

# 激光诱导等离子体点火方法研究进展

陈梦, 窦志国, 席文雄

航天工程大学激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416

**摘要** 激光诱导等离子体点火(LIPI)具有点火位置可调、点火延迟时间短、无侵入式结构等优点,有取代电火花点火的潜力。从火焰核形成与发展的角度介绍了 LIPI 的基本物理过程,分析了点火过程中的能量沉积和转化。在现有研究的基础上,对包括激光烧蚀等离子体点火、多点激光等离子体点火、预电离辅助激光等离子体点火和重复频率脉冲激光等离子体点火的性能进行了评价,并分析了每种方法的优缺点。指出了当前激光等离子体点火系统存在的问题,包括点火机理不完善、对非预混燃烧系统的点火特性研究不足、最小点火能量高等,并提出了下一步的研究方向和建议。

**关键词** 激光光学; 激光诱导等离子体点火; 激光烧蚀; 预电离; 重复频率脉冲激光

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.030010

## Advances in Methods of Laser-Induced Plasma Ignition

Chen Meng, Dou Zhiguo, Xi Wenxiong

State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Space Engineering University, Beijing 101416, China

**Abstract** Laser-induced plasma ignition (LIPI) has the potential to replace the spark plug ignition with the advantages of adjustable ignition position, short ignition delay time, non-invasive structure, and so on. We introduce the basic physical process of LIPI from the perspective of the generation and development of the flame kernel, and analyze the deposition and transformation of energy in ignition process. Based on the existing research, we evaluate the ignition performances of laser ablation plasma ignition, multi-point laser plasma ignition, pre-ionization laser plasma ignition and repetitive frequency pulse laser plasma ignition, and summarize the advantages and disadvantages of each method. The problems of the existing laser plasma ignition system are pointed out, which are imperfect ignition mechanism of the laser plasma ignition, the lack of research on the ignition characteristics of the non-premixed combustion system, and the high energy of the minimum ignition energy. Finally, we propose some suggestions on the future work.

**Key words** laser optics; laser-induced plasma ignition; laser ablation; pre-ionization; repetitive frequency pulse laser

**OCIS codes** 140.3440; 140.3450; 140.3460

## 1 引言

在发动机领域,启动燃烧最主要的方式是电火花点火,随着发动机技术的飞速发展,传统点火技术已经无法满足人们对高效、清洁燃烧的追求。在内燃机领域,发动机未来将运行在更大的压缩比、更高的压缩速率和更低的空燃比条件下,废气排放也面

临更高的标准。在航空航天领域,发动机燃烧室入口来流速度快、湍流度高,燃料在燃烧室内的驻留时间远小于点火延迟时间,导致点火难度增大。

将激光应用于极端条件点火是发动机领域最具有挑战但又最富有成效的尝试之一。激光诱导等离子体点火(LIPI)是通过透镜将激光聚焦到混合燃气中,经过多光子电离、逆韧致辐射和雪崩电离等过程诱导

收稿日期: 2017-10-20; 收到修改稿日期: 2017-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(51606220)

作者简介: 陈梦(1993—),男,硕士研究生,主要从事等离子体辅助燃烧方面的研究。E-mail: m18811591062@163.com

导师简介: 窦志国(1963—),男,硕士,教授,硕士生导师,主要从事先进推进技术方面的研究。

E-mail: dou-zhiguo@tom.com(通信联系人)

产生等离子体,随后高温等离子体引发聚焦区域内燃气发生燃烧化学反应,形成具有高反应活性的初始火焰核,经过初始火焰核的传播实现混合燃气的点火。

相比于电火花点火,LIPI 具有很多优点:1) 激光能量密度高、沉积速率快,能够在更大的当量比范围内实现稳定点火,具有更低的可燃下限和更少的  $\text{NO}_x$  排放;2) LIPI 不使用电极,避免了金属电极与燃烧室壁面的热传导过程,降低了火焰核发展过程中的能量损失;3) LIPI 可控性好,通过改变激光参数,能够控制能量沉积速率和点火延迟时间,还可实现多点同步点火或在流场平缓位置处点火;4) 在点火系统输入能量相同的情况下,LIPI 过程产生的火花体积要大于电火花点火产生的火花体积<sup>[1]</sup>,能够提高点火成功率;5) LIPI 系统中不存在侵入式结构,不会对燃烧室内流场造成影响。在发动机领域,LIPI 有取代电火花点火的潜力,得到了国内外学者

的广泛关注。

本文介绍了 LIPI 的基本物理过程,对包括激光烧蚀等离子体点火、多点激光等离子体点火、预电离辅助激光等离子体点火和重复频率脉冲激光等离子体点火在内的多种点火方法进行了总结与评述,分析了 LIPI 技术在工程应用研究方面存在的问题,为今后的研究提出了建议。

## 2 LIPI 的物理过程

LIPI 是一个复杂的物理过程,主要包括等离子体的形成、冲击波的传播、火焰核的发展和混合燃气的燃烧等过程。图 1 为 LIPI 各个物理过程的时间尺度。等离子体在激光作用后的纳秒量级时间内形成,冲击波传播和初始火焰核发展过程对应的时间尺度分别为微秒量级和毫秒量级<sup>[2]</sup>。对于 LIPI 过程来说,点火延迟时间一般为几百毫秒。

