

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.04.006

电火花点火和激光点火性能对比研究

牛嘉伟 范育新 缪俊杰 吕浩杰

(南京航空航天大学能源与动力学院,南京,210016)

摘要:为了比较激光点火和电火花点火的点火性能,在一带稳定器方形直管试验段上,利用电火花调能调频点火器和激光器分别进行点火试验,比较相同来流条件下的初始火核发展、点火极限和火焰传播。结果表明:两者的初始火核形状不同,电火花点火的初始火核呈圆弧形,而激光点火下呈瓣型。相同点火能量下,激光点火比电火花点火的贫油点火极限更宽;相同来流条件下,点火位置下游激光点火的火焰传播速度更快,并且在化学恰当比附近和来流速度为 2.14 m/s 的情况下,两种点火模式的火焰传播速度相差更大。

关键词:电火花点火;激光点火;点火性能

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2018)04-0465-06

Comparative Study of Spark Ignition and Laser Ignition Performance

NIU Jiawei, FAN Yuxin, MIAO Junjie, LÜ Haojie

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: To compare the ignition performance of electric spark and laser induced spark ignition, experiments are carried out by using a modulated electric spark plug and a laser. The evolution of initial flame kernel, ignition limits and flame propagation speed of these two different ignition modes are compared and analyzed under the same flow condition. The results show different shapes of the two initial flame kernels. The initial flame kernel of spark ignition is arc-shaped while laser ignition is petal shaped. Laser ignition has wider lean ignition limit than spark ignition within the same ignition energy. Flame propagation of laser ignition behind ignition position is faster than that of spark ignition under the same flow condition. Meanwhile, the differences of flame propagation speed between these two ignition patterns are much larger around stoichiometric ratio and at the flow velocity of 2.14 m/s.

Key words: spark ignition; laser ignition; ignition performance

燃烧室的点火模式包括电火花点火、热射流点火、等离子体点火和激光点火等。其中由于电火花点火装置结构轻便简单,并且电火花放电技术具有能量集中、容易控制等特点^[1],因此是目前航空发动机上运用最为广泛的点火模式。但传统电火花点火存在诸多缺陷:火花塞电极会因为电压升高而发生烧蚀,降低火花塞寿命;点火时间和点火位置不能精确控制,为了避免干扰精心设计的流场,点火火花不得不在燃烧室的淬熄区生成,而非在热力学和空气动力学概念中最佳位置^[2];在点燃贫油混

合气时,火焰前锋的传播速度会降低到一个不利于火焰传播的值,给目前的点火系统带来新的问题,如火花核生成困难、火焰传播时容易发生熄火等,降低点火可靠性;但提高电火花点火系统能量会使点火电压增高,火花塞烧蚀加剧,使用寿命大大减少。而且高火花能量也并不一定能改进点火性能,因为电极消耗放出的相当一部分热量,起了热能沉降的作用,减少了向混气中点火传输的能量。使用高能电火花点火点燃贫油空气/燃油混合物,其使用的耐久性和灵活性已近极限。

收稿日期: 2017-09-25; **修订日期:** 2018-05-01

通信作者: 范育新,女,博士,教授,博士生导师, E-mail: fanyuxin@nuaa.edu.cn。

引用格式: 牛嘉伟,范育新,缪俊杰,等. 电火花点火和激光点火性能对比研究[J]. 南京航空航天大学学报,2018,50(4):465-470. NIU Jiawei, FAN Yuxin, MIAO Junjie, et al. Comparative study of spark ignition and laser ignition performance[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(4):465-470.

激光点火是将脉冲激光聚焦,用聚焦后的激光束通过各种物理和化学过程点燃燃料的技术。根据激光与可燃混合物的作用机理不同,可以将激光点火分为以下4类:激光热点火、激光诱导光化学点火、激光诱导谐振分解点火及激光诱导火花点火(激光诱导非谐振分解点火)^[3]。其中激光诱导火花点火能够选用的激光波长段范围宽,操作简单,是目前应用最为广泛的激光点火模式^[4-5]。

