

用于激光诱导等离子体点火技术的激光源研究进展

马欲飞^{1,2}, 何 应¹, 于 欣¹, 陈德应¹, 孙 锐²

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院 光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001

2. 哈尔滨工业大学 动力工程及工程热物理博士后流动站, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 激光诱导等离子体点火是一种新颖的发动机点火方式, 这种技术点火位置精确可控, 点火延迟时间短, 无烧蚀作用, 还可实现同时多点点火, 能够提高发动机的燃烧效率, 具有良好的发展前景。主要针对用于激光诱导等离子体点火技术中的核心元件——激光光源的发展状况及最新成果作了全面的综述, 并对该种类型激光器的发展前景进行了展望。

关键词: 激光诱导等离子体点火; 固体激光器; 被动调 Q 技术

中图分类号: TN248; TN29 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1136003

Research progress of laser source used in laser induced plasma ignition

Ma Yufei^{1,2}, He Ying¹, Yu Xin¹, Chen Deying¹, Sun Rui²

(1. Institute of Opto-electronics, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Post-doctoral Mobile Station of Power Engineering and Engineering Thermophysics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Laser induced plasma ignition (LIPI) is a new technique for engine ignition. It is revealed that LIPI has benefits in many aspects, including reduction of erosion effects, increase of engine efficiency, shorter combustion time, more accurate location of ignition, and multipoint ignition simultaneously. Therefore it has a wide developing prospect. This paper mainly aimed at the key component-laser source, of LIPI and made a comprehensive review for the development of the laser source and the latest achievements. Furthermore, the development prospect of this kind laser was also predicted.

Key words: laser induced plasma ignition; solid-state laser; passively Q-switched

收稿日期: 2016-03-02; 修订日期: 2016-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(61505041, 61275127); 黑龙江省自然科学基金(F2015011);

中国博士后科学基金(2015T80350; 2014M560262); 黑龙江省博士后科学基金(LBH-Z14074);

中央高校基本科研业务费专项资金(HIT.NSRIF.2015044); 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ040164);

黑龙江省博士后科学基金特别资助(LBH-TZ0602)

作者简介: 马欲飞(1984-), 男, 讲师, 主要从事固体激光技术方面的研究。Email: mayufei926@163.com

0 引言

随着发动机技术的加速发展,汽车发动机、特别是高压燃烧环境下的发动机如冲压发动机、航空发动机等对点火要求也愈发严格。为了提高点火的成功率、可靠性以及燃烧效率,传统的电火花塞点火需要提供更高的放电电压^[1],但电火花塞碳化烧蚀的速度大大增加了,同时高压的点火环境又会影响周围其他的电子电路设备,如使一些需要外部触发的电子设备失去控制。因此,研究新型的点火方式,实现高效可靠连续的点火,成为当前发动机点火领域的研究热点。激光诱导等离子体点火(Laser induced plasma ignition, LIPI),即利用调 Q 技术获得高重频、高峰值功率的激光替代传统火花塞对发动机进行点火。这种技术具有诸多优点,如点火位置精确可控,可同时多点点火,点火延迟时间短,无烧蚀作用,能够提高发动机的燃烧效率等^[2-4],是一种新兴的发动机点火方式,具有广阔的应用前景。

1 激光诱导等离子体点火的基本原理

激光诱导等离子体点火是一个涉及等离子体物理、燃烧动力学、流体力学等复杂的物理过程,其主要的过程是当激光能量密度足够高时,激光与气体作用时就会使气体电离,即击穿介质形成等离子体。其产生的等离子体近似为一个温度极高、压强极大、包含大量正负离子的高度活跃物质。诱导的等离子体对外辐射能量同时其温度降低,等离子体产生后 0.1~0.3 μs 内冲击波形成并传播,同时伴随剩余热气的出现,剩余热气与燃料相互作用形成燃烧场,最终实现点火。这三个过程经历的时间尺度为 ns-μs-ms 量级^[5],如图 1 所示。

