

丙烷/空气稀薄预混合气流动下的激光点火特性

张俊杰, 郭晓阳, 王朝君, 胡二江, 黄佐华

(西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 基于流动点火平台, 在不同当量比和流速下, 对丙烷/空气稀薄预混气进行了激光点火实验。研究发现: 随着当量比和流速的增加, 火焰发展速度加快且火焰面积增大; 火焰中的 CH* 发光强度随当量比提升有明显提高, 通过 CH* 的分布及发光强度变化能判断火焰发展阶段。混合气的击穿和点火成功率都随当量比和流速的增加而增加, 但改变当量比对成功率的影响比改变流速更大; 通过击穿发射光谱中的 H/N 峰值强度比, 可以判断混合气中各组分的含量变化, 且使用标定线能确定未知预混合气的当量比。

关 键 词: 激光点火; CH* 发光强度; 击穿成功率; 点火成功率; 击穿发射光谱

中图分类号: V233.3; TK401

文献标志码: A

Laser ignition characteristics in propane/air lean premixed gas flow

ZHANG Junjie, GUO Xiaoyang, WANG Chaojun, HU Erjiang, HUANG Zuohua

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on a flow-ignition platform, laser ignition experiments were carried out on the propane/air lean premixed gas for different equivalence ratios and velocities of flow. The study found that with the increase of the equivalence ratio and velocity of flow, the flame development speed increased and the flame area increased; the CH* luminous intensity in the flame increased significantly with the increase of the equivalence ratio, and the stage of flame development could be judged by the CH* distribution and luminous intensity changes. The probability of successful breakdown and ignition of the mixed-gas increased with the increase of the equivalence ratio and the velocity of flow, but the change of the equivalence ratio had a greater impact on the probability than the velocity of flow; the changes of the content of each component in the mixed gas could be judged by the H/N peak intensity ratio in the breakdown emission spectrum, and the calibration line could determine the equivalence ratio of the unknown premixed gas.

Keywords: laser ignition; CH* luminous intensity; probability of breakdown;
probability of ignition; breakdown emission spectrum

为了满足日益严格的排放法规和降低能源的对外依存度, 稀薄燃烧技术正以其高燃油效率, 低排放等优点, 受到相关行业越来越多的关注^[1-4]。

但在实际应用中稀薄燃烧还存在一些问题, 如航空发动机通常在稀燃、高流速的极端条件下工作, 对于在低压下的稀混合气, 保证成功点火率而不

收稿日期: 2021-08-13

基金项目: 国家科技重大专项(2017-I-0007-0033)

作者简介: 张俊杰(1998—), 男, 硕士生, 主要从事激光点火特性研究。

通信作者: 胡二江(1983—), 男, 教授, 博士, 主要从事航空发动机点火和燃烧调控研究。E-mail: hujiang@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 张俊杰, 郭晓阳, 王朝君, 等. 丙烷/空气稀薄预混合气流动下的激光点火特性[J]. 航空动力学报, 2023, 38(3): 630-639. ZHANG Junjie, GUO Xiaoyang, WANG Chaojun, et al. Laser ignition characteristics in propane/air lean premixed gas flow[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(3): 630-639.

发生熄火是一项极大的挑战。对于传统的电火花点火,通常会采用提高电压的方式来提高点火稳定性,但这种方法提高成功率的效果有限且会使其使用寿命显著下降,无法从根本上解决稀燃条件下点火困难的问题。

为了实现高效、稳定、可靠地点火,人们提出了一种新型的点火方式:激光点火。根据激光点火的原理不同,主要可分为以下3种:激光热点火、激光诱导光化学点火、激光诱导等离子体点火(laser induced plasma ignition, LIPI)。LIPI通过诱导击穿产生大量高温等离子体完成点火过程,不存在与目标分子吸收波长匹配等问题^[5-6],同时LIPI发射的电磁波可以忽略不计,最大限度地降低了电磁干扰的风险^[7],LIPI还可以更好地控制点火时间和位置,有利于多点点火的应用^[8-9]。此外,在流动状态下,稀混合气会更难以点火,所以LIPI比电火花点火的应用范围更广,也更适应于极端条件下点火工况。

丙烷通常来源于处理天然气或精炼原油时的副产物,通常与丁烷一起用作液化石油气,主要用作户外取暖、便携式炉灶和机动车的燃料,丙烷价格低廉、可以适应比较宽的温度范围,在美国和加拿大,数百万家庭将丙烷作为家庭用燃料,同时丙烷还可作为化工产业的原材料,用于制备乙烯、丙烯等^[10],此外,丙烷还可以用作航空煤油的模拟燃烧^[11],因此本文使用丙烷作为燃料,在流动状态下进行激光点火实验研究。

Esakov等^[12]研究了在高速气流中的微波放电对丙烷气点火的影响。实验使用功率为1 kW、波长为12.5 cm的线偏振微波辐射准光束激发放电,证明了丙烷在超声速条件下点火和燃烧的可能性。Lydia等^[13]对比了单脉冲和双脉冲激光在稀燃甲烷/空气预混流中的点火以及化学发光特征。研究表明,当燃料当量比更高时,单双脉冲点火的着火概率都随速度的增加而增加。Beduneau等^[14]研究了流速、当量比和焦距对预混甲烷/空气的最小点火能量的影响。结果表明,当量比大于0.8时,最小点火能量随流速的增大而增大,当量比小于该值时,最小点火能量的变化规律则相反。Börner等^[15]开发出一款用于火箭发动机燃烧室的微型激光点火系统,该款激光点火系统比传统的火炬点火器体积更小。基于该款点火系统,他们开展了激光点火的可靠性、火焰发展特性等研究。An等^[16]以乙烯为燃料在超声速燃烧

室上,对激光点火(LI)和火花放电点火(SDI)进行了实验研究,并分析了 CH^* 随时间的变化。发现初始火核的大小和强度受点火能量和位置的影响,通过提高点火能量,可以缩短点火时间,提高单脉冲激光点火的成功率。

由此可见,目前对于激光点火的研究主要使用的是甲烷、乙烯等燃料,对于在流动状态下的丙烷激光点火研究较少,且研究内容较为单一,主要是着火概率和最小点火能量等。本实验使用丙烷/空气预混合气,在稀燃和流动状态下,使用激光诱导等离子体点火,结合ICCD(intensified charge coupled device)、光谱仪、高速摄像机等设备,对混合气的火焰边界发展、火焰中 CH^* 分布、击穿和点火成功率、击穿发射光谱等方面进行了探究,系统研究了不同工况下上述结果的变化情况。

