

激光诱导击穿火焰等离子体光谱研究

刘玉峰 张连水 和万霖 黄宇 杜艳君 蓝丽娟 丁艳军 彭志敏

Spectroscopic study on the laser-induced breakdown flame plasma

Liu Yu-Feng Zhang Lian-Shui He Wan-Lin Huang Yu Du Yan-Jun Lan Li-Juan Ding Yan-Jun
Peng Zhi-Min

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 045202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.045202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.045202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光诱导击穿空气等离子体时间分辨特性的光谱研究

[Spectroscopic study on the time evolution behaviors of the laser-induced breakdown air plasma](#)

物理学报.2014, 63(20): 205205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.205205>

基于激光诱导击穿光谱技术定量分析食用明胶中的铬元素

[Quantitative analysis of chromium in edible gelatin by using laser-induced breakdown spectroscopy](#)

物理学报.2014, 63(14): 145202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.145202>

基于神光III原型的背向散射实验技术研究

[Backscattered Light diagnostic technique on Shen Guang-III prototype Laser Facility](#)

物理学报.2013, 62(17): 175202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.175202>

激光-纳米丝靶相互作用过程中超热电子的加热机理研究

[Heating mechanism of hot electrons in the interaction between laser and nanolayered target](#)

物理学报.2012, 61(22): 225202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.225202>

驱动激光束间相干性以及对背向散射影响的研究

[Research of coherence between driven-laser beams and its influence on backscatter](#)

物理学报.2012, 61(18): 185202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.185202>

激光诱导击穿火焰等离子体光谱研究*

刘玉峰¹⁾ 张连水²⁾ 和万霖²⁾ 黄宇¹⁾³⁾ 杜艳君¹⁾ 蓝丽娟¹⁾
丁艳军¹⁾ 彭志敏^{1)†}

1) (清华大学热能工程系, 电力系统与发电设备控制与仿真国家重点实验室, 北京 100084)

2) (河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

3) (华北电力大学控制与计算机工程学院, 保定 071003)

(2014年6月4日收到; 2014年8月26日收到修改稿)

采用PI-MAX-II型增强型电荷耦合器件, 用Nd:YAG纳秒脉冲激光器输出的1064 nm强光束击穿在一个大气压的空气中燃烧的酒精灯火焰, 对激光诱导击穿酒精灯火焰产生的等离子体光谱进行了初步研究. 根据美国国家标准与技术研究院原子发射谱线数据库, 对等离子体中的主要元素的特征谱线进行了标识和归属. 通过激光诱导击穿空气等离子体光谱、激光诱导击穿酒精灯火焰等离子体光谱、激光诱导酒精喷灯火焰等离子体光谱的对比分析, 发现不同燃烧状况下的光谱中各原子谱线的相对强度是不同的. 这些结果对于使用激光诱导击穿技术分析和研究碳氢燃料在空气中的燃烧特性具有重要的意义和参考价值, 同时也为将该技术应用用于燃烧诊断提供了实验依据.

关键词: 激光诱导击穿光谱, 火焰, 等离子体

PACS: 52.27.-h, 52.38.-r

DOI: 10.7498/aps.64.045202

1 引言

激光诱导击穿光谱 (laser induced breakdown spectrometry, LIBS) 技术是一种基于激光的功能强大而又相对简单的测量技术. LIBS的基本方法是通过聚焦透镜将强激光束聚焦于样品, 微量的样品在激光聚焦处气化, 在其表面或内部产生等离子体 (火花), 同时气化的原子或分子被很强的激光激发, 从而产生很强的发射光谱^[1-6]. 相比于其他的元素分析方法, LIBS技术只需一步就可完成测量. 它既能够对不同元素在固体、液体或气体中的浓度及含量进行分析, 又能够进行实时在线测量^[7-14]. 即使在有很多干扰的情况下, LIBS技术仍能得到很强的测量信号. 尤其是在远程、危险和恶劣等环境下进行测量, 更能体现出该方法的优越性, 因而该技术的应用范围十分广泛. 此外, LIBS方法还有很多其他优点, 如可以在很小的空间体积内对样品

完成测量, 测量空间精确度很高; 实验过程简单, 样品制备不需要任何提前准备和预处理等^[12-20]. 所以, LIBS技术出现以后, 在很短的时间内就成为有关基于激光技术测量方面专家关注的焦点.