相比于电火花点火,激光点火具有能够精确控制点火时间和自由选择点火位置,点火能量高,可以降低点火延迟、降低 NO_x 排放、减少点火时的传热损失并增大贫燃界限,同时,具有多点点火的潜力^[6-7]。因此激光点火可加快贫油混合气的燃烧速率,避免在贫油燃烧中伴随的问题,诸如:早期的火焰熄灭、部分燃烧、不点火、压力脉动和循环与循环间发生变化等^[8-9]。而且激光点火相比电火花点火更容易实现贫油点火,因为电火花点火装置的电极会冷却初始火焰内核和妨碍火焰进一步在燃烧室内传播,而激光点火则不存在这一阻碍^[10-11]。

相比电火花点火,激光点火有诸多优势,但激光点火技术目前研究大多集中于内燃机和炸药引爆等方面,采用的燃料大多为静止的均匀混气或固体,对于流动状态下的激光点火研究较少。同时激光点火也存在着装置过于繁重和点火能量较小等缺点。因此了解掌握激光点火性能有助于更好地将激光点火应用于工程实际中。本文对电火花点火和激光点火进行比较研究,初步获得激光点火性能,并比较了电火花点火和激光点火在火核发展初期的差异,为激光点火的实际应用提供理论基础。

1 试验系统

图1为试验系统模型图,主要包括供气系统、试验段、点火系统、高速摄影拍摄系统和火焰传播测试系统。试验段为一带稳定器的方形直管,甲烷气体通过喷气杆顺喷进入试验段与空气进行掺混。根据点火方式不同,点火系统分为电火花点火系统和激光点火系统。电火花点火系统由一台TDH01/5可调能调频的点火器、火花塞和高能电缆等相应的电路组成。激光点火系统包括一台Dawa-350调Q Nd:YAG纳秒脉冲激光器、聚焦透镜(焦距 $f=250\text{ mm}$)等。离子探针与点火位置之间相对位置如图2所示,试验过程中每个工况进行3次测量,取平均值作为两个离子探针中间位置的火焰传播速度,3个位置距离点火位置后方分别是81.5, 205和355 mm。

1.1 电火花调能调频点火器

TDH01/5调能调频点火器主要由升压变压

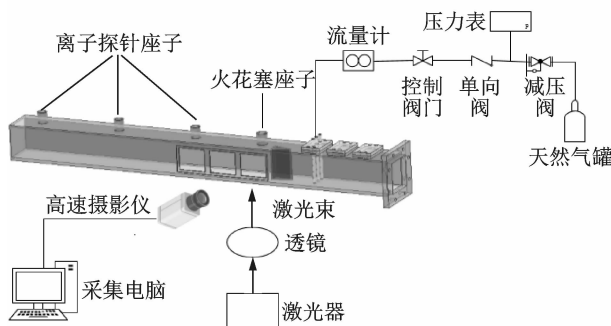


图1 试验系统图

Fig. 1 Test system



图2 试验段示意图

Fig. 2 Test section

器、高压稳压器、直流电源、信号发生器和变频器组成。调能由升压变压器对储能电容充电,通过改变充电电容,即改变储能存储量实现。调频则通过变频器实现。信号发生器会产生一组方波信号,而变频器通过改变电路中充放电电阻来改变方波频率,因此改变可控硅触发频率即改变了火花频率。

虽然点火器中含有高压稳定器,用于稳定储能电容电压来保持每个储能电容控制插座对应的能量恒定,但由于点火器制造误差的存在,实际放电能量与设计放电能量会存在偏差,通过示波法对点火器能量进行实测,获得不同储能电容控制插座实际对应的电火花能量^[12]。实际电火花能量结果如表1所示。

表1 实际电火花能量

Tab. 1 Actual spark energy

插入的储能电容控制插座	实测放电能量/J
CZ ₁	0.092
CZ ₂	0.119
CZ ₃	0.084
CZ ₄	0.094
CZ ₅	0.141
CZ ₆	0.141
CZ ₄ +CZ ₆	0.235
CZ ₅ +CZ ₆	0.282
CZ ₄ +CZ ₅ +CZ ₆	0.374
CZ ₃ +CZ ₄ +CZ ₅ +CZ ₆	0.460
CZ ₂ +CZ ₃ +CZ ₄ +CZ ₅ +CZ ₆	0.579
CZ ₁ +CZ ₂ +CZ ₃ +CZ ₄ +CZ ₅ +CZ ₆	0.660

1.2 激光器系统

本文选用的激光器为Dawa-350调Q Nd:

