

激光瑞利散射法在火焰温度测量中的应用*

北京航空航天大学 曹明骅**

德国宇航院燃烧物理化学研究所 W Meier

【摘要】 近年来为了进行燃烧诊断, 发展了一些成功的激光测试技术, 由于瑞利散射法(LRS)具有许多很有价值的特点, 因此在紊流燃烧研究中愈来愈引起人们的注意。通过证实瑞利散射可以用来测量火焰温度。本文阐述了瑞利散射原理、应用中问题和火焰温度的实际测量。

主题词: 温度测量 激光测量方法 燃烧

分类号: TN206 O643.21

1 激光瑞利散射测量原理

瑞利散射(简称 LRS)是光子和与光波波长相比要小的粒子通过弹性碰撞而进行的散射。它的散射光强度和激光功率、气体分子数密度以及气体瑞利有效散射截面成正比:

$$I = CI_L N \Omega (d\sigma/d\Omega) \quad (1)$$

式中 I_L 为起始激光强度, N 为气体分子数密度, Ω 为聚焦光学的立体角, l 取样长度, C 常数。

当散射光检测器安放在激光传播方向的垂直平面内, $(d\sigma/d\Omega)^{[1]}$ 为:

$$d\sigma/d\Omega = [2\pi^2(n_i - 1)^2]/(N_o\lambda^4) \quad (2)$$

式中 n_i 是气体在标准状况下的折射指数, $N_o = 2.69 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 是 Loschmidt 数, λ 是波长, 单位为 cm。气体混合物的有效瑞利微分截面是气体摩尔百分数 x_i 与散射截面乘数之和, 因此瑞利散射强度^[2]

$$I = CI_L N \Omega \sum_i x_i \left(\frac{d\sigma_i}{d\Omega} \right) \quad (3)$$

对于理想气体混合物, 根据理想气体状态方程得到 $T = PA_o/NR$ 和 $\rho = MP/RT$, A_o 为阿佛加德罗常数, M 为介质平均分子量。如果用注角 s 代表参改状态, 则由(3)式可分别导出:

$$\frac{T}{T_s} = \frac{P}{P_s} \cdot \frac{I_s}{I} \cdot \sum_i x_i \left(\frac{d\sigma_i}{d\Omega} \right) \left/ \left[\sum_i x_i \left(\frac{d\sigma_i}{d\Omega} \right) \right]_s \right. \quad (4)$$

$$\frac{\rho}{\rho_s} = \frac{M}{M_s} \cdot \frac{I_s}{I} \cdot \left[\sum_i x_i \left(\frac{d\sigma_i}{d\Omega} \right) \right]_s \left/ \sum_i x_i \left(\frac{d\sigma_i}{d\Omega} \right) \right. \quad (5)$$

从式(4)和式(5)中不难看出: 火焰温度 T 和混合气密度 ρ 均可直接通过总的瑞利散射光强的测量分析整理中得到。

此外, 从上述分析中还可看到: 瑞利散射光强度的相对量变化主要是由于气体温度和混合

1995 年 1 月收到; 1995 年 7 月收到修改稿。 本文系德国联邦科技部部长资金资助项目

** 北京航空航天大学热动力研究所 100083

气化学成份变化所造成。由于瑞利散射是没有频移的弹性散射,因而从瑞利散射信号强度的分析中不能直接得到有关化学成份浓度方面的信息。虽然人们可通过选择合适的燃料成份,使其反应物、中间媒介物和生成物的瑞利散射有效散射截面变化尽量减少到某一程度,从而得到粗略的火焰温度。然而,根据化学动力学分析:一定化学当量比下的某一种燃料燃烧,在绝热条件下,其燃烧温度和化学反应成份有着一定的关系,作者对氢与空气预混火焰,考虑以下4个主要化学反应过程,对 H_2O 、 N_2 、 O_2 、 H_2 、 O 、 H 和 OH 等7种化学成份进行计算分析,将瑞利散射截面变化合并到数据处理过程中,并与根据(4)式得出的火焰温度进行反复迭代数值处理,最后同时得出比较精确的火焰温度和所对应的化学成份浓度。所考虑的4个主要化学反应过程为: $\text{O}_2 + \text{H} = \text{OH} + \text{O}$; $\text{H}_2 + \text{O} = \text{OH} + \text{H}$; $\text{H}_2 + \text{OH} = \text{H}_2\text{O} + \text{H}$; $\text{OH} + \text{OH} = \text{H}_2\text{O} + \text{O}$ 。