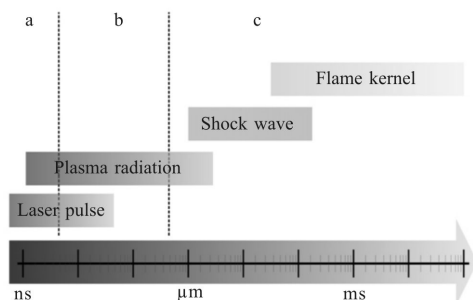


图 1 激光诱导等离子体点火物理过程及其时间尺度

Fig.1 Physical process of LIPI and its time scale

当前 T. A. Spiglanin^[6-9]等人提出两种激光诱导等离子体点火机理:其一是由膨胀波锋面直接促使燃烧发生;其二是由等离子体扩散后留下的高温热气点燃燃烧物质。但到目前为止,没有任何一种理论得到完全的确立。

2 点火激光器的发展现状

在激光诱导等离子体点火技术中,激光器是其中的核心元件,也是限制其工程应用的最关键因素。在点火技术的发展过程中,对激光器的激光能量以及激光器本身的结构尺寸都有很高的要求,这是因为为了产生足够高能量的等离子体,激光器应输出大能量脉冲,同时,为了满足实际工程应用,激光器必须具有小体积的特点。目前点火激光器的研究均以固体激光器为主,这是因为相比其它种类的激光器如气体激光器和液体激光器,固体激光器体积较小,操作起来更为方便。为了提高激光器输出能量和峰值功率,应用于点火技术中的固体激光器均采用调 Q 的方式输出激光。常见的调 Q 方式有电光调 Q、声光调 Q、可饱和吸收体被动调 Q。其中,电光调 Q 运用于点火激光器中具有诸多缺点,如功耗大、调 Q 过程中需要几千伏的半波电压,这极易对其他电子线路造成干扰。声光调 Q 主要是对高增益激光器的关断能力较差,同时激光器的体积也较大。相比以上两种调 Q 方式而言,可饱和吸收体调 Q 即被动调 Q 具有结构简单、体积小、使用方便、没有电干扰、可获得峰值几兆瓦脉宽十几纳秒激光脉冲的优点。基于这些优点,被动调 Q 激光器一直是点火激光器的主流研究方向。针对点火激光器的研究,国内外相继研制了各种不同输出指标以及不同结构尺寸的固体激光器。

3 点火固体激光器的研究进展

2009 年,奥地利 G. Kroupa 等人^[10]利用六相二极管侧面泵浦被动调 Q 的方式,在泵浦光 0.3 J 的能量下得到了能量 25 mJ、脉宽 3 ns、重复频率 150 Hz 的 Nd:YAG 脉冲激光输出,其光-光效率为 8%。他们在激光器输出端加入了长焦透镜,整个点火系统的长度为 1 170 mm,透镜焦点处光斑的功率密度达到了 $3 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$,最终在发动机上进行了测试,能

够成功并且稳定地实现点火,整体结构也很好地抑制了发动机燃烧室的高温以及振动的工作环境。这种结构较为普通的激光器也具有不足之处,主要是输出的激光重复频率较低,难以满足燃烧时间为 ms 量级的发动机点火要求。该激光器的实物图以及应用在发动机上的结构分别如图 2 和 3 所示。



图 2 点火激光器的输出端实物图

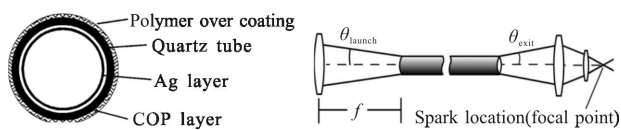
Fig.2 Physical figure of the output end of laser for ignition



图 3 点火激光器应用于发动机的实物图

Fig.3 Physical figure of the laser used in combustion ignition

2005 年,美国科罗拉多州立大学的 A. P. Yalin 等人^[11]将光纤传输激光的方式运用于激光点火,其所用光纤端面和光纤传输结构分别如图 4(a)和 4(b)所示。