YAG 纳秒脉冲激光器, Dawa-350 激光器采用了新型的功率开关器件来实现功率变换; 机内弱电电源采用开关电源, 电源采用模块化设计, 维修简单、方便; 充电电压采用数字显示。

为了确定激光器不同调节电压下的激光能量, 采用以色列 Ophire-II 激光能量计测量激光器不同调节电压下的激光能量, 为了保证激光能量测量的精确性, 每个调节电压下的激光能量测量 5 次, 最终取平均值作为该调节电压对应的激光能量, 测量结果如表 2 所示。

从表 2 中可以看到, 随着调节电压升高, 激光能量计采集到的激光能量也随着升高, 拟合后调节电压与平均能量基本呈线性关系, 如图 3 所示, 通过调节电压可以获得试验所需的激光能量。

表 2 脉冲激光能量参数

Tab. 2 Pulsed laser energy parameters

电压/V	激光能量/J					平均能量/J
660	0.094	0.095	0.093	0.093	0.093	0.093 6
680	0.117	0.118	0.117	0.117	0.116	0.117 0
720	0.153	0.154	0.154	0.152	0.152	0.153 0
760	0.184	0.183	0.186	0.183	0.185	0.184 2
800	0.217	0.217	0.218	0.218	0.219	0.217 8
840	0.244	0.243	0.246	0.246	0.245	0.244 8
880	0.276	0.278	0.274	0.275	0.274	0.275 4
920	0.300	0.301	0.301	0.298	0.300	0.300 0

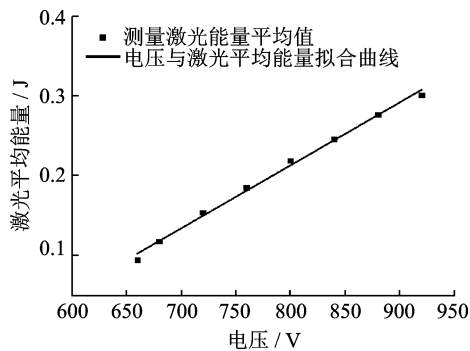


图 3 电压与激光平均能量拟合曲线图

Fig. 3 Fitting curve of voltage and average laser energy

拟合后激光平均能量与电压的关系式为

$$W = 0.008U - 0.4185 \quad (1)$$

式中: W 为激光平均能量; U 为电压。可决系数 $R^2 = 0.9955$ 。

2 试验结果及分析

2.1 电火花与激光点火初始火核生成发展比较

电火花点火能量 0.282 J, 激光点火能量 0.283 J (对应电压 890 V, 两者能量相差很小, 默认相同) 时的初始火核发展进行比较, 如图 4 所示。

图 4 中图片右侧为靠近进口的一侧, 从图片上看, 两种点火方式形成的火花往右逆流传播, 传播至回流区内火焰传播速度等于气流速度的位置, 此处会形成稳定点火源, 形成稳定燃烧。对比图 4(a, b) 可以看到, 在进口速度 $V = 3.04 \text{ m/s}$, 当量比 $\phi = 0.79$ 条件下, 该点火能量下电火花点火和激光点火都能生成初始火核, 但激光点火初始火核生成后发展更加迅速, 传播更快, 激光点火触发后, 在点火位置形成了明亮的三瓣初始火核, 激光脉冲放电结束后, 在 1 ms 时这个初始火核消失, 但在点火位置对应的管道下壁面附近出现了明火, 在 2 ms 时刻壁面附近的火焰区域扩大, 并向上回传, 到 3 ms 火焰已经发展至整个截面并向下游传播, 到了 4 ms 时刻在整个观察窗区域都充满了明亮的火焰。而电火花点火在火花触发后, 在点火位置的初始火核呈现圆弧形, 在火花放电停止后, 这个弧形初始火核触发火核外围的混气开始化学反应, 弧形火核拉长、亮度减弱, 到 4 ms 时, 火核拉得更长, 周围发生化学反应的区域更大, 但整个观察区域除了初始火核外还未出现强烈的明火区。从火核的生成和发展过程可以看出, 在同样点火能量下, 激光点火对初始火核的生成和发展明显有利得多。图 4(b) 中出现的初始火核呈瓣型, 除了流动方向的扁圆形外还有上下两个瓣, 很多学者都在试验研究中发现了第三瓣, 但是第三瓣的产生还未有充分的解释。Spiglanin 等人^[12]认为由于等离子体前端能量交换率高, 从而形成了迎着激光束的辐射传输波和初始流场, 引起第三瓣的产生。Chan 等人^[13]还从气体动力学方面来解释第三瓣形成, 认为是由于气流速度产生“过膨胀”区域才会导致第三瓣形成。Raizer 等人^[14]认为激光击穿后产生的等离子体核的离子化阵面向激光源传播, 产生从聚焦点往激光源的“逆流”, 从而形成第三瓣, 并预计第三瓣在脉冲停止后持续时间很短。作者认为可能是由于高温高压的等离子体发展过程中产生了冲击波, 由于等离子体迎光侧吸收能量的速率大于背光侧, 因此导致球形冲击波不同方向的能量不一致, 由此导致初始火核的多瓣现象。