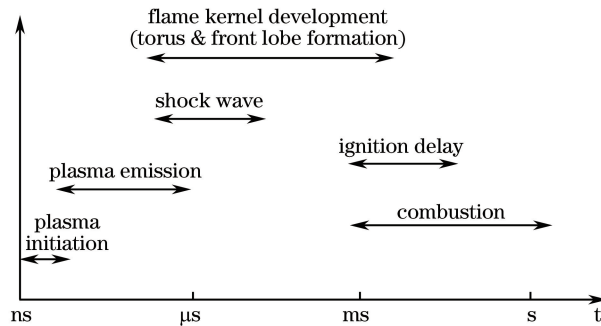


图 1 LIPI 的物理过程及对应的时间尺度

Fig. 1 Physical process of LIPI and corresponding time scale

在激光诱导产生等离子体的过程中,初始电子的产生和激光能量的沉积与激光脉冲宽度有关。对于纳秒激光作用下的 LIPI,其物理机制主要包括多光子电离和雪崩电离<sup>[3]</sup>。其中,多光子电离是指气体原子或分子同时吸收多个光子后发生电离,产生初始电子。雪崩电离是指电子经过逆韧致辐射过程吸收激光能量,增大动能,然后与原子或分子碰撞,通过电子级联过程,电子数量在纳秒量级时间内呈指数倍增加。对于皮秒和飞秒激光而言,初始电子的主要来源不再是多光子电离,而是隧穿电离和越垒电离;同时,由于激光脉宽很短,在激光脉冲作用时间内等离子体吸收的激光能量有限,导致能量沉积率较低。因此,国内外多采用纳秒脉冲激光开展 LIPI 研究。

在 LIPI 过程中,利用透镜将激光聚焦到混合燃气中,当聚焦体积内的激光功率密度高于气体击穿阈值(约为  $10^{10} \text{ W/cm}^2$ )时,即可诱导产生等离子体<sup>[3]</sup>。随后,高温等离子体迅速膨胀形成初始火焰

核,并产生向外快速传播的球形冲击波。同时,初始火焰核内部存在大量的燃烧活性基团,促进了燃烧化学反应的进行。当火焰核内部燃烧化学反应释放的热量高于该区域的热损失能量时,初始火焰核向外传播并最终发展为自持的火焰,混合燃气实现成功点火。图 2 为典型的 LIPI 火焰核的传播与发展图像,激光从右侧垂直射入并击穿气体,产生初始火焰核和向外传播的冲击波。随后,火焰核向外膨胀,体积增大,在激光束两侧形成 2 个对称旋涡环结构。在激光入射方向,由于等离子体前缘对激光的吸收率较高,火焰核朝着激光入射方向一侧传播,呈现不对称发展,形成第三瓣结构<sup>[4]</sup>。

LIPI 对激光器的要求较高,点火过程中激光能量的沉积和转化效率低。LIPI 最小点火能量(MIE)高,根据所用激光参数的不同,LIPI 所需的激光脉冲能量可能达到几十毫焦,甚至超过百毫焦量级,大大制约了 LIPI 的实际应用。LIPI 对激光

器的功率密度要求较高,对于常见的气体燃料,激光功率密度必须超过  $10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> 才能实现混合燃气的稳定点火<sup>[5]</sup>。在 LIPI 过程中,激光透射和散射造成的能量损失较大,高温等离子体的辐射、热传导和

冲击波的传播过程也消耗了大量能量,导致混合燃气吸收激光能量的实际利用率低于 8%<sup>[6]</sup>。因此,降低 MIE 并提高激光能量利用率是当前 LIPI 研究领域需要解决的重要课题。

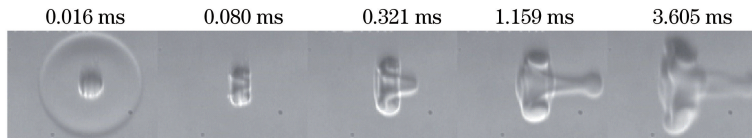


图 2 甲烷/空气混合物火焰核发展纹影图<sup>[4]</sup>

Fig. 2 Schlieren image of flame kernels for methane/air mixture<sup>[4]</sup>

### 3 LIPI 方法

根据燃料的物质形态,可将 LIPI 分为激光直接击穿气体点火和激光烧蚀固体诱导等离子点火(LAI)。采用激光直接击穿气体点火的方法开展 LIPI 研究时,通过改变激光脉冲频率和激光聚焦点数量,可以实现多点激光等离子体点火、单点单脉冲激光等离子体点火、重复频率脉冲激光等离子体点火和预电离辅助激光等离子体点火。研究发现,与最常用的单点单脉冲激光等离子体点火方法相比,包括 LAI 在内的其他几种点火方法能够有效提高 LIPI 性能。

#### 3.1 激光烧蚀等离子体点火

LAI 是指利用激光辐照固体靶材(主要是金属材料)直接击穿靶面气化产生的蒸气和靶面附近的气体产生的等离子体辅助点火<sup>[7]</sup>。Cabalin 等<sup>[8]</sup>利用波长为 266,532,1064 nm 的脉冲激光研究了典型金属(铜,镍,铁)的 LAI,实验结果表明,对于烧蚀过程而言,激光波长较短时金属靶材的激光吸收率更

高,烧蚀能量更低;对于逆韧致辐射过程而言,电子对红外波段激光的吸收率高,降低了烧蚀阈值,更容易诱发气体击穿。当纳秒脉冲激光波长为 1064 nm 时,激光烧蚀阈值为  $1.4\sim 2.3$  J/cm<sup>2</sup>,比气体光学击穿阈值小 1~2 个数量级。Li 等<sup>[9]</sup>利用波长为 1064 nm 的脉冲激光烧蚀金属钽,研究了甲烷/空气混合燃气的激光烧蚀点火,发现 LAI 所需激光脉冲能量为 2~4 mJ,点火延迟时间约为 50  $\mu$ s,均比激光直接击穿气体点火方法低 1 个数量级。

