

火箭燃气射流中颗粒衍射散射 对莫尔偏折图的影响

阎大鹏 贺安之 李开明 王海林 苗鹏程

(南京理工大学应用物理系, 南京 210014)

王亚伟

(江苏工学院, 镇江 212013)

提要 本文根据 Fourier 光学和衍射散射理论分析了火箭燃气射流中 Al_2O_3 颗粒衍射散射对莫尔偏折图的影响, 从实验上研究了 Al_2O_3 颗粒衍射散射造成莫尔条纹模糊的现象。实验结果表明, 对 Al 粉含量较低(3~8%)的固体推进剂, 莫尔偏折法能够用于其燃气射流场的显示。

关键词 衍射散射, 莫尔偏折图, 流场显示

The effect of diffracted scattering of particles in rocket exhausted jet on moire deflectogram

YAN Dapeng, HE Anzhi, LI Kaiming, WANG Hailin, MIAO Pengcheng

(Department of Applied Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210014)

WANG Yawei

(Department of Applied Physics, Jiangsu Institute of Technology, Zhenjiang 212013)

Abstract In this paper, the theory of Fourier optics and diffracted scattering are used to analysis the effect of diffracted scattering of particles Al_2O_3 in real rocket exhausted jet on the moire deflectogram. The phenomenon of moire fringes confusion caused by the diffracted scattering of particles Al_2O_3 is studied experimentally. The results show that for the solid propellant of containg Al powder of 3~8%, the flow field of its rocket exhausted jet can be visualized with moire deflectometry.

Key words diffracted scctering, moire deflectogram, visualization

1 引言

火箭燃气射流场的显示是涉及火箭发动机设计和提高射击密集度等的重要研究工作。然而由于火箭燃气射流场中存在严重的烟雾, 给流场显示工作带来很大困难。所以至今, 主要还

收稿日期: 1992年11月27日; 收到修改稿日期: 1993年5月20日。

· 本文工作为霍英东教育基金会青年教师基金资助项目的部分内容。

是利用阴影或纹影技术在风洞中模拟冷射流,或用液体和气体燃料模拟热射流进行流场显示实验^[1,2]。

本文从火箭燃气射流场中烟雾产生的来源分析了 Al_2O_3 颗粒是造成入射激光衰减的主要原因。用 Fourier 光学和衍射散射理论推导了颗粒衍射散射使莫尔条纹模糊的表达式。通过几种不同配方的固体推进剂,利用激光莫尔偏折法显示其真实火箭燃气射流场,结果表明,理论与实验结果一致,当推进剂中 Al 粉含量为 3~8% 时,莫尔偏折法能够用于火箭燃气射流场的显示,从而为进一步解决火箭燃气射流场的显示工作提供一种有效的途径。

2 理论分析

火箭燃气射流场中的烟雾主要来源于碳黑、HCl 雾滴和氧化物颗粒^[3]。碳黑颗粒产生于推进剂中的粘合剂、包覆层、隔热层的不完全燃烧,在燃气射流中呈黑色烟雾;HCl 雾滴是由 AP 生成的 HCl 与空气中或冷却燃气中的水蒸气凝结成雾滴,形成白色烟雾;氧化物颗粒是由于推进剂中加入 Al 粉作为燃速催化剂,当推进剂燃烧时,Al 粉被迅速氧化,生成 Al_2O_3 颗粒。凝相氧化生成粗的 Al_2O_3 颗粒,其直径大于 $43\ \mu\text{m}$;蒸气相氧化则产生细粒径的烟雾状 Al_2O_3 ,其直径小于 $2\ \mu\text{m}$ 。因此,激光通过燃气射流场时,将受到衍射散射。

