

新型高功率激光加工用激光光束展宽方法的探索性研究

罗 曦¹ 陈培锋¹ 王 英¹ 梁乔春¹ 杜建伟²

(¹华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074
²安阳睿愚运销有限责任公司激光加工中心, 河南 安阳 455000)

摘要 探索性地提出了一种基于新型扇形类抛物面聚焦镜的高功率激光加工用激光光束的展宽方法, 并对该方法的实现原理和光路设计进行了研究与相关实验验证。根据几何光学原理, 采用光线追迹的方法, 对实际激光光束经新型光束展宽系统变换后的聚焦特性进行了分析。理论结果表明, 通过光束展宽系统变换后, 能够将原始圆形激光束连续扫描展宽为光强分布均匀的大尺寸(20~500 mm)弧形条状聚焦光斑。利用横流 CO₂ 激光器, 对该光束展宽系统的实际光学变换特性进行了初步实验研究, 实验结果与理论结果相符合。

关键词 激光技术; 光束展宽; 新型扇形类抛物面聚焦镜; 光线追迹; 聚焦特性

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0403003

An Exploratory Investigation of Wide-Band Beam Shaping for High Power Laser Processing

Luo Xi¹ Chen Peifeng¹ Wang Ying¹ Liang Qiaochun¹ Du Jianwei²

(¹ College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China
² Laser Processing Center, Anyang Ruiyu Transport to Sell Co., Ltd, Anyang, Henan 455000, China)

Abstract A novel high-power wide-band laser beam shaping method using a fan-shaped quasi-parabolic mirror is exploringly proposed. The design principle and preliminary experimental results of the wide-band beam shaping system based on a fan-shaped quasi-parabolic mirror are presented. According to the geometrical optics, the focusing characteristics of a real beam passing through the beam wide-band shaping system are investigated by ray tracing. It is demonstrated that, after transformed by the wide-band beam shaping system, the original high-power circular laser beam can be shaped into an arc-shaped scanning strip of uniform intensity distribution and large size (20~500 mm). By using a transverse flow CO₂ laser, the optical transformation characteristics of the actual wide-band beam shaping system are investigated. The experimental and theoretical results are in good agreement.

Key words laser technique; beam expansion; novel fan-shaped quasi-parabolic mirror; ray tracing; focusing characteristics

OCIS codes 140.3300; 140.3390; 220.2740; 220.4830; 230.4040

1 引 言

随着激光热处理的推广及应用, 如何优化输出光束质量与光斑形状以提高激光热处理的效率一直为人们所关注^[1,2]。实际激光束的光强分布以及光

斑形状对激光热处理硬化层的性能影响极大^[3]。在高功率激光热处理、激光淬火及激光熔覆中, 普遍认为具有一定功率密度且分布均匀的方形、矩形或宽带光斑是一种较为理想的光束结构^[1]。迄今国内外

收稿日期: 2010-09-10; 收到修改稿日期: 2010-11-22

作者简介: 罗 曦(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事激光光束传输、控制与变换等方面的研究。

E-mail: luoxihust@126.com

导师简介: 陈培锋(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光加工、光电检测等方面的研究。

E-mail: pfchen@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

已发展了多种光束整形技术:如采用方形积分镜^[4,5]、带式积分镜^[6]、二元光学元件^[7]、微透镜阵列^[8]、光波导均束^[9]、宽带扫描转镜^[10~12]等多种方法获取光强分布较均匀的方形、矩形或宽带光斑。在上述光束整形技术中,使用较为成功的是方形积分镜与宽带扫描转镜。但方形积分镜的制造工艺较为复杂,制造成本昂贵。本课题组在从事激光光束传输变换理论与实验研究的基础上,曾提出过一种高功率激光加工用的新型宽带光斑成型抛物面镜^[13],其制造工艺简单,可利用高精车一次加工成型,克服了方形积分镜制造工艺复杂的缺点。

利用激光束进行材料表面热处理时,往往要求输出激光束的宽度与被处理工件相匹配,这样可以尽量避免激光热处理时出现热处理带之间的搭接,实现热处理层厚度的均匀性。随着对大型工件激光热处理需求的日益增长,利用现有整形技术所获得的宽带光斑的尺寸相对有限,已难以满足热处理加工效率的需要。具有大尺寸、高功率密度的有效宽带光斑处理技术已成为迫切需要解决的问题。

鉴于上述问题,本文探索性地提出了一种基于新型扇形类抛物面聚焦镜的高功率激光加工用激光光束展宽方法,并针对实际的光束展宽系统进行了设计。利用该方法,能够在现有整形技术更宽的范围(20~500 mm)内对高功率激光束进行有效的连

续可控展宽。利用光线追迹的方法对实际激光光束经该光束展宽系统变换后的聚焦特性进行了数值模拟,并利用3 kW横流CO₂激光器,对该新型光束展宽系统的实际光学变换特性进行了初步实验研究。实验结果与理论结果相符合。

