

高功率激光大宽度矩形光束抛物带式积分镜研究

刘晓东, 秦应雄^{1*}, 柳洁², 唐霞辉¹, 罗博伟¹

¹华中科技大学光学与电子信息学院激光加工国家工程研究中心, 湖北 武汉 430074;

²武汉武钢华工激光大型装备有限公司, 湖北 武汉 430223

摘要 提出一种通用的抛物带式矩形光斑积分镜,建立了分段抛物线匀化模型,推导了满足超精密车削加工的分段抛物线方程。该积分镜解决了传统直线带式积分镜在积分方向上匀化宽度太小的问题,可获得远大于输入光斑直径的匀化宽度,同时分析了该积分镜分割段数对输出光斑均匀性的影响。利用高斯光束行波传输方程,计算回转方向上的离焦光斑尺寸,解决了采用几何光学方法获得离焦光斑尺寸误差大的问题。设计了输出光斑尺寸分别为 $100\text{ mm}\times 3.2\text{ mm}$ 和 $14\text{ mm}\times 3.3\text{ mm}$ 的积分镜,采用 Zemax 和 SolidWorks 软件进行仿真,仿真得到的光斑尺寸分别为 $100.2\text{ mm}\times 3.2\text{ mm}$ 和 $14.2\text{ mm}\times 3.3\text{ mm}$ 。加工了 $14\text{ mm}\times 3.3\text{ mm}$ 的积分镜,在 3 kW 光纤激光器上进行实验,测得的光斑尺寸为 $14.3\text{ mm}\times 3.3\text{ mm}$,匀化方向均匀性为 90% ,满足激光加工应用要求。

关键词 激光光学; 激光光束整形; 积分镜; 分段抛物线; 矩形光斑; 匀化光斑

中图分类号 V261.8

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.191403

Research on Parabolic Band Integrating Mirror for High-Power Large-Width Rectangular Laser Beams

Liu Xiaodong¹, Qin Yingxiong^{1*}, Liu Jie¹, Tang Xiahui², Luo Bowei¹

¹National Engineering Research Center for Laser Processing, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

²Wuhan WISCO Huagong Laser Large Equipment Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430223, China

Abstract Herein, a versatile parabolic band integrating mirror for a rectangular spot is proposed. A segmented parabolic equation satisfying the ultraprecision turning process is derived using an established segmented parabola homogenization model. Using the integrating mirror, homogenization width in the integrating direction larger than that of the traditional rotating segmental linear integrating mirror can be obtained, which is considerably larger than the input spot diameter. The influence of the number of integrating mirror segments on the uniformity of the output spot is analyzed. To avoid large deviation errors caused by a geometric method, the transmission equation for traveling Gaussian waves is used to calculate the defocused spot size in the rotation direction. Two integrating mirrors with output spots of $100\text{ mm}\times 3.2\text{ mm}$ and $14\text{ mm}\times 3.3\text{ mm}$ are designed and simulated by SolidWorks and Zemax, respectively, and the simulated spot sizes are $100.2\text{ mm}\times 3.2\text{ mm}$ and $14.2\text{ mm}\times 3.3\text{ mm}$. The $14\text{ mm}\times 3.3\text{ mm}$ integrating mirror is processed and tested with a 3-kW fiber laser. The spot size is measured to be $14.3\text{ mm}\times 3.3\text{ mm}$, and the uniformity of the homogenization direction reaches up to 90% , which satisfies the application requirements for laser processing.

Key words laser optics; laser beam shaping; integrating mirror; segmented parabola; rectangular spot; homogenized spot

OCIS codes 140.3300; 080.4035; 220.4610

收稿日期: 2019-04-10; 修回日期: 2019-04-15; 录用日期: 2019-04-19

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFB1100302)、国家自然科学基金(61575072)、中央高校基本科研业务费资助(2016YXMS209)

* E-mail: qyx@hust.edu.cn

1 引言

激光光束整形是激光光学以及激光应用中的一个重要的研究方向。宽带匀化光斑^[1]具有激光热作用均匀^[2]、加工效率高等优势,不仅在传统的激光热加工如激光淬火、激光熔覆、激光合金化^[3]中具有重要应用,而且在硅片退火、LED加工中的剥离和结晶、太阳能电池的结晶、干燥和烧结以及有机发光二极管(OLED)、印刷电路板、聚合物的加工等领域也具有良好的应用前景。目前,宽带匀化光斑的需求宽度越来越大,例如:对于激光熔覆,光斑尺寸在40 mm左右;对于20 kW级的激光淬火,则需要100 mm以上;而对于OLED激光脱膜的加工过程,则需要750 mm以上。Laserline公司推出的OTZ ZOOM系列产品可以满足激光熔覆和激光淬火的需求,而LIMO公司相关产品则可以对OLED进行激光脱膜的加工。