图 5 是激光点火下不同进口速度初始火核生成发展过程。进口速度变化过程中保持进口总当量比不变, 从图 5(b) 中可以看出, 相同激光点火能量在低来流速度下初始火核形成多个瓣, 激光触发停止后初始火核仍在点火位置继续扩大, 火焰亮度很强, 一直到 4 ms 时初始火核已经发展成一个大而明亮的火团并点燃整个观察区, 但温度还是在火团处最大。分析图 5(a) 未观测到初始火核的多瓣现象是由于来流速度较低, 初始火核亮度过高所引

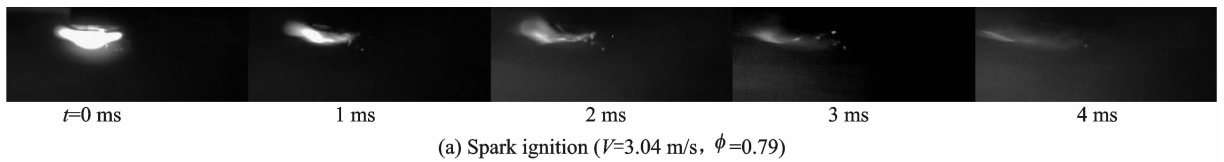
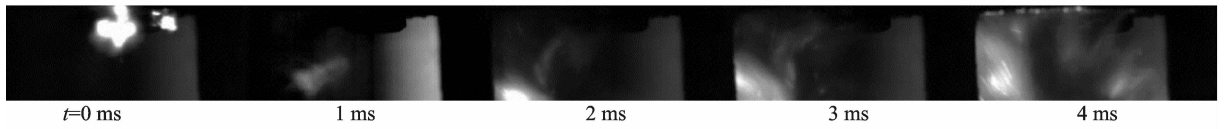
(a) Spark ignition ($V=3.04$ m/s, $\phi=0.79$)(b) Laser ignition ($V=3.04$ m/s, $\phi=0.79$)

图4 不同点火模式下初始火核发展过程

Fig. 4 Initial flame-kernel development process under different ignition modes

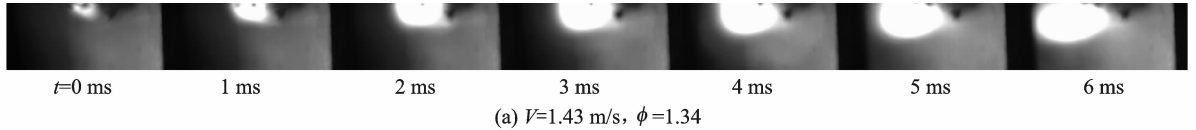
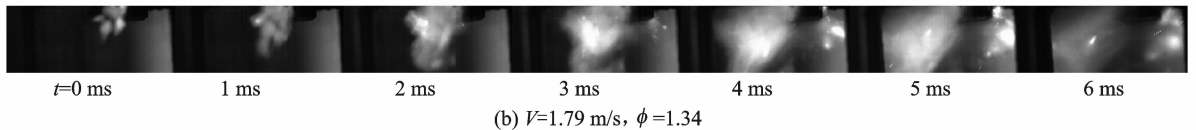
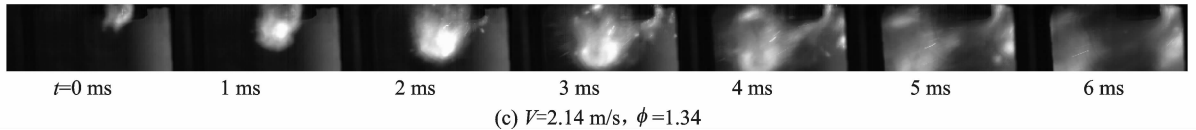
(a) $V=1.43$ m/s, $\phi=1.34$ (b) $V=1.79$ m/s, $\phi=1.34$ (c) $V=2.14$ m/s, $\phi=1.34$