1 实验装置及数据处理

1.1 实验装置

流动点火实验平台如图1所示,主要包括进排气系统、光路系统、点火系统和数据采集系统等。燃烧室为一个方形隧道,横截面尺寸为4 cm×4 cm,预混的 C_3H_8 /空气气流从燃烧室入口流入后,通过三片间距为1 cm的整流孔板以形成平流,点火位置在距离入口20 cm处。燃烧室侧面嵌入了两块20 cm×4 cm的石英玻璃凸台,用作光学视窗,便于击穿、火核形成及火焰传播阶段的图像获取。在视窗边缘下游3 cm处通入 N_2 作为稀释气,阻断火焰的继续传播。

激光点火系统采用Nd:YAG灯泵浦纳秒调Q激光器(Grace NASOR800),可选用3个波长(355、532、1 064 nm),本文使用的是532 nm。激光脉冲能量是通过外部光路上的能量衰减器进行调节。激光脉冲能量的测量主要通过分光镜和两个能量计(Coherent,型号为J-50-MB-YAG和J-25-MB-LE)来实现,分光镜可将激光分成比例一定的两束光,通过测量其中一束就可知道另一束进入燃烧室的能量,激光聚焦镜的焦距为150 mm,在聚焦镜前安装有一组扩束镜,以减小激光束的发散角并使能量分布更均匀。

光路系统包括连续光源,两面焦距为60 cm的K9凸透镜,一台安装50 mm f/1.8镜头(Nikon)的高速摄像机(Phantom VEO1310)。高速摄像机帧速为30 000 帧/s,曝光时间为4 ms,空间分辨率为207 mm/像素。此外,还使用一台安装80 mm

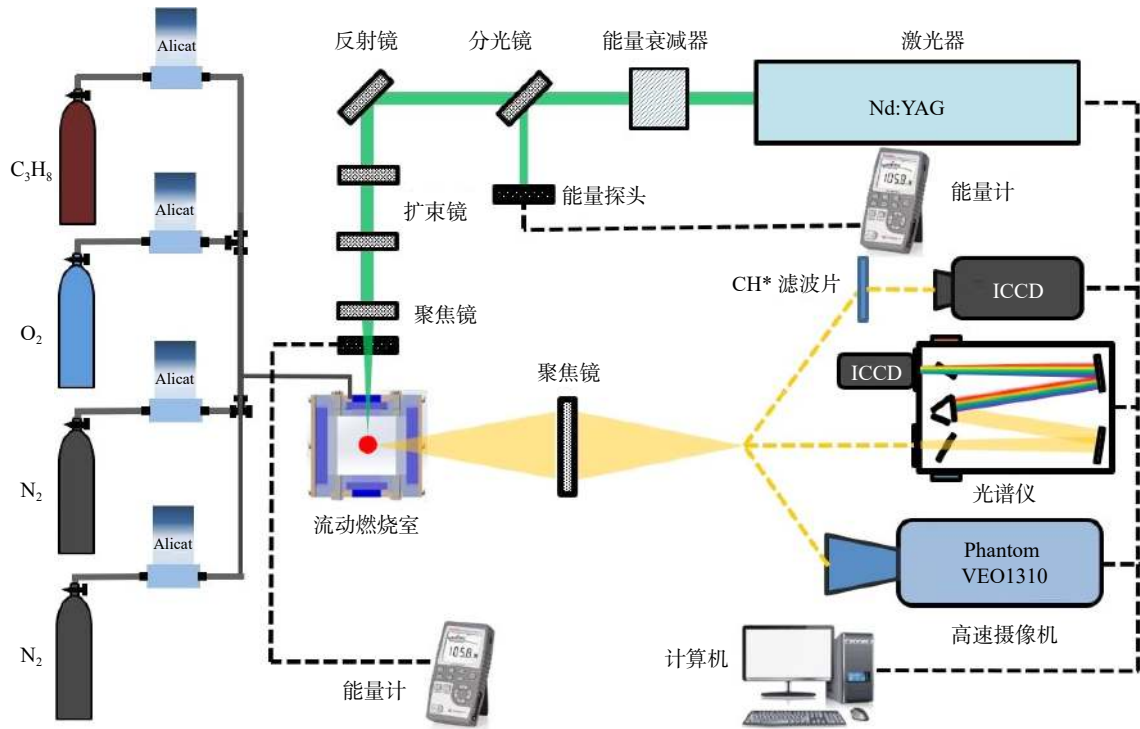


图 1 流动管激光点火实验系统图

Fig. 1 Diagram of laser ignition in flow tube experimental system

f/2.8 镜头(Nikon)的 ICCD 相机(Oxford Instruments, Andor-iStar DH334T), 配合中心波长 430 nm、带宽 10 nm 的窄带通滤波片(Edmund Optics), 捕捉火焰发展过程中的 CH* 发光。ICCD 相机的 MCP (microchannel plate) 增益设置为 4 095, 门宽设置为 0.5 ms, 成像分辨率为 195 mm/像素。光谱仪测量系统由光谱仪(Shamrock 750, Andor)和 ICCD 组成, 在测量混合气击穿光谱时, 延迟时间设为 400 ns, 门宽时间为 100 ns, MCP 增益为 1 000。

实验选用最大体积流量(文中简称流量)为 250、100、10 L/min 的体积流量控制器(ALICAT,

MCR-Series)分别用来控制预混 N₂、O₂、稀释气体 N₂ 和燃料 C₃H₈ 的体积流量, 气体纯度均为 99.999%, 体积流量误差最大为示值的 0.4% 与量程的 0.2% 之和。

1.2 实验工况及数据处理

实验所用混合气均为稀混合气, 空气为 N₂ 与 O₂ 的混合气(体积比为 3.762 : 1), 燃烧室内的初始温度约为 298 K, 静态压力保持在约 100 kPa (室内环境条件), 在进行击穿和点火实验时, 每组工况均进行约 50 次以上点火, 直至成功率稳定, 表 1 为具体实验工况。

表 1 实验工况

Table 1 Experimental conditions

实验内容	当量比 ϕ	流速/(m/s)	入射能量/mJ
火焰发展	0.63, 0.65, 0.68, 0.70	1	20
	0.58, 0.60	1, 2	100
CH*分布	0.65, 0.70	1	50
击穿	0.55, 0.60, 0.65, 0.70	1	7~12
	0.55, 0.70	1, 2	7~12
点火	0.55, 0.58, 0.60, 0.63, 0.65, 0.68, 0.70	1	20, 40, 80
	0.55, 0.58, 0.60, 0.63	1	20~120
	0.58, 0.60	1, 2	20~120
发射光谱	0.40, 0.50, 0.60, 0.70	1	50
	0.55, 0.70	1, 2	50

