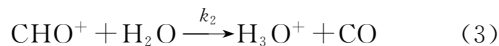
焰前锋面内发生着复杂而剧烈的化学反应,其全局反应可以描述为



反应过程会发生化学电离,产生大量带电的离子基团,其中主要的化学电离过程为



CHO^+ 基团随后与 H_2O 产生迅速的质子转移反应



k_1 、 k_2 均为反应速率常数,其中 $k_1=5\times 10^{-14}\text{ cm}^3/\text{s}$, $k_2=7\times 10^{-9}\text{ cm}^3/\text{s}$, k_2 在数量级上远大于 k_1 ,所以式(3)的反应速率远大于式(2), H_3O^+ 的数量远大于 CHO^+ 的浓度,故一般认为, H_3O^+ 的数量在正离子中居首位。之后, H_3O^+ 会与电子发生中和反应



所以火焰前锋面中所生成的 CHO^+ 、 H_3O^+ 、 e^- 等带电基团在偏置电压所生成的电场中受电场力的作用产生移动,进而形成电流信号,电流的大小可表示为

$$I_f = \frac{N_{\text{ion}} V_{\text{rz}} E v_e}{r} \quad (5)$$

式中: I_f 为火焰前锋面的离子电流; N_{ion} 为单位体积的电荷密度; V_{rz} 为测量电极间反应区域的体积; E 为电场强度; v_e 为迁移率; r 为测量电极的间距。

焰后区离子电流($t_5\sim t_6$)的形成主要是火焰前锋面接触容弹壁未绝缘部分形成的燃烧后期的火焰前锋面离子电流信号,叠加上焰后高温区热电离形成的离子电流信号^[23]。此时的火焰前锋面产生的离子电流信号同 $t_3\sim t_4$ 阶段产生机理一样,高温区热电离目前普遍认为主要是 NO 发生热电离产生 NO^+ 和 e^- ,这些经热电离产生的带电离子基团在电场力的作用下产生迁移,形成电流^[24]。至于普遍认为焰后区的大部分自由电子是由 NO 产生的,主要是因为其热离子化所需的热能最低,离子化率又较高,如表2所示。

电流信号中有两段下降沿,其中 $t_2\sim t_3$ 是因为点火阶段产生的离子电流消失所致; $t_4\sim t_5$ 的下降沿是因火焰前锋面已经不与测量电极接触,但尚未与容弹壁的未绝缘部分接触,且焰后区热电离尚未开始或电离程度不高,所以离子电流信号产生下降。

2.2 甲烷预混湍流火焰的离子电流信号特征

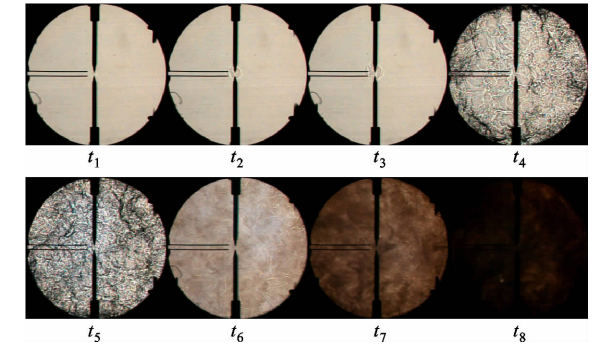
本实验采取湍流生成装置在 $k_n=1\ 650$ 时所形成的湍流,此时湍流生成装置在开放环境下测得风速 v_{wind} 为21.22 m/s左右,测得 $\lambda=1.0$ 时的燃烧压

表 2 已燃高温区主要成分的热电离能和离子化率^[25]

