

# 基于激光诊断的生物柴油碳烟生成特性研究

何 旭, 马 骁, 吴复甲, 王建昕

(清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

## Investigation on the Soot Formation of Biodiesel Fuel by Laser Diagnostics

HE Xu, MA Xiao, WU Fu-jia, WANG Jian-xin

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A burner fueled with liquid fuel was set up, which could produce a laminar diffusion flame. A two-color laser induced incandescence (2C-LII) technique was used for measuring absolute soot volume fraction in the flame. Based on LII signal of the same point in the flame recorded at two wavelengths, the temperature of the laser-heated soot particles was first derived and then the soot concentration of the point could be acquired. The 2D soot concentration distribution in the flame was obtained by mapping. The 2D concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) which are main precursor of soot were obtained by laser induced fluorescence (LIF). The laminar diffusion flames of diesel fuel and biodiesel/air were measured by 2C-LII and LIF. The result shows that with the increase of biodiesel proportion in the blended fuel, the maximum soot and PAHs concentration decrease as well as their distribution area.

**摘要:** 制作了1个以液体为燃料可以产生层流扩散火焰的燃烧器,应用双色激光诱导炽光法(LII)技术来测量火焰中的绝对碳烟体积分数。基于在2个波长上获取的火焰中某1点的LII信号,获得被激光加热的碳烟粒子温度,同时得到此点的碳烟浓度,通过映射得到火焰的二维碳烟浓度分布。采用激光诱导荧光法可获得碳烟前驱物多环芳香烃在火焰中的二维分布,将激光诱导荧光和激光诱导炽光相结合,在柴油和生物柴油混合燃料的层流扩散火焰上进行测试。研究结果表明,随着生物柴油掺混比例的增加,碳烟和多环芳香烃的最大浓度都随之降低,浓区分布面积也进一步缩小。

**关键词:** 内燃机; 激光诱导荧光; 激光诱导炽光; 碳烟; 生物柴油; 柴油机

**Key words:** IC engine; laser induced fluorescence; laser induced incandescence; soot; biodiesel; diesel engine

中图分类号: TK464

文献标识码: A

## 0 概述

柴油机不均匀混合气的压缩着火方式是产生碳烟的根本原因,其中2个重要因素为:多环芳香烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)的化学作用和扩散火焰中空气卷吸量多少<sup>[1]</sup>。由于碳烟生成和氧化的过程十分复杂,因此至今仍然未被很

好地理解和认识。对于碳烟形成原因及相关控制策略的研究,很大程度依赖于对火焰内部碳烟和其它组分的实时观测。近年来,国外大量的研究和应用结果均表明,以激光诱导荧光法(laser induced fluorescence, LIF)和激光诱导炽光法(laser induced incandescence, LII)为代表的激光诊断技术,作为1种非介入式的光学手段,在不干扰燃烧的情况下测

收稿日期: 2008-01-22

基金项目: 中国博士后科学基金(20070410058)

作者简介: 何 旭(1976-),男,博士后,主要研究方向为发动机缸内工作过程激光诊断, E-mail: hhexxu@tsinghua.edu.cn。

量火焰中瞬态二维 PAHs 和碳烟分布,在碳烟机理研究领域具有其它技术无法替代的优势,越来越被人们重视<sup>[2]</sup>。为获得定量的碳烟体积浓度分数,需要对二维 LII 图像进行校准。早期多采用消光法或快速采样进行碳烟浓度标定<sup>[3,4]</sup>,促进了 LII 定量测试的发展。但消光法表示的是光程上的碳烟平均浓度,而实际碳烟在火焰中分布是不均匀的;快速采样对燃烧过程有一定影响,并且会混入杂质;这 2 种方法均存在一定的误差。文献[5]提出了新的标定方法:基于双色测温原理,采用不同的滤光片,获得不同波长上的炽光信号,基于这 2 个炽光信号的比值可以确定被激光加热粒子的温度和碳烟体积分数。该方法由于具有测试精度高、实现简单、可以在线进行标定等特点,得到迅速推广和应用,成为目前最热门的标定方法<sup>[6]</sup>。