2 实现原理

利用新型扇形类抛物面聚焦镜实现高功率激光光束展宽的基本原理如图1所示。由高功率CO₂激光器输出的沿y轴方向传输的连续激光束经平面反射镜M₁导向后,光路改变90°,沿-z向垂直投射到与反射镜M₁垂直的偏转式振镜M₂的镜面中心O'处。光束再经偏转式振镜M₂反射到与之水平的新型扇形类抛物面聚焦镜M₃上,并由其反射聚焦于被处理工件的表面。上述新型扇形类抛物面聚焦镜M₃的回转中心O'与偏转式振镜M₂的镜面中心O'重合。当偏转式振镜M₂在电机带动下做高速往复摆动时,作为光束展宽元件的新型扇形类抛物面聚焦镜M₃会将由偏转式振镜M₂投射来的扇形区域内的扫描光束连续反射扫描到被处理工件的表面,形成聚焦的均匀弧形条状光斑。所得均匀弧形条状光斑通过与被处理工件的相对运动,即可实现大面积宽带激光加工处理。

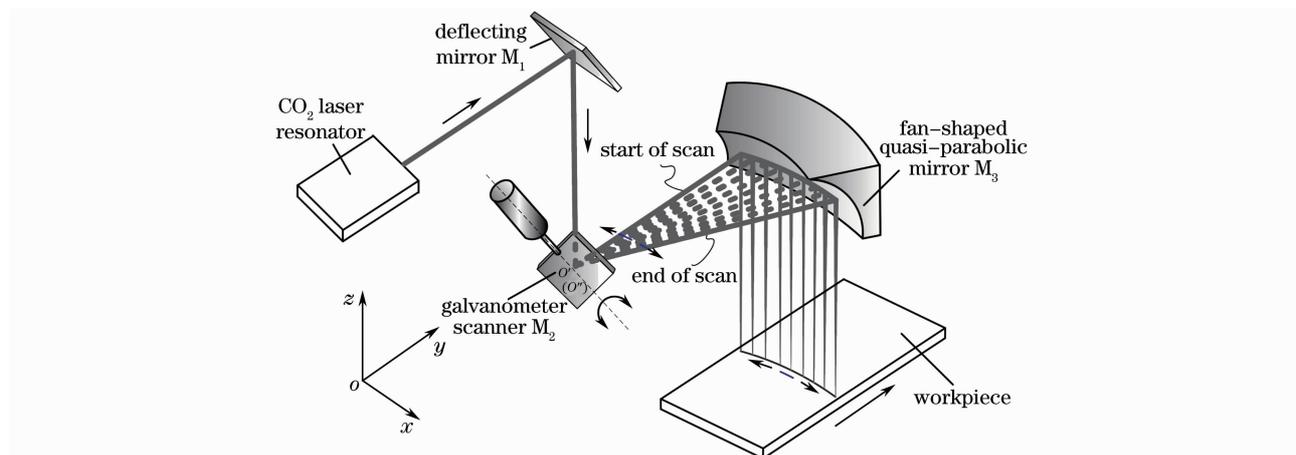


图1 基于新型扇形类抛物面聚焦镜的高功率激光束展宽系统

Fig. 1 Schematic diagram of high-power beam laser wide-band shaping system based on a fan-shaped quasi-parabolic mirror

3 新型扇形类抛物面聚焦镜的设计

作为图1所示高功率激光束展宽系统中的关键光学元件,新型扇形类抛物面聚焦镜M₃的设计原理是:将标准90°离轴抛物面反射聚焦镜的加工回转轴^[14]由原来平行于其焦平面的方向转至垂直于

其焦平面的方向。这样,由偏转式振镜M₂投射来的扇形区域内的扫描激光束,通过与偏转式振镜M₂对应水平安装的新型扇形类抛物面聚焦镜M₃反射后,将被连续扫描到被处理工件的表面,形成聚焦的均匀弧形条状光斑。

图 2 为该新型扇形类抛物面聚焦镜光路设计原理图。由于该新型扇形类抛物面聚焦镜 M_3 是以 $y=5f/2$ 为加工回转轴在高精车上一次加工成型的,因此,在该聚焦镜的任意子午面内(即任意一个经过加工回转轴 $y=5f/2$ 的平面与该扇形类抛物

面聚焦镜 M_3 相交所成的截平面。如图 2(b)所示的 $E'-E'$ 截面,其镜面的二维曲线方程(即加工回转轴 $y=5f/2$ 所在平面与该扇形类抛物面聚焦镜 M_3 镜面的交线)结构均一致。