目前,得到匀化光斑及相关光束整形的方案通常使用微透镜阵列^[4-6]、空间光调制器^[7]、非球面透镜组^[8]、衍射光学元件^[9-10]、带式积分镜^[11]等。微透镜阵列成本高,对光源的波长有要求;非球面透镜组对光源要求高,适用于单模激光器;衍射光学元件设计结构复杂,加工难度大;相对于上述三种方案,带式积分镜具有制造成本低、加工方便、适用功率高以及其自身材料与波长关系不大,基材适用范围宽等优点。

Laserline公司和LIMO公司所实现的大尺寸匀化光斑均是采用微透镜阵列而非带式积分镜。在高功率激光熔覆和激光表面淬火应用中,德国Kugler公司、LT公司及美国II-VI公司等推出了10 mm量级匀化宽度的积分镜产品;北京工业大学提出了一种旋转分段直线带式积分镜设计方法^[12],对于入射光束宽度与匀化光斑宽度之比大于5的情况,能够得到较好的匀化宽度,但无法得到与入射光束宽度接近的匀化光斑宽度。

本文建立分段抛物线匀化的物理模型,详细推导其计算方法,通过MATLAB软件分析分割段数对均匀性的影响,并利用SolidWorks和Zemax软件进行仿真,然后进行实验,提出一种可以获得精确尺寸的大宽度匀化光斑的抛物带式矩形光斑积分镜。

2 分段抛物线匀化的物理模型

2.1 积分方向光束分析

图1、图2分别为直线带式矩形光斑积分镜和

抛物带式矩形光斑积分镜积分方向的原理图。两种积分镜的基本原理均是将输入光斑分段反射,在工作面上得到相同位置和大小输出光斑进行叠加,从而达到匀化和整形的效果。为保证光斑均匀性,积分镜通常需要分割成7段或者更多。对于分段直线,由于平面反射,输出光斑尺寸约等于输入光斑尺寸除以分割段数,因此无法获得大尺寸光斑;而对于抛物带式矩形光斑积分镜,其反射面为抛物面的凸面,输出光斑发散,可获得大尺寸匀化光斑。

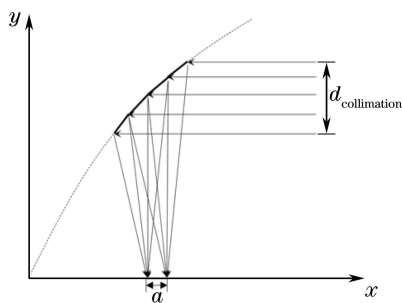


图1 直线带式矩形光斑积分镜原理

Fig. 1 Principle of linear band integration mirror for rectangular spot

如图2所示, $S_{-1}S_1$ 、 S_1S_2 均为抛物线段,首先,给定工作距离 $f_{work} = S_0F$,且 $F\left(\frac{f_{work}}{2}, 0\right)$,匀化光斑大小为 a ,则有点A的坐标为 $\left(\frac{f_{work}-a}{2}, 0\right)$ 、B的坐标为 $\left(\frac{f_{work}+a}{2}, 0\right)$ 。设输入光斑的直径为 $d_{collimation}$,分割带数为 n ,令参数

$$b = \frac{d_{collimation}}{n}, \quad (1)$$

则 S_0 的坐标为 $\left(\frac{f_{work}}{2}, f_{work}\right)$,给定 S_{-1} 坐标为

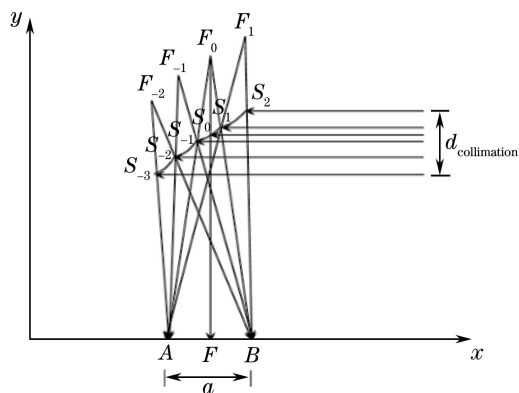


图2 抛物带式矩形光斑积分镜原理

Fig. 2 Principle of parabolic band integration mirror for rectangular spot

$\left(\frac{f_{\text{work}}-b}{2}, f_{\text{work}}-\frac{b}{2}\right)$, 即 $(x_{S_{-1}}, y_{S_{-1}})$, 此时 A, F, S_{-1}, S_0 的坐标已知, 可得直线 AS_{-1} 的方程为