本文制作了 1 个产生层流扩散火焰的液体燃烧器,搭建了 LIF 和 LII 测试系统,根据双色 LII 原理对二维 LII 图像进行校准<sup>[5]</sup>,定量获得火焰中二维空间瞬态碳烟浓度分布。通过这套系统在燃烧器上对普通柴油和生物柴油等不同燃料的层流扩散火焰中的 PAHs 和碳烟浓度分布进行测试,验证了该系统的有效性,为下一步在光学发动机上应用打好基础。

## 1 激光诱导荧光/炽光法基本原理

LIF 是 1 种高灵敏度的浓度检测的方法,其原理是当特定波长的激光射入测试区域,被测物质的原子吸收光子能量而激发到高能态,但高能态十分不稳定,在从高能态返回基态过程中,就会发出荧光,其强度与该物质的浓度成正比。PAHs 受 266 nm 的紫外激光激发后,即可发出荧光信号。

LII 的基本原理是将脉宽为几纳秒的激光片光射入碳烟粒子云团,在激光照射下碳烟粒子的温度迅速上升(4000 K 左右),发出与升高温度相对应的黑体辐射,辐射信号则通过滤光片由增强型 ICCD (intensified charge coupled device) 记录,其大小与激光片光内的碳烟体积分数成正比,因此可以反映碳烟的二维浓度分布。该方法最吸引人的特点是粒子经过激光加热后,产生的辐射远高于周围火焰的辐射,这样可以有效地剔除火焰自身的背景干扰,有利于对燃烧过程中的粒子进行研究,探寻燃烧和污染物的生成机理。

文献[7]提出了校准 LII 系统的新方法,将 LII 信号强度、碳烟粒子温度和碳烟体积分数相关联,通过双色法测出被激光片光加热的碳烟粒子温度,可

以获得绝对的碳烟体积分数。其基本原理为

$$\frac{\lambda E(m_{\lambda})}{\lambda E(m_{\lambda}) \exp \left| -\frac{hc}{kT_p} \right|} - \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \left| = \frac{V_{\text{EXP1}}}{V_{\text{EXP2}}} \frac{\eta_2}{\eta_1} \frac{G_{\text{EXP2}}}{G_{\text{EXP1}}} \quad (1)$$

$$f_v = \frac{V_{\text{EXP}}}{\eta_{\text{wb}} G_{\text{EXP}} \frac{12\pi c^2 h}{\lambda^6} E(m_{\lambda}) \exp \left| \frac{hc}{kT_p} \right| - 1} \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  和  $\lambda$  分别为 2 个探测波长;  $E(m_{\lambda})$  为碳烟吸收函数,在可见光和近红外区域内近似为常数,本文  $E(m_{\lambda})$  在 2 个波长下均取 0.3<sup>[6]</sup>;  $c$  为光速;  $h$  为普朗克常数;  $k$  为玻耳兹曼常数;  $T_p$  为碳烟粒子温度; 探测系统在增益  $G_{\text{EXP}}$  下,获得 LII 信号强度为  $V_{\text{EXP}}$ ;  $f_v$  为测试区域内碳烟粒子云的碳烟体积分数;  $\eta$  为该系统的校准因子,需事先对 1 个已知光谱辐射强度的发射源,如标准钨带灯或者黑体炉来进行校准获得<sup>[7]</sup>;  $w_b$  为激光片光厚度。

## 2 试验装置与方法

LII 试验系统如图 1 所示。其中,激光器为法国 Quantel 公司的 Nd:YAG 激光器 Brilliant B,可以发出波长为 532 nm,脉宽 7 ns,频率 10 Hz 的激光脉冲。LII 信号产生的原因是碳烟粒子被激光加热,因此对激光能量的选择要合适,激光能量太小不足以加热粒子;太大则造成碳粒汽化,碳烟体积浓度降低,炽光信号衰减。由此可见,LII 测试系统存在 1 个最佳激光能量范围,在这个范围内,炽光信号不依赖于激光能量,仅与碳烟浓度有关。试验发现,当激光能量在 90~170 mJ 时,LII 信号有 1 个相对稳定的区域,在这个区域中 LII 信号对激光能量不是十分敏感,降低了能量对炽光信号的干扰,因此试验选用能量为 110 mJ。直径为 9 mm 的光束通过几个透镜组展成均匀厚度的片光(1×50 mm),射入测试区域。燃烧过程中的碳粒、燃烧器的金属壁面等对激光产生的散射效应,燃烧过程中的产物如 PAHs 等在激光诱导作用下产生的荧光,都会对炽光信号产生干扰。因为散射主要发生在几个纳秒的激光脉冲内,被诱导出来的荧光衰减很快,生存周期仅为 20 ns,而炽光信号可以持续数百纳秒,因此可将 ICCD 的采集时间推迟,减少散射光和荧光的干扰。在此基础上,配以合适的滤光片,选择短的曝光时间,可以进一步抑制背景火焰影响,提高信噪比。试验采用美国 PI 公司的 ICCD,延时为 40 ns,门宽 20 ns,滤光片的中心波长 590 nm,半高宽为 30 nm。LIF 测试系统和 LII 系统基本一致,只要将激光波长切换到 266 nm 即可。进行 LIF 测试时 ICCD 不需要延时,门宽为 20 ns,滤光片波长为 400~450 nm。