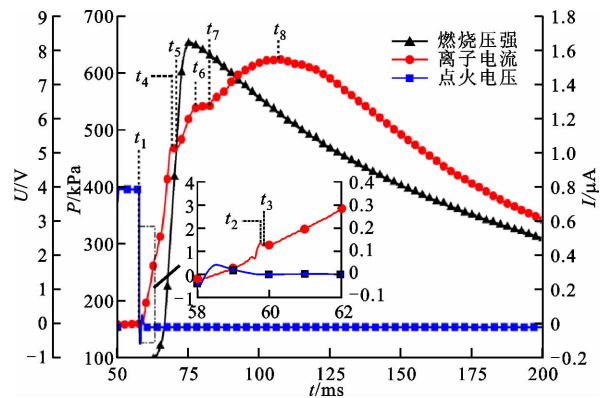
Table 2 The thermal ionization energy and the ionization rate of the main components in the high temperature region^[25]

组分	热电离能 E_{ion}/eV	离子化率
NO	9.264 05	2.44×10^{-8}
H ₂ O ₂	10.540 00	1.73×10^{-9}
CO	14.013 90	1.30×10^{-12}
CO ₂	13.777 00	2.10×10^{-12}
H ₂ O	12.618 80	2.33×10^{-11}
N ₂	15.580 80	5.03×10^{-14}
H ₂	15.425 89	6.87×10^{-14}

强信号和离子电流信号,以及用高速摄像机记录的离子电流信号转折时刻对应的湍流火焰燃烧状态,如图 5 所示。



(a)不同时刻的火焰燃烧状态



(b)燃烧压强信号和离子电流信号

图 5 $\lambda=1.0$ 、 $k_n=1\ 650$ 时甲烷/空气预混湍流火焰的燃烧压强信号和离子电流信号

Fig. 5 The combustion pressure signal and the ion current signal of methane/air premixed turbulence flame when $\lambda=1.0$ and $k_n=1\ 650$

从图中可以看出,和层流火焰采集到的信号相

比,燃烧压强信号依旧只有一个上升沿,而离子电流信号有 4 段上升期,其中: $t_1\sim t_2$ 对应点火阶段的离子电流信号; $t_3\sim t_4$ 对应火焰前锋面与测量电极接触产生的离子电流信号; $t_5\sim t_6$ 阶段的上升沿是由火焰前锋面触壁后在湍流作用下折返与测量电极接触产生的离子电流、火焰前锋面与容弹壁未绝缘部分接触产生的离子电流以及焰后区热电离产生的离子电流的叠加信号; $t_7\sim t_8$ 对应火焰完全燃烧后高温区 NO 热电离产生的离子电流信号。

离子电流信号在 $t_1\sim t_7$ 之间存在 3 段下降沿,分别为 $t_2\sim t_3$ 、 $t_4\sim t_5$ 和 $t_6\sim t_7$ 。其中: $t_2\sim t_3$ 是因为点火阶段产生的离子电流消失所致; $t_4\sim t_5$ 为火焰前锋面与测量电极分离之后又尚未触壁折返,且未接触容弹壁导电部分,焰后区热电离程度过低或未产生热电离而产生的离子电流信号下降; $t_6\sim t_7$ 是因火焰燃烧完毕之后,其折返火焰前锋面与离子电流测量电极接触产生的离子电流和火焰前锋面接触容弹壁导电部分产生的离子电流信号消失,且消失速率大于焰后区 NO 热电离产生离子电流信号的速率而产生的下降。

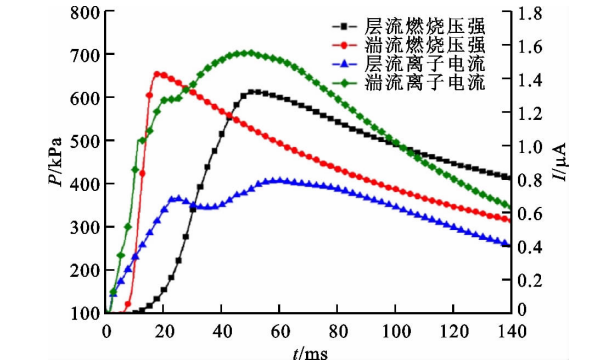
2.3 不同过量空气系数下湍流火焰与层流火焰的燃烧压强与离子电流信号

在层流($k_n=0$)和湍流($k_n=1\ 650$)的状态下,分别测得过量空气系数 λ 为 1.0、1.2、1.4 和 1.6 时的燃烧压强和离子电流信号,其对比图如图 6 所示。

