

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0321-03

强激光宽带扫描转镜的傅里叶光学研究

李俊昌^{1,2} 郑启光² 马琨^{1,2} 石世宏²

(¹ 昆明理工大学理学院激光所, 昆明 650093
² 中国科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要 用标量衍射理论详细讨论一种强激光宽带扫描转镜, 导出任意激光束通过光学系统后任意给定观察区域的瞬时光束功率密度分布。当给定激光处理工件的运动速度及工件表面对光能的吸收特性后, 研究了给定时间间隔内材料表面吸收能量的分布及计算实例。

关键词 光束变换, 衍射计算, 材料表面改性处理

中图分类号 O438.2 **文献标识码** A

Fourier Optical Study on Wide-band Scanning Rotating Mirror of High Power Laser

LI Jun-chang^{1,2} ZHENG Qi-guang² MA Kun^{1,2} SHI Shi-hong²

(¹ Laser Institute, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093
² National Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Sciences and Technology, Wuhan 430074)

Abstract A kind of wide-band scanning rotating mirror of high power laser is discussed in detail by using scalar diffraction theory in this paper. The transient power distribution of laser in any observed region has been derived for the arbitrary laser beam passing through the optical system. Given the translation velocity and laser absorptivity of workpiece in the laser treatment, the distribution of energy absorbed by the surface of workpiece in given time interval is investigated and the calculating example has been finished.

Key words light beam transformation, diffraction calculation, laser surface processing of material

1 光学系统简介

图1为强激光宽带扫描转镜,是20世纪80年代末意大利研究人员提出并申请了专利的一种光学系统^[1,2]。图中,被变换光束自上而下穿过透镜 L_1 ,经45°反射镜 M_1 反射后投向一个高速转动的扫描转镜 M_2 。 M_2 由 N 片形状相同的梯形元平面反射镜组成,它们依次镶嵌于一个底角为45°的圆台形转盘侧面上。装置工作时,转盘的高速转动使反射光形成一扇形扫射光束。如果通过设计,让激光处理的材料表面邻近于扫描光束的焦平面,通过一定反复扫描周期的热作用后,材料表面将形成一个狭窄的均匀热作用带。当工件沿垂直于扇形光束的扫描方向缓慢移

动时,则能够获得一个均匀的宽带热作用区。

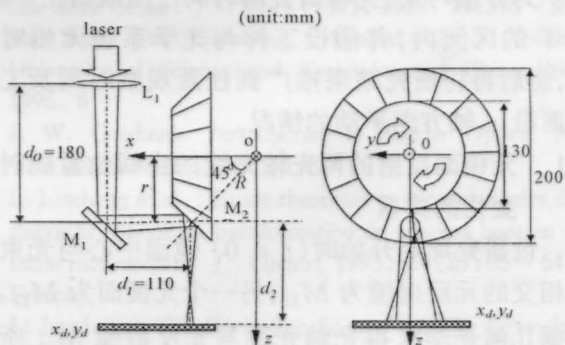


图1 宽带扫描转镜原理及坐标定义(长度单位为mm)
Fig. 1 The scheme of wide-band scanning rotating mirror and the system of coordinate

2 理论分析

当光束直径小于元镜面的宽度时,可以将观察

* 国家自然科学基金(60178004)和激光技术国家重点实验室基金资助课题。

平面上的光波场视为两个相邻镜面反射光束的叠加(当光束只落在一个反射镜上时,认为另一面反射镜的反射为零),从而将问题简化在光轴光线入射到转镜的某一元镜面中心开始,到光轴光线射到相邻的另一元镜面中心时结束的时间周期 T 中进行研究。设 N 为转镜上反射镜的数目,转镜的角速度为(弧度/秒),则周期

$$T = 2\pi/(N\beta) \quad (1)$$

建立与光学系统固定的直角坐标 xyz ,坐标原点为多面体反射镜上过每一元反射镜中心的法线的交点, x 轴与转镜的轴一致,在图1的转镜侧视图中,自右向左为 x 轴的正向。对转镜光学性能的研究可以分以下几个步骤进行:

1) 写出相邻两个元反射镜所对应平面的空间位置随时间的变化关系,求出两平面与入射光束光轴的两个交点,写出从两个交点反射光线的空间位置随时间变化的表达式;

2) 写出将两个元反射镜在 $z = r$ (见图1)平面上的投影随时间的变化关系,并将其视为与两束反射光分别对应的两个光学系统的出射光瞳;

3) 根据从元反射镜反射的光轴光线空间位置随时间变化的表达式,确定出两个反射光束光腰位置;表出每一出射光瞳上的光波场,然后用菲涅耳衍射积分计算 $z > r$ 的任意空间平面的光波场;