在极端条件下,LAI 也表现出良好的点火性能。Börner 等<sup>[10-11]</sup>通过模拟真空环境,研究了低温、低压条件下液氧(LOX)/气态甲烷和 LOX/气态氢气(GH<sub>2</sub>)推进剂的 LIPI 和 LAI,发现 LOX/GH<sub>2</sub> 推进剂 LAI 的 MIE 为 14.5 mJ,仅为 LIPI 的 1/5。通过观察激光烧蚀点火过程的纹影图,发现烧蚀过程产生的等离子体体积更大,存在时间更长。如图 3 所示,在入射激光能量相同时,烧蚀产生的等离子体体积明显大于直接击穿产生的等离子体体积。

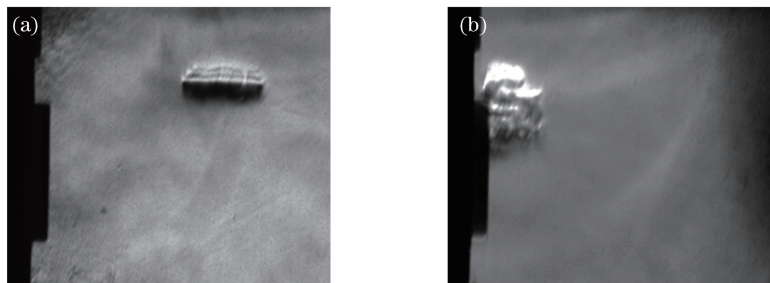


图 3 激光能量沉积 104  $\mu$ s 后等离子体形状的比较。(a)直接击穿;(b)激光烧蚀<sup>[11]</sup>

Fig. 3 Comparison of plasma shapes after laser energy deposition for 104  $\mu$ s. (a) Direct breakdown; (b) laser ablation<sup>[11]</sup>

LAI 能够降低 MIE 的主要原因有以下几点:

1) 金属材料对激光是不透明的,不存在激光透射损失,激光能量利用率高;2) 金属中存在大量自由电子,能够为电子级联过程提供充足的初始电子,加快了产生等离子体的速率;3) 激光作用于靶材表面产生的金属蒸气温度高,蒸气中的很多原子

处于激发态,电离势低,容易发生电离并产生等离子体。

此外,LAI 能够产生更加稳定的火焰。Li 等<sup>[12]</sup>利用波长为 1064 nm、重复频率为 50 Hz 的连续脉冲激光烧蚀金属钽,研究了预混甲烷/空气混合燃气射流火焰的稳定性,发现 LAI 能够在高速气流条件



下产生稳定火焰, LAI 所需激光脉冲能量仅为直接击穿点火的 36%。Bak 等<sup>[13]</sup> 利用连续脉冲激光烧蚀靶材点燃预混甲烷/空气混合物, 发现在激光能量相近时, LAI 火焰更加稳定, 这与 Li 等<sup>[12]</sup> 的结论一

致。如图 4 所示, 图 4(a) 为激光烧蚀点火, 图 4(b) 为激光直接击穿气体点火。通过比较相同时刻自由基 CH 的强度和分布, 发现 LAI 燃烧持续时间更长, 火焰的传播和发展更加平稳。

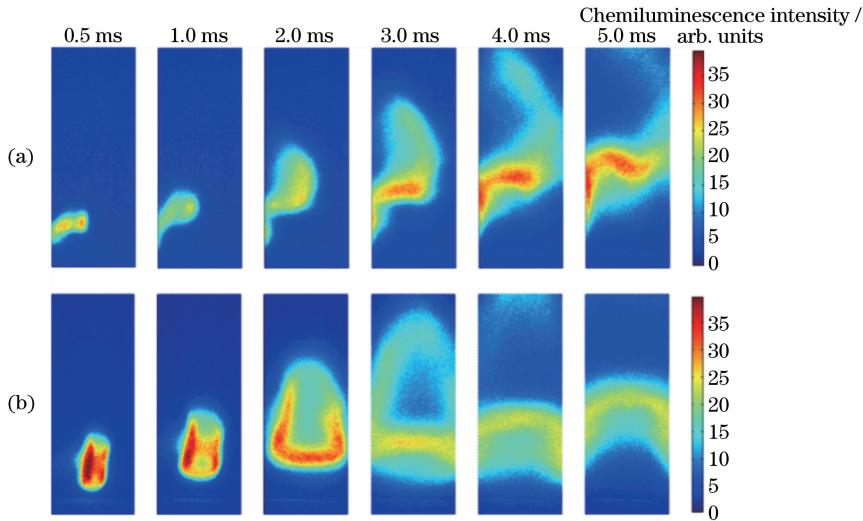


图 4 预混甲烷/空气中 CH 基团随时间的演变图像。(a)激光烧蚀;(b)直接击穿<sup>[13]</sup>

Fig. 4 Temporal evolution images of CH radicals of premixed methane/air mixture. (a) Laser ablation; (b) direct breakdown<sup>[13]</sup>

综上所述, 与激光直接击穿气体点火相比, LAI 不存在激光透射损失, 激光能量利用率高, 可以在激光器功率较低的情况下实现混合燃气的稳定点火。然而, 金属靶材是一个侵入式结构, 会对燃烧室内流场造成扰动, 在气流速度较高时容易产生激波, 降低流场的稳定性。此外, 等离子体对激光有屏蔽作用<sup>[14-15]</sup>, 导致部分或全部激光脉冲不能到达靶面。同时, 在烧蚀过程中, 靶材表面产生的沟槽和凹坑也会降低靶材的激光吸收率<sup>[16]</sup>, 阻碍甚至抑制等离子体的形成, 造成燃烧过程不稳定, 甚至发生熄火。因此, LAI 适用于激光器功率有限、流场速率不高且燃烧持续时间较短的点火过程。