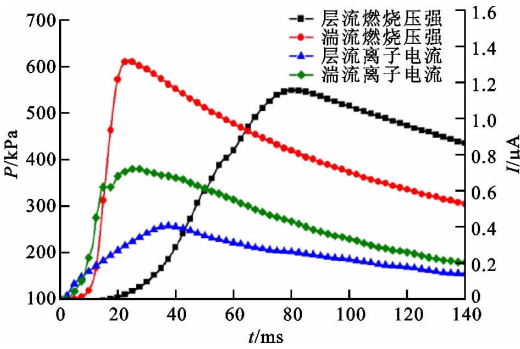
图 6 以点火时刻为基准,即点火时刻为 0 ms 开始记录燃烧压强信号和离子电流信号;离子电流信号忽略点火感应电势造成的离子电流信号,即从 0 μA 开始记录因火焰造成的正向离子电流信号。

从峰值角度分析,在相同 λ 下,湍流的燃烧压强和离子电流信号均比层流的大,而随着 λ 增大,不管是湍流火焰还是层流火焰的各信号峰值均随之减小。

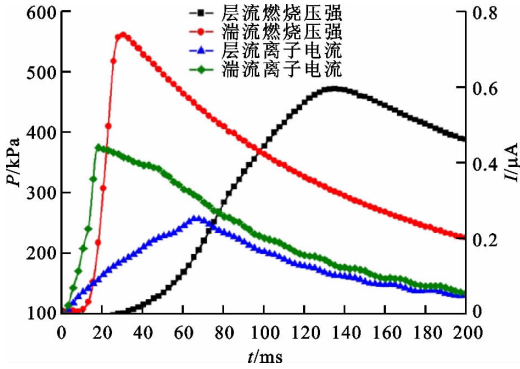
从时间角度分析,在相同 λ 下,湍流火焰各信号



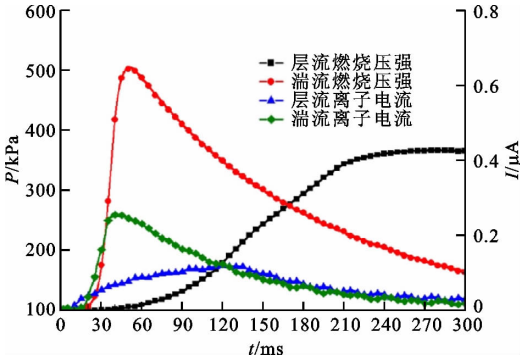
(a) $\lambda=1.0$



(b) $\lambda = 1.2$



(c) $\lambda = 1.4$



(d) $\lambda = 1.6$

图 6 不同 λ 下甲烷/空气预混层流和湍流火焰的燃烧压强信号和离子电流信号对比

Fig. 6 Contrast figure of methane/air premixed laminar flame's combustion pressure signal and ion current signal and methane/air premixed turbulence flame's when $\lambda = 1.0, 1.2, 1.4$ and 1.6 respectively

到达对应峰值的时刻均比层流火焰提前,当 λ 不同时,在同一传播阶段,层、湍流火焰的各测量信号到达此阶段峰值的时间均随着 λ 的增大而变长。

从上升沿数量分析,在相同 λ 和不同 λ 下,层流和湍流的燃烧压强曲线均为单峰曲线,仅一个上升沿。离子电流曲线的上升沿数量在相同 λ 下,湍流的上升沿数量总是大于或等于层流的数量,而在不

同 λ 下,层流和湍流离子电流信号的上升沿数量均随 λ 增大而减少,在 $\lambda = 1.2$ 时,层流和湍流离子电流信号的焰后区部分均消失,但湍流还保留火焰触壁后上升的离子电流信号,在 $\lambda = 1.4, 1.6$ 时,此部分信号也消失,只剩火焰未触壁前的离子电流信号。

