

扩束镜镜间距和倾斜度对激光聚焦特性的影响

杨亮亮¹, 张珞¹, 朱海红¹, 殷杰¹, 柯林达², 曾晓雁¹

¹华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074;

²上海航天精密机械研究所, 上海 201600

摘要 离焦量和激光能量的空间分布对激光加工质量有着重要的影响,通过调节扩束镜镜间距来满足不同加工材料对离焦量的不同需求是激光加工中常用的方法。通过使用 ZEMAX 软件分别在序列模式和非序列模式下对激光加工的光路系统进行建模,其中扩束镜是由双透镜组成的伽利略透射式系统,在仿真环境下测量了扩束镜不同镜间距和倾斜度对应的焦点位置和工作面光斑能量分布情况。结果表明:离焦量与镜间距变化量呈线性关系,离焦量随镜间距变化量的减小而减小;负离焦量随倾斜度的增大而增大。工作面上光斑的峰值功率随着扩束镜镜间距和倾斜度的增大而减小,镜间距改变带来的影响远大于倾斜度的影响。工作面上光斑位置的偏移量与倾斜角呈线性关系。光斑模式始终为基模高斯分布。实验测量了扩束镜不同镜间距下的离焦量和工作面光斑能量分布情况,实验结果与仿真结果较好得吻合。

关键词 激光技术; 激光扩束系统; ZEMAX; 聚焦特性; 激光加工; 镜间距

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.041401

Influences of Lens Distance and Tilt Angle Between Beam Expanders on Laser Focusing Characteristics

Yang Liangliang¹, Zhang Luo¹, Zhu Haihong¹, Yin Jie¹, Ke Linda², Zeng Xiaoyan¹

¹Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

²Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China

Abstract Defocusing amount and spatial distribution of laser energy have a significant effect on the quality of laser processing. It is a commonly used method in laser processing, and the method can adjust the lens distance between beam expanders to meet the different needs of defocusing amounts for the different laser processing materials. We use ZEMAX to model the optical system of laser processing with sequential and non-sequential modes. The beam expander is a Galileo transmission system composed of two lenses. In the simulation environment, the focal position and the spot energy distribution on the working plane are measured at different lens distances and tilt angles. The results show that the defocusing amount is proportional to the variation of lens distance, and the defocusing amount decreases with the decreasing distance. The negative defocusing amount increases with the increasing tilt angle. On the working plane, the peak power of laser spot decreases as the distance between the focal points of two lenses and the tilt angle increase. The effect of lens distance on the laser focusing characteristics is much greater than that of the tilt angle. The displacement of the laser spot is proportional to the tilt angle. The laser spot mode is always base-mode Gauss distribution. Finally, the defocusing amount and the spot energy distribution at different lens distances are measured. The experimental results are in good agreement with the simulation results.

Key words laser technique; laser beam expander; ZEMAX; focusing characteristics; laser processing; lens distance

OCIS codes 140.3300; 120.4820; 140.3390; 220.3620

收稿日期: 2017-10-19; 收到修改稿日期: 2017-10-30

基金项目: 国家重大安全基础研究(6132801)、国家自然科学基金(61475056, 61575074)

作者简介: 杨亮亮(1992—),男,硕士研究生,主要从事激光加工系统中光学设计方面的研究。E-mail: llyang@hust.edu.cn

导师简介: 朱海红(1968—),女,博士,教授,主要从事激光加工、激光增材制造工艺及装备方面的研究。

E-mail: zhuhh@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

1 引言

根据加工工艺和材料特性,激光加工的工作面并不都是焦平面,有时需要离焦。离焦量是指焦点距工作面的距离,当焦点位于工作面之上时,称为正离焦,反之为负离焦。若焦点位置不同,则工作面的光斑直径和离焦量不同^[1-2]。光斑直径决定了激光功率密度的大小,离焦量改变的是热源模型^[3],两者均会影响加工质量。不同材料和不同的加工方法所需的离焦量不同^[4-10],例如,在激光选区熔化(SLM)成形和激光焊接过程中,通常负离焦产生的熔深更大^[11]。此外,在 SLM、激光选区烧结(SLS)和激光微加工等激光加工装备的光路中,由于 f -theta 聚焦镜与工作面之间的距离在激光加工过程中无法改变,要获得不同的离焦量,通常采用调整扩束镜两镜之间的镜间距来实现。此外,受机械加工精度和装配的影响,扩束镜镜间距难以达到理想的两镜焦距之和,两个镜片的平行度也难以达到理论上的平行。因此,为了解激光加工参数对加工质量的影响,研究扩束镜的镜间距和倾斜度对激光聚焦特性的影响具有重要价值。