在气体测量方面, LIBS技术已经实现对燃煤废气和城市空气中悬浮颗粒物 (PM_{2.5}) 有害金属元素的测量分析^[21,22]. 最近, 国际上有关LIBS技术在燃烧诊断方面的报道引起了该方向科研工作者的广泛关注^[23-27]. 燃烧诊断技术是燃烧科学领域的一项重要基础技术. 燃烧诊断技术的提高, 不但能大大促进与燃烧相关的各种先进技术的进步, 而且还能推动能源利用技术的发展. 因此, 燃烧诊断技术的研究一直都受到特别的重视.

在燃烧过程和燃烧技术中, 确定实际的燃料与氧化剂质量的化学计量比, 即当量比是非常重要的. 因为当量比不仅对燃烧特性有非常强的影响, 也对燃烧产物诸如CO, NO_x等污染物的产生有非常大的影响. 因此, 当量比在维持稳定的燃烧过程

* 国家自然科学基金 (批准号: 51206086, 51176085) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: apspect@mail.tsinghua.edu.cn

和尽量减少煤烟的排放量方面是非常有意义的. 传统的方法是根据 CO, CO₂ 和 O₂ 浓度的测量结果和化学平衡方程式来计算出空气和燃料的比——空燃比(也就是当量比) [27,28]. 在发动机燃烧测量方面, 也有使用激光诱导荧光测量的方法来计算当量比; 还有使用拉曼光谱法, 通过测量 N₂ 和 O₂ 浓度来推断有多少燃料没有完全燃烧, 进一步得到当量比. 目前已有一些方法可以实现当量比的直接测量, 如傅里叶变换红外发射光谱法和喷雾诊断法等方法 [29].

最近, 文献 [30, 31] 采用 LIBS 方法对燃烧火焰中的 C, N 和 O 发射谱线进行了测量研究. 文献 [32—34] 分别通过测定火焰中氢和氧的原子数密度来得到预混合层流火焰的当量比. 这些研究结果表明, LIBS 技术作为燃烧系统的光学诊断工具, 不但能获得火焰结构信息和原子种类信息, 还能对燃烧特性和燃烧污染物种类的含量直接进行测定 [11—13]. 国内有关 LIBS 技术在燃烧诊断方面的研究还处于起步阶段, 相关的报道也非常少. 本文利用 LIBS 技术对酒精灯火焰的燃烧特性进行了初步研究, 得到了一些很有价值的结果, 对于使用 LIBS 技术分析和研究碳氢燃料在空气中的燃烧特性具有重要的意义和参考价值.

2 实验及装置

激光诱导击穿火焰等离子体光谱研究的实验装置如图 1(a) 所示. 装置由光源及其控制系统、光谱数据采集和处理等两部分组成. 用于产生等离子体的光源是一台纳秒脉冲 Nd:YAG 调 Q 固体激光器(立陶宛 EKSPLA 公司, NL300 型). 本实验所使用的激光波长为基频 1064 nm, 其单脉冲能量最大约为 800 mJ, 单脉冲宽度为 3—6 ns, 脉冲频率为 10 Hz. 光束经聚焦后, 直接用来激发酒精灯火

焰产生火焰等离子体. 酒精灯火焰的击穿阈值与多方面因素有关, 不仅和激光的波长、脉冲宽度有关, 还和气体压力、燃烧当量比等密切相关. 火焰击穿的机理普遍认为是多光子吸收电离和光致电离. 由于这些过程产生了初始电子, 并引发级联电离过程而使气体击穿发生. 在本文的实验条件(激光波长为 1064 nm, 脉冲宽度为 5 ns, 室温 25 °C, 一个标准大气压, 燃烧当量比为 1 的情况)下, 所测得的酒精灯火焰的击穿阈值约为 120 mJ, 为保证火焰等离子体的连续均匀激发, 我们采用较高的激光能量(约 3 倍击穿阈值的能量, 约为 300—500 mJ), 这样发生击穿的空间体积比较大, 发光更强, 更有利于光谱的测量. 在激光脉冲能量较高的情况下, 发生击穿的部份的空间体积呈现水滴形, 最大部分的直径约为 0.4 cm, 估算其体积约为 0.045 cm³, 所测得的击穿光谱, 就是该击穿体积内发出的光谱.