(a) 空芯光纤截面

(b) 光纤传输激光的结构图

(a) Transversal surface of the hollow-core fiber

(b) Structure of fiber transfer laser system

图 4 空芯光纤结构及光纤传输结构图

Fig.4 Hollow-core fiber and structure of fiber transfer laser system

他们采用内径为 $700\ \mu\text{m}$ 的空芯光纤进行激光传输,将脉宽 8 ns、重复频率 5 Hz 的 1 064 nm 激光注入该光纤,得到了~70%的激光传输效率,光纤输出端光斑的平均功率密度为 $1.8\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 。在点火实

验测试中,得到了击穿空气的最低激光脉冲能量为 39 mJ,即该实验结果能够实现稳定的空气击穿。这种采用光纤进行激光传输的方式有利于点火激光的空间传输,便于实际工程应用。

2010 年,奥地利维也纳技术大学 J. Tauer 等人^[12]在以空芯光纤传输激光理念的基础之上,提出了将光纤传输的激光进行分束,从而可以同时应用于多个发动机进行点火,并取得了较为良好的结果,其具体激光分束传输的示意图如图 5 所示。这种光纤分束结构共用同一台激光器,因而可以降低激光点火的成本。

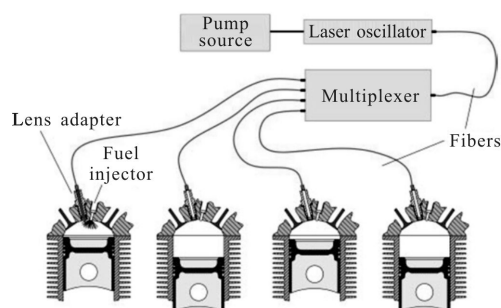
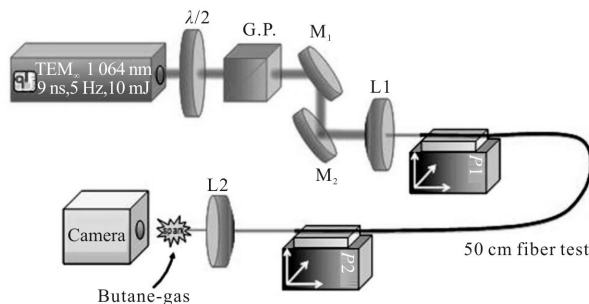


图 5 光纤分束传输应用于多个发动机点火的示意图

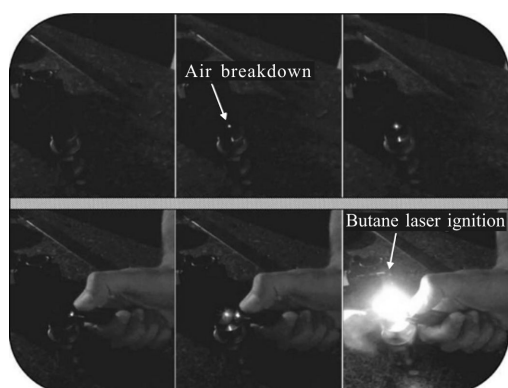
Fig.5 Schematic of fiber delivered laser ignition from a single laser to multiple engine cylinders

2012 年,法国 B. Beaudou 等人^[13]利用六边形结构的空芯光纤传输激光进行可燃混合气体的点火研究。他们采用的激光源是 Nd:YAG 激光,输出脉宽 9 ns、重复频率 5 Hz,最大传输输出能量为 4 mJ,传输效率为 89%。输出激光经聚焦后能够实现稳定的空气击穿,并且在丁烷混合气体中成功实现了激光点火。该激光传输结构以及点火测试情况分别如图 6(a)和 6(b)所示。这种多边形光纤结构有利于大能量激光传输,在实验测试中,最高功率密度可达 TW/cm^2 。