4) 理论上表出两束光在观察平面的光波场复振幅及叠加光波场的瞬时功率密度分布;用瞬时功率密度分布对照射时间求积分,则得到给定照射时间内工件表面吸收的能量。

为方便讨论,先将研究的时间范围限制在 $0 \leq t \leq T$ 的区间内,并假设工件与光学系统无相对运动,然后再将研究结果推广到任意观察时刻及工件平面沿 x 轴方向平动的情况。

2.1 元镜面反射的两光轴光线的空间位置随时间变化的关系

设研究周期开始时($t = 0$)镜面中心与光束光轴相交的元反射镜为 M_{21} ,另一个元镜面为 M_{22} 。即根据几何光学求得光轴光线与元反射镜 M_{21} 所在平面的交点

$$\begin{cases} x_1(t) = r[2 - \cos(\beta t)] \\ y_1 = 0 \\ z_1 = r \end{cases} \quad (2)$$

设由上交点反射光线的单位矢量为 $\mathbf{R}_1 = R_{1x}\bar{i} + R_{1y}\bar{j} + R_{1z}\bar{k}$ 。根据矢量形式的反射定律^[3,4],可以

求得 $R_{1x} = 0, R_{1y} = \sin(\beta t), R_{1z} = \cos(\beta t)$ 。

将以上表达式中的 βt 换为 $\beta t - 2\pi/N$,即得到 M_{22} 所在平面与光轴光线的交点 (x_2, y_2, z_2) 及反射光线的单位矢量 R_{2x}, R_{2y}, R_{2z} 。

2.2 $z = r$ 平面上两束反射光的复振幅

设到达透镜 L_1 的激光波面半径为 R_0 ,光学系统透镜的焦距为 f , t 时刻光轴光线上反射点到光腰的长度即为

$$d_{1f}(t) = \frac{R_0 f}{R_0 - f} - d_0 - d_1 + r(1 - \cos\beta t) \quad (3)$$

于是,得到镜面 M_{21} 反射光束的光腰坐标随时间变化的关系

$$\begin{cases} x_{1f}(t) = x_1(t) + R_{1x}d_{1f}(t) \\ y_{1f}(t) = R_{1y}d_{1f}(t) \\ z_{1f}(t) = r + R_{1z}d_{1f}(t) \end{cases} \quad (4)$$

将光腰中心视为傍轴球面波的波束中心, M_{21} 反射的光波在 $z = r$ 平面上的复振幅即为

$$U_1(x, y, t) = \frac{p_1(x, y, t)}{M_1} U_0 \left[\frac{x - x_1(t)}{M_1}, \frac{y}{M_1} \right] \times \exp \left\{ -jk \frac{[x - x_{1f}(t)]^2 + [y - y_{1f}(t)]^2}{2d_{1f}(t)} \right\} \quad (5)$$

$p_1(x, y, t)$ 为 t 时刻在 $z = r$ 平面上 M_{21} 投影形成的光瞳,而 $M_1 = d_{1f}(t)/f$,表示射到 M_{21} 处光波场相对于到达透镜 L_1 的入射光波场的横向放大率。

利用类似讨论,可得到在 $z = r$ 平面上 M_{22} 所反射的光波复振幅 $u_2(x, y, t)$ 表达式。

2.3 两反射镜在 $z = r$ 平面上投影形成的光瞳

由于镜面对光束的分割反射事实上发生在两个元反射镜交界线的投影旋转至 x 轴附近时才发生,这时交界线在 $z = r$ 平面上的投影与 x 轴夹角 θ_i 很小,可以将出射光瞳视为在 $z = r$ 平面上有两个相邻的以一定速度向 y 方向移动的矩形孔,其移动速度为两镜交界线中心的转动线速度在 y 方向的分量 v_y ,矩形孔沿 x 方向的高度是元反射镜的投影高度 $2L_x$,沿 y 方向的宽度可以视为元反射镜的腰宽 $2L_y$ 。于是,可将(5)中光瞳函数表示为

$$p_1(x, y, t) = \text{rect} \left(\frac{x - r}{2L_x} \right) \text{rect} \left[\frac{y - r\beta t \cos(\pi/N - \beta t)}{2L_y} \right] \quad (6)$$

类似地,可以得出 $U_2(x, y, t)$ 对应的光瞳表达式。

2.4 工作平面静止时工作平面吸收能量的计算

任意给定时刻 t 在工作平面上的光波场可以根据菲涅耳衍射近似得^[5]

$$U(x_d, y_d, t) = \frac{\exp(jkd_2)}{j\lambda d_2} \iint_{-\infty}^{\infty} [U_1(x, y, t) + U_2(x, y, t)] \times \exp\left\{\frac{jk}{2d_2}[(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2]\right\} dx dy \quad (7)$$

