

文章编号: 0258-7025(2002)06-0561-04

Nd:YAG 激光器在柴油机喷雾测量中的应用

汪 洋¹, 胡春明², 苏万华¹, 谢 辉¹

(天津大学¹ 内燃机燃烧学国家重点实验室, ² 天津内燃机研究所, 天津 300072)

提要 开发出了一套使用 532 nm Nd:YAG 激光器作为激光源, 用于柴油喷雾浓度及粒径测量的测试系统, 具有测量环节少、精度高, 可以测量真实柴油喷雾的特点, 使用该系统, 获得了柴油撞壁喷雾的浓度及粒径分布图, 发现了喷雾内部存在拟序结构。

关键词 Nd:YAG 激光器, 喷雾, 测量

中图分类号 TN 249 **文献标识码** A

Application of Nd:YAG Laser on Visualization of Diesel Spray

WANG Yang¹, HU Chun-ming², SU Wan-hua¹, XIE Hui¹

(¹NECL, ²Tianjin Internal Combustion Engine Research Institute, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract A new system based on 532 nm wavelength Nd:YAG laser, which is used in measuring concentration and drop diameter of diesel spray, has been developed in this paper. It has some advantages such as less configuration, high precision, and capacity in measuring real diesel spray. The 2-D concentration and drop diameter distribution is visualized by this system, and the approach correlation structure inside the spray is also discovered.

Key words Nd:YAG laser, spray, measurement

1 引 言

柴油机喷雾是一个复杂过程, 具有瞬态、两相流、受限的特点, 在计算机模拟技术十分发达的今天, 喷雾模型仍需借助喷雾实验的一些研究结果, 而喷雾实验研究的进展在很大程度上依赖于喷雾测量技术的进步。

从 80 年代开始, 激光诊断技术逐渐用于喷雾的测量, 由于具有非接触、快速响应的优点, 逐渐代替了接触测量技术。1983 年 L. A. Melton^[1]报道了用激光诱导荧光法测量喷雾浓度场的方法, 1993 年, 文献^[2]报道了利用喷雾的激光诱导荧光和散射光图像测量喷雾粒径分布的方法。之后的许多研究^[3,4]所使用的方法基本上沿用 L. A. Melton 创立的方法, 它的主要技术特点是: 1) 使用添加了荧光剂(二甲基对苯二胺 TMPD)的十六烷模拟实际柴油; 2) 使用紫外光波段的激光诱导光源(准分子激光器、双倍频 YAG 激光器); 3) 在照相机或 CCD 前

加接像增强器。作者在文献^[5~7]中将可见光波段的激光器 532 nm Nd:YAG 用于柴油机喷雾测量。本文将系统地介绍该激光器在柴油机喷雾浓度、粒径测量中的应用及主要研究结果。

2 基本原理与实验装置

2.1 喷雾浓度及粒径分布测量原理

某一些分子在一定波长的光波激发下, 在短时间(约 10^{-8} s)内会辐射出波长比入射光更长的光波, 这叫荧光现象。利用荧光强度与荧光物质的浓度成正比的特性, 可以测量燃油喷雾的体积浓度。由于柴油机喷雾属于瞬态喷雾, 最好的诱导光源是脉冲激光。由于激光诱导的荧光脉冲相对于喷雾速度几乎是“瞬间”的, 因此可以获得喷雾某一时刻的浓度分布。但是由于激光光片在穿透喷雾体时光强会衰减, 同时荧光图像在被 CCD 接受前也会被喷雾体衰减, 喷雾体浓度具有不对称和不均匀性, 这两种

收稿日期 2001-09-24; 收到修改稿日期 2002-02-01

作者简介 汪洋(1961.1—), 男, 浙江省临海市人, 副教授, 博士, 主要从事内燃机燃烧过程及内燃机电控技术研究。

衰减作用都是无法修正的,因此激光诱导荧光法只能半定量地测量喷雾浓度(目前还没有能定量测量喷雾浓度分布的方法)。

当喷雾受到激光照射时,会同时产生米氏散射现象,散射光强度具有与喷雾微体积内的粒子表面积浓度成正比的特性。根据荧光与散射光的特性,可以发展出测量喷雾素特(Sauter)平均直径 SMD 的方法,图 1 是测量原理图,计算公式如下(详细推