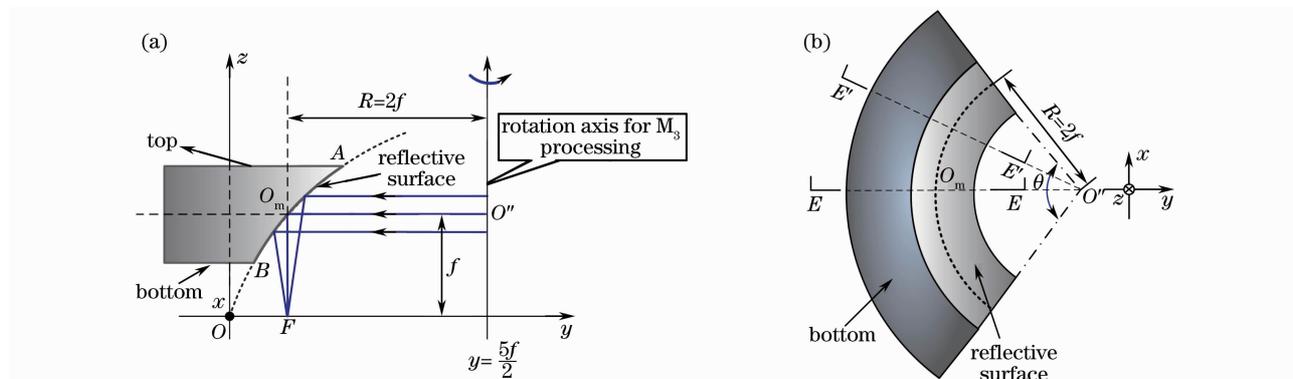


图 2 新型扇形类抛物面聚焦镜设计原理图。(a) $E-E$ 截面图,(b)仰视图

Fig. 2 Schematic diagram of novel fan-shaped quasi-parabolic mirror design. (a) $E-E$ sectional view, (b) bottom view

以图 2(b)所示 $E-E$ 子午面(即 $x=0$ 平面与该扇形类抛物面聚焦镜 M_3 相交所成的截平面)为例,对该新型扇形类抛物面聚焦镜的三维面型结构进行说明。该新型扇形类抛物面聚焦镜与入射激光束成 45° 夹角,镜面中心点 O_m 与加工回转轴[即图 2(a)所示轴位置 $y=5f/2$]的距离为 $R=2f$ 。在镜面中心点 O_m ,入射激光束与出射激光束的夹角为 90° ;而抛物面的焦点在 F 处,焦距为 f ,则 F 点的坐标为 $(0, f/2)$ 。

在图 2(b)所示的 $E-E$ 子午面内,该新型扇形类抛物面聚焦镜 M_3 的镜面 AB 段弧线采用标准抛物线方程

$$y = \frac{z^2}{2f}, \quad (1)$$

于是,根据图 2 中所示的三维直角坐标关系可得该新型扇形类抛物面聚焦镜 M_3 的镜面面型应满足

$$y = \frac{5f}{2} - \sqrt{\left(\frac{5f}{2} - \frac{z^2}{2f}\right)^2 - x^2}. \quad (2)$$

如图 2(a)所示,入射平行激光束经抛物弧线 AB 反射后将会聚于抛物线的焦点 F 处。当该抛物弧线 AB 绕加工回转轴旋转时,会将由偏转式振镜 M_2 投射来的、以扇形类抛物面聚焦镜 M_3 回转中心 O' 为旋转中心的扇形区域扫描光束,连续反射扫描到被处理工件的表面,形成聚焦的均匀弧形条状光斑。

当扇形类抛物面聚焦镜 M_3 的扇形圆心角 θ [见图 2(b)]一定时,上述弧形条状光斑的弦长 S 与扫描光束偏转角范围 $\Delta\alpha$,镜面中心 O_m 到加工回转轴

的距离 R 以及该聚焦镜 M_3 的焦距 f 之间基本满足关系式 $S \approx 2R\sin(\Delta\alpha/2) = 4f\sin(\Delta\alpha/2)$ 。

4 展宽光束的聚焦特性分析

根据几何光学原理,采用光线追迹的方法对实际激光束通过光束展宽系统变换后的聚焦特性进行分析。

在图 2(a)所示的直角坐标系中,由偏转式振镜 M_2 反射得到的激光束连续扫描等效模型如图 3 所示。为方便起见,图 3 中只绘出了激光束连续扫描过程中,对应 3 个不同扫描位置处反射光束的中心线。

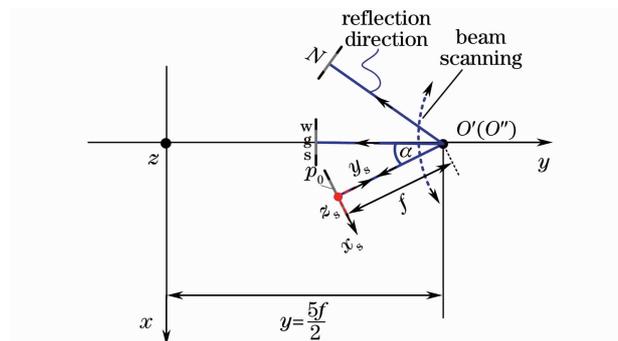


图 3 经振镜 M_2 反射后所形成的光束连续扫描等效模型

Fig. 3 Scanning equivalent model of the beam reflected by galvanometer scanner M_2