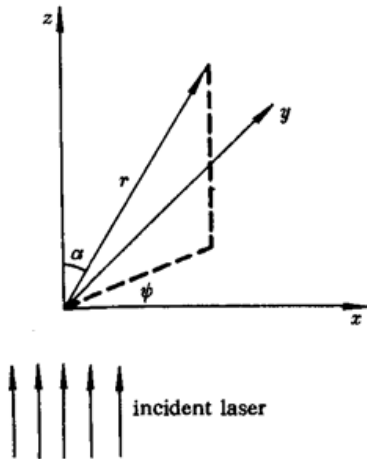


Fig. 1 The geometric relation between incident light and scattering light

设波长为 λ 的平行探测光沿 z 方向传播经过火箭燃气射流场,其表达式为

$$V_z(x, y) = \exp[ik\phi(x, y)] \quad (1)$$

式中 $\phi(x, y)$ 为相位函数,且有

$$\phi(x, y) = \int_L [n(x, y, z) - n_0] dz \quad (2)$$

式中 $n(x, y, z)$ 和 n_0 分别为被测流场和环境的折射率, L 为激光经过火箭燃气射流场的路径。

当其流场中存在颗粒时,设某一颗粒被该平行光照射而产生散射,则远场处距颗粒为 r 点的散射光可表示为

$$V_z'(x, y) = -\frac{s(\alpha, \psi)}{ikr} \exp[ik\phi(x, y)] \quad (3)$$

式中 $s(\alpha, \psi)$ 为颗粒散射的振幅函数, α, ψ 的意义如图 1 所示。

根据巴比涅原理^[4],对于一球体的衍射可表示为

$$V(p, q) = +\frac{i}{\lambda r} \exp[ik\phi(x, y)] \iint_{\sigma} e^{-ik(rs+\eta n)} d\xi d\eta \quad (4)$$

比较(3)式与(4)式,对颗粒的衍射散射有

$$s(\alpha, \psi) = \frac{k}{\lambda} \iint_{\sigma} e^{-ik(rs+\eta n)} d\xi d\eta \quad (5)$$

采用极坐标并对(5)式积分得

$$s(\alpha, \psi) = ka \frac{J_1(ka\alpha)}{\alpha} \quad (6)$$

式中, a 为颗粒直径, $J_1(ka\alpha)$ 为一阶贝塞尔函数,把(6)式代入(3)式有

$$V_z'(x, y) = -\frac{aJ_1(ka\alpha)}{iar} \exp[ik\phi(x, y)] \quad (7)$$

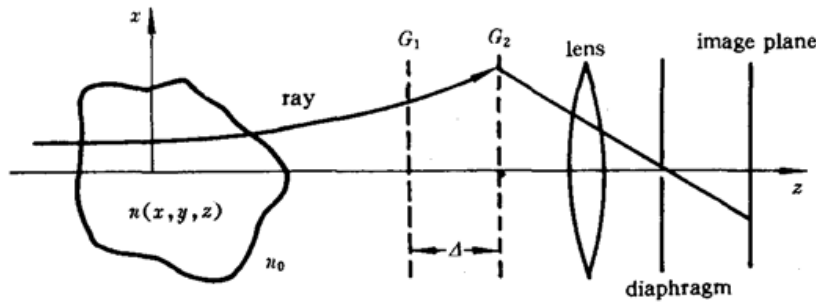


Fig. 2 Schematic drawing of moiré deflectometry

利用图 2 所示的莫尔偏折原理图来显示火箭燃气射流场, 设光栅 G_1 的栅线垂直于 x 轴, 其透射函数的 Fourier 级数展开式为

$$t_1(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} a_m \exp[i2\pi\xi_m x] \quad (8)$$

式中 a_m 为 G_1 光栅的 Fourier 系数, $\xi_m = m/d$, d 为光栅 G_1 和 G_2 的栅距, 当由 (7) 式表示的衍射散射光波通过光栅 G_1 , 得到在光栅 G_2 左表面上的复振幅为

$$U_2'(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} a_m \exp(-i\pi\lambda z \xi_m^2) \exp(i2\pi\xi_m x) V_z'(x - \lambda z \xi_m, y) \quad (9)$$

(9) 式中应用了 Fresnel 近似^[5]。设 G_2 光栅的栅线与 G_1 光栅的栅线的夹角为 θ , 则 G_2 光栅的透射函数的 Fourier 级数展开式为

$$t_2(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \exp[i2\pi\xi_n(x\cos\theta + y\sin\theta)] \quad (10)$$

式中 a_n 为 G_2 光栅的 Fourier 系数, $\xi_n = n/d$ 。由 (9) 式和 (10) 式, 得到光栅 G_2 右表面的复振幅为

$$U_2^+(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} a_m a_n \exp(-in\lambda\xi_m^2) \times \exp\{i2\pi[x(\xi_m + \xi_n\cos\theta) + y\sin\theta]\} V_z'(x - \lambda z \xi_m, y) \quad (11)$$