图5 不同流量下激光点火初始火核生成发展过程

Fig. 5 Initial flame-kernel development process of laser ignition under different flow rates

起的,在图5(c)中仅在初始时刻点火位置出现明亮火核,而其他时刻都没有的原因可能是流速较大把激光触发的初始反应区域吹离了点火位置。还可观察到在进口速度为 $V=1.43$ m/s 时,点火后生成的初始火核不断增大,火焰还未完全向外传播,而在进口速度为 $V=1.79$ m/s 和 $V=2.14$ m/s 时,初始火核生成后迅速向外发展,火焰区域越来越大,也即气流速度增大加快了火焰传播过程。对比图4与图5的激光点火过程,发现图4当中初始火核仅在 $t=0$ ms 存在,分析认为根据文献[15]在静止预混气中拍摄到的高速纹影图可以把激光点火过程分为这样几个阶段:(1)电压击穿能量转移到等离子体;(2)爆震冲击波形成;(3)等离子体与膨胀波的相互气动力作用产生第三瓣;(4)等离子体表面快速延伸、高温诱导化学反应出现火焰。在图4(b)中已经出现了带第三瓣的初始激光诱导火核,但由于气流速度高,产生的高温燃气被吹出了点火位置,但这些带有大量等离子体和活性物质的热燃气在下游的合适位置达到了火焰稳定的条件,从而在此处形成稳定火焰并开始点燃整个区域。

2.2 电火花点火与激光点火极限比较

由于测量手段有限,无法准确测得点火位置的

当量比,只能用进口总当量比来表征点火位置局部当量比的情况,根据现有的试验条件测得的点火总当量比只能在 $0.138\sim 3.462$ 之间调节变化,但总的来说,当量比变化区间已经包含了贫油、富油和化学恰当比3种油气状态。试验条件下当量比变化区间如图6所示。

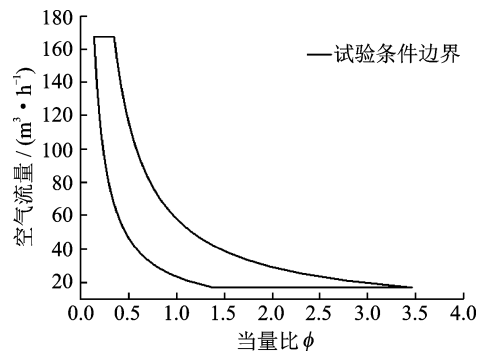


图6 试验条件下当量比变化区域

Fig. 6 Equivalence ratio change area in test conditions

图7是在点火能量基本相同时(电火花点火能量 0.282 J,激光点火能量 0.283 J)电火花点火与激光点火结果。图中曲线上的点为点火成功的边界,所以边界点围成曲线内部为试验条件下点火成功区域,外部为试验条件下点火失败区域。不同点火模式下贫油极限当量比从电火花点火下的 0.692

下降到激光点火下的 0.554,富油极限当量比没有变化。从试验结果来看,激光点火相比电火花点火能在更贫的油气混合下点火成功,分析认为在电火花点火时,初始火核由电嘴放电产生,但是点火前电嘴温度较低,电嘴会冷却初始火核,不利于初始火核形成,而对于激光点火,激光器系统都在试验件外部,不会对试验件内部的等离子体生成发展产生影响,因此能在更贫的条件下点火成功。