(a) 空芯光纤激光传输系统

(a) System of the hollow-core fiber transfer



(b) 应用于混合气体的点火实验图

(b) Experiment of mixed gas ignition

图 6 空芯光纤激光传输系统以及点火实验图

Fig.6 System of the hollow-core fiber for laser transfer and the laser ignition

2011 年,日本 T. Taira 等人^[14]研究了复合陶瓷 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 小型化点火激光器,他们采用了三束独立的泵浦源泵浦同一块陶瓷材料,实现了在同一谐振腔内三束脉冲激光同时输出。单束激光的单脉冲输出能量为 2.4 mJ、峰值功率为 2.8 MW、激光器重复频率为 5 Hz。该多光束激光能够实现稳定的空气击穿,激光器的体积可与传统火花塞相比拟,其结构以及输出激光击穿空气的测试图如图 7 所示。这种多光束激光点火方式有利于提高点火成功率和可靠性。

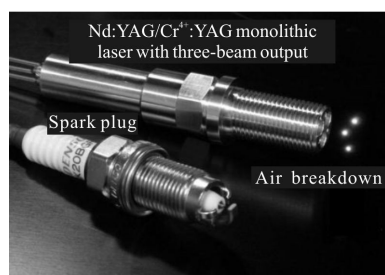


图 7 小型化三光束输出陶瓷被动调 Q 激光器以及其击穿空气的实验测试图

Fig.7 A photo of the composite, all-ceramics passively Q-switched monolithic laser with three-beam output and the demonstration of air breakdown

2014 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的 Z. Wang 等人^[15]研究利用达曼光栅对泵浦光进行分束的方法实现多光束被动调 Q 激光输出,用于激

光点火,如图 8 所示。其中图 8(a)为多光束激光器结构图,图 8(b)为达曼光栅结构示意图,图 8(c)为输出激光轮廓图。该激光器输出的四束激光总功率为 ~366 mW,脉宽范围为 155~175 ns,重复频率为 ~300 kHz,总的光束脉冲能量为 ~2 μJ。此激光器最终未能实现可燃混合气体的成功点火,这是由于达曼光栅的损伤阈值低,较难实现大能量的激光输出,故而难以在激光点火中得到应用。

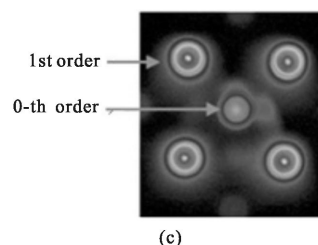
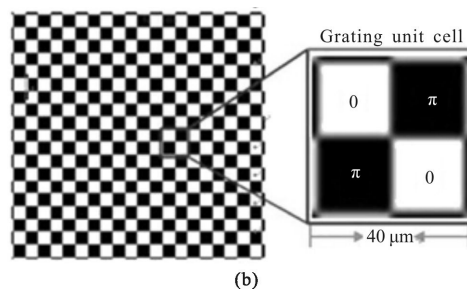
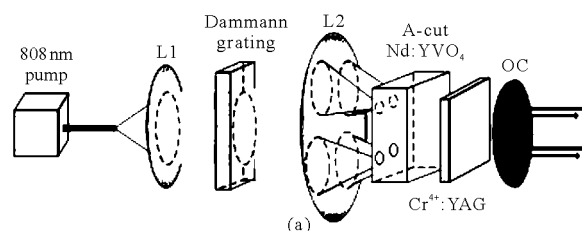


图 8 多光束激光器结构图以及输出激光轮廓图

Fig.8 Structure of the multipoint laser, Damann grating and measured intensity distribution of laser

2014 年,哈尔滨工业大学光电子技术研究所的马欲飞、于欣等人^[16]提出了一种新颖的脉冲串激光点火的方式。该激光器利用一个泵浦周期内可饱和吸收体多次漂白的现象,实现多个脉冲输出(可饱和吸收体漂白一次即可输出一个激光脉冲),进而实现激光高重复频率和大脉冲能量同时输出。该激光器在 10 Hz、600 mJ 的泵浦光作用下,输出了包含 8 个子脉冲的脉冲串激光,其子脉冲能量为 15.5 mJ,重复频率为 34.6 kHz,脉宽为 13.3 ns。在模拟发动机上,该激光器成功实现了液体 CH₄/O₂ 的激光点火。