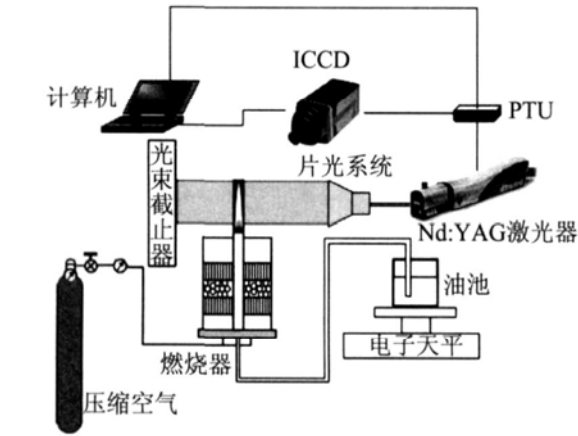


图1 LII 试验系统图

应用于燃烧机理研究的扩散火焰一般使用气体燃料,液体燃料的燃烧器研究还很少。本文试验采用燃油在常压下的层流扩散火焰。图2为液体燃烧器装置简图。它的设计基于油灯原理,燃烧器中心是直径为8 mm 的钢管,用软管与油箱相连,二者液面等高。燃烧需要的燃油蒸气通过浸在钢管内的烧结金属提供。压缩空气通过燃烧器内的玻璃珠和蜂窝陶瓷,在火焰周围形成向上运动气流,保持火焰稳定。火焰的高度通过调节烧结金属露出的长度或者液面的高低来实现。电子天平监控燃油质量并通过质量损失计算出燃油的消耗情况。燃油流速为3.57 mg/s,火焰高度为50 mm,空气流量为6.2 m<sup>3</sup>/h。试验采用4种燃料,分别为B0、B20、B50和B100,其特性如表1所示。其中,柴油为当地购买的普通商业0<sup>#</sup>柴油,满足欧-II排放标准,生物柴油以菜籽油为原料制备。

表1 试验燃料特性

燃料	B0	B20	B50	B100
柴油/(体积)%	100	80	50	0
生物柴油/(体积)%	0	20	50	100
密度/g·cm <sup>-3</sup>	0.830	0.839	0.852	0.873
热值/kJ·kg <sup>-1</sup>	43 140	42 476	41 505	39 950
含氧量/(重量)%	0	2.2	5.41	10.56

LII 标定系统的探测器是由2个光电倍增管(photo multipliers tubes, PMT)组成,采用日本滨松公司的6780-20,响应时间小于1 ns。从火焰测试区域发出的LII信号通过透镜成像在针孔光阑上,针孔限制了测试区域为圆柱形,直径为1 mm,高度为片光厚度。针孔位于1个直径为6 mm 的凸透镜的焦点上,LII信号通过透镜形成直径为6 mm 的光束,再经过1个二色镜分为2束,分别投射到2个PMT的阴极上。每个PMT前面都安装1片滤光片,中心波长分别为425、590 nm,半高宽为50、30 nm。