$$y = \frac{y_{S_{-1}}}{x_{S_{-1}} - x_A}(x - x_A), \quad (2)$$

式中: x_A 为 A 点横坐标值。

将 $x = \frac{f_{\text{work}}}{2}$ 代入(2)式, 可以得到直线 AS_{-1} 与

SF_0 的交点坐标, 即抛物线 $S_{-1}S_1$ 焦点坐标 F_0 $\left[\frac{f_{\text{work}}}{2}, \frac{y_{S_{-1}}}{x_{S_{-1}} - x_A}\left(\frac{f_{\text{work}}}{2} - x_A\right)\right]$, 即 (x_{F_0}, y_{F_0}) 。本

研究设计的抛物线对称轴平行于 x 轴, 故设抛物线 $S_{-1}S_0$ 的方程为

$$(y - y_{F_0})^2 = 2p_0(x - a_0), \quad (3)$$

式中: p_0, a_0 均为抛物线方程的参数。

根据抛物线的性质, 当 $x = x_{F_0}$ 时, 有

$$p_0^2 = 2p_0(x_{F_0} - a_0), \quad (4)$$

因此,

$$a_0 = x_{F_0} - \frac{p_0}{2}. \quad (5)$$

将点 S_{-1} 的坐标代入抛物线方程, 可得

$$p_0 = x_{F_0} - x_{S_{-1}} - \sqrt{x_{F_0}^2 - 2x_{F_0}x_{S_{-1}} + x_{S_{-1}}^2 + y_{F_0}^2 - 2y_{F_0}y_{S_{-1}} + y_{S_{-1}}^2}, \quad (6)$$

$$a_0 = \frac{x_{F_0} + x_{S_{-1}} + \sqrt{x_{F_0}^2 - 2x_{F_0}x_{S_{-1}} + x_{S_{-1}}^2 + y_{F_0}^2 - 2y_{F_0}y_{S_{-1}} + y_{S_{-1}}^2}}{2}. \quad (7)$$

根据 B 点和 F_0 点的坐标, 可得直线 BF_0 的方程为

$$y = \frac{y_{F_0}}{x_{F_0} - x_B}(x - x_B), \quad (8)$$

式中: x_B 为 B 点横坐标值。

联合(3)~(8)式, 可得抛物线 $S_{-1}S_0$ 和直线 BF_0 的交点, 即所求抛物线的右端点 S_1 的坐标为

$$x_1 = x_{F_0} - \frac{(x_{F_0} - x_B)(p_0x_B - p_0x_{F_0}) + \sqrt{p_0(p_0x_{F_0}^2 - 2p_0x_{F_0}x_B + 2x_{F_0}y_{F_0}^2 + p_0x_B^2 - 2a_0y_{F_0}^2)}}{y_{F_0}^2}, \quad (9)$$

$$y_1 = \frac{y_{F_0}(x_1 - x_B)}{(x_{F_0} - x_B)}. \quad (10)$$

至此, 中心段 $S_{-1}S_1$ 计算完毕, 接下来计算 $S_{-1}S_1$ 右边的抛物段 S_iS_{i+1} 。设相邻焦点的纵坐标之差为 b_{F_i} , 通过相似三角形和近似计算可得

$$\begin{cases} b_{F_i} = \frac{2y_{F_{i-1}}}{y_{S_i} + y_{S_{i-1}}}b_{F_{i-1}}, \\ b_{F_0} = b \end{cases} \quad (11)$$

式中: i 为抛物线段数序号, 中心段左边为负, 右边为正; $y_{F_i} = y_{F_{i-1}} + b_{F_i}$ 。

根据 AS_i 的方程和 S_i 的纵坐标即可得到焦点

F_i 的坐标为 $\left[x_A + y_{F_{i-1}}\left(\frac{x_{S_i} - x_A}{y_{S_i}}\right), y_{F_{i-1}} + b_{F_i}\right]$ 。