不论从峰值大小、到达峰值时刻,还是离子电流信号的上升沿数量分析,均说明在相同 λ 下,一定程度的湍流对火焰的燃烧具有促进作用。结合图 4 和图 5 中的火焰图像可以发现,相比层流火焰,湍流加强了火焰的不稳定性,使火焰面出现大量的破裂和褶皱,形成规格小但数量多的火焰胞面,这些胞面扩大了火焰前锋面与未燃区混合气的接触面积,从而提高了燃烧速度。

2.4 湍流火焰燃烧速度和离子电流的关系

火焰传播速度是燃料燃烧时的重要参数,其可以定义为未燃区混合气沿火焰面法线方向单位时间内向火焰面移动的距离。层流火焰的局部火焰面可以看作一个平面,其法线方向固定,所以可以用单位时间内局部火焰前锋面的传播距离定义其速度;湍流火焰因火焰面的形状随时都在变化,很难确定一个固定的法线方向,所以湍流火焰的传播速度以单位时间内火焰投影面积的变化来定义,如下式所示

$$v_{\text{com}} = \frac{dS}{dt} = \frac{S_{t+\Delta t} - S_t}{\Delta t} \quad (6)$$

式中: v_{com} 为湍流火焰燃烧速度; $S_t, S_{t+\Delta t}$ 为 $t, t + \Delta t$ 时刻的湍流火焰面积,火焰面积选用以两点火电极中点为圆心、半径为 57 mm 的圆形范围内的火焰图像提取的面积,以避免扇叶对火焰图像处理的影响; Δt 为高速摄像机的采样间隔 0.2 ms。

火焰图像的处理基于 matlab R2020a 的 Image Processing Toolbox,采用形态法滤波进行边缘提取。将提取的火焰边缘(黑色边线)与火焰原图进行叠加,如图 7 所示,可以发现提取的边缘与实际边缘重合。

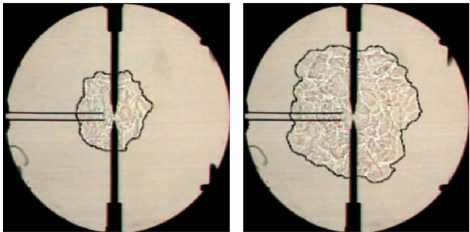
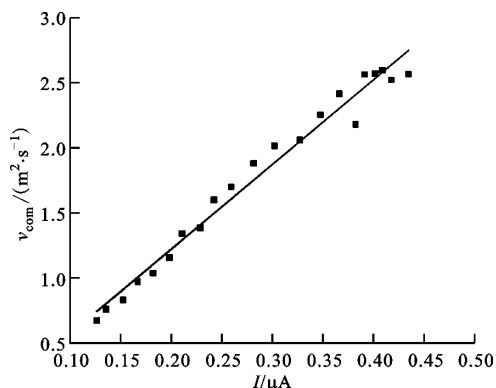


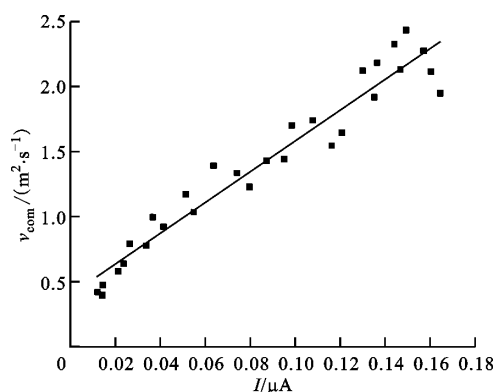
图 7 湍流火焰提取边缘与实际边缘对比
Fig. 7 Contrast of turbulent flame's extracted edge and its actual edge

为测得 $k_n = 1\ 650$ 时湍流火焰离子电流和燃烧

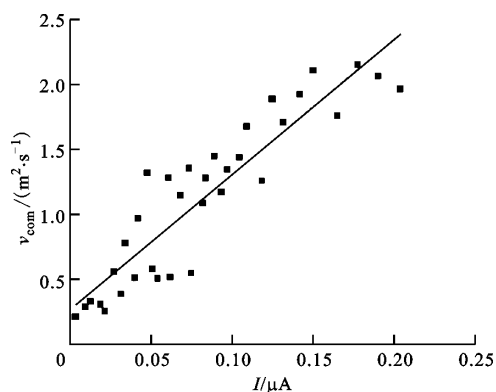
速度之间的关系,选取 λ 为1.0、1.1、1.2时,火焰开始接触测量电极时刻至火焰任意径向半径达到57 mm时刻之间的离子电流及对应的燃烧速度进行分析,结果如图8所示。