### 3.2 多点激光等离子体点火

将激光在燃烧室内的多个位置同时聚焦, 可以实现激光多点同步点火。多点激光等离子体点火(以下简称多点点火)能够在短时间内向燃烧室输入更多点火能量, 同时缩短火焰的传播距离, 提高了燃烧速率和点火成功率, 这对于大型发动机在贫油条件下的点火具有重要意义。

利用圆锥腔对激光的反射作用, Morsy 等<sup>[17-21]</sup> 实现了多点点火。实验中, 将激光沿着圆锥腔的轴线方向射入, 经过内壁面的多次反射, 激光被聚焦在圆锥腔的中轴线上, 在燃烧室内形成一个线聚焦区域。当激光能量足够高时, 线聚焦区域内的气体被击穿, 产生一连串的等离子体火焰核。图 5(a) 中存

在 1 个圆锥腔, 使用聚焦激光束可实现两点点火; 图 5(b) 中存在 2 个圆锥腔, 使用平行激光束可实现两点点火, 使用聚焦激光束可实现三点点火。其中,  $l_1$  和  $l_2$  分别为圆锥孔和圆锥腔的深度,  $l_3$  和  $d_3$  分别为圆柱形预混室的高度和直径,  $d_{11} \sim d_{14}$  为不同位置处的激光光束直径。通过分析火焰发展阴影图(图 6), 发现圆锥腔多点点火能够增大等离子体体积并提高燃烧速率。

多点点火对燃烧性能的提高与聚焦点的数量和分布有关。然而, 圆锥腔多点点火实现的是线聚焦区域点火, 无法确定火焰核的具体位置和分布, 只能对其进行定性分析, 无法进行参数化研究。同时, 圆锥腔的存在会对流场造成扰动, 需要对发动机燃烧系统进行改造。因此, 实际应用中大都采用多束激光多点同步聚焦的方法实现多点点火。

Weinrotter 等<sup>[22]</sup> 利用分束器和衍射透镜分别实现了两点点火和三点点火, 焦点距离分别为 186 mm(两点点火)和 5 mm(三点点火)。结果表明, 相对于单点点火, 两点点火(单点激光能量为 8 mJ)时燃烧室内峰值压力提高了 7%, 到达峰值压力的时间缩短了 50%, 与 Phuoc<sup>[23]</sup> 的实验结果一致。在三点点火实验中, 燃烧室内峰值压力降低, 到达峰值压力的时间延长, 即使将激光能量提高 50%, 依旧不能改善其点火性能。根据 Nakaya 等<sup>[4]</sup> 的实验结果, 对于能量相同的两束激光, 激光聚



焦点距离越近,火焰核发展速度越快,如图 7 所示。其中甲烷/空气混合物的燃空当量比  $\phi = 0.6$ , 压强

为 1 MPa, 令  $E_{ab}$  为混合燃气吸收激光的能量,  $E_{in}$  为入射激光的能量,  $d$  为激光聚焦点之间的距离。

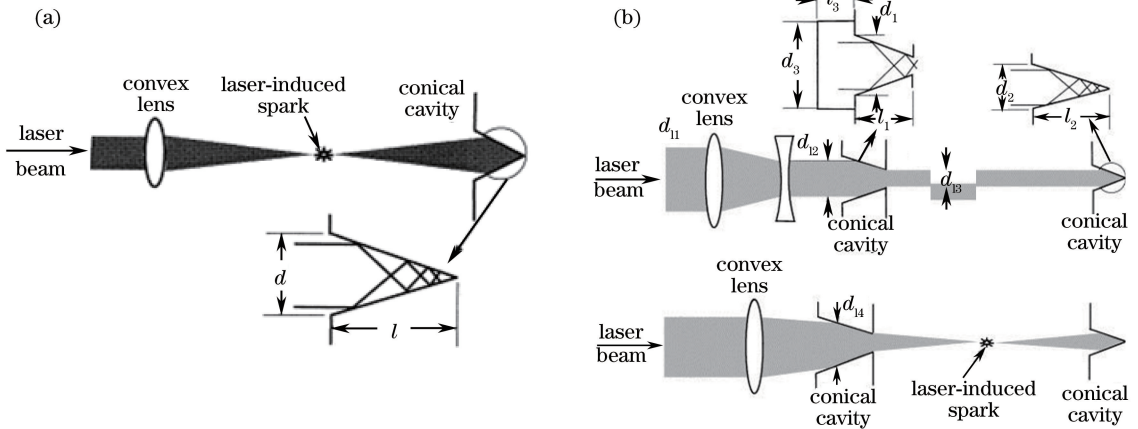


图 5 多点点火原理图。(a)两点点火;(b)三点点火<sup>[20]</sup>

Fig. 5 Principle diagrams of multi-point ignition. (a) Dual-point ignition; (b) three-point ignition<sup>[20]</sup>

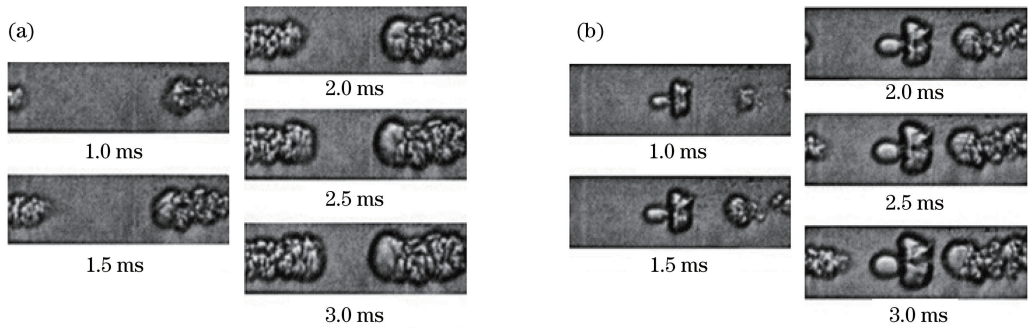


图 6  $H_2$ /空气多点点火阴影图。(a)两点点火;(b)三点点火<sup>[19]</sup>

Fig. 6 Shadow graphs of multi-point ignition of  $H_2$ /air.