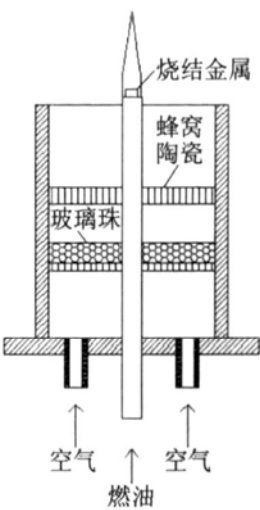


图2 液体燃烧器示意图

整个系统被装配在金属盒子内,安装在二维平移台上,可以进行水平方向上的扫描,测试不同的火焰区域碳烟体积分数。

3 试验结果与讨论

采用LIF测试得到4种燃油的PAHs浓度分布如图3所示。图像灰度用任意单位表示(arbitrary unit, A.U.)。由图3可见,PAHs浓区主要分布在火焰根部,随着生物柴油掺混比例的增加,PAHs的最高浓度和浓区分布范围呈现出下降的趋势。PAHs受532 nm波长的激光激发后产生光谱范围很宽的荧光,而且随着激光能量的增加而加强,很难将它从LII信号中消除,这对标定结果产生很大的影响。因此,选择测试点距离燃烧器出口高度为25 mm(height about burner, HAB),在这里PHAs已经基本消失了。

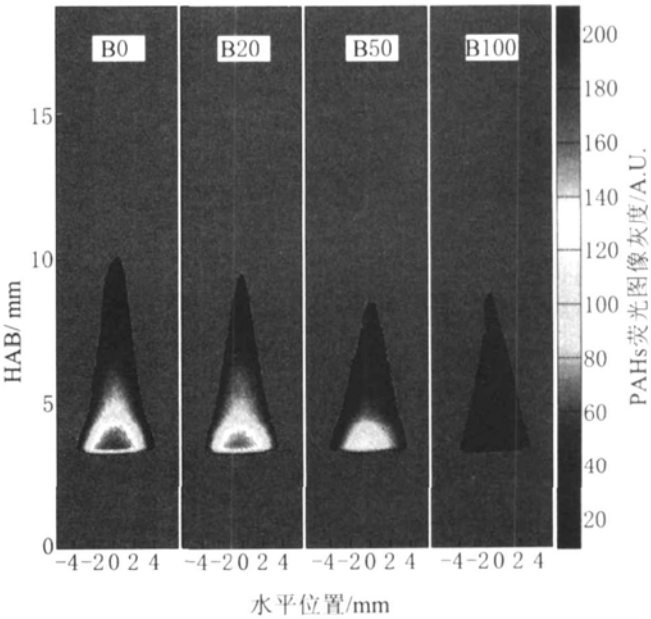


图3 PAHs 荧光强度分布对比

在燃烧器上对 B100 扩散火焰的炽光信号进行标定。标定系统的水平扫描步长为 0.4 mm, 测试点为直径 1 mm 的圆形区域。当 HAB= 25 mm, 在水平位置为 0 点上 PMT 采集到 2 个波长的 200 个 LII 信号, 平均后如图 4 所示, 所对应的粒子温度曲线如图 5 所示。