2007年, Bae 等^[12-13]通过电机驱动改变扩束镜镜间距来获得不同大小的聚焦光斑,以满足同一零件不同部位尺寸的加工要求,从而提高工业 SLS 系统的加工效率,但是并没有给出扩束镜镜间距与光斑尺寸之间的具体关系。2010年,许宝忠等^[14]研究了扩束镜两镜相对移动时系统等效焦点的变换规律,基于此搭建了三维激光标刻系统,以实现自由曲面上标刻的一致性,但仅研究了扩束镜镜间距的增加对激光聚焦特性的影响。2011年,张合勇等^[15]通过调整扩束镜正负透镜间距来研究激光远场聚焦特性。李文成等^[16]设计了用于远距离激光跟踪瞄准系统的激光扩束镜,研究表明当扩束镜镜间距发生微小偏移时,出射光束的束腰位置和束腰半径发生明显变化,即出射光束的准直性对扩束镜两镜焦点的偏移非常敏感。2013年, Eberle 等^[17]通过使用镜间距可变的动态调焦扩束系统,提高了激光微加工中激光的穿透深度,并使用 ZEMAX 软件对系统进行了仿真。

综上,扩束镜镜间距改变对系统的焦移、聚焦光斑尺寸和出射光束的准直性有很大的影响,但目前有关激光加工系统中的扩束镜镜间距对激光聚焦特性的影响研究几乎是空白,并且尚未出现关于镜片倾斜度对聚焦特性影响的研究。本文使用 ZEMAX 软件系统地研究了扩束镜不同镜间距和倾斜度下的

激光聚焦特性,获得离焦量和工作面光斑能量分布随扩束镜镜间距和倾斜度的变化规律。

2 ZEMAX 光路仿真

2.1 序列模式

图 1 为典型的激光加工光路系统原理图,其中,扩束镜由一个焦距为 f_a 的负透镜 L_a 和一个焦距为 f_b 的正透镜 L_b 组成。激光束经扩束镜后到达聚焦透镜,经聚焦透镜聚焦后到达工作面, f -Theta 聚焦镜与工作面之间的距离 h 在激光加工过程中是固定不变。若光路系统的焦距为 f_L , Δf ($\Delta f = h - f_L$) 为离焦量, $\Delta f > 0$ 为正离焦量, $\Delta f < 0$ 为负离焦量。对于基模高斯光束,聚焦光斑直径 w 满足

$$w = 2.44\lambda f_L / D, \quad (1)$$

式中 D 为入瞳光束直径, λ 为激光波长。为减小聚焦光斑直径,一般采用扩束镜来扩大入瞳光束直径 D ^[18-19]。扩束镜是激光加工光路的重要组成部分,其本质上是一对共焦点光学透镜,相当于倒置的望远镜系统^[20]。

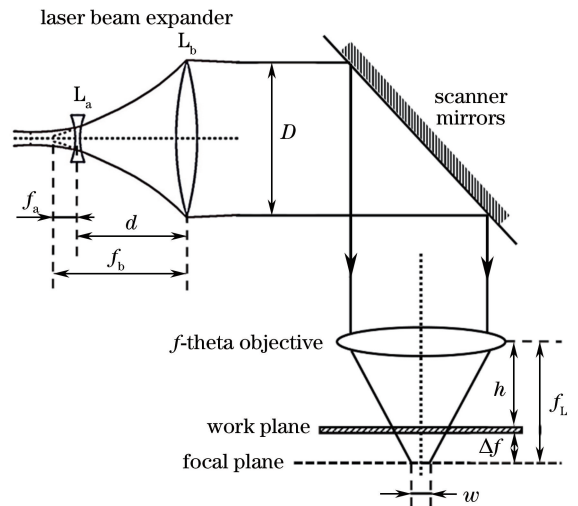


图 1 激光加工光路系统示意图

Fig. 1 Optical system diagram for laser processing

激光加工设备常用的扩束镜包括开普勒法设计的透射式系统,由两片凸透镜组成,如图 2(a)所示;伽利略法设计的透射式系统由一片凹透镜和一片凸透镜组成,如图 2(b)所示^[21]。定义扩束镜两镜焦点重合处为初始状态,对应的镜间距为初始值,此时的焦距值为聚焦镜到工作面的距离,离焦量为 0。镜间距的增大或减小均会使两镜焦点间距增大。由于 ZEMAX 的序列模式适用于成像系统的设计,因此选择该模式进行焦距的测量。