类似地, 对于中心点左边的抛物段, 可按照相同的方法进行计算, 但要注意区分使用的是 A 点还是 B 点的坐标, 以及求交点时多个解的选取。

2.2 回转方向光束分析

对于积分镜的回转方向, 光斑大小通过改变离焦量实现。旋转积分镜高斯方向光斑大小的计算原

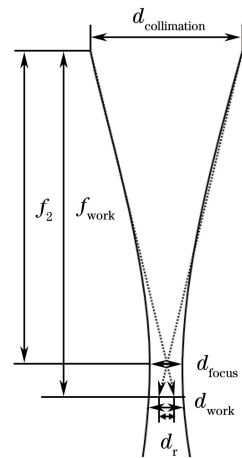


图3 回转方向计算原理

Fig. 3 Calculation principle in rotation direction

理如图3所示, 实线为回转光束计算方法, 虚线为通常使用的几何光学计算方法。

对于几何光学方法, 图3中 f_2 为反射镜焦距, f_{work} 为工作距离, d_r 为几何计算方法的光斑大小,

$d_{\text{collimation}}$ 为准直镜上光斑大小,通过三角形相似的方法,即图中虚线光路,可以求得离焦距离 $f_{\text{work}} - f_2$,该方法默认焦点处光斑大小为 0;而对于实际光源,输出光束为高斯光束,经过准直和聚焦后,焦点处的光斑大小并不为 0,因此,采用高斯光束行波方程进行计算。设光纤出口处的光斑直径为 d_{fiber} ,准直镜和积分镜的焦距分别为 f_1 、 f_2 ,根据几何光学知识可知,回转方向上焦点处的光斑大小为

$$d_{\text{focus}} = \frac{f_2}{f_1} \times d_{\text{fiber}}, \quad (12)$$

高斯光束任意位置 z 处的光斑大小为^[13]

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 + \frac{z^2}{z_0^2}, \quad (13)$$

式中: ω_0 为束腰半径; z_0 为常数。

设要求的工作距离和光斑大小分别为 f_{work} 和 d_{work} ,将点 $\left(f_{\text{work}} - f_2, \frac{d_{\text{work}}}{2}\right)$ 、 $\left(f_2, \frac{d_{\text{collimation}}}{2}\right)$ 和 $\left(0, \frac{d_{\text{focus}}}{2}\right)$ 代入(13)式,求解方程组,得到 ω_0 、 z_0 、 f_2 、 d_{focus} 的 12 组解,舍去其中不合理的解,选取合适的 f_2 作为回转距离,可使积分镜在工作距离 f_{work} 下的光斑大小为 d_{work} 。例如,在光源直径为 $600 \mu\text{m}$,准直镜焦距为 150 mm ,工作距离为 400 mm 的条件下,对于回转距离为 425.7 mm 的积分镜,两种方法计算的光斑大小分别为 3 mm 和 3.3 mm ,仿真和实验结果均为 3.3 mm 左右。可见,该方法可以减小 10% 左右的尺寸误差。

3 抛物带式矩形光斑积分镜参数分析

3.1 积分镜分割段数对输出光斑均匀性的影响

一般通过光斑的均匀性来评价光束聚焦匀化系统的优劣。光斑均匀性可通过对光斑强度的所有取样点取均方根 M_{RMS} 表示,即

$$M_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^m (I_p - \bar{I})^2}{m-1}} \times 100\%, I_p \geq 0.5I_{\text{max}}, \quad (14)$$

式中: I_{max} 为最大输出光强; I_p 为不小于 $0.5I_{\text{max}}$ 的取样点光强; m 为总取样点数; \bar{I} 为取样点光强的平均值。从(15)式可以看出, M_{RMS} 表征所有取样值对平均光强的偏离程度,其值越大,偏离程度越大,光斑均匀性越差,因此光斑均匀性 M 可表示为

$$M = 1 - M_{\text{RMS}}. \quad (15)$$

在理想的基模条件下,采用 2~10 段积分镜进

行仿真,所得结果如图 4 所示。可以看到:积分镜分割段数小于 5 时,均匀性基本不变,为 83% 左右(根据光斑均匀性定义, 83% 均匀性表示光斑在平均光强处上下浮动 17% ,所以 5 段匀化效果非常差);当段数超过 5 时,随着段数增加,均匀性明显提高,当达到 7 时,均匀性可达 95% 以上。因此,通常设计积分镜的分割段数为 7 段以上。