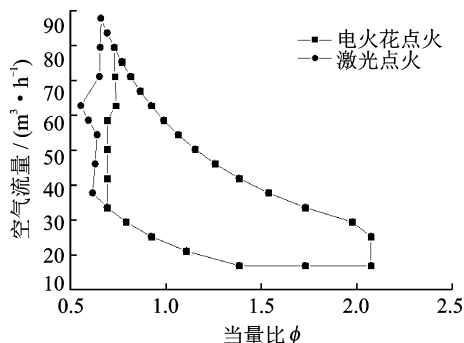


图 7 不同点火模式下点火极限当量比

Fig. 7 Ignition limit equivalence ratio by different ignition modes

2.3 电火花点火与激光点火的火焰传播速度比较

图 8,9 分别是不同当量比和不同速度下电火花点火与激光点火平均火焰传播速度比较。从图 8 可观察到,在当量比 0.79 时,不同点火方式下火焰传播速度均先增大后减小,这是由于火焰发展初期消耗了大量燃料所导致的,在当量比 0.99 和 1.38 时,火焰传播速度随着发展过程越来越快。从

不同当量比来看,当量比 0.99 时火焰传播速度最大。在试验工况相同的情况下,点火位置后方相同位置处激光点火下的火焰传播平均速度都比电火花点火的火焰传播平均速度大,并且在化学恰当比附近情况下,两种点火模式的火焰传播平均速度相差更大,说明此时激光点火下火焰发展比电火花点火更快。

从图 9 可观察到,对于激光点火方式,在进口速度为 2.14 m/s 时,火焰向下游传播过程中传播速度逐渐增大,当进口速度为 2.50 m/s 及以上时,火焰向下游传播过程中传播速度先增大后减小,对于电火花点火方式是在进口速度为 2.86 m/s 时出现火焰向下游传播过程中传播速度先增大后减小的现象,分析认为来流增大,燃烧效果更好,使得前期传播过程消耗燃料增多,导致在出口段出现火焰传播速度不增反降的趋势。并且也可观察到在试验工况相同的情况下,点火位置后方相同位置处激光点火下的火焰传播平速度都比电火花点火的火焰传播平均速度大,并在来流速度为 2.14 m/s,两种点火模式的火焰传播平均速度相差更大。分析认为激光器发射激光通过透镜聚焦在流场内形成焦点,经过透镜聚焦后的焦点都比较小,但是焦点内的能流密度很大,激光诱导产生等离子体后激光能量转移到等离子体中,等离子体表面快速延伸、高温诱导化学反应出现火焰。生成的初始火核具有高的能量密度,能迅速点燃其周围混气,点火后火焰强度更大、反应更剧烈,火焰传播及发展也更迅速。