对于击穿和点火成功率的结果, 之前的研究中有采用逻辑分布函数来处理数据^[17], 本文采用对数正态分布函数来拟合实验数据^[18], $\text{erf}[\bullet]$ 为误差函数, 具体函数关系式如下:

$$P(E_{\text{inc}}, C_1, C_2) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{erf} \left[\frac{\ln E_{\text{inc}} - C_1}{C_2 \sqrt{2}} \right] \quad (1)$$

式中 E_{inc} 即为击穿和点火过程中的入射能量, C_1 、 C_2 为根据实验结果优化后的参数, 当关系式确定后, 根据式 (2) 能计算出当 $P = 50\%$ 时的入射能量, 即 50% 击穿或点火成功率下的入射能量, 分别用 E_{b50} 和 E_{s50} 来表示。

$$E_{\text{b50}} = e^{C_1} \quad \text{或} \quad E_{\text{s50}} = e^{C_1} \quad (2)$$

在当量比较低时会出现实验能量范围内, 点火成功率不足 50% 的情况, 使用式 (2) 就可以外推出 E_{s50} , 除 50% 成功率的能量外, 本文还选取成功率为 90% (E_{b90} 、 E_{s90}) 和 10% (E_{b10} 、 E_{s10}) 的能量来表征击穿或点火的难易程度。

2 火焰发展特征及 CH^* 分布

2.1 火焰发展图片

图 2 为在混合气流速 $v=1 \text{ m/s}$, 点火入射能量为 20 mJ 工况下, 当量比为 0.63~0.70 时的混合气火焰发展图片。如图所示, 随当量比增大, 火焰发展速度加快, 同一时刻的火焰面积变大, 同时火焰边界也更加清晰。激光入射方向为图中左侧, 激光点火会形成明显的 3 瓣型火焰结构, 且第 3 瓣火焰会朝着激光入射方向发展。为便于比较, 取第一张能清晰辨认出火核的图片为时间零点 (火焰发展的起始时刻), 在火焰发展的前 5 ms, 能看见第 3 瓣火焰的存在, 但由于第 3 瓣火焰的发展方向垂直于气体流动方向, 故随着气体流动, 在 5 ms 后第 3 瓣火焰逐渐消散, 但在高当量比下, 例如当量比为 0.7 时第 3 瓣火焰能维持到 10 ms, 且火焰面积也较低当量比工况更高。火焰发展到后期时, 由于气体流动, 火焰会出现多层混叠的现象 (如图 2(d))。

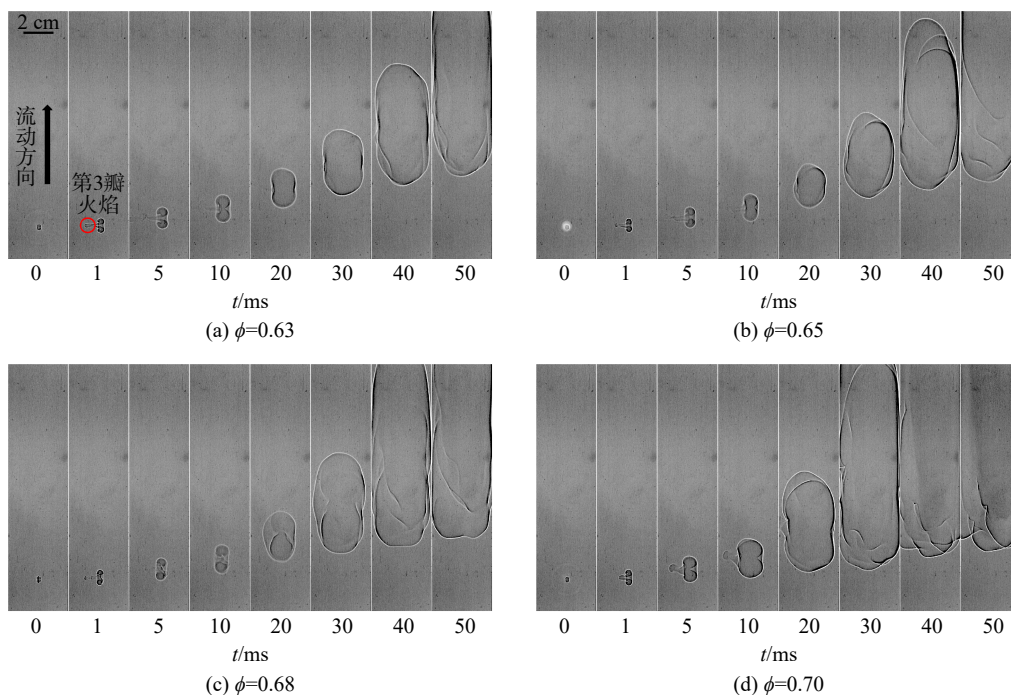


图 2 不同当量比下的火焰发展图片

Fig. 2 Flame development pictures for different equivalence ratios

图 3 为当量比为 0.58 和 0.60 的混合气, 分别在 $v=1 \text{ m/s}$ 和 2 m/s 流速下的火焰发展图片, 点火入射能量为 100 mJ, 图中 t 表示时间。从图中可以看到, 与增大当量比相似, 随着流速增大, 火焰发展速度也会加快, 但火焰边界也更不规则, 这是因为流速越大, 各组分的绝对浓度越大, 燃烧

发展更快, 但高流速也会影响火焰发展, 由于火焰在燃烧室中朝着两个方向发展 (与气流同向和反向), 而更高流速的未燃气对反向发展的火焰阻碍作用更强, 所以相同当量比下, 在火焰发展后期, 高流速工况火焰的下边界更高, 但在前期能完整看到火焰形状的时刻, 依然能够看出流速