实验所用激光束能量的空间分布符合高斯分布, 如图 1(b) 所示, 光束直径约为 8 mm, 通过一个焦距为 100 mm 的熔融石英透镜聚焦于酒精灯火焰. 聚焦后的焦斑直径约为 0.5 mm. 焦斑处的光功率密度可用以下公式计算:

$$\rho = E/(ts), \quad (1)$$

式中, ρ 表示光功率密度, E 表示单脉冲能量, t 表示单脉冲宽度, s 表示焦斑面积. 在本试验中, 单脉冲能量 $E = 400$ mJ (0.4 J), 单脉冲宽度 $t = 5$ ns, 焦斑面积 $s = \pi(0.05)^2/4$, 代入 (1) 式, 可得光功率密度

$$\rho = \frac{0.4}{5 \times 10^{-9} \times \frac{\pi}{4} \times (0.05)^2} \approx 4 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2, \quad (2)$$

因此, 本试验中光功率密度很高, 其数量级可达到 10^{10} W/cm².

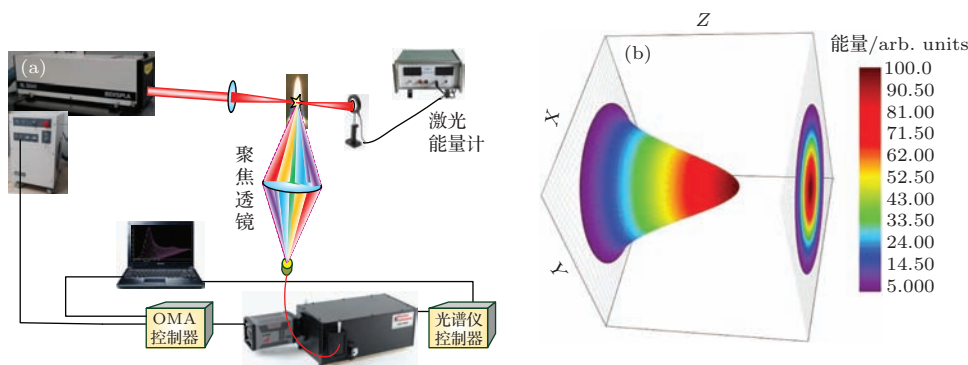


图1 (网刊彩色) (a) 激光诱导击穿火焰等离子体实验装置; (b) 激光束能量分布

光谱数据采集和处理器由计算机和相应的软件组成. 光谱仪采用 Acton SP2300 型光栅光谱仪, 内置 3 块光栅, 参数分别为 600 刻线/mm, 闪耀波长位于 300 nm 处; 300 刻线/mm, 闪耀波长为 500 nm; 600 刻线/mm, 闪耀波长为 1200 nm. 光谱响应范围为 150—2000 nm, 分辨率为 0.13 nm. 探测器使用 PI-MAX-II 型增强型电荷耦合器件, 像素分辨率为 1024 × 1024. 实验过程中, 光谱测量范围为 150—900 nm, 光栅的切换由计算机通过 Winspec/32 软件控制完成.

3 实验结果与讨论

3.1 激光诱导击穿空气等离子体光谱分析

为了研究激光诱导击穿酒精灯火焰的击穿光谱, 首先对一个大气压情况下的空气等离子体进行了测量. 图 2 给出了用 shutter 模式测得的一个大气压下激光诱导击穿空气等离子体的光谱 (180—900 nm 波段). 从图 2 可以看出, 激光诱导击穿空气等离子体光谱是由连续光谱和线状光谱叠加而成, 并且 400—700 nm 可见光波段的连续谱强度高于 700—900 nm 红外波段的连续谱强度.

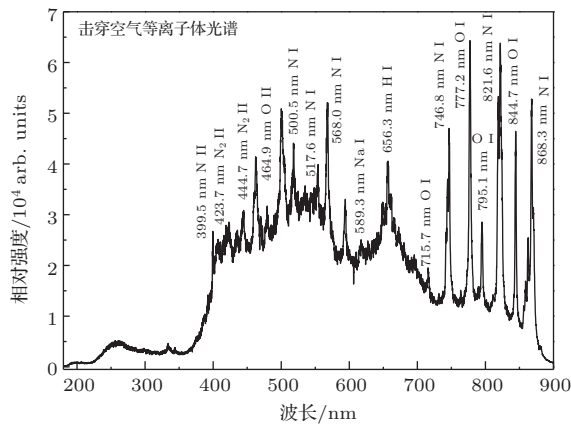


图 2 激光诱导击穿空气等离子体光谱

一般情况下, 激光诱导击穿空气等离子体的连续光谱部分可以认为是由韧致辐射和复合辐射产生的 [35]. 韧致辐射是等离子体中的高温自由电子与其他粒子碰撞过程中发生自由态-自由态跃迁而降低温度、损失能量并发出光子的过程. 复合辐射过程是等离子体中的高温自由电子与离子碰撞时被离子俘获后, 多余的能量以光子的形式释放出来的过程 [35]. 在空气等离子体中, 则是空气分子离子解离后, 再与自由电子复合的过程. 复合辐射也可

以是空气分子正离子和空气分子负离子的直接复合辐射过程.

