

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0264-04

一种反射型正交双带式积分镜均束装置的设计

黄雅峥, 季凌飞, 蒋毅坚*

(北京工业大学国家产学研激光技术中心, 北京 100022)

摘要 利用几何光学原理和轴外像差理论,设计一种应用于大功率 CO₂ 激光陶瓷烧结实验的反射型正交双带式积分镜均束装置。经模拟,该装置均束效果良好,基本不受原始激光束光斑质量的变化影响;并且因为所有光学元件都属于反射型镜面,光能利用率高,水冷方便,符合大功率 CO₂ 激光器的使用要求。

关键词 几何光学; 激光均束; 积分镜; 正交双带式; 轴外像差

中图分类号 TG665 **文献标识码** A

Design of Crossed Double Strip Integrators for High Power Laser Beam Homogenizing

HUANG Ya-zheng, JI Ling-fei, JIANG Yi-jian

(National Center of Laser Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract Using geometrical optics theory and off-axis aberration analysis, a set of crossed double strip integrators for high power CO₂ laser beam homogenizing has been designed. The uniformity of the power distribution on the working plane can be improved without being affected by the change of original laser beam. And because all the elements have reflecting surface, energy loss is not serious and water cooling can be easily used.

Key words geometrical optics; laser beam homogenizing; integrator; crossed double strip; off-axis aberration

1 引言

目前,国内外大功率激光器的原始光束光强一般呈非均匀分布,但在诸多大功率激光应用领域,如激光热处理、激光淬火及激光辐照材料改性实验中,希望投射在材料表面上的光斑是均匀分布的。已有多种激光均束方法被提出并应用到激光技术中,如非球面均束法^[1]、光波导法^[2,3]及带式积分镜法^[4]等。非球面均束法中,一块非球面透镜只能对应某一特定原始激光束,而且加工困难,光波导法因激光束在波导中多次反射,光能损失大。

为满足大功率 CO₂ 激光烧结陶瓷^[5]实验的要求,本文设计了一种反射型正交双带式积分镜均束装置,以获得光强均匀分布的方形光斑。该装置光能损失小,使用寿命长,符合大功率 CO₂ 激光器的使用要求。

2 均束原理和初步设计

反射型正交双带式积分镜均束装置^[6]的均束原

理类似于透镜阵列^[7]和光楔阵列^[8]的均束原理,即把原始激光束分割为若干单元,每一单元的光强可视为均匀分布,然后将所有单元光束重叠在工作面上,从而获得均匀光斑。该装置的结构示意图如图1所示。图中 I_1 和 I_2 是两块反射型带式积分镜(以下简称积分镜),它们的反射表面兼为一系列连续排列的带式反射镜面,每块积分镜各带式反射镜面间的交线相互平行,加工时由高精车在铜坯材上一次切削成型。在装配时两块积分镜的交线是相互正交的关系。 I_1 为凹面形,原始激光束经 I_1 反射,在平行纸面方向被分割为一系列沿不同方向传播的带状平行光束,并在一定距离 L_1 处每束带状平行光束重叠在一起形成一带状光斑,光斑所在平面 FP1 可视为 I_1 的“焦平面”。“离焦”后每束带状平行光束继续按各自的方向发散,并投射到 I_2 上。 I_2 为凸面形,各带状平行光束经 I_2 反射后在垂直纸面方向被分割成一系列截面边长相等的方形平行光束,所有方形平行光束经反射镜面 IM 反射后在工作面上重