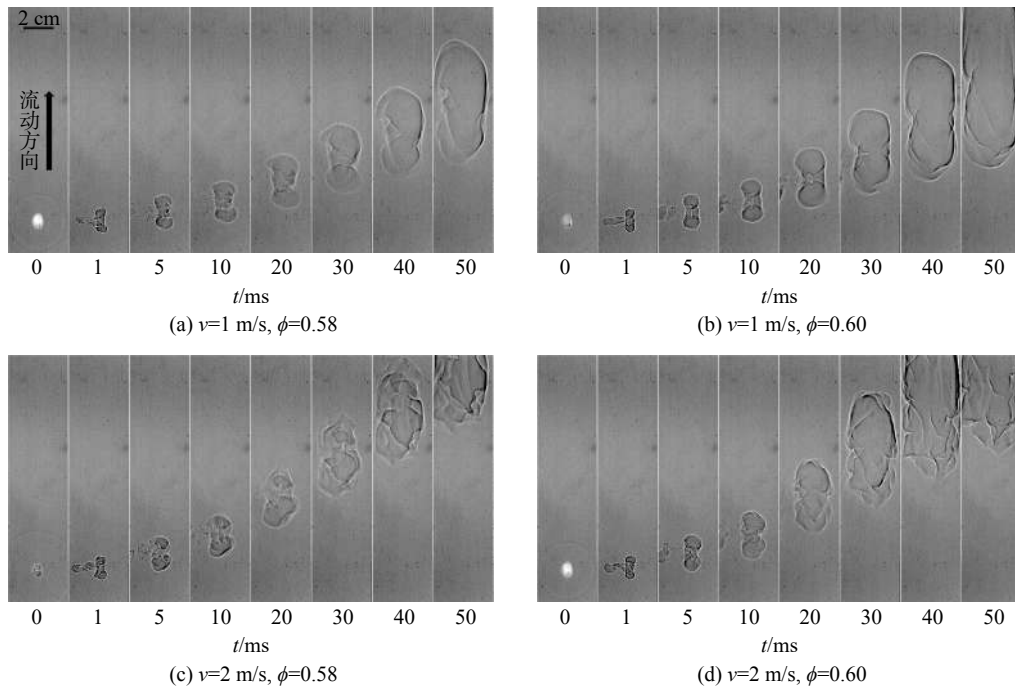


图 3 不同流速下的火焰发展图片

Fig. 3 Flame development pictures for different velocities of flow

对火焰发展的促进作用。在 2 m/s 的流速下, 火焰前期就已出现不规则的现象, 发展方向与气流平行的两瓣火焰也在很早期(约为 1 ms)就出现多层火焰混叠的情况, 到 20 ms 时火焰发展紊乱且边界已完全不规则, 火焰混叠严重。

2.2 火焰中 CH* 分布特征

除火焰发展图片外, 本实验还利用 ICCD 并结合 CH* 滤波片, 对不同当量比下火焰发展过程中的 CH* 分布进行了研究, 化学发光强度越高代表 CH* 在该区域密度越大。图 4 反应了混合气在 50 mJ 点火能量, 流速为 1 m/s, 当量比为 0.65 和 0.70 时, 火焰中的 CH* 分布变化, CH* 是由燃料分子裂解产生, 可以表征反应区。混合气当量比为 0.70, 火焰发展到 35 ms 时已超出燃烧室, 故记录时间取到 30 ms, 由于 CH* 发光信号较弱, 故 ICCD 增益设置为 4 095, 测量门宽为 0.5 ms。图中 CH* 化学发光强度为归一化强度, 顶端白色数字为当前时刻图中的最高强度。如图所示, 在火焰边界上, 化学反应最活跃, 所以发光强度最高, 而由于激光点火的第 3 瓣火焰形成与气体流动有关, 所以在初始阶段(约 5 ms), 两瓣火焰的交界处(即气流运动和化学反应最剧烈的区域), 发光强度最高, 而且随着火焰发展, 沿着气流方向的两瓣火焰不断发展且第 3 瓣火焰逐渐消失, 最大发光强度区域逐渐向火焰外边界转移。

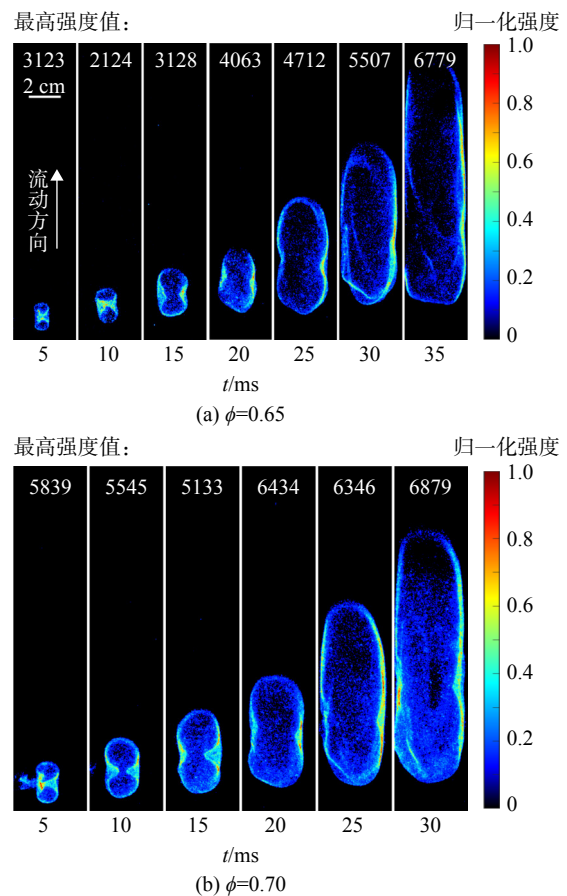


图 4 不同当量比下的 CH* 分布

Fig. 4 CH* distribution for different equivalence ratios

由于 CH* 大量分布在火焰边界, 所以图中的分布也反映了火焰的形态。可以看到当量比更高

时, 火焰发展速度更快, 同一时刻下 CH^* 最大发光强度也更高, 且随时间逐渐变大, 5 ms 时强度较高是因为击穿产生的大量等离子体还存在于火焰中, 到 30 ms 时, 除最外部的火焰边界外, 还出现了其他的 CH^* 强度较高的区域, 这部分区域是由于流动和火焰拉伸导致的新火焰边界, 也即图 2~图 3 中出现的多层火焰混叠的现象。

CH^* 能在一定程度上表示反应的进行程度, 图 5 为图 4 中的 CH^* 发光总强度, 图中 a.u. 表示任意单位 (arbitrary unit), 意为表示定性的大小。可以看到, 对于当量比为 0.65 的混合气, 在 5~20 ms 时 CH^* 发光强度变化并不大, 在 20 ms 之后, 发光总强度迅速增加, 火焰进入快速发展期; 而当量比为 0.70 时, 从 15 ms 之后, 火焰就已经开始快速发展, 这一结论也可以从图 4 中火焰发展轮廓看出。对 CH^* 分布和强度的研究, 提供了一种判断火焰发展阶段的方法。