(a) Dual-point ignition; (b) three-point ignition<sup>[19]</sup>

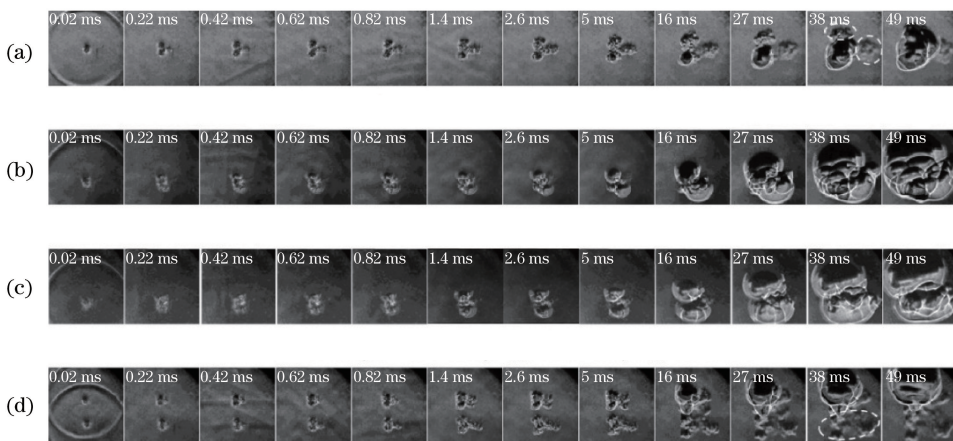


图 7 单点与双点激光等离子体点火火焰核传播和发展图像<sup>[4]</sup>。(a)单点,  $E_{ab} = 23.3$  mJ,  $E_{in} = 28.1$  mJ; (b)双点,  $d = 0$  mm,  $E_{ab} = 22.3$  mJ,  $E_{in} = 28.3$  mJ; (c)双点,  $d = 0.2$  mm,  $E_{ab} = 22.7$  mJ,  $E_{in} = 29.6$  mJ; (d)双点,  $d = 6.5$  mm,  $E_{ab} = 28.9$  mJ,  $E_{in} = 35.1$  mJ

Fig. 7 Transmission and development images of flame kernels in single- and dual-point laser plasma ignitions<sup>[4]</sup>. (a) Single-point,  $E_{ab} = 23.3$  mJ,  $E_{in} = 28.1$  mJ; (b) dual-point,  $d = 0$  mm,  $E_{ab} = 22.3$  mJ,  $E_{in} = 28.3$  mJ; (c) dual-point,  $d = 0.2$  mm,  $E_{ab} = 22.7$  mJ,  $E_{in} = 29.6$  mJ; (d) dual-point,  $d = 6.5$  mm,  $E_{ab} = 28.9$  mJ,  $E_{in} = 35.1$  mJ

对于上述现象,可以从热力学的角度进行解释。在 Weinrotter 等<sup>[22]</sup>的两点点火实验中,相邻火焰核的距离足够远,2个火焰核在空间上独立发展,互不影响。多点点火缩短了火焰传播距离,使燃烧速率得到提升。对于图 7(d)所示情况,相邻火焰核的距离较近,但短时间内不会发生空间重叠,2个等离子体冲击波的相互碰撞增大了热损失,可能会导致局部熄火,Weinrotter 等<sup>[22]</sup>进行的三点点火实验也属于此类情况。当火焰核之间距离很近且在短时间内发生空间重叠时,由于重叠后高温等离子体区域与环境接触面积的减小,对流和辐射热损失减小,LIPI 性能得到提高,如图 7(b)、(c)所示。因此,如何快速确定火焰核的数量与相邻火焰核之间的距离使得激光多点点火性能达到最优,成为实际应用中需要解决的首要问题。

综上所述,燃烧室内部的多点同步点火能够缩短火焰传播距离,提高火焰发展速率,缩短点火延迟时间。对于不同条件下的多点点火,通过改变聚焦点的数量和分布能够改善点火性能。同时,多点点火能够使燃料充分燃烧,提高燃料利用率,适用于燃烧室来流速度较快的大型发动机,如超燃冲压发动

机、火箭发动机等。

### 3.3 预电离辅助激光等离子体点火

预电离辅助激光等离子体点火是指在点火前用能量较低的单个脉冲激光(第一脉冲)对气体进行电离,但并不击穿气体,然后用能量较高的单个脉冲激光(第二脉冲)击穿气体以实现点火。

Dumitrache 等<sup>[24]</sup>利用波长为 266 nm 和 1064 nm 的脉冲激光研究了激光在空气中的击穿现象。在击穿空气之前,用波长为 266 nm 的单脉冲紫外激光对空气进行预电离,利用瑞利散射原理对脉冲激光聚焦点区域的温度进行测量,发现预电离过程能够显著提高聚焦区域内气体温度。实验中,经过 11 mJ 的紫外激光作用 1  $\mu$ s 后,聚焦区域内气体的温度升高至 710 K。在此基础上,Dumitrache 等<sup>[25]</sup>在定容燃烧室内研究了预混丙烷/空气混合物的预电离点火性能,发现预电离辅助激光等离子体点火与单脉冲激光直接击穿气体点火相比具有多个优点:1) 预电离点火能够降低燃料的可燃下限,提高燃烧效率;2) 通过分析燃烧过程中 OH 基团的发展过程,发现预电离点火过程未出现第三瓣结构,火焰拉伸小,燃烧过程更加稳定,如图 8 所示。