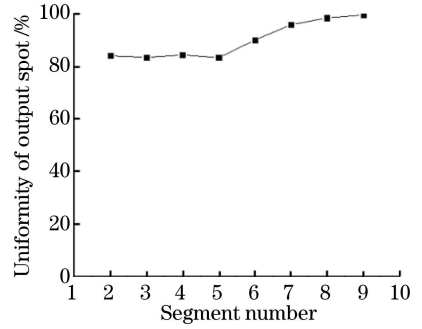


图 4 分割段数对输出光斑均匀性的影响

Fig. 4 Influence of number of segments on uniformity of output spot

图 5 为将积分镜分割成 3、5、7 段时的输出光斑三维图,其中 I 和 I_{max} 分别为取样点光强和最大光强。可以看出:分割段数越多,光斑均匀性越好;分割为 7 段时,匀化效果已经相当理想。因此,对于 10 mm 量级的输出光斑,如果选用直线带式积分镜,分段数不够时易影响均匀性。

3.2 参数设计

在光源直径为 $600 \mu\text{m}$,积分镜输入光斑直径为 32.5 mm ,准直镜焦距为 150 mm 的条件下设计两个积分镜,积分镜的口径均为 49.5 mm ,工作距离为 400 mm ,分割段数为 7 段,输出光斑大小为 $14 \text{ mm} \times 3.3 \text{ mm}$ 的积分镜回转距离为 425.7 mm 。每一段抛物线的端点和焦点坐标如表 1 所示。图 6 为抛物带式积分镜的模型图和实物图。输出光斑大小为 $100 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$ 的积分镜回转距离为 424.5 mm 。每一段抛物线的端点和焦点坐标如表 2 所示。

4 实验与仿真

对 3.2 节所设计的抛物带式矩形光斑积分镜进行仿真,利用 $14 \text{ mm} \times 3.3 \text{ mm}$ 的积分镜进行实验。

4.1 仿真结果

根据表 2 数据,利用 SolidWork 软件绘制积分镜模型,然后将其导入 Zemax 软件进行仿真,所得光斑如图 7 所示。

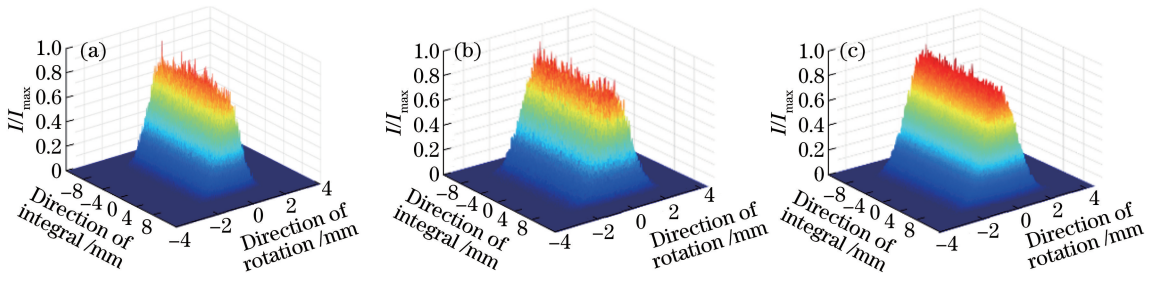


图5 不同分割段数下的输出光斑三维图。(a) 3段;(b) 5段;(c) 7段

Fig. 5 Three-dimensional diagrams of output spots with different numbers of segments. (a) 3 segments; (b) 5 segments; (c) 7 segments

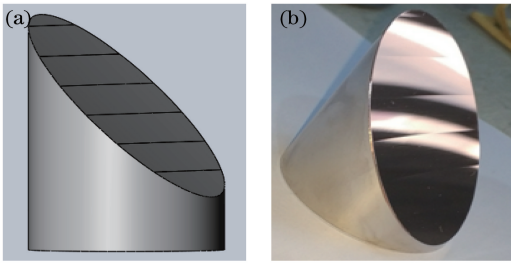


图6 抛物带式积分镜。(a)模型图;(b)实物图

Fig. 6 Parabolic band integration mirror for rectangular spot. (a) Diagrammatic figure; (b) real figure

仿真得到的光斑大小为 $100.2 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$, 与设计的光斑大小基本一致,但是从图7可以看出,在均匀方向上,边缘区域能量密度相对较大,这是因为本文计算方法只能保证每一个小段的输出光斑照