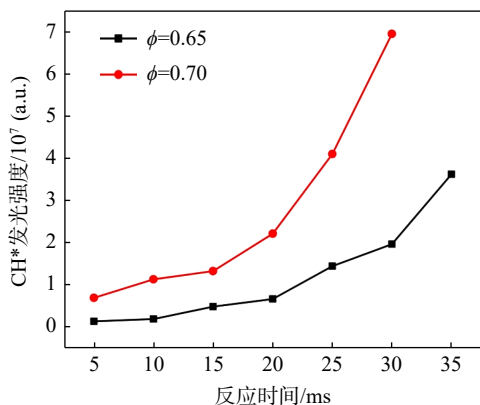


图 5 不同当量比下的 CH^* 强度

Fig. 5 CH^* intensity for different equivalent ratios

3 点火及击穿成功率

3.1 不同工况下的击穿成功率

混合气的成功点火需要火核能够形成并发展, 也即形成自维持的火焰, 火核的形成在于激光入射后使原子和分子离解并产生能量沉积。能产生电子雪崩和能量沉积就代表发生了混合气的击穿, 所以击穿其实是成功点火的前提, 没有产生击穿就不可能点火成功, 所以本节重点研究不同工况下的混合气击穿和点火特性。实验时使用光谱仪采集击穿时刻的发射光谱, 若光谱仪能采集到的击穿后产生的 $\text{H}/\text{N}/\text{O}$ (氢/氮/氧) 特征峰, 则视为成功击穿。

图 6 是在 $v=1$ m/s, 当量比为 0.55~0.70 时, 混合气的击穿成功率与击穿能量的变化关系, 图中

SL (stochastic law) 表示分布函数拟合曲线, 后续图同理, 表 2 为图 6 中的数据拟合后的参数及结果。增大当量比, 即提高混合气中的燃料占比, 可以降低 50% 击穿所需能量, 但 E_{b50} 降低的幅度并不大, 从当量比 0.55 提高到 0.70, E_{b50} 仅降低 0.46 mJ。从击穿成功率上看, 提高当量比对于提高击穿成功率影响还是比较明显, 但如果要进一步提高击穿成功率, 可以考虑提高击穿能量, 由于击穿所需能量并不大 (约为 10 mJ), 所以提高击穿能量在对成功率有较大提升的同时, 对设备的要求不会提高太多。

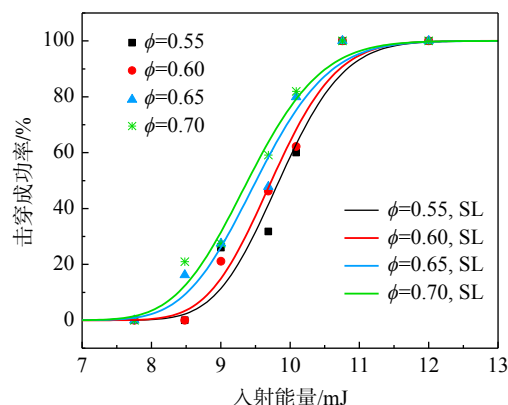


图 6 不同当量比下的击穿成功率

Fig. 6 Probability of breakdown for different equivalence ratios

表 2 不同当量比的击穿成功率拟合参数及结果

Table 2 Fitting parameters and probability of breakdown for different equivalence ratios

当量比 ϕ	C_1	C_2	E_{b10}/mJ	E_{b50}/mJ	E_{b90}/mJ
0.55	2.286 8	0.074 1	8.95	9.85	10.85
0.60	2.275 6	0.075 2	8.85	9.75	10.72
0.65	2.252 6	0.086 3	8.55	9.51	10.62
0.70	2.239 8	0.088 1	8.40	9.39	10.54

除提高当量比外, 增加流速也是提高击穿成功率的途径之一, 图 7 是当量比为 0.55 和 0.70, 流速分别为 1 m/s 和 2 m/s 时, 击穿成功率随入射能量的变化关系, 表 3 为图 7 中的数据拟合后的参数及部分结果。可以看到, 流速的增加对于降低 E_{b50} 有效果, 但不如提高当量比明显, 流速从 1 m/s 增加到 2 m/s 后, E_{b50} 仅降低了 0.24 mJ, 在实际使用中, 可以考虑将同时增加当量比和流速。

虽然从能量上看, 增加流速和提高当量比的作用并不大, 这是因为混合气击穿所需的能量本身就较小, 但从成功率上看, 这两种方法对于提高击穿成功率的作用相当明显。例如当击穿入射

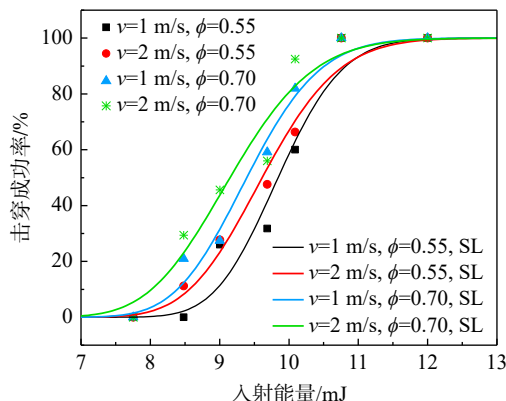


图 7 不同流速下的击穿成功率

Fig. 7 Probability of breakdown for different velocities of flow

表 3 不同流速的击穿成功率拟合参数及结果

Table 3 Fitting parameters and probability of breakdown for different velocities of flow

当量比 ϕ	流速/(m/s)	C_1	C_2	E_{b10}/mJ	E_{b50}/mJ	E_{b90}/mJ
0.55	1	2.286 8	0.074 1	8.95	9.85	10.85
0.70	1	2.239 8	0.088 1	8.40	9.39	10.54
0.55	2	2.263 2	0.090 2	8.57	9.61	10.80
0.70	2	2.213 7	0.103 1	8.02	9.15	10.44

能量为 10 mJ 时, 当量比和流速同时增加, 击穿成功率从 60% 提升到 92.5%。由于击穿所需能量远小于点火(后文详细解释), 所以对于击穿来说, 能量往往不是最重要的参数, 击穿成功率的提高才是真正需要关注的。

3.2 不同工况下的点火成功率

图 8 是固定点火入射能量(E_{inc})分别为 20、40、80 mJ 时, 当量比为 0.55~0.70 的混合气的点火成功率, 混合气流速为 1 m/s。可以看到, 在当量比为 0.6 时, 提高入射能量对点火成功率的影响最大, 且入射能量较低时, 当量比提高而引起的点火成功率增加更明显。相较于静态点火, 混合气流带来的能量耗散和气流运动的不确定性, 会导致点火更难以成功, 在当量比为 0.55 时, 尽管入射能量已达到 80 mJ, 点火成功率依然只有 15% 左右, 为了拓宽混合气的燃烧极限(尤其是稀限), 增大入射能量是有效的, 例如在 0.58 当量比下, 入射能量从 20 mJ 增加到 80 mJ, 点火成功率从 0 增加到了 44.1%。