激光诱导击穿空气等离子体的线状光谱主要来自大气中处于激发态的氮和氧的分子、原子和离子等的自发辐射 [36]. 本文对实验观测到的 300—900 nm 波段的空气 LIBS 中的线状光谱 (原子发射谱线) 进行了归属, 并与美国国家标准与技术研究院 (national institute of standards and technology, NIST) 原子光谱数据库 (atomic spectra database lines data) 的标准谱线波长进行了比较, 结果列于表 1. 实验结果与文献 [35, 37—39] 的结果基本一致, 实验波长的偏差来源于相对较低的波长分辨率. 从这些结果可以看出, 激光空气等离子体中的中性原子的谱线大多分布在 700—900 nm 的红外光谱范围内, 而相应的氮和氧的离子谱线则分布在 400—600 nm 的可见光波段. 这表明在激光激发过程中, 基态氮分子和氧分子被激发到其相应离子的激发态或高激发态, 可以辐射出波长较短的离子光谱. 光谱中没有出现高价氮或氧的离子光谱, 说明等离子体中的自由电子主要来自空气分子或原子最外层的价电子. 可见, 用激光诱导击穿方法产生高电子密度等离子体时, 其激发能量的利用效率比较高.

表 1 激光大气等离子体主要线状谱线的归属情况

粒子种类	谱线位置/nm	跃迁形式
N ₂ I	333.9	C ³ Π _u → B ³ Π _g
N II	343.7	3p(¹ S) → 3s(¹ P ⁰)
N II	399.5	3p(¹ D) → 3s(¹ P ⁰)
N II	403.8	4f(³ D) → 3d(³ F ⁰)
N ₂ II	423.7	B ² Σ _u ⁺ → X ² Σ _g ⁺
N II	444.7	3d(³ D ⁰) → 3p(³ D)
O II	464.9	3p(⁴ D ⁰) → 3s(⁴ P)
N II	500.5	3p(³ S) → 3s(³ P ⁰)
N II	517.6	3d(⁵ D) → 3p(⁵ P ⁰)
N II	568.0	3p(³ D) → 3s(³ P ⁰)
O I	715.7	3p(¹ D ₂) → 3s(¹ D ₂ ⁰)
N I	746.8	3p(⁴ S ⁰) → 3s(⁴ P)
O I	777.2	3p(⁵ P) → 3s(⁵ S ⁰)
O I	795.1	3d(³ F ⁰) → 3s(³ D ⁰)
N I	821.6	3p(⁴ P ⁰) → 3s(⁴ P)
O I	822.2	3p(³ D) → 3s(³ D ⁰)
O I	844.7	3p(³ P) → 3s(³ S ⁰)
N I	868.3	3p(⁴ D ⁰) → 3s(⁴ P)

3.2 激光诱导击穿酒精灯火焰等离子体光谱分析

用眼睛直接观察暗室中稳定燃烧的酒精灯火焰, 可以看到燃烧的火焰呈圆锥形分布, 底部直径约为12 mm, 火焰高度约为45 mm, 随着高度的增加, 火焰直径逐渐减小. 根据火焰的颜色, 可以明显地分为淡蓝色的内焰和黄色的外焰两部分. 酒精完全燃烧时的化学反应方程式为



酒精燃烧时, 由于环境压力低, 而酒精本身携带的氧化剂又不能充分发挥其效率, 导致火焰内部氧化

剂不足. 外焰部分因酒精蒸汽与空气直接接触, 化学反应剧烈, 燃烧充分, 温度较高, OH分子密度也较高; 内焰部分由于氧的供应量不足, 燃烧不充分, 因而温度较低, 相应的OH分子密度也较低. 当燃烧当量比为1时, 火焰在水平方向OH分子数密度分布较均匀, 并随着高度的增加而逐渐降低. 在研究火焰的发射光谱时, 为了得到酒精灯火焰不同高度处(顶部、中部和底部)的发射光谱, 我们使用了一个宽度为3 mm的水平狭缝作为挡板, 以避免火焰其他高度处的发射光谱对所测量部位的光谱产生影响. 在研究激光诱导击穿产生的等离子体所发出的光谱时, 由于等离子体光谱强度远远高于火焰本身的发射光谱, 所以不再使用狭缝.