2 测量问题

2.1 颗粒引起的 Mie 散射干扰

作为弹性散射过程,对于 LRS 来说,由于颗粒引起的 Mie 散射光干扰是定量分析中遇到的一个主要问题。一般来说,不同尺寸的颗粒引起的 Mie 散射截面变化大约从 10^{-27} 到 $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sr}$,而 Rayleigh 散射截面大约为 10^{-27} 到 $10^{-28} \text{ cm}^2/\text{sr}$,即使对一个直径为 $1 \mu\text{m}$ 的粒子, Mie 散射截面在数量级上大约为氮分子 Rayleigh 散射截面的20倍。颗粒的瑞利散射截面不可能进行计算,因为它是随机的,而且它的作用是多方面的,特别是像烟尘颗粒,它不仅发生 Mie 散射,而且它还吸收起始激光和被散射光。另外,由液体燃料生成的液滴和燃烧生成的烟尘是和实验研究的流动状态有关,并且它取决于燃烧系统。

用来减少颗粒引起的 Mie 散射干扰有二种办法:一种是采用过滤器等各种可能的净化措施,尽量减少或避免颗粒在散射容积中的出现;另一种办法就是采用计算机软件,在瑞利散射信号处理过程中进行,清除它的干扰。由于前者不可能完全避免颗粒的出现,而后者是解决 Mie 散射干扰比较可行的办法。

Rayleigh 散射和 Mie 散射虽然都是弹性散射,但是二种散射过程存在着某些明显的不同特点,这就是被采用频率判据和振幅判据的理论基础。Mie 散射信号以高频、高脉冲强度迭加在较低强度缓慢变化的 Rayleigh 信号上,因此人们可以在它们之间辨别。Green^[3]通过仔细的研究提出了临界振幅判据。具有最大瑞利散射截面的混合物气体散射产生瑞利信号的最大振幅,当信号振幅超过这最大振幅时,此信号便不是由气体分子散射的瑞利信号,而是颗粒引起的 Mie 散射信号。将分子散射可能产生的最大信号振幅做为临界值,它可以通过单一气体的散射强度校正来确定,这样在信号数据处理过程中,如果发现超过此临界值,则将它从测量系列中清除。振幅过滤技术很容易被采用,但是它不能消除临界值以下的 Mie 散射干扰,因而人们又提出信号起始增涨判据等,它是基于颗粒 Mie 散射具有瞬变的特点。各种不同过滤方案的选择和它的合理应用主要取决于所要研究的对象和所要求达到的精度。减少 Mie 散射干扰是 LRS 技术中主要的问题也是最困难的问题。作者在德国宇航院燃烧物理化学研究所实验中采用的便是临界振幅过滤软件处理办法,效果很好。

2.2 背景光干扰

激光激发的 Rayleigh 散射,作为弹性散射过程,具有相同或不同波长的背景光,例如周围环境光、光学元件散射光、固体表面散射光和火焰辐射中的化学发光。

为了减少周围环境光的影响,实验尽可能在暗室内进行。而引起强烈背景光的主要因素是

与激光同时出现的来自于光学元件和其他固体表面散射的影响,将所有固体表面涂黑和采用窄带缝隙槽口都是很有效的方法。

火焰辐射主要包括化学发光排放和烟尘等其他粒子灰黑体连续光谱。化学发光的排放虽然在某些范围内也存在连续光谱的辐射,但是很侥幸,它是窄带。因为瑞利散射发生在单波长,因此可以通过激光波长的合适选择以及在检测器前方设置一个起始激光波长的窄带通道干扰过滤器来避免化学发光干扰。本文作者在所进行的实验研究中,采用了一台单色仪,以排除燃烧流动中可能出现的严重火焰发光干扰。另外检测器短的开启时间在减少化学发光干扰上也是有用的。然而,为了获得绝对的瑞利散射信号,还必需知道这些背景光的数量。

为了同时测量化学发光激发的背景光和瑞利散射光, Wakai 等人^[2]和 Barat 等人^[2]提出一个新颖的方法,以排除包括背景光和化学发光在内的噪音干扰。来自气体瑞利散射光保持起始激光束的垂直偏振,而噪音光是非偏振的。垂直偏振的瑞利散射光 I_R 被一个光束分光镜所反射,非偏振的噪音光 B 被相等地分成二个分量:垂直分量 B_s 和水平分量 B_p 。垂直偏振的瑞利散射光和噪音光的垂直分量被光电倍增管 PMT 2 所检测得到信号 S_2 ,而噪音光水平分量 B_p 被光电倍增管 PMT 1 所检测得到信号 S_1 ,然后通过减法器将噪音光的干扰阻尼掉,即 $S_2 - S_1$,从而得到单纯的瑞利散射光。