如图 3 所示,在反射光束的连续扫描过程中,选取对应空间某一扫描位置(对应扫描光束偏转角为 α)、且到扫描光束旋转中心 O' 的传输距离为 f 处的

反射光波振面 wgs; 并设此时已选波振面 wgs 所在空间平面为 N 。

因此, 在如图 3 所示的直角坐标系 $Oxyz$ 下, 对应该扫描位置处 (即对应扫描光束偏转角为 α 时), 已选波振面 wgs 所在空间平面 N 的方程可以表示为

$$\sin \alpha(x - f \sin \alpha) - \cos \alpha\left(y - \frac{5f}{2} + f \cos \alpha\right) = 0. \quad (3)$$

假设激光束为均匀分布的圆光束^[14], 采用如图 4 所示^[15]圆环阵列表示波振面 wgs。为使计算简化, 在已选反射光波振面 wgs 所在空间平面 N 内引入新的直角坐标系 $O_s-x_s y_s z_s$ (如图 3, 4 所示)。则在上述空间平面 N 内, 经振镜 M_2 反射后光点阵中的任意一点 P_0 在新直角坐标系 $O_s-x_s y_s z_s$ 下的三维坐标可以表示为

$$\begin{cases} x_s^2 + z_s^2 = r_s^2, \\ y_s = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $0 \leq r_s \leq D/2$; D 为激光束直径。

(4) 式也可以表示为极坐标形式

$$\begin{cases} x_s = r_s \cos t_s \\ y_s = 0 \\ z_s = r_s \sin t_s \end{cases}, \quad (5)$$

式中 r_s 为 P_0 点的极半径; t_s 为 P_0 点的极角。

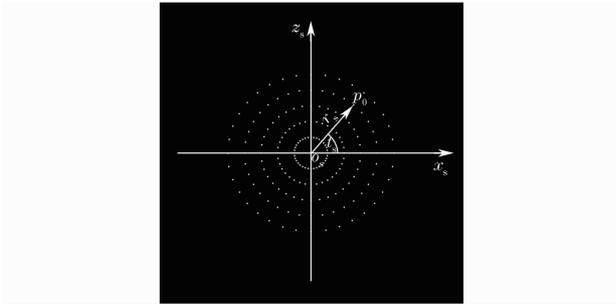


图 4 空间平面 N 内经振镜 M_2 反射后的光点阵
Fig. 4 Lattice of the reflected beam by galvanometer scanner M_2 in the spacial plane N

根据图 3 所示的空间几何关系可知: 原直角坐标系 $Oxyz$ 与新直角坐标系 $O_s-x_s y_s z_s$ 之间存在的变换关系

$$\begin{cases} x = x_s \cos \alpha + f \sin \alpha \\ y = x_s \sin \alpha + \frac{5f}{2} - f \cos \alpha, \\ z = z_s + f \end{cases}, \quad (6)$$

将(5)式代入(6)式, 可得在原直角坐标系 $Oxyz$ 下, 上述空间平面 N 内经振镜 M_2 反射后光点阵中的任意一点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 的三维坐标可以表示为

$$\begin{cases} x_0 = r_s \cos t_s \cos \alpha + f \sin \alpha \\ y_0 = r_s \cos t_s \sin \alpha + \frac{5f}{2} - f \cos \alpha, \\ z_0 = r_s \sin t_s + f \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $0 \leq t_s \leq 2\pi, 0 \leq r_s \leq D/2$ 。

取图 4 中任意一点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$, 由已知的偏角值 $(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$, 可得经振镜 M_2 反射后入射扇形类抛物面聚焦镜 M_3 的入射光线方程

$$\frac{x - x_0}{\cos \alpha_0} = \frac{y - y_0}{\cos \beta_0} = \frac{z - z_0}{\cos \gamma_0}, \quad (8)$$

联解(2)式与(8)式, 可得该入射光线与扇形类抛物面聚焦镜 M_3 的交点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 。那么, 由(2)式可得交点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 处该扇形类抛物面聚焦镜 M_3 的外法线 \mathbf{n} 方程为

$$\frac{x - x_1}{x_1} = \frac{y - y_1}{y_1 - \frac{5f}{2}} = \frac{z - z_1}{\frac{z_1}{f} \left(\frac{5f}{2} - \frac{z_1^2}{2f} \right)}, \quad (9)$$