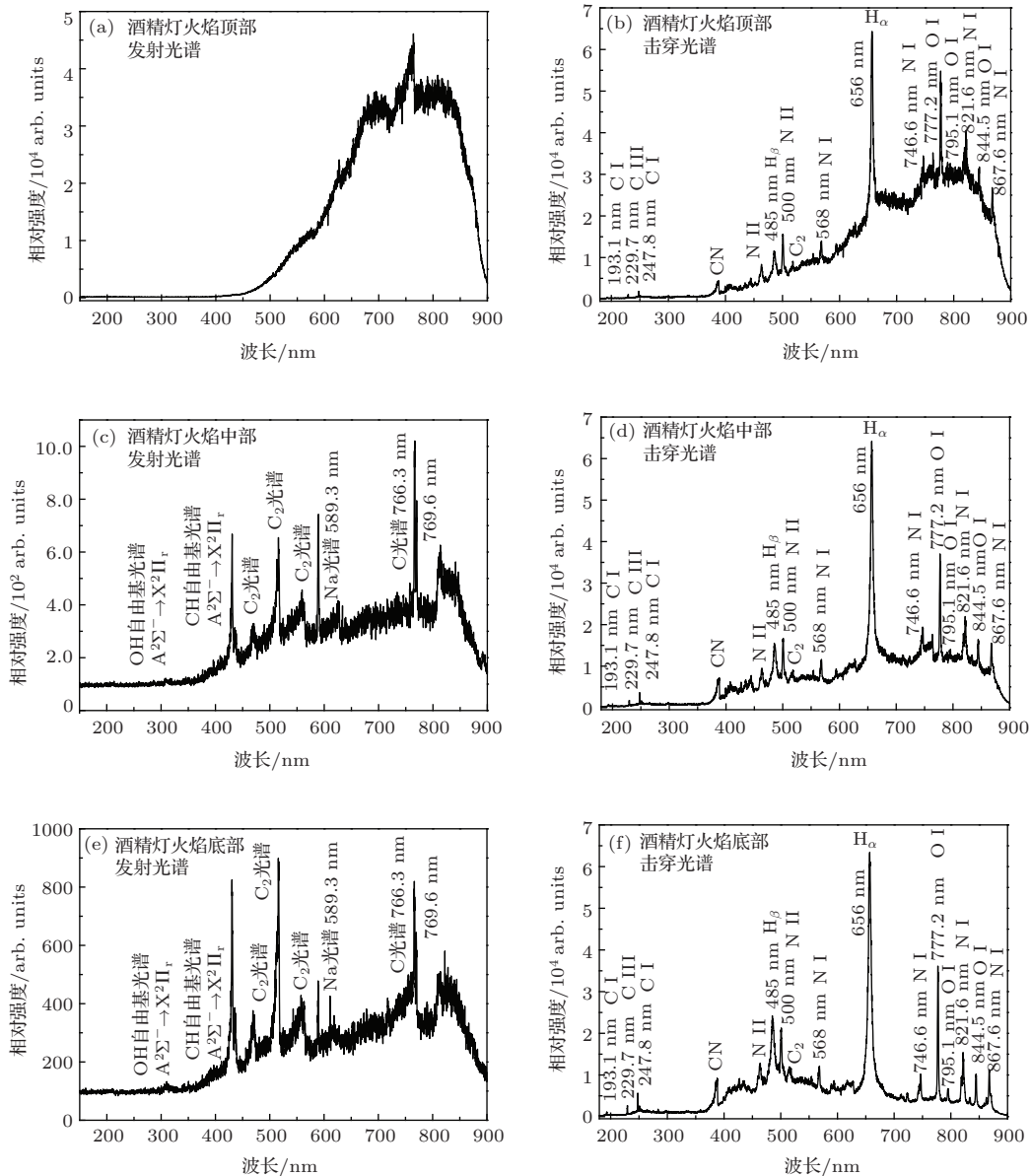


图3 酒精灯火焰发射光谱和 LIBS (a) 火焰顶部发射光谱; (b) 火焰顶部击穿光谱; (c) 火焰中部发射光谱; (d) 火焰中部击穿光谱; (e) 火焰底部发射光谱; (f) 火焰底部击穿光谱