为了得出背景光的数量,作者通过接通与断开激光光源二次测量信号之差,来确定周围环境光之影响,还通过检测具有很小瑞利散射截面氮气的散射光来确定固体表面的影响。因为瑞利散射光强度取决于气体的瑞利散射截面,因此固体表面散射光强度可以通过对已知散截面的氮气和氮气的瑞利散射信号测量中分析计算得出。该法直接测量当地周围环境光和固体表面散射光等背景光,简易可行,效果很好。但要注意背景光必需在同样的实验条件下测量,而且要经常加以监测,特别是激光输出变化时要进行重测。

3 实验研究

3.1 实验设备

LRS 技术对一个开口场的应用避免了它的许多缺点而充分发挥了它的优点,可以说自由射流和开口火焰是 LRS 技术应用的最好选择。

它的光学通道容易,可以使它在一个低的背景光条件下进行测量,因而可以有一个高的信噪比(SN)。此外,由于是常压,因而数据分析整理也容易。另外,大多数自由散流和开口火焰的许多性能已被人们所掌握,因此自由散流和敞口火焰很合适用来评价激光测试系统。作者所用实验设备简图如图 1 所示。所用激光器为一单脉冲染料激光器(Candela, LFDL20),激光束波长为 488 nm,单脉冲功率为 2 J,重复频率为 10 Hz。瑞利散射信号通过具有 1800 l/mm 光栅的单色仪,被光电倍增管 PMT R928 所检测,其信号通过 Boxcar 积分器,并经 A/D 转换贮存在计算机中。为了进行 Rayleigh 散射实验研究,并与激光非相干反斯托克斯法(CARS)实验结

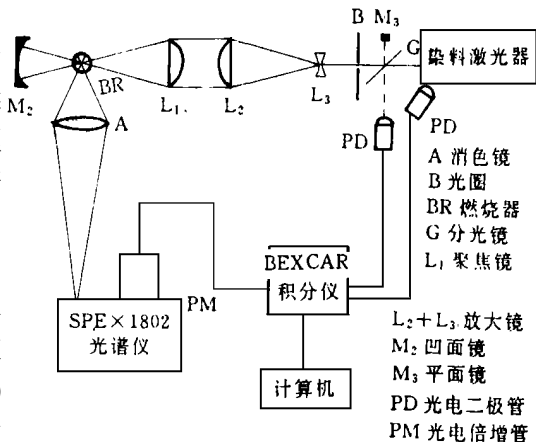


图1 实验设备简图

果相对比,选用了氢氧/空气预混层流火焰。

3.2 实验结果

在稳定的预混层流氢气/空气火焰燃烧室上进行了 LRS 实验,在不同氢气、空气流量和不同化学当量比 φ 下进行多次重复的测试,实验结果与 CARS 结果对比如图 2 和表 1 所示。

经过在不同激光功率输出、不同尺寸窄带缝隙槽口、不同过滤器和不同光电倍增管电压以及不同的周围环境光下大量测试,其结果表明: LRS 测试结果与 CARS 结果非常吻合。根据德国宇航院过去实验研究结果: CARS 测量误差为 2.5%。LRS 与 CARS 相比,绝大多数点均于小 1.5%,个别点也不超过 2.5%,相差稍多的是当量比 φ 为 0.5、氢气流量为 4.88 slpm 的那点,经查阅过去实验资料,是该点 CARS 测量误差稍大所造成。