利用入射光线矢量 $\mathbf{p}_0 \mathbf{p}_1$, 外法线矢量 \mathbf{n} 及反射光线矢量间的夹角关系 (见图 5), 可求得经上述扇形类抛物面聚焦镜 M_3 反射后的反射光线矢量方向角 $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ 。于是, 可得反射光线方程为

$$\frac{x - x_1}{\cos \alpha_1} = \frac{y - y_1}{\cos \beta_1} = \frac{z - z_1}{\cos \gamma_1}. \quad (10)$$

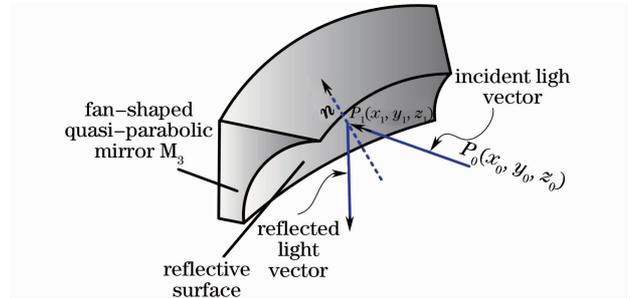


图 5 入射光线矢量 $\mathbf{p}_0 \mathbf{p}_1$, 外法线 \mathbf{n} 及反射光线矢量间的反射定律

Fig. 5 Reflection law between the incident light vector $\mathbf{p}_0 \mathbf{p}_1$, the normal line \mathbf{n} and the reflected light vector

对应某一确定的激光光束分布及某一扫描光束偏转角 α , 由(10)式可求得任意 z 平面内的对应反射光点位置。取遍图 4 中的各点, 则可得任意 z 平面内对应扫描光束偏转角 α 时的光斑形状。按照图 3 所示反射激光束的连续扫描方向取遍各扫描光束偏转角, 则可得任意 z 平面内经光束连续扫描后所形成的总体光斑形状。

在数值计算中, 根据实际情况, 取横流 CO_2 激光器输出光束的发散角 (全角) 为 3 mrad, 激光器输出的激光光束直径为 $D=25$ mm, 扇形类抛物面聚

焦镜 M_3 的焦距 $f=120$ mm。考虑扫描光束偏转角范围 $-60^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ ，计算得到不同离焦量条件下（即不同 z 平面内），实际激光束经新型光束展宽系统变换后的光斑形状以及扫描式光斑的运动轨迹，如图 6 所示。

为大致了解经光束展宽系统变换后的光斑形状及连续扫描式光斑运动的轨迹，图 6 中只绘出了经光束展宽系统变换后，对应激光束连续扫描过程中 13 个采样扫描位置处的光斑形状以及扫描光斑的运动轨迹。

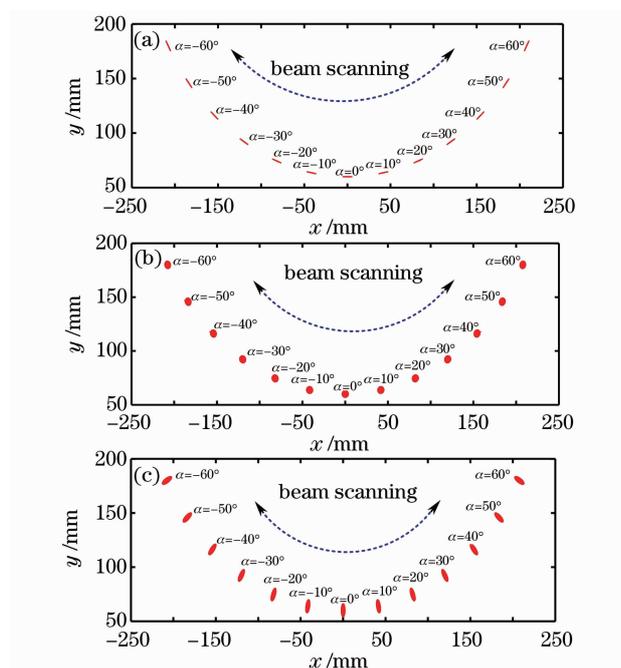


图 6 不同 z 平面处扫描式光斑的运动轨迹。(a)焦平面处($z=0$), (b)正离焦 40 mm 处($z=-40$ mm), (c)正离焦 75 mm 处($z=-75$ mm)

Fig. 6 Movement trajectory of the scanning spots in different z planes. (a) scanning spots in focal plane ($z=0$), (b) scanning spots in positive defocusing plane of 40 mm ($z=-40$ mm), (c) scanning spots in positive defocusing plane of 75 mm ($z=-75$ mm)