图3为使用300刻线/mm的光栅采集到的酒精在空气中燃烧时火焰顶部、中部和底部的发射光谱和LIBS. 比较酒精灯火焰不同部位的发射光谱可以看出, 酒精灯火焰发射光谱在180—900 nm波段范围内存在多支辐射强度很大的带状分子光谱. 尤其是在火焰的底部和中部, 带状分子光谱非常明显, 其中OH自由基、CH自由基和C₂自由基电子带系的发射光谱非常强烈. 此外, 酒精灯火焰中Na原子的特征谱线589.0 nm和589.6 nm也非常明显. 酒精灯火焰的顶部发射光谱在500—900 nm范围内有很强的带状谱线. 其原因可能是酒精中含有碳元素, 在燃烧过程中, 由于氧气供应量不足, 燃烧不充分, 产生很多碳颗粒. 高温下的这些碳颗粒类似于黑体, 会对外产生强烈的辐射作用. 碳颗粒的辐射波长主要集中在可见光区和近红外波段.

比较酒精灯火焰顶部、中部和底部的LIBS可以看出, 不同部位的LIBS都表现为线状谱叠加于带状谱之上, 既出现了CN和C₂等自由基电子带系的发射光谱, 又出现了C, H, O和N等的原子谱线. 如在193.1 nm处的C I线, 229.7 nm处的C III线, 247.8 nm处的C I线, 485 nm处的H_β线和656 nm处的H_α线等, 其中656 nm处的H_α线强度最高. 另外, 通过与激光诱导击穿空气等离子体光谱进行比较, 还发现激光诱导击穿酒精灯火焰的光谱在700—900 nm范围内出现的N和O的原子谱线与激光诱导击穿空气等离子体光谱在该范围内的谱线基本相同, 只是谱线相对强度较低.

3.3 激光诱导击穿酒精喷灯火焰等离子体光谱分析

观察暗室中酒精喷灯的火焰, 从内到外可分为焰芯、还原焰和氧化焰三部分, 最高温度在氧化焰的中部.

图4为用300线/mm的光栅采集到的酒精喷灯在空气中燃烧时的氧化焰发射光谱和激光诱导击穿酒精喷灯氧化焰等离子体光谱. 比较酒精喷灯火焰发射光谱和酒精灯火焰的发射光谱可以看出: 二者的带状分子光谱, 如OH, CH和C₂等自由基的电子带系的发射光谱基本相同; 二者都出现了Na原子的特征光谱线, 只是酒精喷灯发射光谱的宽带谱要比酒精灯发射光谱的宽带谱低得多. 原因可能是酒精喷灯的氧气供应量比较充足, 燃烧充

分, 由于不完全燃烧形成的碳颗粒很少, 产生的红外辐射也就少得多.

对比酒精喷灯和酒精灯的激光诱导击穿等离子体光谱可以看出, 各个原子谱线除了强度比不同外, 其余基本相同, 说明酒精喷灯和酒精灯的燃烧状况(当量比)是不同的. 因此, 我们可以利用激光诱导击穿火焰等离子体原子谱线的强度比来确定碳氢燃料燃烧的当量比等信息. 本文研究结果充分说明, 使用LIBS技术完全有可能对碳氢燃料在空气中的燃烧特性进行分析和研究.