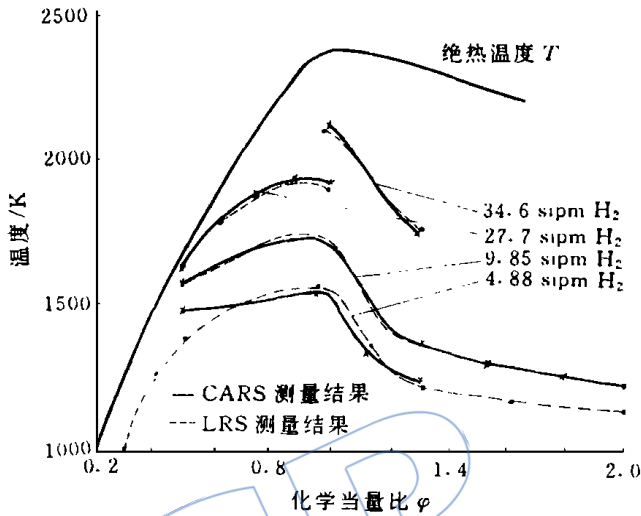


图 2 LRS 与 CARS 实验结果对比

表 1 LRS 与 CARS 实验结果对比表

		3	4	5	6	7	13	14	15	19	20	21
氢气流量 (slpm)		4.88	4.88	4.88	4.88	4.88	9.85	9.85	9.85	19.7	19.7	34.6
空气流量 (slpm)		23.3	16.7	11.6	9.66	8.93	46.9	23.4	18.0	78.2	46.9	82.4
化学当量比 φ		0.5	0.7	1.0	1.2	1.3	0.5	1.8	1.3	0.6	1.0	1.0
X_{H_2}	LRS	0	0	0.06	6.58	9.46	0	0.08	9.51	0	0	0
	CARS	0	0	0	6.49	9.43	0	0	9.43	0	0.24	0.59
X_{O_2}	LRS	9.53	5.57	0	0	0	9.50	0	0	7.46	0	0
	CARS	9.46	5.46	0	0	0	9.43	0	0	7.31	0.08	0.21
X_{N_2}	LRS	71.51	68.93	65.25	61.00	59.11	71.49	65.24	59.08	70.16	65.29	65.29
	CARS	71.4	68.8	65.3	61.1	59.1	71.4	65.3	59.1	70.0	65.2	65.0
X_{H_2O}	LRS	18.96	25.50	34.69	32.42	31.43	19.00	34.68	31.41	22.37	34.71	34.70
	CARS	19.0	25.6	34.7	32.5	31.4	19.0	34.6	31.4	22.3	34.4	33.8
温度 (K)	LRS	1393.2	1506.3	1565.5	1285.3	1245.7	1581.6	1721.7	1377.2	1778.1	1918.8	2121.3
	CARS	1484	1504	1547	1274	1249	1581	1728	1376	1773	1939	2123
	相对误差	6.12%	0.15%	1.20%	0.89%	0.26%	0.04%	0.36%	0.09%	0.29%	1.04%	0.08%

LRS 与 CARS 相比,不仅对实验设备条件要求低而且简易、快速,几分钟内便可得到测试

结果,而 CARS 信号的数据处理要复杂得多,耗时也长。基于 LRS 的简单快速和准确,现在德国宇航院燃烧物理化学研究所已将火焰温度的校准方法逐渐由原来的 CARS 改成 LRS。

4 结 论

为了研究紊流燃烧流场,人们提出并发展了许多激光非接触式测量技术,而此文中介绍的 LRS 技术是对这个领域的一个补充,它可能是用来测量某些反应流流场温度和密度等物理量的一个很有前途的方法。

LRS 测试系统简易,这使许多燃烧研究者能在短时间内以低的代价得到很有价值的实验数据。高的瑞利散射信号强度使它能对紊流脉动量进行检测,具有高的时间上、空间上的分辨率。脉冲的 LRS 技术还可以用来观察瞬时的火焰结构。将 LRS 技术与其他激光诊断技术相结合,可以进一步扩充它们的应用范围。

然而,如上所述瑞利散射是一个弹性散射,它不能直接提供有关组分的信息,并且受颗粒 Mie 散射、背景光散射和火焰辐射的干扰,这些缺点限制了它主要应用于某些燃料的干净流场测量,妨碍了它进一步应用于实际燃烧系统。但是,随着这项技术的改进和实验装置的精心安排,避免或克服它的缺点,那么 LRS 技术特有的许多优点就将更加突出,可以推断:只要巧妙地使用,LRS 技术将是对燃烧科学研究具有明显的贡献。

致谢 该研究工作由德国联邦科技部(BMFT)部长资金资助,属中国航空研究院(CAE)与德国宇航研究院(DLR)科技合作项目。研究中得到德国宇航研究院 W. Stricker 博士的大力支持与帮助,在此一并表示衷心地感谢。

参 考 文 献

- 1 Dibble R W, Hollenbach R E. Laser Rayleigh Thermometry in Turbulent Flames. Eighteenth Symposium (International) on Combustion, 1981
- 2 Zhao F Q, Hiroyasu H. The Applications of Laser Rayleigh Scattering to Combustion Diagnostics. Prog. Energy Combust. Sci. 1993, 19: 447- 485
- 3 Green H G. Developments in Signal Analysis for Laser Rayleigh Scattering. J. Phys. 1987, E. 20: 670- 676

(责任编辑 杨再荣)