从图 6 中可以看到：1)通过光束展宽系统变换后，能够将原始圆形激光束连续扫描展宽为光强分布均匀的大尺寸弧形条状聚焦光斑(其弦长可达 500 mm)；2)弦长一定的情况下，弧形条状光斑的宽度(即垂直于扫描方向的光斑尺寸)可根据离焦量的大小进行控制[如图 6(a)~(c)所示]；3)弧形条状光斑的展宽范围(即扫描后所形成弧形条状光斑的弦长)可通过控制偏转式振镜 M_2 的偏转角度范围进行调节(一般可为 20~500 mm)；4)光束连续扫

描过程中的任一时刻，焦平面处光束扫描方向上的聚焦光斑尺寸偏大[如图 6(a)所示]，导致其功率密度较低，这对高功率激光淬火或熔覆应用中激光器的输出功率提出了新的要求。

5 实验研究

利用 3 kW 横流 CO_2 激光器，对该基于新型扇形类抛物面聚焦镜的高功率激光加工用激光光束展宽方法进行了初步实验研究。整体实验装置及新型扇形类抛物面聚焦镜 M_3 的实物图分别如图 7(a), (b)所示。

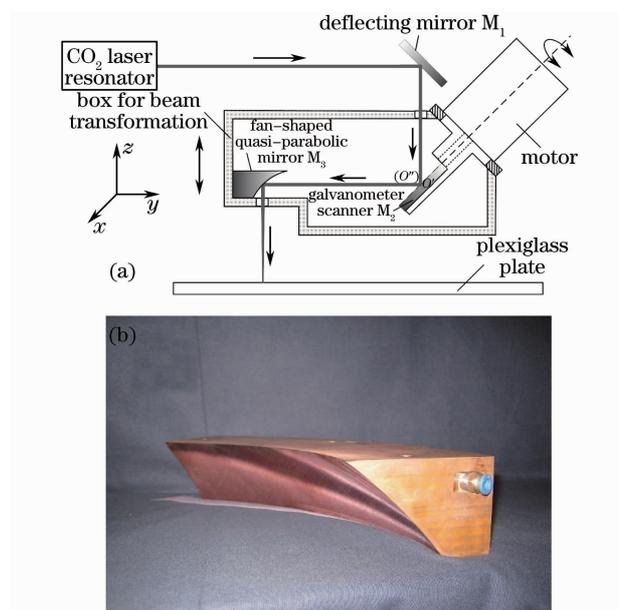


图 7 基于新型扇形类抛物面聚焦镜的光束展宽系统的实验装置(a)和实物照片(b)

Fig. 7 Experimental setup for wide-band beam shaping based on a fan-shaped quasi-parabolic mirror (a) and its photograph (b)

基于新型扇形类抛物面聚焦镜的光束展宽系统实验装置如图 7(a)所示。在该实验装置的装配过程中，应尽量保证扇形类抛物面聚焦镜 M_3 的回转中心 O' 与偏转式振镜 M_2 的镜面中心 O' 重合。

由高功率横流 CO_2 激光器输出的沿 y 向传输的连续激光束经平面反射镜 M_1 导向后，光路改变 90° ，沿 $-z$ 向垂直投射到与平面反射镜 M_1 位置垂直对应的偏转式振镜 M_2 的镜面中心 O' 处；上述连续激光束再经偏转式振镜 M_2 反射到与之对应水平安装的新型扇形类抛物面聚焦镜 M_3 上，并由其反射聚焦于有机玻璃板的表面；当偏转式振镜 M_2 在电机带动下高速往复式摆动时，作为光束展宽元件的新型扇形类抛物面聚焦镜 M_3 会将由偏转式振镜

M_2 投射来的扇形区域内的扫描光束连续反射扫描到有机玻璃板的表面,形成在 x 向具有一定展宽(即具有一定弦长)的均匀弧形条状光斑。

实验中可通过数控机床精密调节图 7(a)所示箱体在 z 向的位置,控制扇形类抛物面聚焦镜 M_3 的焦平面到有机玻璃板表面间的离焦量大小,以获取不同离焦量下连续扫描后所形成的弧形条状光斑形貌。

实验过程中通过电机控制偏转式振镜 M_2 的偏转角度范围,以确保扫描光束偏转角 α 在 $-6.5^\circ \leq \alpha \leq 6.5^\circ$ 范围之内连续变化。不同离焦量条件下,有机玻璃板表面烧蚀的连续扫描式弧形条状光斑形貌如图 8 所示。

从图 8 中可以看到:1)通过如图 7(a)所示的实际光束展宽系统变换后,能够将原始圆形激光束连

续扫描展宽为光强分布均匀的弧形条状聚焦光斑。2)弧形条状光斑的宽度(即垂直于扫描方向的光斑尺寸)可根据离焦量的大小进行控制:图 8(c)所示正离焦 75 mm 时弧形条状光斑的宽度约为 12 mm,这与图 6(c)所示理论模拟结果相符合。3)弧形条状光斑的展宽范围(即扫描后所形成弧形条状光斑的弦长)可通过控制偏转式振镜 M_2 的偏转角度范围进行调节:如图 8(a)~(c)所示弧形条状光斑的展宽弦长范围约为 55~64 mm,这与在实验中控制扫描光束偏转角 α 在 $-6.5^\circ \leq \alpha \leq 6.5^\circ$ 范围之内连续变化是一致的。