但是过高的点火能量也会限制设备的使用条件, 而且从图 3 也可看出, 较高的入射能量也会加剧火核的形成初期的气流运动, 造成火焰形状的不规则, 所以对于低当量比下使用的点火能量,

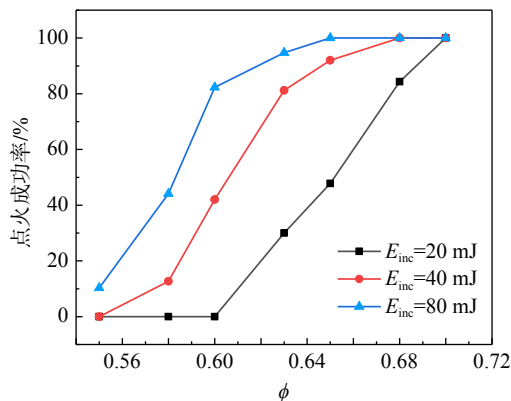


图 8 不同点火能量下的点火成功率与当量比的关系

Fig. 8 Relationship between probability of ignition and equivalent ratio under different ignition energies

还需要进行合理的选择。

当量比变化对点火成功率的影响非常明显, 图 9 是在 $v=1$ m/s, 当量比为 0.55~0.63 时, 点火成功率随点火入射能量的变化关系, 表 4 为图 9 中的数据拟合后的参数及部分结果。从表中的数据 and 图中变化可以看到, 提高当量比可以显著提高低入射能量下的点火成功率, 并降低 E_{10} 、 E_{50} 、 E_{90} 的大小, 这个结论也可以被图 8 验证。

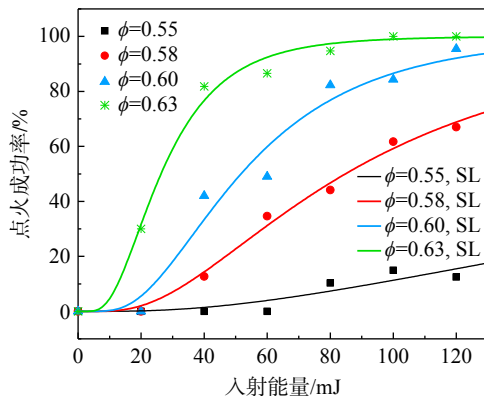


图 9 不同当量比下的点火成功率

Fig. 9 Probability of ignition for different equivalence ratios

当点火入射能量为 40 mJ, 当量比从 0.55 增加到 0.63 时, 点火成功率增加了 81.8%, 成功率有明显的提升, 相较于击穿, 点火成功率随当量比改变而变化得更明显。从表 2 和表 4 对比可以看到, E_{50} 要比 E_{b50} 大很多, 这是由于点火成功(火核能发展成自维持火焰)所需要的时间尺度比击穿成功(发生电子雪崩)大很多, 而实验点所处工况均是稀燃且为流动状态(热量散失更快), 故点火比击穿更易失败, 所以达到 50% 点火成功率所需要的能量会更高, 但点火和击穿的变化规律和趋

表 4 不同当量比的点火成功率拟合参数及结果

Table 4 Fitting parameters and probability of ignition for different equivalence ratios

当量比 ϕ	C_1	C_2	E_{10}/mJ	E_{50}/mJ	E_{90}/mJ
0.55	5.740 8	0.938 1	93.6	311.3	1 035.4
0.58	4.440 4	0.705 8	34.3	84.8	209.6
0.60	3.945 2	0.596 7	24.1	51.7	111.5
0.63	3.269 9	0.575 2	6.9	26.3	55.0

势是一致的。

此外,在更高当量比工况下,点火成功率对点火能量的提高更敏感,例如在当量比为 0.60 时,点火能量从 20 mJ 增加到 40 mJ 时,点火成功率从 0 提高到 42%;而当量比为 0.63 时,点火成功率从 29.9% 提高到了 81.8%。如前所述,当点火能量过高时,会产生新的问题,所以如果在提高入射能量受限时,适当增大当量比也是提高点火成功率另一种合理途径。

在增大点火入射能量和提高当量比都受限时,和击穿类似,增加混合气的流速也是提高点火成功率的可行方法。图 10 是当量比为 0.58 和 0.60 条件下,流速分别为 1 m/s 和 2 m/s 时,点火成功率随入射能量的变化关系,表 5 为图 10 中的数据拟合后的参数及结果。在相同当量比下流速越高, E_{50} 越低,这是因为虽然混合气的当量比控制一定,但提高流速后各组分的绝对流量变大,也即气体的分子密度增大,光子与混合气分子的碰撞几率也更大,更易引起能量交换和电子雪崩,故混合气更易点火成功。

从图 10 和表 5 中也可看到,虽然提高当量比和增加流速都会促进点火,但与击穿一样,两者对于点火成功率的影响却并不相同,提高当量比

表 5 不同流速的点火成功率拟合参数及结果

Table 5 Fitting parameters and probability of ignition for different velocities of flow

当量比 ϕ	流速/(m/s)	C_1	C_2	E_{10}/mJ	E_{50}/mJ	E_{90}/mJ
0.58	1	4.440 4	0.705 8	34.3	84.8	209.6
0.60	1	3.945 2	0.596 7	24.1	51.7	111.0
0.58	2	4.201 9	0.503 0	35.1	66.8	127.3
0.60	2	3.724 7	0.586 1	19.6	41.5	87.9

相较于增加流速对点火的促进作用更大,这一点在入射能量较低时更加明显。以当量比为 0.58 的混合气为例,在入射能量为 40 mJ 时,流速从 1 m/s 增加到 2 m/s,点火成功率只增加了 5.1%;而当量比从 0.58 增加到 0.60 时,点火成功率增加了 29%,尽管在较高入射能量下,两者的差距会减小,但提高当量比带来的影响还是大于增加流速,所以从提高点火成功率,降低 E_{50} 的角度看,提高当量比带来的收益更大。由于点火成功率与当量比和流速都呈正相关,而考虑到实际应用中的限制,可以两种方法一起使用,通过调整合适的增加幅度来达到提高点火成功率的目的。