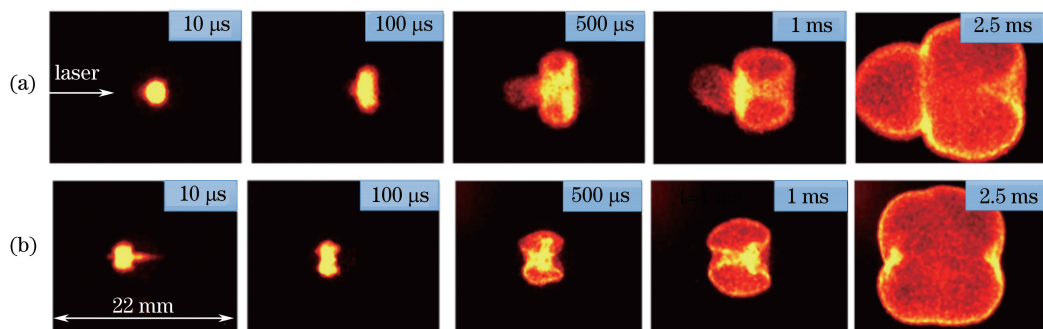


图 8 丙烷/空气中 OH 基团时间演变图像。(a)激光等离子体点火;(b)预电离激光等离子体点火<sup>[25]</sup>

Fig. 8 Temporal evolution images of OH radicals of propane/air mixture. (a) Laser plasma ignition;

(b) pre-ionization laser plasma ignition<sup>[25]</sup>

利用相同的实验方法,Yalin 等<sup>[26]</sup>发现预电离过程能够减小气体击穿阈值能量。实验过程中,定容燃烧室的压力为 0.08 MPa,当 1064 nm 脉冲激光单独作用时,空气击穿阈值为 27 GW/cm<sup>2</sup>。在预电离击穿空气实验中,随着第一脉冲激光强度的提高,空气击穿阈值不断减小,当第一脉冲激光强度为 7 GW/cm<sup>2</sup>时,空气击穿阈值降低了近 50%,约为 16 GW/cm<sup>2</sup>。在展开实验研究的同时,利用数值计算的方法得到了不同点火条件下的气体击穿阈值,并将仿真结果与实验结果进行比较,发现 1064 nm 脉冲激光电离击穿空气实验和组合激光预电离击穿

空气实验的实验结果能够与仿真结果较好地吻合。此外,还对紫外激光脉冲单独作用时激光诱导产生的电子数密度进行仿真,发现在激光脉冲作用的纳秒量级时间内,预电离过程能够大幅度提高聚焦体积内的自由电子数密度。基于此,Yalin 等<sup>[26]</sup>提出预电离能够降低气体击穿阈值的原因是预电离过程增大了聚焦点区域内的电子数密度。结合 LIPI 的物理过程对预电离点火过程进行分析可知,利用低能量激光脉冲对气体进行预电离能够增大聚焦体积内的初始电子密度并提高第二脉冲激光作用过程中的逆韧致辐射吸收效率,从而将多光子电离过程所



需能量从 LIPI 所需总能量中解耦,降低了 LIPI 气体的击穿阈值。

通过对气体进行预电离能够提高聚焦点附近气体的温度和电离度,并增加气体中自由电子的数量,从而降低气体的可燃下限和击穿阈值、提高火焰稳定性。但是,预电离辅助激光等离子体点火需要多台激光器同时工作,并且预电离过程多使用紫外激光,成本较高、实现难度较大。以上实验在常温常压下展开,在未来的研究中,可以通过改变温度和压强,探究预电离点火在低温、低压、贫油等极端点火条件下的点火性能。此外,对气体进行预电离改变了火焰核的发展和传播过程,致使火焰核的形状发

生改变,但其机理尚不清晰,需要对其进行进一步研究。

### 3.4 重复频率脉冲激光等离子体点火

重复频率脉冲激光等离子体点火是利用连续脉冲激光击穿气体以实现点火。Yu 等<sup>[27]</sup>利用不同频率的连续脉冲激光研究甲烷射流火焰的稳定性,发现增大激光脉冲频率会减小相邻火焰核的距离,火焰稳定性得到提高。如图 9 所示,通过观察 CH 基团的时间演变图像,发现当激光频率为 250 Hz 时,火焰发展更加稳定,燃烧也更加充分。图中  $K_{\text{exist}}$  为上一激光脉冲作用后产生的火焰核, $K_{\text{new}}$  为前激光脉冲作用后产生的新的火焰核。