该方案中的脉冲串测试结果如图 9 所示(泵浦频率分别为 10 Hz、50 Hz 和 100 Hz)。这种脉冲串激光器解决了激光晶体热效应限制引起的重复频率和脉冲能量难以同时提高的难题,激光输出重复频率可达 10 kHz、脉冲能量可达 10 mJ 量级,因而有利于在燃烧时间很短的发动机上得到应用。

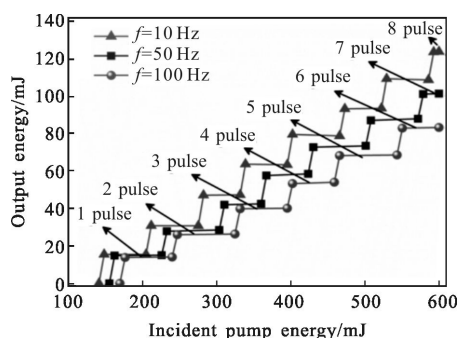


图 9 包含多个子脉冲的脉冲串激光能量随泵浦能量的变化
Fig. 9 Output energy of passively Q-switched pulse-burst laser containing several laser pulses vs pump energy

2015 年,哈尔滨工业大学光电子技术研究所的马欲飞、于欣等人^[7]提出了一种利用微型透镜阵列分束泵浦光实现多光束激光输出的新颖方案。其研究中利用可高掺杂浓度的陶瓷 Nd:YAG 材料作为激光工作物质,输出了四束激光用以提高激光点火的成功率以及可靠性。此外,他们还将多光束激光与脉冲串激光输出方式进行了结合,实验装置如图 10 所示,多光束激光输出光斑分布如图 11 所示。在 10 Hz 脉冲泵浦下,以输出的四束激光中以光束 I 为例,脉冲串中包含了 5 个子脉冲,单个子脉冲的脉冲能量为 0.22 mJ,其重复频率为 10.8 kHz。此激光能够在金属靶上产生等离子体,即能够实现激光点火。该方法采用一台泵浦源,因而极大地提高了泵浦光的利用率和降低了成本,此外,多光束激光输出结合脉冲串方案可进一步提高激光点火的成功率和可靠性。

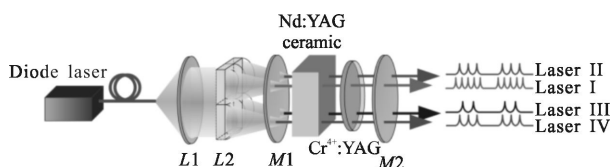
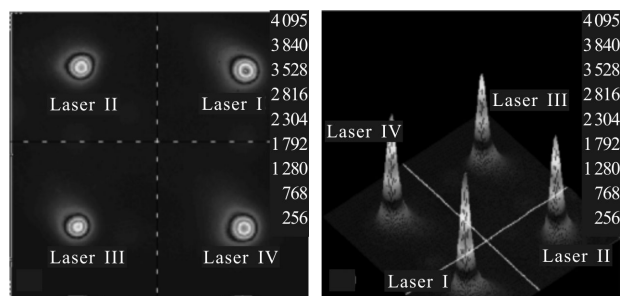


图 10 四光束脉冲串被动调 Q 陶瓷 Nd:YAG 激光器结构示意图
Fig.10 Schematic of four-beam, pulse-burst, passively Q-switched ceramic Nd:YAG laser



(a) 2D 轮廓图 (b) 3D 轮廓图
(a) 2-D profile (b) 3-D profile

图 11 多光束陶瓷激光输出光斑轮廓图

Fig.11 Output beam profile of multiple-beam ceramic laser

4 结 论

激光点火具有很好的点火效果,相比于传统的火花塞点火,其具有诸多优势。由于激光器是激光点火技术中的核心元件,近年来,国内外对点火激光器的研究十分重视,并且取得了较大的进展,激光器的尺寸、激光传输方式、激光点火方式都有了不同程度的进步和发展。