在观察平面的光束功率密度分布即为

$$I(x_d, y_d, t) = U_d(x_d, y_d, t) U_d^*(x_d, y_d, t) \quad (8)$$

在转镜工作时,工作平面上吸收的光能是上式对时间的积分。当扫描光束的作用时间 t 大于(1)式确定的周期 T 时,观察平面吸收的光能可以表示为

$$E(x_d, y_d, t) = \int_0^t I(x_d, y_d, t_m) dt' \quad (9)$$

式中, $t_m = t' \bmod T$, 表示积分运算中当 $t' > T$ 时取 t' 关于 T 的余数。(9) 式只能通过数值计算求解。

由于工作平面沿 x 轴正向以速率 v_x 运动等价于光学系统及入射激光束以速率 v_x 沿 x 轴负向运动。将(2)式重新写为

$$\begin{cases} x_1(t) = r[2 - \cos(\beta t_m)] + v_x t \\ y_1 = 0, \quad z_1 = r \end{cases} \quad (10)$$

便能利用上面的讨论结果研究工作平面平动的问题。

3 数值计算与讨论

令 $w = 10 \text{ mm}$, $R_0 = 5000 \text{ mm}$, $f = 380 \text{ mm}$, $d_0 = 180 \text{ mm}$, $d_1 = 110 \text{ mm}$, $N = 24$, $r = 165 \text{ mm}$, $L_y = \pi r / N$, $L_x = 20 \cos(\pi/4) \text{ mm}$, $\beta = 17000\pi$ (弧度/分), $d_2 = 200 \text{ mm}$ 。图 2 给出工件平动时扫描带吸收能量模拟结果。图 2(a) 是工件运动速度接近扇形扫描光束在工作平面的扫描速度时,工作平面形成的扫描带形貌模拟。这里,使用了热敏纸的灰度反应特性来描述工作平面吸收能量的强度分布^[6,7]。由图可见,若工件移动速度过高,沿工件运动方向将形成一些分离的扫描带[图 2(a)],并且,由于工件平面对光学系统的相对运动,扇形扫描光束的每一周期在工件表面的扫描轨迹已经不再是对称的“弓形”。显然,当工件移动速度过高时不能实现均匀热作用。但当速度放慢时,分离的扫描带相互重叠,便能形成一个较宽的均匀扫描区[图 2(b)]。因此,利用上面的讨论,可以较直观地研究扫

描转镜的性能。

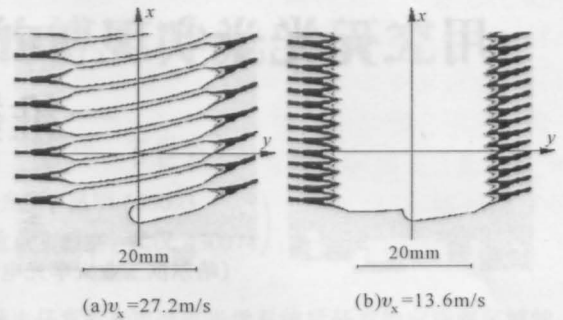


图 2 工件运动速度较高时的扫描带形貌

Fig. 2 The profile of scanned band at a high translation velocity of workpiece

在实际激光表面改性处理的应用研究中,工件平动的速率通常远小于由转镜反射形成的扇形扫描光束在工作平面上的扫描速率。利用适用于任意分布光束作用的激光热处理温度场快速计算方法^[8],不难为光学系统配制相应的热作用计算软件。因此,本研究将能为提高宽带扫描转镜及同类光学系统的使用质量提供方便。

参 考 文 献

- 1 Liu Jianglong, Zou Zhirong, Su Baorong. *The Heat treatment by High energy Beam*. Beijing: China Machine Press, 1997
- 2 Maichi Cantello, Marco Celani, Diego Cruciani *et al.*. Increasing the flexibility of integrating multifaceted mirrors for high power laser surface treatments. *Proc. SPIE*, 1988, **1024**: 167
- 3 Li Junchang, J. Merlin. Conception optique d'un dispositif permettant de transformer un faisceau laser de puissance en une tache carrée. *J. Optics (FR)*, 1998, **29**: 376~382
- 4 Hu Yuxi, An Liansheng. *Applied Optics*. Beijing: University of Science and Technology of China Press, 1996. 8
- 5 J. W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1968
- 6 Li Junchang *et al.*. Etude theorique et experimentales d'un dispositif optique de transformation de faisceau laser en une tache rectangulaire. *J. Optics*, 1993, **24**(2): 55~64 (in French)
- 7 Li Junchang. *The Optimistic Control of The Laser Heat Treatment*. Metallurgical Industry Press, 1995
- 8 Li Junchang, Li Xingyi, Chen Qinghua *et al.*. Fast calculation of thermal action of actual beam during the laser heat treatment. *J. Materials Research*, 1998, **12**(3): 262~266