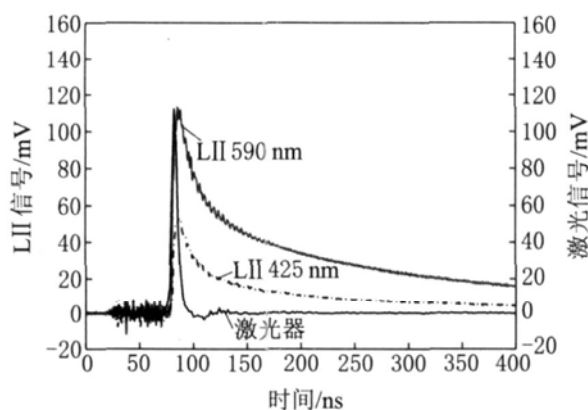


图 4 不同波段上 LII 信号随时间变化

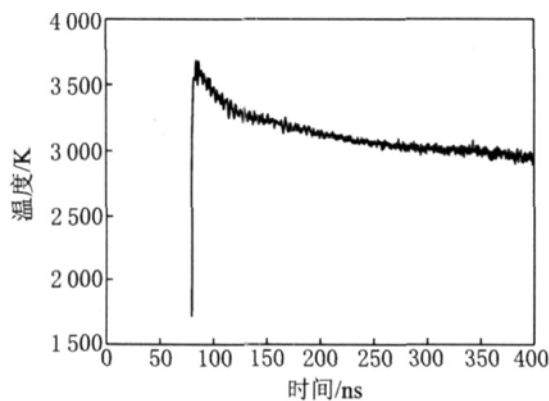


图 5 碳烟粒子温度随时间变化

由图可见, 以激光器给出的外部触发电平为时间 0 点, 在 30 ns 附近, 信号有 1 个很大的干扰, 这是由激光器的 Q 开关造成的。光电二极管 (thorlabs DET10A) 测得激光脉冲的发生位置大约在 70 ns 左右。在激光脉冲内, LII 信号迅速加强达到顶峰, 这是因为激光脉冲内粒子吸收激光能量迅速加热发出强烈的 LII 信号, 峰值温度达到 3688 K, 通过这个峰值温度即可计算出碳烟体积分数。激光加热结束后, 粒子开始冷却, 粒子温度开始衰减, LII 信号下降, 由于不同尺寸的粒子冷却速度不一样, 所以通过粒子温度的衰减曲线可以进行粒径的测试, 这也是 LII 测试技术的另一个应用发展方向<sup>[8]</sup>。但即使采用 200 组信号进行平均来计算碳烟温度曲线, 仍然显示了很大的噪声, 尤其在后面 LII 信号强度很低时, 信噪比进一步降低。由于温度和碳烟浓度为指数关系, 错误的温度会导致浓度出现较大偏差。因

此提高信号的灵敏度, 获取高质量的温度衰减曲线, 是 LII 测试技术的关键。

将 ICCD 拍摄的二维生物柴油火焰 50 幅取平均, 获得碳烟浓度的相对分布。将校准点的绝对碳烟体积分数与 ICCD 拍摄的 LII 二维图像中相应位置的灰度进行映射匹配, 即可获得二维的定量结果。匹配后的结果如图 6 所示。图 6 中, 曲线代表二维图像中 HAB= 25 mm 处的碳烟分布曲线, 圆点表示校准点, 二者基本吻合。由于火焰边缘信噪比不好, 造成火焰边界失真, 给标定带来一定的误差。因此需要进一步优化系统来提高信噪比。此外可通过增加测量点提高测量精度。