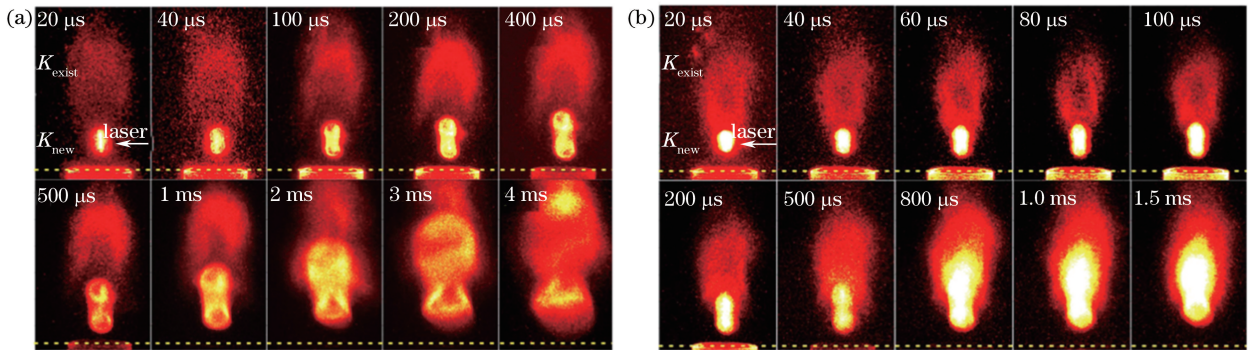


图 9 CH 基团的时间演化图像<sup>[27]</sup>。(a)激光频率为 100 Hz;(b)激光频率为 250 Hz

Fig. 9 Temporal evolution images of CH radicals<sup>[27]</sup>. (a) Laser frequency is 100 Hz; (b) laser frequency is 250 Hz

重复频率脉冲激光等离子体点火性能与激光脉冲能量、重复频率和激光作用时间等因素有关。通常情况下,激光脉冲能量越高、激光作用时间越长,激光等离子体吸收的能量就越多,点火性能也越好,而 LIPI 点火性能与脉冲重复频率之间的关系则相对复杂。研究表明,激光脉冲能量的沉积和转化与等离子体的温度、密度有关<sup>[7-9]</sup>。在激光脉冲结束后的不同时刻,激光等离子体的物理性质与化学性质是不同的。因此,对于相邻的 2 个激光脉冲而言,脉冲间隔不同,激光等离子体对后一个激光脉冲能量的吸收率也不同。为了研究相邻 2 个激光脉冲的时间间隔对点火性能的影响,实际中多采用双脉冲激光展开 LIPI 研究。Bak 等<sup>[28]</sup>利用双脉冲激光对甲烷射流火焰进行研究,发现双脉冲 LIPI 性能与脉冲能量和脉冲间隔有关。实验结果如图 10 所示,存在一个或多个最佳脉冲间隔,此时混合燃气对第二脉冲激光的吸收率最高。Wermer 等<sup>[29]</sup>利用 3 种不同脉冲间隔时间的激光展开双脉冲 LIPI 实验,所得结论与 Bak 等<sup>[28]</sup>所得结论一致,认为选择合适的激光脉冲间隔能够提高激光能量的利用率。

上述研究结果表明,通过改变脉冲间隔可以增

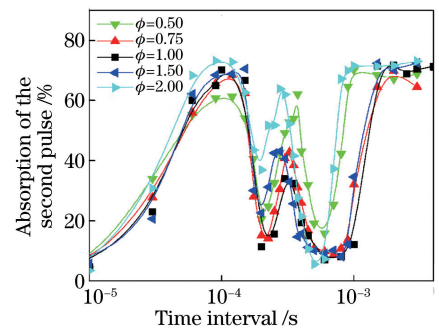


图 10 第二激光脉冲吸收率<sup>[28]</sup>

Fig. 10 Absorption of the second laser pulse<sup>[28]</sup>

大等离子体对激光的吸收率并提高燃料的燃烧效率。当激光脉冲频率较高时,点火过程产生的火焰更加稳定,可用于微型推力器点火以及对微小卫星的姿态控制和轨道控制。然而,对于一个确定的点火条件,如何快速、准确地确定最佳脉冲重复频率使得 LIPI 点火性能最优,是重复频率脉冲激光等离子体点火在实际应用中迫切需要解决的问题。

以上对 4 种 LIPI 方法的研究进展进行了总结和评述,从目前实验研究进展可以看出,对于不同的点火条件,应当合理选择 LIPI 方法,采用激光烧蚀等离子体点火、多点点火、预电离辅助激光等离子体



点火和重复频率脉冲激光等离子体点火等方法能够提高气体和液体燃料的燃烧性能和点火效率。

## 4 结束语

LIPI 是涉及激光等离子体物理学、流体力学、燃烧化学动力学等多个学科领域的复杂物理过程,目前 LIPI 领域的研究主要集中于点火特性研究和工程应用研究,而关于 LIPI 机理的研究却很少。虽然也有部分学者从理论角度对 LIPI 机理展开研究,建立了相关物理过程的数学模型,并采用数值计算的方法对 LIPI 过程进行仿真,但仿真结果与实验结果存在较大差异。因此,有必要对 LIPI 机理做进一步研究,以完善现有点火模型。

LIPI 特性研究主要基于预混燃烧系统展开,对于非预混燃烧系统的研究较少,而实际发动机多为非预混燃烧系统。此外,点火延迟时间对于超燃冲压发动机而言具有十分重要的意义,而当前 LIPI 特性研究主要关注燃烧系统的 MIE,针对点火延迟时间的报道则十分有限。因此,有必要对非预混燃烧系统的 LIPI 特性,尤其是对时间特性进行进一步研究。