由于 G_2 与照相底片有物像共轭关系, 在不考虑线性放大率和在 +1 级频谱的滤波下, 照相底片上的复振幅为

$$U(x, y) = U_2^+(x, y) = - \left\{ \frac{aJ_1(ka\alpha)}{iar} \exp\left[i2\pi\left(\frac{\cos\theta}{d}x + \frac{\sin\theta}{d}y\right)\right] \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda}\phi(x, y)\right] + \frac{aJ_1(ka\alpha)}{iar} \exp\left[i2\pi\left(-\frac{\lambda\Delta}{2d^2} + \frac{x}{d}\right)\right] \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda}\phi\left(x - \frac{\lambda\Delta}{d}, y\right)\right] \right\} \quad (12)$$

式中代入了 $V_z'(x - \lambda z/d, y) = -(aJ_1/iar) \exp[ik\phi(x - \lambda z/d, y)]$, $z = \Delta$ 为光栅 G_1 和 G_2 的间距。这样像平面上的光强分布为

$$I(x, y) \approx \frac{a^2 J_1^2(ka\alpha)}{\alpha^2 r^2} \left\{ 1 + \cos\left[2\pi\left(-\frac{\lambda\Delta}{2d^2} + \frac{1 - \cos\theta}{d}x - \frac{\sin\theta}{d}y - \frac{\partial\phi(x, y)}{\partial x} \frac{\Delta}{d}\right)\right] \right\} \quad (13)$$

式中考虑了 $\lambda\Delta/d$ 很小的情况, 并把波函数 $\phi(x - \lambda\Delta/d, y)$ 展开成 Taylor 级数, 取其前两项。当燃气射流场中没有颗粒的衍射散射时, 则像面上的光强分布为

$$I'(x, y) \approx 1 + \cos\left\{2\pi\left[-\frac{\lambda\Delta}{d} + \frac{1 - \cos\theta}{d}x - \frac{\sin\theta}{d}y - \frac{\partial\phi(x, y)}{\partial x} \frac{\Delta}{y}\right]\right\} \quad (14)$$

比较 (13) 式和 (14) 式可见, 由于火箭燃气射流场中颗粒的衍射散射, 莫尔偏折图上无法反映位相 $\phi(x, y)$ 变化引起条纹的变化。同时, 还与粒子直径 a 及衍射角 α 和有关。

3 实验结果和分析

莫尔偏折法的实验装置如图 3 所示,这种结构的莫尔偏折仪具有口径大($\phi 400$ mm),灵敏度高,适用于恶劣环境条件下瞬态流场显示的特点^[6]。实验中,考虑普通黑白胶片的感光问题,采用 $0.53 \mu\text{m}$ 波长的 YAG 倍频激光作为光源。光栅 G_1 和 G_2 的参数为 20 line/mm。通过同步延时器,选择燃气射流过程(全过程为毫秒级)的某一时刻触发激光来获取瞬时莫尔偏折图,曝光时间为 20 ns。固体推进剂为 AP/HR/Al/HTPB。选择如表 1 所示的四种不同配方进行实验,结果表明:当固体推进剂中 Al 粉含量为 3~8% 时, Al_2O_3 颗粒对激光的衍射散射不是很严重,莫尔偏折图能够显示火箭燃气射流场的激波结构,且莫尔条纹清晰能够反映探测光线经过燃气射流场后的偏折。图 4 表示了 Al 粉含量为 8% 推进剂的火箭燃气射流场近场结构莫尔偏折图,从该图可清楚地观察到近场结构中的马赫盘位置、斜激波和边界层。通过该图可定量计算流场中的折射率和密度分布^[7]。当 Al 粉含量超过 9% 时,生成的 Al_2O_3 量比含 6% Al 粉时增加 50%^[8],此时燃气射流场对激光的衍射散射剧增,由于 Al_2O_3 颗粒的严重散射,莫尔偏折图上条纹模糊,无法用于显示火箭燃气射流场的近场结构。图 5 表示了 Al 含量为 19% 时燃气射流场近场结构的莫尔偏折图。显然,从图 5 无法观察到火箭燃气射流场的近场结构,且在马赫桶内莫尔条纹模糊。图 5 中,马赫桶外的参考条纹(平行条纹)也有点模糊,这是因为所拍摄的火箭燃气射流场莫尔偏折图是整个射流过程中的某一瞬态,当射流一开始后,由于燃气射流场中存在严重的烟雾颗粒,经过一段时间后,喷口周围的空气中也会弥漫着颗粒,尽管马赫桶外的颗粒浓度远小于马赫桶内,但其衍射散射仍影响着莫尔条纹,使其变得有点模糊。