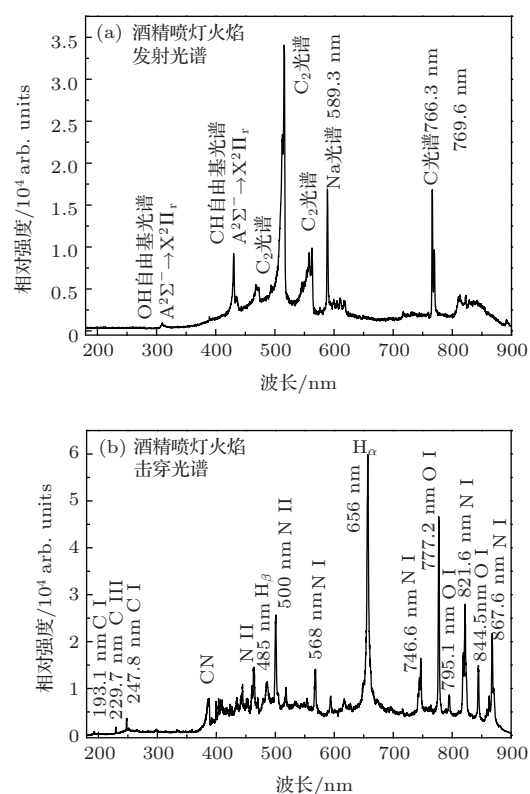


图4 (a)酒精喷灯火焰发射光谱; (b)激光诱导击穿酒精喷灯火焰等离子体光谱

4 结论

本文采用PI-MAXII型ICCD, 用Nd:YAG纳秒脉冲激光器输出的1064 nm强光束击穿在一个大气压的空气中燃烧的酒精灯火焰, 对激光诱导击穿火焰产生的等离子体光谱进行了研究. 根据NIST原子发射谱线数据库, 对等离子体中的主要元素的特征谱线进行了标识和归属, 并对酒精灯和酒精喷灯不同部位的发射光谱和LIBS进行了比较和分析. 这些结果对于LIBS技术应用于燃烧诊断技术和提高燃烧研究水平有重要的意义.

参考文献

- [1] Lu C P, Liu W Q, Zhao N J, Liu L T, Chen D, Zhang Y J, Liu J G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 045206 (in Chinese) [鲁翠萍, 刘文清, 赵南京, 刘立拓, 陈东, 张玉钧, 刘建国 2011 物理学报 **60** 045206]
- [2] Nakimana A, Tao H Y, Hao Z Q, Sun C K, Gao X, Lin J Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 014209
- [3] Guo L B, Hao R F, Hao Z Q, Li K H, Shen M, Ren Z, Li X Y, Zeng X Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 224211 (in Chinese) [郭连波, 郝荣飞, 郝中祺, 李阔湖, 沈萌, 任昭, 李祥友, 曾晓雁 2013 物理学报 **62** 224211]
- [4] Miziolek A, Palleschi V, Schechter I 2006 *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS): Fundamentals and Applications* (Cambridge: Cambridge University Press) pp257–290
- [5] Singh J P, Thakur S N 2007 *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy* (New York: Elsevier) pp10–15
- [6] Cremers D A, Radziemski L J 2007 *Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy* (New York: Wiley) pp36–42
- [7] Rusak D A, Castle B C, Smith B W, Winefordner J D 1997 *Crit. Rev. Anal. Chem.* **27** 257
- [8] Zhang H, Yueh F Y, Singh J P 1999 *Appl. Opt.* **38** 1459
- [9] Hahn D W, Flower W L, Henken K R 1997 *Appl. Spectrosc.* **51** 1836
- [10] Zhang H, Singh J P, Yueh F Y, Cook R L 1995 *Appl. Spectrosc.* **49** 1617
- [11] Michalakou A, Stavropoulos P, Couris S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 081501
- [12] Cremers D A, Radziemski L J 1983 *Anal. Chem.* **55** 1252
- [13] Radziemski L J, Loree T R, Cremers D A, Hoffman N M 1983 *Anal. Chem.* **55** 1246
- [14] Sturm V, Peter L, Noll R 2000 *Appl. Spectrosc.* **54** 1275
- [15] Cabalín L M, Laserna J J 1998 *Spectrochim. Acta Part B* **53** 723
- [16] Sattmann R, Monch I, Krause H, Noll R, Couris S, Hatziaepostolou A, Mavromanolakis A, Fotakis C, Larrauri E, Miguel R 1998 *Appl. Spectrosc.* **52** 456
- [17] Gornushkin I B, Anzano J M, King L A, Smith B W, Omenetto N, Winefordner J D 1999 *Spectrochim. Acta Part B* **54** 491
- [18] Cremers D A, Radziemski L J, Loree T R 1984 *Appl. Spectrosc.* **38** 721
- [19] Pichahchy A E, Cremers D A, Ferris M J 1997 *Spectrochim. Acta Part B* **52** 25
- [20] Hanafi M, Omar M M, Gamal Y E E D 2000 *Radiat. Phys. Chem.* **57** 11
- [21] Blevins L G, Shaddix C R, Sickafoose S M, Walsh P M 2003 *Appl. Opt.* **42** 6107
- [22] Lithgow G A, Robinson A L, Buckley S G 2004 *Atmos. Environ.* **38** 3319
- [23] Kiefer J, Tröger J W, Seeger T, Leipertz A, Li B, Li Z S, Aldén M 2010 *Meas. Sci. Technol.* **21** 065303
- [24] Kiefer J, Li Z S, Aldén M 2013 *Meas. Sci. Technol.* **24** 075205
- [25] Tripathi M M, Srinivasan K K, Krishnan S R, Yueh F Y, Singh J P 2013 *Fuel* **106** 318
- [26] Kiefer J, Tröger J W, Li Z S, Aldén M 2011 *Appl. Phys. B* **103** 229
- [27] Einecke S, Schulz C, Sick V 2000 *Appl. Phys. B* **71** 717
- [28] Ma L, Sanders S T, Jeffries J B, Hanson R K 2003 *Proc. Combust. Inst.* **29** 161
- [29] Hoinghaus K K, Jeffries J B 2002 *Applied Combustion Diagnostics* (New York: Taylor and Francis) pp15–28
- [30] Ferioli F, Puzinauskas P V, Buckley S G 2003 *Appl. Spectrosc.* **57** 1183
- [31] Ferioli F, Buckley S G 2006 *Combust. Flame* **144** 435
- [32] Phuoc T X, White F P 2002 *Fuel* **81** 1761
- [33] Stavropoulos P, Michalakou A, Skevis G, Couris S 2005 *Spectrochim. Acta B* **60** 1092
- [34] Stavropoulos P, Michalakou A, Skevis G, Couris S 2005 *Chem. Phys. Lett.* **404** 309
- [35] Lin Z X, Li X Y, Cheng X W, Li F Q, Gong S S 2003 *Spectrosc. Spect. Anal.* **23** 421 (in Chinese) [林兆祥, 李小银, 程学武, 李发泉, 龚顺生 2003 光谱学与光谱分析 **23** 421]
- [36] Robert J N 1995 *Appl. Spectrosc.* **49** 1490
- [37] Li X Y, Lin Z X, Liu Y Y, Chen Y Q, Gong S S 2004 *Acta Opt. Sin.* **24** 1051 (in Chinese) [李兆祥, 林兆祥, 刘煜炎, 陈扬钊, 龚顺生 2004 光学学报 **24** 1051]
- [38] Ding H L, Gao L X, Zheng H Y, Wang Y P, Huang T, Ding L, Zhang W J, Fang L 2010 *Spectrosc. Spect. Anal.* **30** 1 (in Chinese) [丁慧林, 高立新, 郑海洋, 王颖萍, 黄腾, 丁蕾, 张为俊, 方黎 2010 光谱学与光谱分析 **30** 1]
- [39] Lin Z X, Wu J Q, Gong S S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5892 (in Chinese) [林兆祥, 吴金泉, 龚顺生 2006 物理学报 **55** 5892]