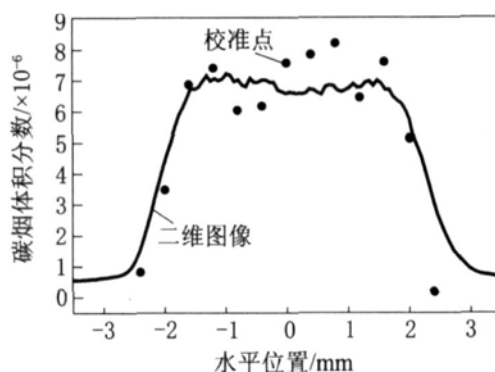


图 6 碳烟体积分数校准

对 4 种燃料的火焰进行 LII 测试, 最终获取的碳烟浓度分布如图 7 所示。

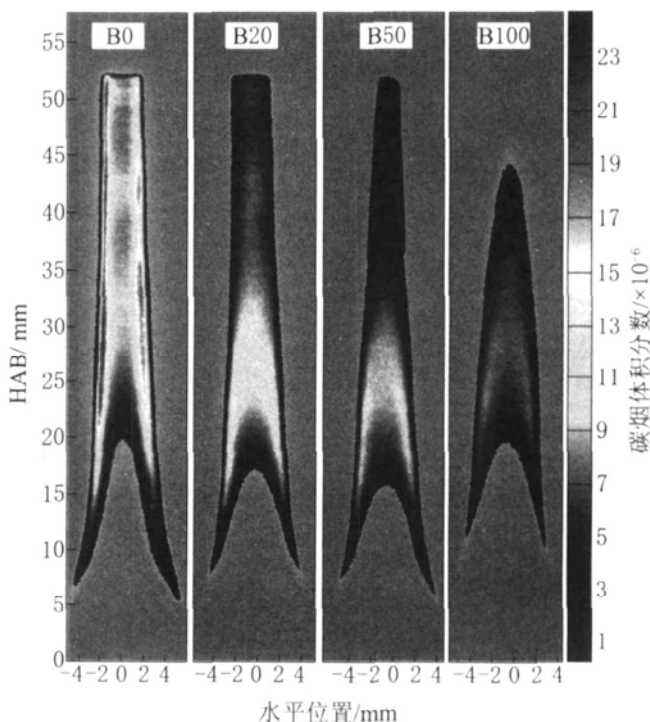


图 7 碳烟浓度分布对比

由图 7 可见: B0 的碳烟体积分数最浓区域分布在火焰的两翼, 而其它燃料则分布在火焰中部。B0 火焰中 2 条对称分布的高浓度碳烟区域说明火焰正处于发烟状态, 高浓度的碳烟未被氧化就直接从火焰顶端逸出, 所以碳烟浓区呈现出开放的状态; 而其它火焰的碳烟在竖直方向上先是逐渐变浓, 在中部达到最大值, 然后逐渐氧化, 碳烟浓度降低, 最后排放到大气之中, 所以碳烟浓区呈现出闭合的状态。B0 火焰中最大碳烟体积分数为  $22.4 \times 10^{-6}$ , 随着生物柴油的增加, 碳烟最高浓度逐渐降低, 分布面积逐渐缩小。B100 火焰中最大碳烟体积分数为  $8.3 \times 10^{-6}$ , 并且碳烟浓区的分布范围也缩小很多。

通过 LIF 和 LII 测试所观察到的现象可以通过以下原因来解释: 第一, 生物柴油的主要成分为甲酯, 基本不含多环芳香烃, 而柴油一般含有 10% 左右的多环芳香烃, 是碳烟生成的前驱物, 一般燃料中多环芳香烃含量愈高, 生成的碳烟越多, 所以生物柴油火焰中的 PAHs 浓度远远低于柴油, 因此碳烟生成比普通柴油低; 第二, 生物柴油是含氧燃料, 随着生物柴油比例增加, 氧含量也随之增加。碳烟生成的条件是高温缺氧, 氧原子一定程度上改善了这种状况, 减少了碳烟的生成, 同时氧原子在燃烧过程中起到了助燃作用, 特别是在燃料浓度高的区域, 缓解了扩散火焰中部缺氧状况, 促进了扩散燃烧的进行, 加速已经生成的碳烟的氧化, 从而降低了最终的碳烟排放。LIF 和 LII 的测试结果验证了该套激光测试系统的有效性。

#### 4 结论

(1) 建立了 LII 定量测试系统, 根据双色 LII 原理对二维 LII 图像进行了校准, 定量获得二维空间瞬态碳烟浓度分布。将 LII 系统对生物柴油扩散火焰中的碳烟浓度进行测试, 发现标定点和映射后的二维图像之间碳烟浓度特性基本吻合, 验证了该系统的有效性。

(2) 纯柴油火焰处于发烟状态, 其碳烟浓区呈

开放状态分布在火焰两翼; 当掺入 20% 的生物柴油后, 碳烟分布形态发生了明显变化, 碳烟浓区出现在火焰中部、呈现闭合状态, 如果进一步提高生物柴油掺混比例, 则碳烟最高浓度将随之降低, 分布面积随之缩小, B100 的碳烟最高浓度仅为 B0 的 37%。

(3) 随着生物柴油掺混比例的提高, 多环芳香烃的最高浓度和浓区分布范围均呈现为下降的趋势。

#### 参考文献:

- [1] Dec J E. A conceptual model of DI diesel combustion based on laser-sheet imaging[C]. SAE 970873.
- [2] Zhao H, Ladommatos N. Engine combustion instrumentation and diagnostics[M]. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2001.
- [3] Greis A E, Grünefeld G. Quantitative measurements of the soot distribution in a realistic common rail D. I. diesel engine [C]. 11th Int. Symposium on Applications of Laser Techniques to, Fluid Mechanics, Lisbon, 2002.
- [4] Axelsson B, Collin R, Bengtsson P E. Laser-induced incandescence for soot particle size and volume fraction measurements using on-line extinction calibration[J]. Applied Physics, 2001, 72: 367-372.
- [5] Smallwood G J, Clavel D, Gareau D. Concurrent quantitative Laser-induced incandescence and SMPS measurements of EGR effects on particulate emissions from a TDI diesel engine[C]. SAE 2002-01-2715.
- [6] Schulz C, Kock B F, Hofmann M. Laser induced incandescence: recent trends and current question [J]. Applied Physics, 2006, 83: 333-354.
- [7] Snelling D R, Smallwood G J, Liu F S. A calibration-independent laser-induced incandescence technique for soot measurement by detecting absolute light intensity[J]. Applied Optics, 2005, 44(31): 6773-6785.
- [8] Boiarciuc A, Foucher F. Soot volume fractions and primary particle size estimate by means of the simultaneous two-color time-resolved and 2D laser-induced incandescence[J]. Applied Physics, 2006, 83: 413-421.

(编辑: 李 贞)