基金项目: 北京市自然科学基金和北京市新世纪百千万人才工程培养经费资助课题。

作者简介: 黄雅峥(1982—),男,浙江永康市人,北京工业大学硕士研究生,主要从事激光光束整形技术方面的研究。

* 通信联系人。E-mail: yjjiang@bjut.edu.cn

叠,从而形成一块光强均匀分布的方形光斑。

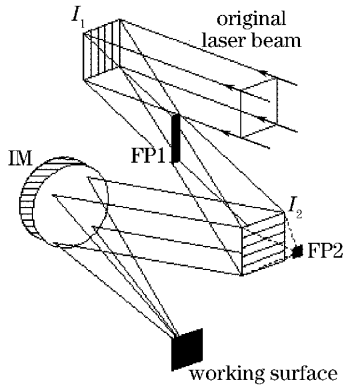


图1 反射型双带式积分镜的结构示意图

Fig.1 Schematic of crossed double strip integrators

这种反射型正交双带式积分镜均束装置的设计重点在于如何将所有方形光束最终重叠在同一区域。这里只介绍两块积分镜的设计。

给定原始激光束直径和所需分割量后,还需要确定每块积分镜各带式反射镜面间的夹角及两块积分镜之间的相对位置关系。先确定第一块积分镜 I_1 。原始激光束在平行纸面方向的分割数即为积分镜中带式反射镜面的数目,设为 $2N+1$ (用奇数是为了方便计算和光线追迹),图2为有5块带式反射镜面的积分镜 I_1 在纸面上的光路截面图, I_1 中各带式反射镜面之间的交线垂直于纸面。如图2所示,平行于 x 轴的原始激光束中心光线以 45° 入射角斜入射到 I_1 中间带式反射镜面 M_0 的中心(即坐标原点 O),偏折 90° 后投射在距离 L_1 的“焦平面”上的 F_1 点,光斑宽度为 $2a$ 。相邻两块带式反射镜面的倾角及宽度可通过解析几何的方法确定下来。如一

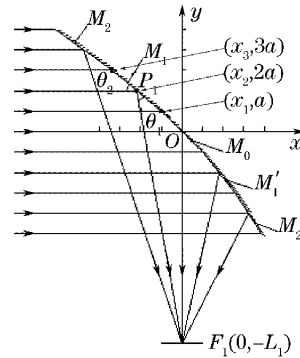


图2 第一块积分镜的设计

Fig.2 Design of No.1 integrator

条平行于 x 轴的光线经过带式反射镜面 M_1 的中心 P_1 反射后也投射在 F_1 点,这样直线 P_1F_1 的斜率可表示为:

$$k_{P_1F_1} = \frac{y_2 + L_1}{x_2}, \quad (1)$$

镜面 M_1 的斜率可表示为:

$$k_{M_1} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{a}{x_2 - x_1}, \quad (2)$$

直线 P_1F_1 与镜面 M_1 之间的夹角为

$$\tan \theta_1 = \frac{k_{M_1} - k_{P_1F_1}}{1 + k_{M_1} \cdot k_{P_1F_1}}, \quad (3)$$

入射光线与镜面 M_1 的夹角为

$$\tan \theta_2 = \frac{0 - k_{M_1}}{1 + 0 \cdot k_{M_1}} = -k_{M_1}, \quad (4)$$

根据镜面反射,应有 $\tan \theta_1 = \tan \theta_2$,所以

$$\frac{k_{M_1} - k_{P_1F_1}}{1 + k_{M_1} \cdot k_{P_1F_1}} = -k_{M_1}, \quad (5)$$

联合(1)式,(2)式,(5)式,解得 x_2 的值为

$$x_2 = \frac{x_1(a - y_2 - L_1) + \sqrt{x_1^2(a - y_2 - L_1)^2 - (2a - y_2 - L_2)(a^2 - x_1^2)(y_2 + L_2)}}{2a - y_2 - L_2}, \quad (6)$$

代入(2)式求出镜面 M_1 的斜率。 P_1 点为镜面 M_1 的中心,所以 M_1 的另一个端点 (x_3, y_3) 也可以确定下来

$$\begin{cases} x_3 = 2x_2 - x_1, \\ y_3 = 2y_2 - y_1, \end{cases} \quad (7)$$

以此类推,可以把镜面 M_2 也确定下来。

经边缘两块带式反射镜面反射的光束的夹角与距离 L_1 成正比,为了减小球面反射镜的直径和增大工作面上的焦深,夹角应尽量小,同时 L_1 尽可能大,但增大 L_1 带来的影响是增加了衍射效应。所以应适

当选择一个 L_1 值。

第二块积分镜 I_2 带式反射镜面数量一般与 I_1 相等($2N+1$),不同的是光束经 I_2 后是发散的,各光束的反向延长线在某一截面上重叠,形成一个光强均匀分布的“虚斑”,可通过镜面成像的方法来获得这一“虚斑”。因为 I_2 是在垂直纸面方向将光束再分割,所以各带式反射镜面之间的交线应与纸面平行。 I_2 位于 I_1 的正下方,中间反射镜面与原始激光束的中心光线有一定的夹角,使反射后的光线不会投射回 I_1 上。现在把 I_1 “焦平面”FP1上的带状光斑看作