射在工作面的同一范围,并未对其中的能量分布进行计算。通常认为,激光热处理时作用光束在材料表面形成的截面为方形或矩形的均匀光斑是一种较理想的光束结构,但即便是一个简单的平面边界工件,如果期望获得均匀的淬火带,就需要在作用光斑边缘有能量突起的光束^[14-15],因此,类似于图7中边缘功率较大的光斑在实际使用中可行。当然,在实际设计中,也可以根据能量分布对每段抛物线的方程进行调整,从而得到分布均匀且对称的输出光斑。

同样地,利用 SolidWorks 软件绘制如图6(a)所示的积分镜模型,然后将其导入 Zemax 软件进行仿真,所得光斑如图8所示,仿真光斑大小为 $14.2 \text{ mm} \times 3.3 \text{ mm}$,与理论计算结果一致。

表1 输出矩形光斑大小为 $14 \text{ mm} \times 3.3 \text{ mm}$ 的抛物带式积分镜设计参数

Table 1 Parameters of parabolic band integration mirror for $14 \text{ mm} \times 3.3 \text{ mm}$ rectangular spot

Parabolic segment number	Focus coordinate /mm	Left end point coordinate /mm	Right end point coordinate /mm
1	(751.9303,159.20102)	(375.3867,176.12651)	(382.32245,182.69638)
2	(780.0554,171.97745)	(382.32245,182.69638)	(389.3926,189.51724)
3	(794.0951,185.89755)	(389.3926,189.51724)	(396.4643,196.46428)
4	(801.1046,200.0)	(396.4643,196.46428)	(403.47382,203.47447)
5	(808.176,213.98083)	(403.47382,203.47447)	(410.42276,210.54514)
6	(822.3404,228.15417)	(410.42276,210.54514)	(417.3717,217.73662)
7	(850.72076,243.42018)	(417.3717,217.73662)	(424.43564,225.1705)

表2 输出矩形光斑大小为 $100 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$ 的抛物带式积分镜设计参数

Table 2 Parameters of parabolic band integration mirror for $100 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$ rectangular spot

Parabolic segment number	Focus coordinate /mm	Left end point coordinate /mm	Right end point coordinate /mm
1	(455.5179,224.08635)	(417.35858,217.88004)	(424.85757,225.83057)
2	(446.23444,215.65775)	(410.12717,210.34502)	(417.35858,217.88004)
3	(437.70215,207.6788)	(403.06757,203.11478)	(410.12717,210.34502)
4	(429.845,200.0)	(396.07144,196.07143)	(403.06757,203.11478)
5	(422.84888,192.42545)	(388.9467,189.02396)	(396.07144,196.07143)
6	(415.37976,184.87997)	(381.77625,182.05824)	(388.9467,189.02396)
7	(407.40305,177.49763)	(374.6794,175.28896)	(381.77625,182.05824)

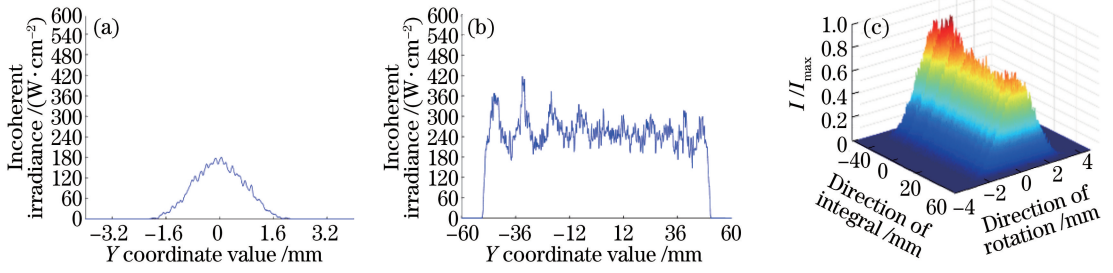


图 7 100 mm×3.2 mm 输出光斑。(a)回转方向;(b)积分方向;(c)三维光斑

Fig. 7 100 mm×3.2 mm output spot. (a) Rotation direction; (b) integrating direction; (c) three-dimensional output spot