综合近几年激光点火技术的发展状况,未来应用于激光点火的激光光源的发展方向有以下几点:(1) 固体激光器结合被动调 Q 的方式具有体积小、无电磁干扰等优势,因而将会继续成为主流;(2) 脉冲串输出方式可以有效地提高输出激光的脉冲能量和重复频率,这对于燃烧时间很短的发动机而言,具有很大的吸引力;(3) 采用光纤技术便于点火激光的空间传输;(4) 多光束点火有利于提高激光点火的成功率和可靠性。

参 考 文 献:

- [1] Ronney P D. Laser versus conventional ignition of flames [J]. *Opt Eng*, 1994, 33(2): 501-521.
- [2] Phuoc T X. Laser-induced spark ignition fundamental and applications[J]. *Opt Lasers Eng*, 2006, 44(5): 351-397.
- [3] Weinrotter M, Kopecek H, Wintner E. Laser ignition of engines[J]. *Laser Phys Lett*, 2005, 15: 947-953.
- [4] Pavel N, Tsunekane M, Taira T. Composite, all-ceramics, high-peak power Nd:YAG/Cr³⁺:YAG monolithic micro-laser with multiple-beam output for engine ignition [J]. *Opt Express*, 2011, 19(10): 9378-9384.
- [5] Lorenz S, Bärwinkel M, Stglich R, et al. Pulse train ignition

- with passively Q-switched laser spark plugs [J]. *Int J Engine Res*, 2015, 1177(10): 1-12.
- [6] Spiglanin T A, Mcilroy A, Fournier E W. Time-resolved imaging of flame kernels: Laser spark ignition of H₂/O₂/Ar mixtures[J]. *Combust Flame*, 1995, 102(3): 310-328.
- [7] Bradley D, Sheppard C G W, Suardjaja I M, et al. Fundamentals of high-energy spark ignition with lasers [J]. *Combust Flame*, 2004 138 (1-2): 55-77.
- [8] Syage J A, Fournier E W, Rianda R, et al. Dynamics of flame propagation using laser-induced spark initiation: Ignition energy measurements [J]. *J Appl Phys*, 1998, 64: 1499-1507.
- [9] Schmieder R W. Laser spark ignition and extinction of a methane-air diffusion flame [J]. *J Appl Phys*, 1981, 52: 3000-3003.
- [10] Kroupa G, Franz G. Novel miniaturized high-energy Nd-YAG laser for spark ignition in internal combustion engines [J]. *Opt Eng*, 2009, 48(1): 014202.
- [11] Yalin A P, DeFoort M, Willson B, et al. Use of hollow-core fibers to deliver nanosecond Nd:YAG laser pulses to form sparks in gases[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(16): 2083-2085.
- [12] Tauer J, Kofler H, Wintner E. Laser-initiated ignition [J]. *Laser & Photon Rev*, 2010, 4(1): 99-122.
- [13] Beaudou B, Gerôme F. Millijoule laser pulse delivery for spark ignition through kagome hollow-core fiber [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(9): 1430-1432.
- [14] Pavel N, Tsunekane M, Taira T. Composite all-ceramics high-peak power Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG monolithic micro-laser with multiple-beam output for engine ignition [J]. *Opt Express*, 2011, 19(10): 9378-9384.
- [15] Wang Z, Yu J J, Xia K G, et al. 2×2 arrayed and passively Q-switched Nd:YVO₄ laser under Damman-arrayed pumping [J]. *Appl Optics*, 2014, 53(12): 2664-2668.
- [16] Ma Y F, Li X D, Yu X, et al. A novel miniaturized passively Q-switched pulse-burst laser for engine ignition[J]. *Opt Express*, 2014, 22(20): 24655-24665.
- [17] Ma Y F, He Y, Yu X, et al. Multiple-beam, pulse-burst, passively Q-switched ceramic Nd:YAG laser under micro-lens array pumping [J]. *Opt Express*, 2015, 23(19): 24955-24961.