(a) $\lambda = 1.0$



(b) $\lambda = 1.1$



(c) $\lambda = 1.2$

图8 不同 λ 下湍流火焰的离子电流和燃烧速度之间的关系

Fig. 8 The relationship between turbulent flame's ion current and its combustion velocity when $k_n = 1\ 650$, $\lambda = 1.0, 1.1$ and 1.2 respectively

拟合曲线的相关系数平方 R^2 在 $\lambda = 1.0$ 时为0.977 6, $\lambda = 1.1$ 时为0.938 3, $\lambda = 1.2$ 时为0.831 9,

3种工况下的 R^2 均大于0.75,说明在这3种工况下湍流火焰的离子电流和燃烧速度成正线性相关。

3 结 论

本实验通过对在 $k_n = 1\ 650$ 下的甲烷/空气预混湍流火焰燃烧全过程的火焰图像、燃烧压强信号和离子电流信号进行分析,得出以下结论。

(1)当 $\lambda = 1$ 时,与层流相比,湍流预混火焰传播过程的离子电流信号存在更多上升沿,会出现一段火焰锋面与焰后区共同作用的离子电流信号。

(2)通过对 λ 分别为1.0、1.2、1.4和1.6时的层流和湍流火焰的燃烧压强信号和离子电流信号进行对比,发现随着 λ 减小,层、湍流预混火焰的燃烧压强和离子电流信号变化趋势一样;各传播阶段峰值变大,峰值时刻提前且离子电流信号上升沿数量增加;在相同 λ 下,湍流对火焰的传播有促进作用,结合火焰图像可以得出湍流增大了火焰锋面与未燃混合气的接触面积,从而加速燃烧,使压强和离子电流信号的峰值大于层流,峰值时刻早于层流,离子电流上升沿数量大于或等于层流。

(3)通过对 $k_n = 1\ 650$, λ 为1.0、1.1和1.2时的甲烷预混湍流火焰的离子电流和燃烧速度进行相关性分析,发现离子电流和燃烧速度之间存在正线性相关, R^2 分别为0.977 6、0.938 3和0.831 9。

参考文献:

- [1] 陈昊, 韩斌, 陈轶嵩, 等. 天然气汽车发展现状及趋势[J]. 中国能源, 2018, 40(2): 36-41.
- [2] SWEENEY M S, HOCHGREB S, DUNN M J, et al. The structure of turbulent stratified and premixed methane/air flames: I Non-swirling flows[J]. Combustion and Flame, 2012, 159(9): 2896-2911.
- [3] SWEENEY M S, HOCHGREB S, DUNN M J, et al. The structure of turbulent stratified and premixed methane/air flames: II Swirling flows[J]. Combustion and Flame, 2012, 159(9): 2912-2929.
- [4] ASKARI O, METGHALCHI H, KAZEMZADEH HANNANI S, et al. Fundamental study of spray and partially premixed combustion of methane/air mixture[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2013, 135(2): 021001.
- [5] ASKARI O, METGHALCHI H, KAZEMZADEH HANNANI S, et al. Lean partially premixed combustion investigation of methane direct-injection under different characteristic parameters[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2014, 136(2): 022202.