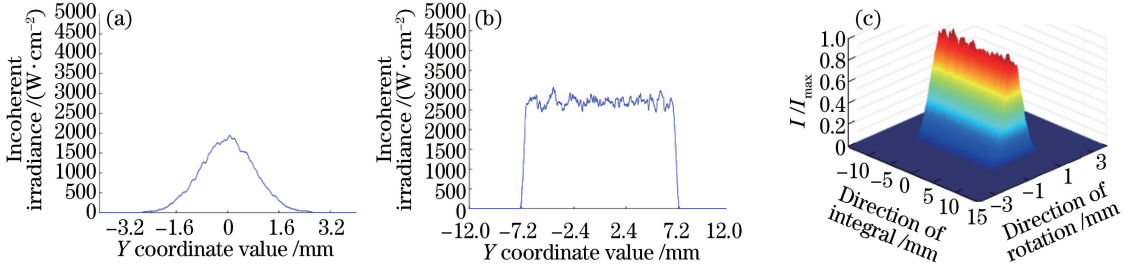


图 8 14 mm×3.3 mm 光斑。(a)回转方向;(b)积分方向;(c)三维光斑

Fig. 8 14 mm×3.3 mm output spot. (a) Rotation direction; (b) integrating direction; (c) three-dimensional output spot

4.2 实验结果

所设计的积分镜适用于激光熔覆,目前 100 mm×3.2 mm 的匀化光斑在熔覆中还没有明确的应用需求,考虑到积分镜加工成本高,本研究只加工一个具有实际应用需求的 14 mm×3.3 mm 积分镜进行实验。使用如图 6 (b)所示的 7 段 14 mm×3.3 mm 的抛物带式矩形光斑积分镜以及武汉锐科光纤激光技术股份有限公司生产的 3 kW 光纤激光器和模式分析仪进行实验,并在积分镜要求的条件下进行实验。

图 9 所示为实验装置,左边为激光器和整形系统,中间为模式分析仪,右边为用于遮挡激光的耐火砖。图 10 所示为模式分析仪测得的实验结果,其中图 10(a)所示为激光器输出的圆形光束光斑模式的一维分布,光束直径为 32.52 mm,呈高斯分布;图 10(b)所示为积分镜输出的矩形光束光斑模式的一维分布,积分方向呈均匀分布,回转方向呈高斯分布。模式分析测得的光斑大小为 14.3 mm×3.3 mm,计算得到的均匀性为 90%,实验测得的光斑尺寸与仿真结果以及理论设计均一致,但均匀性比理论结果差,原因是 32.52 mm 的光斑范围只能覆盖积分镜的 5~6 段,但该结果已经能够满足应用要求。

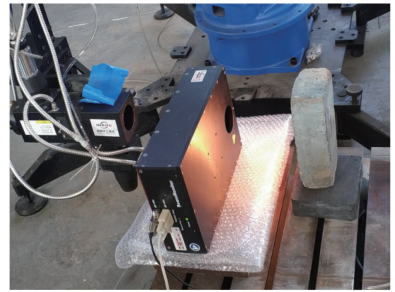


图 9 实验装置

Fig. 9 Experimental equipment

5 结 论

通过研究大宽度矩形光束抛物带式积分镜,建立了分段抛物线匀化的物理模型,仿真和实验结果表明,抛物带式积分镜可以有效解决输出光斑尺寸过小和计算精准性差的问题。在理想的高斯基模条件下,当分割段数超过 7 时,均匀性可达 95% 以上。设计了输出光斑大小分别为 100 mm×3.2 mm 和 14 mm×3.3 mm 的积分镜,利用 SolidWorks 和 Zemax 软件进行仿真,仿真光斑尺寸与设计光斑尺寸基本一致。利用加工的一款积分镜在 3 kW 光纤激光器上进行实验,测得的光斑大小为 14.3 mm×3.3 mm,匀化方向均匀性为 90%,满足激光加工应用要求。