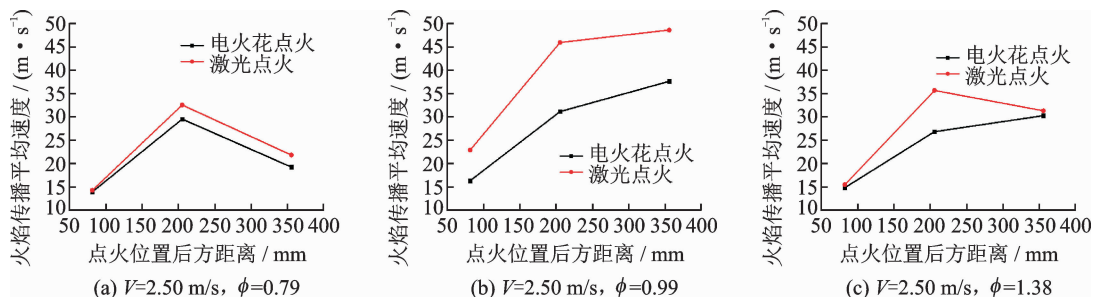


图 8 不同当量比下电火花点火与激光点火火焰传播平均速度比较

Fig. 8 Comparison of flame propagation speed under different equivalence ratios

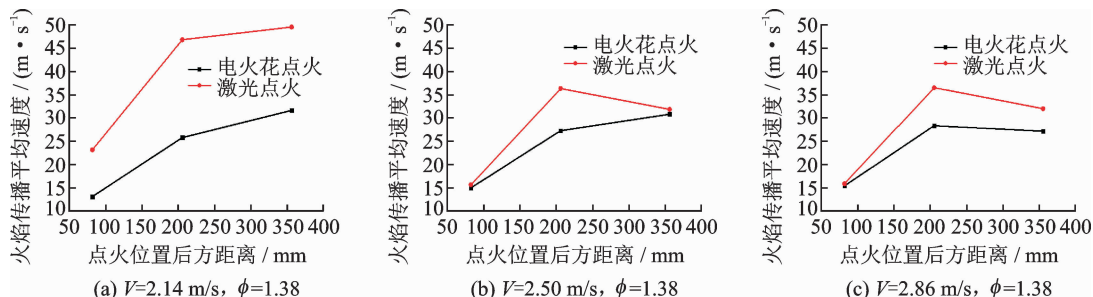


图 9 不同速度下电火花点火与激光点火火焰传播平均速度比较

Fig. 9 Comparison of flame propagation speed at different inflow velocities

3 结 论

本文通过对电火花点火和激光点火的试验研究,分析了电火花点火和激光点火在初始火核发展、点火极限和火焰传播方面的差异,获得如下结论:

(1)对电火花点火能量 0.282 J,激光点火能量 0.283 J 下两者的初始火核发展高速摄影结果显示,两者的初始火核形状的不同,电火花点火的初始火核呈圆弧形,而激光点火下的初始火核呈瓣型。初始火核形成后,电火花点火的弧形火核在流动气流作用下逐渐拉长,点燃混气的范围扩散,点火位置的强度减弱。激光点火初始生成的瓣型火核在低流速下,在点火位置快速点燃周围混气,火核尺寸迅速增大,发光增强,很快即点燃整个观察区域。相同条件下,激光点火比电火花点火更快点火成功,同时点火后的火焰传播更快。对于激光点火过程,气流速度增大可加快火焰传播过程。

(2)相同点火能量下激光点火比电火花点火的贫油点火极限更宽,但对富油点火极限没什么影响。

(3)相同来流条件下,激光点火火焰传播速度都比电火花点火快,并且在化学恰当比附近和来流速度为 2.14 m/s 的情况下,两种点火模式的火焰传播速度相差更大。

参考文献:

- [1] NGO M. Determination of the minimum ignition energy (MIE) of premixed propane/air[D]. Bergen, Norway: University of Bergen, 2009.
- [2] MOESL K G, VOLLMER K G, SATTELMAYER T, et al. Experimental study on laser-induced ignition of swirl-stabilized kerosene flames[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131(2):021501.
- [3] 方栋华. 液体燃料激光诱导火花点火机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.

- FANG Donghua. Study on mechanism of laser-induced spark ignition in liquid fuel[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [4] KOPECEK H, MAIER H, REIDER G, et al. Laser ignition of methane-air mixtures at high pressures[J]. Exp Thermal Fluid Sci, 2003, 27:499-503.
- [5] DHANAJAY K S, MARTIN W, KURT I, et al. Characterisation of laser ignition in hydrogen-air mixtures in a combustion bomb[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009(34):2475-2482.
- [6] MCMILLIAN M. Laser-spark ignition testing in a natural gas-fueled single-cylinder engine[R]. SAE Paper 2004-01-0980, 2004.
- [7] KOPECEK H. Laser ignition of methane-air mixtures at high pressures and diagnostics[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2005, 127(1):213-219.
- [8] RONNEY P D. Laser versus conventional ignition of flames[J]. Optical Engineering, 1994, 33:510-521.
- [9] PHUOC T X. Laser-induced spark ignition fundamental and applications[J]. Optics and Lasers in Engineering 2006, 44:351-397.
- [10] LEFEBVRE A H. Title: Gas turbine combustion [J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 1984, 5(4):228-238.
- [11] RAGER J. Funkenerosion an Zündkerzenelektroden [D]. Stuttgart: University Stuttgart, 2006.
- [12] SPIGLANIN T A, MCILROY A, FOURNIER E W, et al. Time-resolved imaging of flame kernels: Laser spark ignition of H₂/O₂/Ar mixtures [J]. Combustion & Flame, 1995, 102(3):310-328.
- [13] CHAN S H. Transport phenomena in combustion [M]. [S. l.]: Taylor & Francis, 1996.
- [14] RAIZER Y P, TYBULEWICZ A. Laser-induced discharge phenomena[M]. [S. l.]: Consultants Bureau, 1977.
- [15] BRADLEY D., SHEPPARD C G W, SUARDJAJA I M, et al. Fundamentals of high energy spark ignition with lasers[J]. Combustion and Flame, 2004 (138):55-77.

(编辑:夏道家)