- [6] ZHANG Meng, WANG Jinhua, XIE Yongliang, et al. Flame front structure and burning velocity of turbulent premixed $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{air}$ flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(26): 11421-11428.
- [7] WANG Jinhua, YU Senbin, NIE Yaohui, et al. Measurement on turbulent premixed flame structure of $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{air}$ mixtures with CO_2 dilution [C/OL] // *JSAE/SAE 2015 International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting*. [2020-09-04]. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1960>.
- [8] CAI Xiao, WANG Jinhua, BIAN Zhijian, et al. Self-similar propagation and turbulent burning velocity of $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{air}$ expanding flames; effect of Lewis number [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 212: 1-12.
- [9] 贾伟东. 火焰锋面离子电流特征峰形成的试验研究和机理分析 [D]. 西安: 西安交通大学, 2018.
- [10] TANAKA T, NARAHARA K, TABATA M, et al. Measurement of ion current in homogeneous charge compression ignition combustion (HCCI, combustion processes II) [C] // *The Proceedings of the International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines*. Tokyo, Japan: JSME, 2004: 319-325.
- [11] BADAWEY T, RAI N, SINGH J, et al. Effect of design and operating parameters on the ion current in a single-cylinder diesel engine [J]. *International Journal of Engine Research*, 2011, 12(6): 601-616.
- [12] 李建文, 徐正飞, 刘金华, 等. 空燃比对离子电流信号影响的试验研究 [J]. *车用发动机*, 2008(4): 74-76.
LI Jianwen, XU Zhengfei, LIU Jinhua, et al. Experimental study on the influence of air-fuel ratio on ionic current signal [J]. *Vehicle Engine*, 2008(4): 74-76.
- [13] LIU Yintong, LI Liguang, YE Junyu, et al. Ion current signal and characteristics of ethanol/gasoline dual fuel HCCI combustion [J]. *Fuel*, 2016, 166: 42-50.
- [14] DONG Guangyu, LU Haifeng, WU Zhijun, et al. Effect of electric fields on the ion current signals in a constant volume combustion chamber [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(4): 4865-4873.
- [15] DONG Guangyu, FENG Zhiwei, LI Liguang, et al. The effect of electron ambipolar diffusion on the ion current signals in a premixed methane flame [J]. *Fuel*, 2019, 256: 115813.
- [16] GAO Zhongquan, WU Xiaomin, MAN Chao, et al. The relationship between ion current and temperature at the electrode gap [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 33/34: 15-23.
- [17] 李春艳, 高忠权, 刘兵, 等. 电极位置与电极面积对离子电流影响的试验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(7): 55-60.
LI Chunyan, GAO Zhongquan, LIU Bing, et al. Experimental investigation for influences of electrode location and area on ionic current [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(7): 55-60.
- [18] SHY S S, LIN W J, WEI J C. An experimental correlation of turbulent burning velocities for premixed turbulent methane-air combustion [J]. *Proceedings of the Royal Society of London: Series A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2000, 456: 1997-2019.
- [19] SHY S S, LIN W J, PENG K Z. High-intensity turbulent premixed combustion: general correlations of turbulent burning velocities in a new cruciform burner [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28(1): 561-568.
- [20] SHY S, YANG S, LIN W, et al. Turbulent burning velocities of premixed $\text{CH}_4/\text{diluent}/\text{air}$ flames in intense isotropic turbulence with consideration of radiation losses [J]. *Combustion and Flame*, 2005, 143(1/2): 106-118.
- [21] 贾伟东, 何子奇, 杨猛, 等. 稀释气对离子电流影响的试验研究与机理分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(1): 142-149.
JIA Weidong, HE Ziqi, YANG Meng, et al. Experimental study and mechanism analysis on the influence of dilution gas on ion current [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(1): 142-149.
- [22] 刘兵. 离子电流法获取层流火焰燃烧信息的实验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2015.
- [23] 李春艳. 离子电流特征峰形成因素的试验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2015.
- [24] COLLINGS N, DINSDALE S, HANDS T. Plug fouling investigations on a running engine: an application of a novel multi-purpose diagnostic system based on the spark plug [C/OL] // *International Fuels & Lubricants Meeting & Exposition*. [2020-09-04]. DOI: 10.4271/912318.
- [25] SALTZKOFF A, REINMANN R, MAUSS F, et al. In-cylinder pressure measurements using the spark plug as an ionization sensor [EB/OL]. [2020-09-04]. DOI: 10.4271/970857.

(编辑 荆树蓉)