Table 1 Four different formulation of propellant

Sample	Content		
	AP	HR	Al
Propellant I	50	0	3
Propellant II	50	0	8
Propellant III	50	0	9
Propellant IV	50	0	19

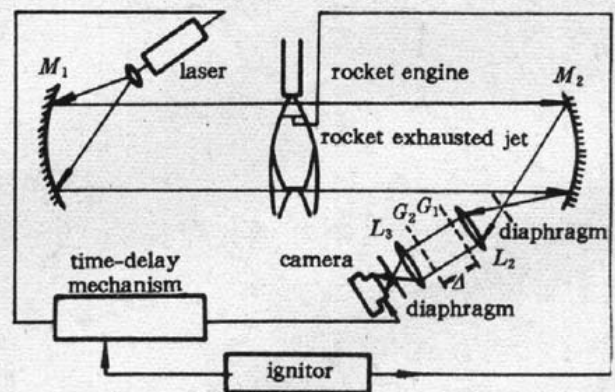


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up

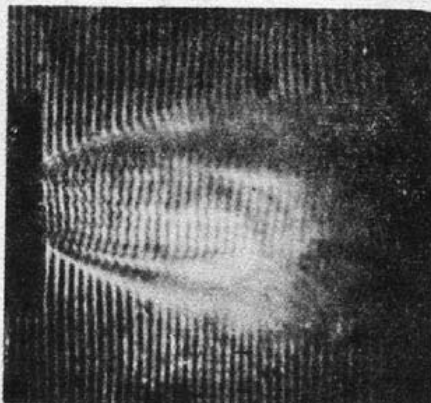


Fig. 4 Moire deflectogram of near-field structure of rocket exhausted jet by using the propellant with Al powder of 8%



Fig. 5 Moire deflectogram of near-field structure of rocket exhausted jet by using the propellant with Al powder of 19%

参 考 文 献

- 1 Hunt B. L., Lamont P. J., *J. Fluid Mech.*, **100** part 3, 471~511(1980)
- 2 Truscott, N84-245248(1984)
- 3 彭培根, 王振芳 *et al.*, 固体火箭技术, (1), 32~37(1991)
- 4 朱德忠 主编, 热物理激光测试技术, 科学出版社, 北京, 1990, 349~350
- 5 J. D. Gaskill 著, 封开印 译; 线性、傅里叶变换、光学, 人民教育出版社, 北京, 1981, 366
- 6 贺安之, 阎大鹏 *et al.*, 中国激光, **18**(11), 827~830(1991)
- 7 阎大鹏, 张 健 *et al.*, 光学学报, **13**(2), 145~149(1993)
- 8 彭培根, 推进技术, (5), 35~39(1988)

钛宝石激光器 980 nm 连续输出功率超过 150 mW

我们研制的掺钛宝石激光器在长波段调谐取得了较好进展。钛宝石激光器为四镜折迭驻波腔, 两球面折迭腔镜曲率半径为 100 mm, 它们对氩离子激光束透过率 $\geq 85\%$, 对 880~1100 nm 光的反射率 $\sim 100\%$ 。钛宝石晶体尺寸为 $\phi 4 \text{ mm} \times 11.5 \text{ mm}$, 由安徽光机所提拉法生长。钛宝石棒用铜质水冷器通水冷却, 由氩离子激光器(Coherent Innovia 20, 额定输出功率 10 W)全轴轴向泵浦。用腔内布儒斯特角放置的单片石英双折射调谐器实现长波段调谐。

泵浦功率为 8.0 W 时, 钛宝石激光器在波长 901.6 nm 到 990.0 nm 范围内的输出功率大于 5 mW; 当泵浦功率为 8.9 W 时, 在 1005.0 nm 处的输出功率 $> 15 \text{ mW}$ 。波长调谐在 980 nm 处的激光振荡阈值为 6.7 W, 斜率效率为 3.7%, 激光谱线半宽度约 0.8 nm; 当泵浦功率为 10.6 W 时钛宝石激光器连续输出功率达 155 mW。

(中国科技大学物理系, 安徽

谢建平 明 海 孙晓东 刘 宇 吴云霞 汤洪高
成份结构中心 张运生 耿玉珍

中国科学院安徽光机所四室 殷绍唐 周东方

收稿日期: 1993 年 8 月 10 日)