2N+1 块连续排列的边长相等的方形光斑,所以从 FP1 上发散出来的带状平行光束又可看作一系列方形平行光束。不考虑衍射效应,由中心的方形光斑发出的光束全部投射在 I₂ 的中间带式反射镜面上,根据镜面成像原理,所有反射光线可看作是由该方形光斑相对 I₂ 中间带式反射镜面所成像斑发出的光线。其他“焦平面”上的方形光斑发出的光束投射在 I₂ 对应的一块带式反射镜面上,也对应一个像斑。各反射镜面间是否能找到这样一个关系使每个像斑都重叠在一起呢?像斑虽然不能严格重合,但可以让它们中心点重合。图 3 为有 5 个反射镜面的 I₂ 垂直纸面的一个光路截面图,积分镜各个带式反射面分别对一个方形光斑成像,相邻反射面之间总可以找到一个夹角,使方形光斑的中心 P₀, P₁, P₂ 都成像在同一个点 F₂ 上,但像斑之间会存在一个倾角,如当中心反射镜面 M₀ 与相邻的反射镜面 M₁ 夹角为 180°+δ 时,对应像斑的夹角为 2δ。增大中心点 P₀ 与中间反射镜面的垂直距离 L₂ 可以减小夹角,从而使各像斑近似重合。考虑到加工精度和衍射效应的问题,δ 值不能太小,同时下一节还要对像差作进一步校正,所以可以允许有一定大小的夹角存在。

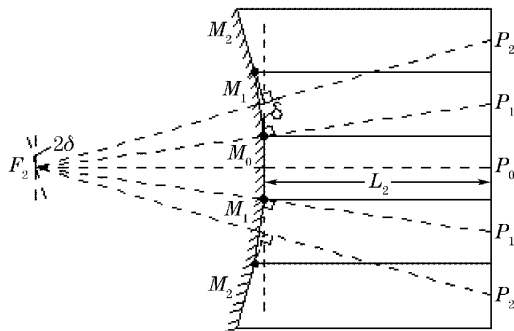


图 3 第二块积分镜的设计
Fig. 3 Design of No. 2 integrator

3 积分镜的调整:像差校正

原始激光束经过 I₁, I₂ 两块相互正交的积分镜后,只是得到了一个光强均匀分布的“虚斑”,如果在第二块积分镜 I₂ 出射方向放置一块接收屏,可发现它的光强分布是一个由若干方形光斑组成的阵列。因此需要在 I₂ 出射方向再放置一块球面反射镜,把“虚斑”转化成实像。

根据所需要的垂轴放大倍数确定球面反射镜 IM 的焦距和与 I₂ 的相对位置,同时保证足够大的直径使所有的光束都能投射在镜面上。为方便装

配,原始激光束的中心光线通过三块镜片的中心,最终转了 90°角,这样 IM 的光轴与 I₂ 的中间带式反射镜面垂直。利用高斯光学原理确定物像位置关系。

对轴外物成像,轴外像差的影响不能忽视^[9]。图 4 为圆形原始激光束通过两块积分镜和球面反射镜后利用光学设计软件 ZEMAX 得到的工作面光斑点列图(Spot Diagram,取光线密度为 50)。黑色方框内为理想像斑的范围,可见轴外像差的存在可能直接导致均束效果的失败。可通过调节两块积分镜各带式反射镜面间的夹角来改善工作面上的光斑质量。当每束方形光束的中心光线在工作面上相交于一点时,方形光束通过球面反射镜后在工作面上的投影也基本重合,图中比理想光斑大几倍的弥散斑正是由于各方形光束的中心光线的偏离所引起的。I₁ 主要控制 x 方向的偏离, I₂ 主要控制 y 方向的偏离。首先调节 I₁ 各反射镜面间的夹角,不动中间反射镜面的位置,以加工达到的角度精度为步长递增或递减与相邻两块反射镜面间原来的夹角,追踪过这两块反射镜面且过 I₂ 中间反射镜面的两束方形平行光束的中心光线在工作面上的坐标值,达到最小值时调节完毕,按同样的方法由内而外调节各反射镜面的夹角。调节 I₂ 时,以过 I₁ 中间反射镜面的 2N+1 束方形平行光束的中心光线为追