Spectroscopic study on the laser-induced breakdown flame plasma*

Liu Yu-Feng¹⁾ Zhang Lian-Shui²⁾ He Wan-Lin²⁾ Huang Yu¹⁾³⁾ Du Yan-Jun¹⁾
Lan Li-Juan¹⁾ Ding Yan-Jun¹⁾ Peng Zhi-Min^{1)†}

1) (*State Key Laboratory of Power Systems, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

2) (*College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China*)

3) (*School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China*)

(Received 4 June 2014; revised manuscript received 26 August 2014)

Abstract

The emission spectra from a flame-breakdown atmospheric pressure plasma generated by a nanosecond pulsed 1064 nm beam of Nd:YAG laser are investigated by using a PI-MAX-II intensified charge coupled device. The emission lines of the main elements, such as carbon, hydrogen, oxygen and nitrogen are identified according to the national institute of standards and technology database of atomic emission. It is found that the relative intensities of the atomic emission lines are different from each other under different combustion conditions by making a comparative analysis of the spectra of laser induced breakdown air plasma, alcohol burner flame plasma, and alcohol blast burner flame plasma. The obtained results in this work provide an experimental basis for applying the laser-induced breakdown technology to the combustion diagnostics, and have an important reference and significance for analyzing the characteristics of hydrocarbon fuel combusting in air.

Keywords: laser induced breakdown spectrometry, flame, plasma

PACS: 52.27.-h, 52.38.-r

DOI: [10.7498/aps.64.045202](https://doi.org/10.7498/aps.64.045202)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51206086, 51176085).

† Corresponding author. E-mail: apspect@mail.tsinghua.edu.cn