对于工程应用而言,现有 LIPI 系统的 MIE 太高,而且受多种复杂因素的影响,大大限制了 LIPI 在实际发动机中的应用。因此,迫切需要探索一种新的 LIPI 方法以降低 MIE。文中介绍的 4 种激光等离子体点火方法均能降低燃烧系统的 MIE 并提高燃烧系统的点火性能。在激光烧蚀等离子体点火过程中,金属靶材的加入会影响燃烧室内流场,降低流场的稳定性。此外,等离子体对激光有屏蔽作用,阻碍烧蚀过程的进一步进行,会造成燃烧过程不稳定,甚至熄火。预电离辅助激光等离子体点火需要 2 种不同波长和脉冲能量的激光束,对激光器的要求较高,且需要多台激光器同时工作,运行成本和实现难度都较高。因此,随着激光器的轻型化和小型化,多点激光等离子体点火和重复频率脉冲激光等离子体点火在发动机领域具有更高的实际利用价值和更为广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Endo T, Takenaka Y, Sako Y, *et al.* An experimental study on the ignition ability of a laser-induced gaseous breakdown[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 178: 1-6.
- [2] Li X H, Yu X. Application of laser plasma ignition in aerospace propulsion systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1136001.
- [3] 李晓晖, 于欣. 激光等离子体点火在航空航天动力系统的應用[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(11): 1136001.
- [4] Phuoc T X. Laser-induced spark ignition fundamental and applications[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(5): 351-397.
- [5] Nakaya S, Iseki S, Gu X J, *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.
- [6] Yang L, Dong J. Progress in laser ignition based on passively Q-switched solid-state lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 030007.
- [7] 杨林, 董俊. 基于被动调 Q 固体激光器的激光点火系统的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(3): 030007.
- [8] Phuoc T X, White F P. An optical and spectroscopic study of laser-induced sparks to determine available ignition energy[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(2): 1621-1628.
- [9] Sun C W, Lu Q S, Fan Z X, *et al.* Laser irradiation effect[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [10] 孙承伟, 陆启生, 范正修, 等. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [11] Cabalin L M, Laserna J J. Experimental determination of laser induced breakdown thresholds of metals under nanosecond Q-switched laser operation[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 1998, 53(5): 723-730.
- [12] Li X H, Yu X, Fan R W, *et al.* Laser ablation ignition of premixed methane and oxygen-enriched air mixtures using a tantalum target[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 139-141.
- [13] Börner M, Manfletti C, Kroupa G, *et al.* Laser ignition of an experimental combustion chamber with a multi-injector configuration at low pressure conditions[J]. *CEAS Space Journal*, 2017, 3(5): 299-311.
- [14] Manfletti C. Laser ignition of an experimental cryogenic reaction and control thruster: Ignition energies[J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2014, 30: 952-961.
- [15] Li X H, Yu Y, Peng J B, *et al.* Laser ablation plasma-assisted stabilization of premixed methane/air

- flame[J]. Applied Physics B, 2016, 122: 14.
- [13] Bak M S, Cappelli M A. Successive laser ablation ignition of premixed methane/air mixtures[J]. Optics Express, 2015, 23(11): A419-A427.
- [14] Cai S, Chen G Y, Zhou C, *et al.* Research of plasma physical model for single pulsed laser ablation of bronze-bond grinding wheel[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0414001.  
蔡颂, 陈根余, 周聪, 等. 单脉冲激光烧蚀青铜砂轮等离子体物理模型研究[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0414001.
- [15] Shen R Q, Ye Y H, Tu J. Effects of plasma and ablation on ignition processes of energetic materials under pulsed laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(11): 1323-1326.  
沈瑞琪, 叶迎华, 涂建. 激光等离子体和烧蚀对含能材料的激光点火过程的影响[J]. 中国激光, 2004, 31(11): 1323-1326.
- [16] Kumakawa A, Kusaka K, Sato M, *et al.* Experimental study on a laser ignited thruster made of Si<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub> [C]. 40<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2004: 183-190.
- [17] Morsy M H, Ko Y S, Chung S H. Laser-induced ignition using a conical cavity in CH<sub>4</sub>-air mixtures [J]. Combustion and Flame, 1999, 119(4): 473-482.
- [18] Morsy M H, Ko Y S, Chung S H, *et al.* Laser-induced two-point ignition of premixture with a single-shot laser[J]. Combustion and Flame, 2001, 124(4): 724-727.
- [19] Morsy M H, Chung S H. Laser-induced multi-point ignition with a single-shot laser using two conical cavities for hydrogen/air mixture [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2003, 27(4): 491-497.
- [20] Morsy M H. Review and recent developments of laser ignition for internal combustion engines applications[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(7): 4849-4875.
- [21] Ryu S K, Won S H, Chung S H. Laser-induced multi-point ignition with single-shot laser using conical cavities and prechamber with jet holes [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 3189-3196.
- [22] Weinrotter M, Kopecek H, Tesch M, *et al.* Laser ignition of ultra-lean methane/hydrogen/air mixtures at high temperature and pressure [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2005, 29(5): 569-577.
- [23] Phuoc T X. Single-point versus multi-point laser ignition: Experimental measurements of combustion times and pressures[J]. Combustion and Flame, 2000, 122(4): 508-510.
- [24] Dumitrache C, Yalin A P. Laser-induced heating using a non-resonant dual-pulse approach with application to laser ignition [C]. 46<sup>th</sup> AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2015: 1-7.
- [25] Dumitrache C, Vanosdol R, Limbach C, *et al.* Laser ignition of propane-air mixtures using a dual-pulse technique [C]. 55<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2017: 1-8.
- [26] Yalin A P, Wilvert N, Dumitrache C, *et al.* Laser plasma formation assisted by ultraviolet pre-ionization [J]. Physics of Plasmas, 2014, 21(10): 103511.
- [27] Yu Y, Li X H, An X K, *et al.* Stabilization of a premixed methane-air flame with a high repetition nanosecond laser-induced plasma[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 92: 24-31.
- [28] Bak M S, Im S K, Cappelli M A. Successive laser-induced breakdowns in atmospheric pressure air and premixed ethane-air mixtures [J]. Combustion and Flame, 2014, 161(7): 1744-1751.
- [29] Wermer L, Hansson J, Im S K. Dual-pulse laser-induced spark ignition and flame propagation of a methane diffusion jet flame [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(3): 4427-4434.