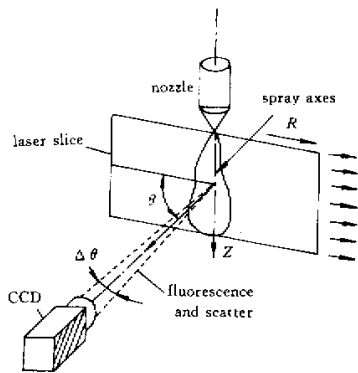


图 1 喷雾浓度及粒径测量原理图

Fig.1 Sketch map of the measuring system

导见文献[2,6]):

平均直径 SMD 定义公式为

$$\text{SMD} = \frac{\sum N_i d_i^3}{\sum N_i d_i^2} \quad (1)$$

其中, SMD 为油滴素特平均直径,单位 μm ; d_i 为油滴群中第 i 组油滴的直径,单位 μm ; N_i 为直径为 d_i 的油滴个数。

粒径测量使用的公式为

$$\text{SMD} = K \frac{i_f(r, z)}{i_s(r, z)} \quad (2)$$

其中, K 为由喷雾的荧光效率、散射系数、光学系统配置等因素决定的系数,对于常规喷射系统的喷雾,粒径主要分布在大于 $5 \mu\text{m}$ 的范围内, K 近似为常数; $i_f(r, z)$ 为喷雾体坐标 (r, z) 处聚焦于 CCD 阵列的荧光强度; $i_s(r, z)$ 为喷雾体坐标 (r, z) 处聚焦于 CCD 阵列的散射光强度。

在喷雾粒径测量中,喷雾对光片及图像光强的衰减作用在运算中相互抵消,可以获得定量的测量结果。

2.2 柴油的荧光特性

大部分物质都存在吸收光谱,但并非这些物质都能发射荧光,荧光通常发生于具有刚性平面结构

的 π -电子共轭体系的分子中^[8]。柴油的主要成分是烷烃,如十六烷、癸烷等,还有少量烯烃,这些分子结构都不具备荧光特性,为了使被测的燃油产生荧光现象,通常的做法是在十六烷中添加荧光添加剂(萘, TMPD)模拟真实柴油,这些物质的激发光光谱与荧光光谱都处于紫外波段,因此必须使用紫外激光器,而且 CCD 摄像头前必须接图像增强器。作者在研究中发现^[6~8],当普通 0 号柴油在 532 nm 的光波激发下,可以产生峰值波长为 570 nm 的荧光,其光谱如图 2 所示,研究表明普通柴油产生荧光的物质是其中的改性添加剂,具体成分不明。有了这个发现,就可以使用单倍频的 532 nm Nd:YAG 激光器作为激发光源,同时由于喷雾的散射光与荧光都处于可见光波段,可以直接用 CCD 摄像头,透过不同的滤光片,分别接收喷雾的荧光与散射光图像,无需像增强器,这不但提高了测量精度,还降低了系统的成本。另外本系统可以测量真实柴油的喷雾。

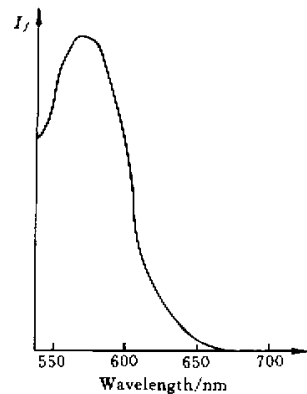


图 2 0 号柴油的荧光光谱

Fig.2 Fluorescence spectrum of 0# diesel fuel

2.3 实验装置

实验所用的激光器波长为 532 nm ,光束直径为 8 mm ,脉冲能量为 70 mJ 。棱镜组将圆柱激光束变成厚度小于 0.5 mm 的激光光片。为了确保能量的均匀性,在接近测量区,有一 $0.5 \text{ mm} \times 38 \text{ mm}$ 的窄缝,用于光片的整形。整个实验系统的原理如图 3 所示。燃油喷射装置的核心部件是自行开发的共轨式电控喷射器,其喷射动作受驱动信号控制,最高喷射压力可达 145 MPa 。He-Ne 激光器、光电三极管、整形电路用于产生始喷信号,作为控制激光器触发延时的时间基准,始喷信号与激光发射之间的时间,

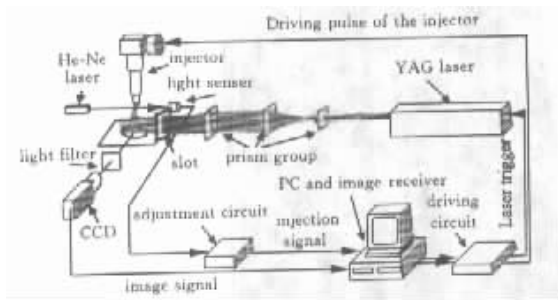


图 3 喷雾测量系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of the measuring system