此外,图 8(c)所示正离焦 75 mm 处连续扫描时弧形条状光斑沿 $-x$ 向的宽度不均匀性,是由于实验中的光路装配误差所造成的。因此,上述实验结果与理论分析结果是基本相符合的。

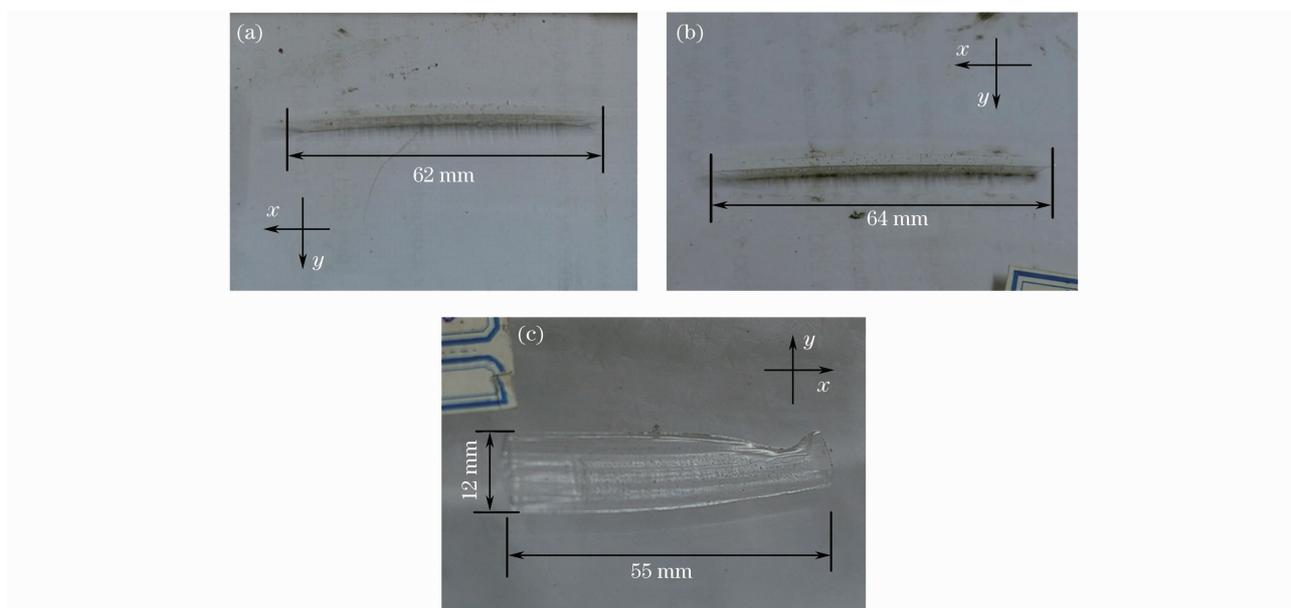


图 8 不同离焦量下的连续扫描式弧形条状光斑形貌。(a)焦平面处,(b)负离焦 5 mm 处,(c)正离焦 75 mm 处
Fig. 8 Experimental results of the scanning arc-shaped strip pattern in different defocusing planes. (a) focal plane, (b) negative defocusing of 5 mm, (c) positive defocusing of 75 mm

6 扇形类抛物面聚焦镜结构参数设计中存在的问题及改进措施

通过理论建模与初步实验研究发现:通过扇形类抛物面聚焦镜 M_3 反射聚焦后,原始圆形激光束被连续扫描展宽为光强分布均匀的大尺寸(弦长可达 500 mm)弧形条状聚焦光斑。然而,在光束连续扫描过程中的任一时刻,焦平面处光束扫描方向上的聚焦光斑尺寸偏大[见图 6(a)],导致其功率密度较低,在高功率激光淬火或熔覆的实际应用中有一定的局限性。

后续理论研究结果表明,当扇形类抛物面聚焦镜 M_3 的焦距 f 为某一定值时,通过适当缩短 M_3 镜面中心 O_m 到加工回转轴的距离 R [见图 2(a)],可以明显压缩焦平面附近区域光束扫描方向上的聚焦光斑尺寸,以实现高功率密度的大尺寸有效光束展宽。