4 激光诱导击穿发射光谱

如前所述,混合气在击穿阶段会形成大量等离子体,在这一阶段原子会吸收能量,由基态变为激发态,核外电子产生能级跃迁,由于原子处于激发态不稳定,随着等离子体的衰减或冷却,高能级的电子就向低能级或基态跃迁,多余的能量以电磁辐射的形式发射出去,从而产生发射光谱。不同的原子其特征发射谱线的不同,而原子浓度不同,发射强度也不相同,通过该特性可进行元素的定量测量,通常这种方法被称为激光诱导击穿光谱法(laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS)^[19]。本节在流动点火平台上,进行了 H656、N742/744/746、O777 等原子发射光谱的测定,并拟合出测量丙烷/空气预混合气当量比的标定线^[20]。

图 11(a)为在 50 mJ 入射能量,1 m/s 流速下,当量比为 0.4~0.7 的混合气击穿发射光谱;图 11(b)是当量比分别为 0.55 和 0.70 时,不同流速下的发射光谱,谱线颜色从冷色(蓝)到暖色(红)代表信号强度的增强。从图 11 中可知,随着当量比提高,H656 的谱线峰值强度逐渐升高,N 的谱线峰值强度几乎无变化,O777 的谱线峰值强度略微下降。

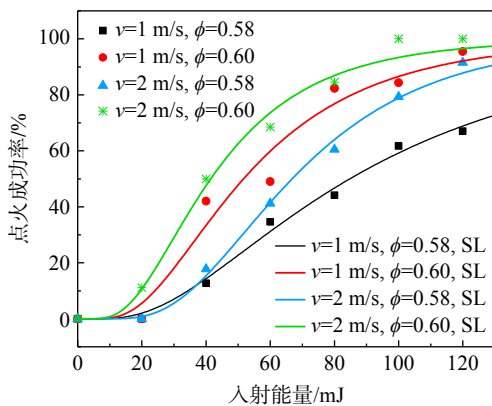


图 10 不同流速下的点火成功率

Fig. 10 Probability of breakdown for different velocities of flow

这是因为 H 元素主要来自于燃料, 而 N、O 元素则主要来自于空气(N_2+O_2), 流量一定时, 当量比升高导致燃料(H)所占比例增大, 空气占比减小, 又因为实验所用为稀混合气, 空气所占比例较大, 所以当量比变化时, H 峰值强度变化较明显, 但 N、O 峰值强度变化不大。而从图 11(b) 可以看到, 当流速增加而当量比不变时, H、N、O 的峰值强度均会上升, 这是因为流速增加, 各组分的相对比例不变, 但绝对流量增加, 分子数密度变大, 所以相应的谱线峰值强度也会增加。

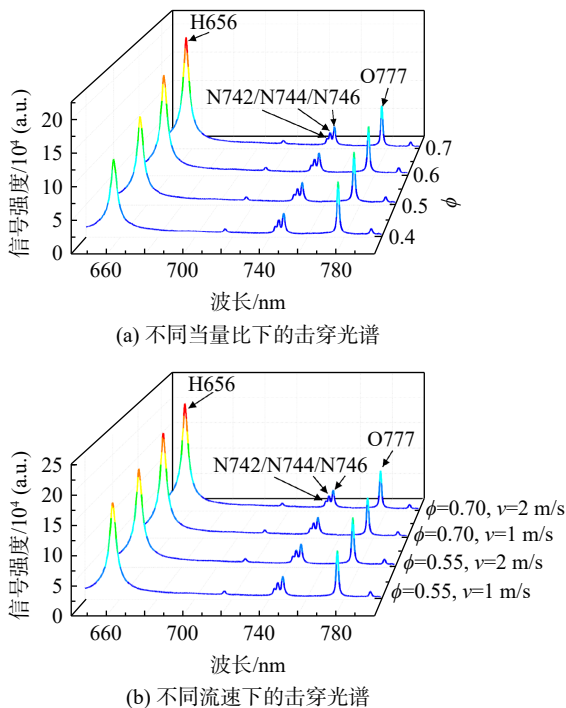


图 11 不同当量比和流速下的击穿发射光谱

Fig. 11 Breakdown emission spectra for different equivalent ratios and velocities of flow

尽管流速增加会导致各谱线峰值强度增加, 但因为当量比不变, 所以 H/N(氢/氮)的值也几乎不会发生变化, 图 12 是不同流速下的 H/N 峰值强度比随当量比变化的结果, 其规律近似为直线, 所以在 LIBS 测量里, 通常用直线拟合成标定线, 用标定线可以测量未知混合气的当量比^[21]。

表 6 是图中拟合线的参数结果。可以看到流速对拟合曲线几乎没有影响, H656 与 N 的 3 条谱线拟合度都较高, 趋势线拟合程度表征值 R^2 (拟合评价) 都达到了 0.99 以上。由于实验所用混合气是充分预混的平流, 可以近似认为燃烧室内的气体是分布均匀的, 且未燃烧前燃烧室处于室温(谱线强度比与当量比和温度有关), 所以可以用

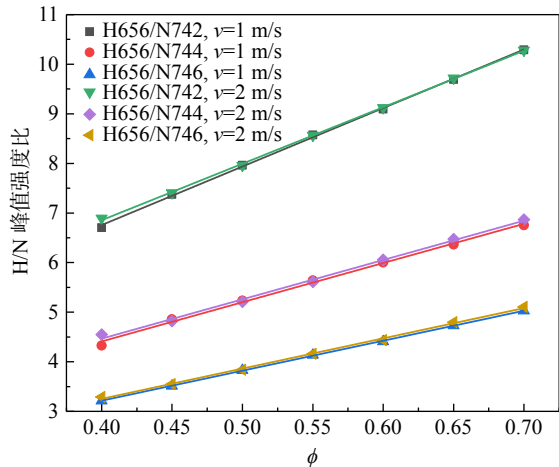


图 12 不同流速下的 H/N 峰值强度比

Fig. 12 H/N peak intensity ratio at different velocities of flow

表 6 不同流速下的 H/N 谱线强度比拟合参数

Table 6 Fitting parameters of H/N spectral line intensity ratio at different velocities of flow

H/N 类型	流速/(m/s)	截距	斜率	R^2
H656/N742	1	2.036 76	11.799 81	0.999 13
H656/N744	1	1.247 86	7.905 78	0.996 26
H656/N746	1	0.797 49	6.045 09	0.999 73
H656/N742	2	2.297 44	11.392 19	0.999 52
H656/N744	2	1.293 92	7.930 07	0.996 28
H656/N746	2	0.813 17	6.098 56	0.997 92