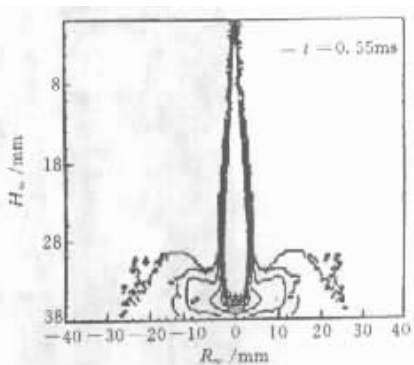


图 4 垂直撞壁喷雾浓度分布图(95 MPa)

Fig.4 Concentration distributing of the impinging spray (95 MPa)

就是喷雾图像对应的喷射时刻。利用 CCD 的帧同步信号,可以使激光发射时刻控制在 CCD 的场积分时间区域内。微机用于图像采集、处理、喷射器及激光器控制。

3 实验结果

3.1 柴油喷雾浓度场的测量

由于使用光片作为激发光源,喷雾的荧光图像反映的是喷雾某一截面的浓度分布,图 4 是柴油喷雾垂直撞击壁面时的浓度场分布(以等高线形式表示,越靠近中间浓度越浓),测量条件:光片沿喷雾的轴线贯穿喷雾体。喷射参数:喷射时刻为 0.55 ms,喷射压力为 95 MPa,喷孔直径为 0.27 mm,喷孔长度为 1.5 mm,撞壁距离 H 为 38 mm。图 5 是以三维坐标形式表示的撞壁喷雾的相对浓度分布,高度方向代表相对浓度,是 20 次喷射的平均结果,喷射压力为 65 MPa 其他条件同图 4。从图 4 5 可以发现从喷孔到壁面的浓度变化规律:刚脱离喷孔时浓度急剧耗散变稀,之后变化缓慢,到达距离壁面 2~3 mm 时,再一次急剧耗散变稀。

喷雾属于湍流,或叫紊流,意思是它的内部结构是杂乱无章的。但是深入细致地观察喷雾的荧光图像,却发现喷雾体内部明显存在一种拟序结构,它的结构形式可以归纳为 4 种:1)细条状,图 6(a);(2)辫子状,图 6(b);(3)树枝状,图 6(c);(4)带状,图 6(d)。通过实验还发现,这种拟序结构与喷射压力存在密切关系:随着喷射压力的提高,拟序结构的形式由带状向细条状转变,即由简单向复杂转变。这一发现说明喷雾虽然属于湍流运动,但在深层次上存在一种有序的结构与规律,如果掌握这种规律,就可以将喷雾的混合机理研究向深层次推进一步。

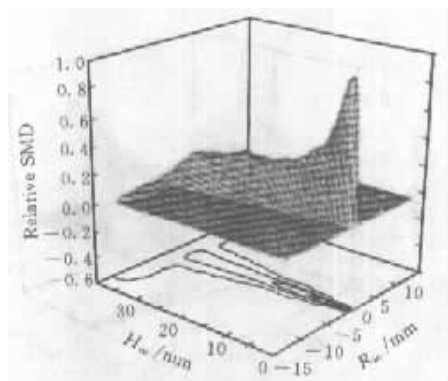


图 5 垂直喷雾的浓度分布 (20 次平均,喷射压力 65 MPa)

Fig.5 Concentration distributing of the impinging spray (average of 20 times, 65 MPa)

3.2 柴油喷雾的粒径分布

测量柴油喷雾的常用方法是基于粒子夫朗和费衍射原理的粒子测量仪,如马尔文粒子测量仪,但这种仪器只能测量喷雾周围粒子浓度较稀的区域,而且测量值反映的是探测光束通过途中累计的平均粒径。本文使用的方法能得到喷雾某一截面的全场粒径分布。图 7 是垂直撞壁喷雾的测量结果,喷射参数:喷孔直径 0.27 mm,喷孔长度 1.5 mm,喷射压力 65 MPa,撞壁距离 H 为 38 mm。从图中可发现撞壁喷雾粒径分布存在如下规律:

- 1) 喷雾轴线方向的分布规律:从喷孔到撞击壁面,粒径由大变小,接近壁面时又变大。
- 2) 喷雾的径向分布规律:中间大,四周小。
- 3) 在撞壁点附近,出现粒径分布的尖峰,表明此处油滴重新聚集成大粒子。