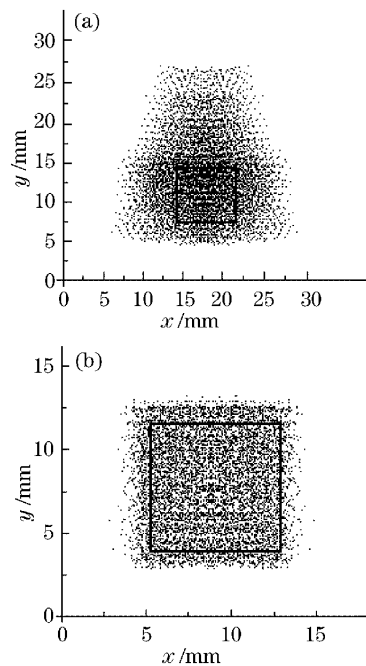


图 4 校正轴外像差前(a)和后(b)的点列图
Fig. 4 Spot diagram on the working surface before (a) and after (b) correcting off-axis aberration

踪对象, I_2 中间反射镜面不动, 同样从内而外微调各反射镜面的夹角, 直至满意的数值为止。图 4(b) 为圆形原始激光束通过校正后的积分镜和球面反射镜后在工作面上得到的光斑点列图。

4 结 论

反射型正交双带式积分镜经模拟可实现预期的均束效果, 将其应用于大功率 CO_2 激光器烧结陶瓷光路中预计可以改善实验结果, 同时在对其他材料进行激光辐照测量材料损伤阈值实验中也将会有进一步的应用。

参 考 文 献

- 1 Takayuki Hirai, Keiji Fuse, Manabu Shiozaki *et al.*. Characteristic of ZnSe aspheric beam homogenizer for CO_2 laser [C]. *SPIE*, 2003, **4831**: 142~147
- 2 Joseph M. Geary. Channel integrator for laser beam uniformity on target [J]. *Opt. Eng.*, 1988, **27**(11): 972~977
- 3 Dong Jinxing, Ye Zhenhuan, Gao Hongyi *et al.*. Improvement of the intensity homogeneity of excimer laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(12): 894~896
董景星, 叶震寰, 高鸿奕等. 改善准分子激光光强分布的一种方法 [J]. *中国激光*, 1995, **A22**(12): 894~896
- 4 Wang Zhiyong, Chen Hong, Zuo Tiechuan. Design of strip integral mirror for high power laser processing [J]. *J. Beijing University of Technology*, 2002, **28**(3): 334~336
王智勇, 陈虹, 左铁钊. 一种大功率激光加工用带式积分镜的设计 [J]. *北京工业大学学报*, 2002, **28**(3): 334~336
- 5 Ji Lingfei, Wang Wei, Yu Zhenlong *et al.*. Improving dielectric properties of Ta_2O_5 ceramics by laser irradiation [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(10): 1242~1245
季凌飞, 王伟, 于振龙等. 激光辐照改变 Ta_2O_5 陶瓷的介电性能 [J]. *光电子 • 激光*, 2004, **15**(10): 1242~1245
- 6 Joseph M. Geary. Strip mirror integrator for laser beam uniformity on a target [J]. *Opt. Eng.*, 1989, **28**(8): 859~864
- 7 [邓锡铭], Liang Xiangchun, Chen Zezun *et al.*. Uniform illumination of large focal targets using a lens array [J]. *Chinese J. Lasers*, 1984, **12**(5): 257~260
[邓锡铭], 梁向春, 陈泽尊等. 用透镜阵列实现大焦斑面的均匀照射 [J]. *中国激光*, 1984, **12**(5): 257~260
- 8 Lü Baida, Cai Bangwei, Zhang Bin. Spatial shaping and uniform irradiation on the target of high-power lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, **28**(1): 25~28
吕百达, 蔡邦维, 张彬. 强激光的空间整形和靶面均匀辐照技术 [J]. *红外与激光工程*, 1999, **28**(1): 25~28
- 9 Fred M. Dickey, Burton D. O'Neil. Multifaceted laser beam integrators; general formulation and design concepts [J]. *Opt. Eng.*, 1988, **27**(11): 999~1007