同时,考虑到高功率激光热处理的实际应用需求,应适当增加扇形类抛物面聚焦镜 M_3 的焦距 f ,以避免热处理加工过程中产生的烟尘污染光学镜面。

7 结 论

探索性地提出了一种基于新型扇形类抛物面聚焦镜的高功率激光加工用激光光束展宽方法,并对基于该新型扇形类抛物面聚焦镜的光束展宽系统进行了设计。理论研究表明,通过该新型光束展宽系统变换后,能够将原始圆形激光束连续扫描展宽为光强分布均匀的大尺寸(20~500 mm)弧形条状聚焦光斑。利用横流 CO₂ 激光器,对该新型光束展宽系统的实际光学变换特性进行了初步实验研究,实验结果与理论结果相符合。通过理论模拟与实验研究,发现扇形类抛物面聚焦镜结构参数设计中存在的问题,并提出相应的改进措施。理论研究与初步实验结果,为进一步优化扇形类抛物面聚焦镜的结构参数、开展针对大型工件的激光淬火及激光熔覆研究提供了一定的前提与基础。

参 考 文 献

- 1 Yang Xichen. Study of laser pattern for a wide-band laser heat treatment[J]. *Chinese J. Lasers*, 1990, **17**(4): 229~235
杨洗陈. 激光热处理宽带光斑的研究[J]. 中国激光, 1990, **17**(4): 229~235
- 2 Li Junchang. The present arts and trends of laser heat treatment [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, 1997, **22**(1): 146~153
李俊昌. 激光热处理现状分析[J]. 昆明理工大学学报, 1997, **22**(1): 146~153
- 3 Wang Yunshan, Wang Juanjuan, Zhu fudong. Beam optimum system for laser heat treatment[J]. *Chinese J. Laser*, 2008, **35**(11): 1730~1734
王云山, 王娟娟, 朱福栋. 激光热处理光束优化系统[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1730~1734
- 4 Dixon D. Dourte, Richard L. Pierce, Walter J. Spawr. Optical integration with screw supports[P]. US Patent No: 4195913, 1980
- 5 Y. Kawamura, Y. Itagaki, K. Toyoda *et al.*. A simple optical device for generating square flat-top intensity irradiation from a Gaussian laser beam[J]. *Opt. Commun.*, 1983, **48**(1): 44~46
- 6 Wang Zhiyong, Chen Hong, Zuo Tiechuan. Design of strip integral mirror for high power laser processing[J]. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 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
- 7 Tao Shaohua, Chen Peifeng, Qiu Junlin. Study of a diffractive refractive optical element used for Gaussian beam's shaping[J]. *Optical Technology*, 1998, (6): 3~5
陶少华, 陈培锋, 丘军林. 一种用于高斯光束整形的衍射光学元件的研究[J]. 光学技术, 1998, (6): 3~5
- 8 Deng Ximing, Liang Xiangchun, Chen Zezun *et al.*. Uniform illumination of large focal target using a lens array[J]. *Chinese J. Lasers*, 1985, **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, 1985, **12**(5): 257~260
- 9 Li Zhi, Ji Lingfei, Jiang Yijian. Design of laser beam homogenizing instrument for ceramic sintering on double sides [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 240~243
李 智, 季凌飞, 蒋毅坚. 用于双面烧结陶瓷的激光均束装置的设计[J]. 中国激光, 2009, **36**(s1): 240~243
- 10 Yang Xichen, Wang Baoqi, Wang Yunshan *et al.*. Laser cladding by 10 kW-CO₂ laser wide-band scanning pyramid mirror[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 1996, **7**(5): 279~283
杨洗陈, 王宝琦, 王云山 等. 千瓦级激光熔敷宽带扫描转镜的研究[J]. 光电子·激光, 1996, **7**(5): 279~283
- 11 Yang Xichen, Wang Yunshan, Li Huishan *et al.*. Research on laser wide-band quenching principle and its applications[J]. *China Mechanical Engineering*, 2004, **15**(3): 196~198
杨洗陈, 王云山, 李会山 等. 激光宽带淬火机理及应用研究[J]. 中国机械工程, 2004, **15**(3): 196~198
- 12 J. D. Kim, J. K. Jung, B. C. Jeon *et al.*. Wide band laser heat treatment using pyramid polygon mirror[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **35**(5): 285~297
- 13 Luo Xi, Chen Peifeng, Wang Ying *et al.*. Novel kind of wide-band shaping parabolic mirror for high power laser processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1853~1856
罗 曦, 陈培锋, 王 英 等. 一种大功率激光加工用新型宽带光斑成形抛物面镜[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1853~1856
- 14 Shi Hongbin, Cheng Zhaogu, Xu Guoliang *et al.*. Study on focusing spot characteristic by off-axis parabolic mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(10): 880~886
石鸿斌, 程兆谷, 许国良 等. 激光束经离轴抛物面镜聚焦后光斑特性的研究[J]. 中国激光, 2000, **A27**(10): 880~886
- 15 Luo Xi, Chen Peifeng, Wang Ying. Analysis of 90° off-axis parabolic mirror focal spot characteristic[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 682~687
罗 曦, 陈培锋, 王 英. 离轴 90°抛物面镜焦斑特性分析[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 682~687