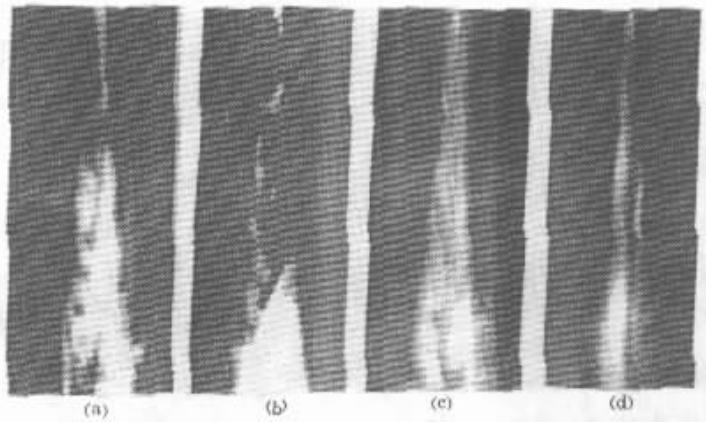


图 6 喷雾内部的相干结构

Fig.6 Approach correlation structure inside the spray

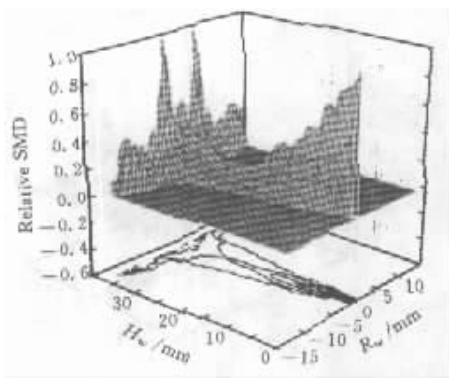


图 7 垂直撞壁喷雾的相对 SMD 分布

Fig.7 SMD distributing of the impinging spray
(average of 20 times, 65 MPa)

以上测量结果对加深喷雾认识十分有利,比如关于喷雾的径向分布,一直存在两种相反认识:一部分学者认为大粒子油滴分布在喷雾的中心;另一部分学者却认为,大粒子油滴分布在靠近外围的区域,这种矛盾的认识源于测量技术的落后,本文的试验结果有力地支持了前一种说法。

4 结 论

1) 当普通 0 号柴油在 532 nm 的光波激发下,可以产生峰值波长为 570 nm 的荧光;

2) 开发出一套使用 532 nm Nd:YAG 激光器作为激光源,用于柴油喷雾浓度及粒径测量的测试系统,该系统具有测量环节少,精度高,可以测量真实

柴油喷雾的特点;

3) 获得了柴油撞壁喷雾的浓度及粒径分布图,发现了喷雾内部存在拟序结构。

参 考 文 献

- 1 L. A. Melton. Spectrally separated fluorescence emissions for diesel fuel droplets and vapor [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(14): 2224 ~ 2226
- 2 Y. K. Nan, *et al.*. Study on measuring the average droplets diameter in non evaporative spray by using scatter and fluorescence method [C]. *Transaction of Japanese Mechanism Engineering (B)*, 1993, **59**(568): ~
- 3 M. E. A. Bardsley, O. G. Felton, F. V. Bracco *et al.*. 2-D visualization of liquid and vapor fuel in an I. C. engine [S]. SAE 880521
- 4 Jiro Sanda, *et al.*. Visualization of evaporative diesel spray impinging upon wall surface by complex fluorescence method [S]. SAE 920578
- 5 Wang Yang, Su Wanhua, Si Shaoshi. New method used in measuring the SMD distributing in diesel spray [J]. *Transaction of CSICE (内燃机学报)*, 1996, **14**(3): 221 ~ 228 (in Chinese)
- 6 Wang Yang, Su Wanhua, Si Shaoshi. Visualization of fuel spray impinging upon wall surface by fluorescence method (1) [J]. *Combustion Science and Technology (燃烧科学与技术)*, 1996, **2**(4): 329 ~ 341 (in Chinese)
- 7 Wang Yang, Su Wanhua, Si Shaoshi. Visualization of fuel spray impinging upon wall surface by fluorescence method (2) [J]. *Combustion Science and Technology (燃烧科学与技术)*, 1996, **2**(4): 342 ~ 348 (in Chinese)
- 8 Chen Guozhen ed. *Fluorescence Analysis Method* [M]. Xiamen: Science Publishing Company, 1975. 4 (in Chinese)