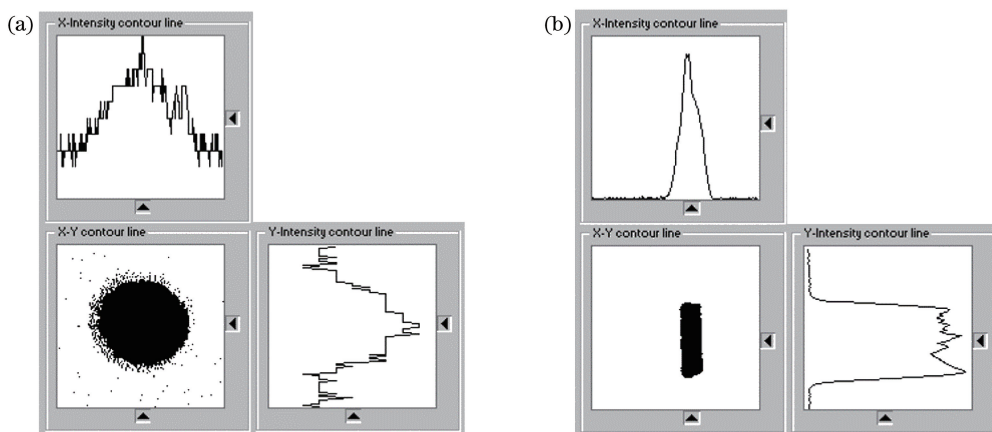


图 10 光斑一维分布图。(a)激光器输出;(b)积分镜输出

Fig. 10 One-dimensional distributions of spot. (a) Output spot of laser; (b) output spot of integrating mirror

参 考 文 献

- [1] Sugioka K, Cheng Y. A tutorial on optics for ultrafast laser materials processing: basic microprocessing system to beam shaping and advanced focusing methods [J]. *Advanced Optical Technologies*, 2012, 1(5): 353-364.
- [2] Traczyk M, Wojtanowski J, Mierczyk Z, *et al.* Theoretical analysis and optimization of 3D laser beam shaping [J]. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 2015, 63(2): 555-560.
- [3] Griso G, Miara B. Homogenization of periodically heterogeneous thin beams [J]. *Chinese Annals of Mathematics, Series B*, 2018, 39(3): 397-426.
- [4] Lei C Q, Wang Y F, Yin Z Y, *et al.* Homogenization system for diode laser stack beams based on microlens array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0502009.
雷呈强, 汪岳峰, 殷智勇, 等. 基于微透镜阵列的半导体激光器堆栈匀化系统 [J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0502009.
- [5] Liu Z H, Yang H, Shi Z D, *et al.* Homogenization of the semiconductor laser planar array using diffractive micro-lens array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(1): 0102005.
刘志辉, 杨欢, 石振东, 等. 衍射微透镜阵列用于面阵半导体激光光束匀化 [J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0102005.
- [6] Yin Z Y, Wang Y F, Jia W W, *et al.* Performance analysis of beam integrator system based on microlens array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(7): 0702007.
殷智勇, 汪岳峰, 贾文武, 等. 基于微透镜阵列的光束积分系统的性能分析 [J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0702007.
- [7] Chen B Y, Xu Z Y, Zhang S H, *et al.* Laser diode beam shaping method based on complex amplitude modulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0605005.
陈本永, 徐哲毅, 张世华, 等. 基于复振幅调制的半导体激光光束整形方法 [J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0605005.
- [8] Chang Y, Wang S L. Gaussian beam shaping of round spot based on spheric-aspheric cylindrical lens [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 060801.
常颖, 王狮凌. 基于球面-非球面柱透镜的圆光斑高斯光束整形 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 060801.
- [9] Liu X Q, Xue C X. Design of diffractive optical elements based on axicon and its light analysis [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 040501.
刘晓庆, 薛常喜. 基于轴棱锥的衍射光学元件设计及其光场分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 040501.
- [10] Lin Y, Hu J S, Wu K N. Algorithm for the design of diffractive optical elements for laser beam shaping [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(9): 1682-1686.
林勇, 胡家升, 吴克难. 一种用于光束整形的衍射光学元件设计算法 [J]. *光学学报*, 2007, 27(9): 1682-1686.
- [11] Huang Y Z, Ji L F, Jiang J Y. Design of crossed double strip integrators for high power laser beam homogenizing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(s1): 264-267.
黄雅峥, 季凌飞, 蒋毅坚. 一种反射型正交双带式积

- 分镜均束装置的设计[J]. 中国激光, 2006, 33(s1): 264-267.
- [12] Wang Z Y, Chen H, Zuo T C. 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.
- [13] Xia M. Laser principles and technology[M]. Beijing: Science Press, 2016: 37.
- 夏珉. 激光原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 37.
- [14] Li J C, Renard C, Merlin J. Calcul des effets thermiques induits par un dispositif optique permettant de condenser un faisceau laser de puissance en une tache rectangulaire[J]. Journal de Physique III, 1993, 3(7): 1497-1508.
- [15] Li J C. Diffraction and Thermal Action Calculation of Laser[M]. Beijing: Science Press, 2002.
李俊昌. 激光的衍射及热作用计算[M]. 北京: 科学出版社, 2002.