该标定线来测量实验条件下, 任意未知浓度的丙烷/空气混合气当量比。

5 结 论

本文基于流动点火平台, 对不同工况下的丙烷/空气稀燃预混合气进行了激光点火实验, 研究了火焰发展状况、CH*分布、击穿及点火成功率和激光击穿发射光谱在不同工况下的变化结果, 就相关现象做出了解释并其提出建议, 其结果对于实际燃机及航空发动机在流动状态下的点火及燃烧的研究有一定的参考价值, 主要结论如下:

1) 随当量比和流速增加, 火焰发展速度加快, 火焰面积增大, 同时火焰边界也更加清晰, 但 2 m/s 流速下的火焰边界混叠严重。

2) CH*主要分布在化学反应剧烈的区域, 初期集中在两瓣火焰的交界处, 后续主要分布在火焰边界, 而出现混叠的火焰边界也会有较高的 CH*发光强度。

3) 火焰中的 CH*发光强度随当量比提高而增加, 从发光强度的分布和变化可以判断火焰发

展的不同阶段。

4) 击穿和点火成功率都随当量比和流速的提高而增加, 但提高当量比对于提高成功率的效果比增加流速更强, 在入射能量较低时更加明显。

5) 不同工况下 E_{b50} 变化没有 E_{50} 大, 但成功率改变却很明显, 对于击穿来说, 相较于击穿能量的降低, 击穿成功率的提高更具有实际意义。

6) 激光击穿发射光谱中的 H/N 峰值强度比, 可以反映混合气中的当量比变化趋势, 增加流速可以提高各组分的峰值强度, 但强度比值不会变化。通过 H/N 强度比可以拟合出标定线, 用于测定实验条件下未知浓度混合气的当量比 (LIBS)。

参考文献:

- [1] JOHN H. Internal combustion engine fundamentals[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.
- [2] RICHARDSON S, MCMILLIAN M, WOODRUFF S, et al. Misfire, knock and NOx mapping of a laser spark ignited single cylinder lean burn natural gas engine[J]. SAE Technical Papers, 2004, 113(4): 1853-1863.
- [3] 段景辉. 汽车发动机油耗问题与节能技术研究[J]. 内燃机与配件, 2019(19): 30-31.
DUAN Jinghui. Research on fuel consumption and energy saving technology of automobile engine[J]. Internal Combustion Engine and Accessories, 2019(19): 30-31. (in Chinese)
- [4] RONNEY P D. Laser versus conventional ignition of flames[J]. Optical Engineering, 1994, 33(2): 510-521.
- [5] PHUOC T X. Laser-induced spark ignition fundamental and applications[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2006, 44(5): 351-397.
- [6] LIOU L C, CULLEY D E. Laser ignition application in a space experiment[J]. The International Society for Optical Engineering, 1993, 1862: 71-82.
- [7] MANFLETTI C. Laser ignition of an experimental cryogenic reaction and control thruster: ignition energies[J]. Journal of Propulsion and Power, 2014, 30(4): 952-961.
- [8] NAKAYA S, ISEKI S, GU X, et al. Flame kernel formation behaviors in close dual-point laser breakdown spark ignition for lean methane/air mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(3): 3441-3449.
- [9] AN Bin, WANG Zhenguo, YANG Leichao, et al. The ignition characteristics of the close dual-point laser ignition in a cavity-based scramjet combustor[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 101: 136-140.
- [10] 朱鸣航, 芳心意. 丙烷制丙烯制备技术及安全性分析[J]. 化工安全与环境, 2012, 4(13): 8-10.
- ZHU Minghang, FANG Xinyi. Preparation and safety analysis of propylene from propane[J]. Chemical Safety and Environment, 2012, 4(13): 8-10. (in Chinese)
- [11] 金海峰, 宋子刚, 董辉, 等. 使用丙烷模拟航空煤油燃烧特性[J]. 航海工程, 2017, 46(3): 50-56.
JIN Haifeng, SONG Zigang, DONG Hui, et al. On combustion characteristics of aviation kerosene simulated by propane[J]. Ship-building and Sea Engineering, 2017, 46(3): 50-56. (in Chinese)
- [12] ESAKOV I, GRACHEV L, KHODATAEV K, et al. Experiments on propane ignition in high-speed airflow using a deeply under critical microwave discharge[R]. Reno, US: the 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004.
- [13] LYDIA W, LEFKOWITZ J K, TIMOTHY O, et al. Ignition enhancement by dual-pulse laser-induced spark ignition in a lean pre-mixed methane-air flow[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2018, 37(4): 5605-5612.
- [14] BEDUNEAU J L, KIM B, ZIMMER L, et al. Measurements of minimum ignition energy in premixed laminar methane/air flow by using laser induced spark[J]. Combustion and Flame, 2003, 132(4): 653-665.
- [15] BÖRNER M, MANFLETTI C, KROUPA G, et al. Repetitive laser ignition by optical breakdown of a LOX/H₂ rocket combustion chamber with multi-injector head configuration[J]. CEAS Space Journal, 2017, 9(3): 289-297.
- [16] AN Bin, WANG Zhenguo, YANG Leichao, et al. Experimental investigation on the impacts of ignition energy and position on ignition processes in supersonic flows by laser induced plasma[J]. Acta Astronautica, 2017, 137(8): 444-449.
- [17] BANE S, SHEPHERD J E, KWON E, et al. Statistical analysis of electrostatic spark ignition of lean H₂/O₂/Ar mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(3): 2344-2350.
- [18] RUDZ S, TADINI P, BERTHET F, et al. Effect of low initial pressures on ignition properties of lean and rich *n*-decane/air mixtures for laser-induced breakdown[J]. Combustion Science and Technology, 2018, 191(2): 223-242.
- [19] JUN H M, KIM J H, LEE S H, et al. Towards simplified monitoring of instantaneous fuel concentration in both liquid and gas fueled flames using a combustor injectable LIBS plug[J]. Energy, 2018, 160: 225-232.
- [20] 田照华, 董美蓉, 陆继东, 等. LIBS应用于甲烷层流扩散火焰空间分布研究[J]. 激光技术, 2018, 42(1): 64-69.
TIAN Zhao-hua, DONG Meirong, LU Jidong, et al. Application of LIBS to the study of spatial distribution of methane laminar diffusion flame[J]. Laser Technology, 2018, 42(1): 64-69. (in Chinese)
- [21] 左鹏. 激光诱导击穿光谱技术对甲烷空气混合当量比和火焰温度的测量研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
ZUO Peng. Research on the measurements of equivalence ratio and flame temperature of methane/air mixture by laser-induced breakdown spectroscopy[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)

(编辑: 王碧琨)