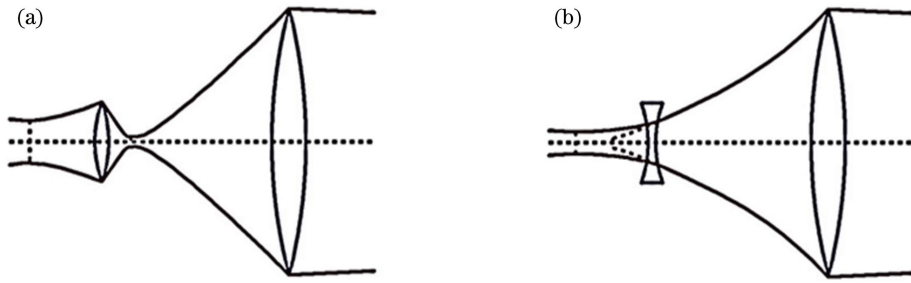


图2 激光加工中常用的扩束镜。(a)开普勒式系统;(b)伽利略式系统

Fig. 2 Beam expanders commonly used in laser processing. (a) Kepler system; (b) Galileo system

以激光加工系统的扩束镜为例,已知该光路系统的扩束镜为伽利略透射式系统,其初始镜间距为26.1 mm,入射光束直径为5 mm,放大倍数为4。在序列模式下经建模和优化得到的光路系统如图3所示,其由扩束镜、反射镜和聚焦镜组成,表1给出了系统参数。图3中序号2~9与表1中Surface的编号相对应,

表示光学元件表面的编号。经测试发现,无论是否在扩束镜(第6面)之后插入反射镜,优化所得系统的焦距不变,因此为了简化设计,在非序列模式下设计的光路系统将不含反射镜。

2.2 非序列模式

ZEMAX 的非序列模式适用于照明系统的设计,因此选择该模式进行光斑能量分布的测量。对应表1,在非序列模式下设置光路系统各元件的参数如表2所示。表中,Reference object 的编号与Item 的编号相对应,表示不同光学元件的编号,0表示 z 轴原点。 z_{position} 指在 z 轴上以参考物体的前表面为原点,自身前表面的坐标。非序列模式下的光路系统如图4所示,其中序号②~⑧与表2中Item 的编号相对应,表示光学元件的编号。分别在入射光处、扩束镜后以及工作面上设置了编号为2,5,8的三个探测器(Detector rect),用来测量光斑的能量分布。

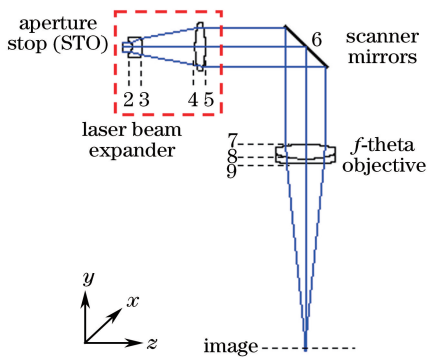


图3 序列模式下的光路系统示意图

Fig. 3 Schematic of optical system with sequence mode

表1 序列模式下的光路系统参数

Table 1 Parameters of optical system with sequence mode

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Semi-diameter /mm
OBJ	Infinity	Infinity	—	0.000
STO	Infinity	5.000	—	2.500
2	-3.800	5.200	N-BK7	3.500
3	-10.450	26.100	—	5.000
4	50.600	5.100	N-BK7	12.500
5	-50.600	50.000	—	12.500
6	Infinity	50.000	—	10.868
7	61.026	7.500	BK7	15.000
8	-44.842	2.500	SF5	15.000
9	-131.726	95.726	—	15.000
Image	Infinity	—	—	9.826

表 2 非序列模式下的光路系统参数

Table 2 Parameters of optical system with non-sequential mode

Item	Object type	Reference object	z_{position}	Material
1	Source Gaussian	0	0	—
2	Detector rect	0	5.000	—
3	Standard lens	2	10.000	N-BK7
4	Standard lens	3	31.300	N-BK7
5	Detector rect	4	55.100	—
6	Standard lens	5	50.000	BK7
7	Standard lens	6	7.500	SF5
8	Detector rect	7	98.226	—

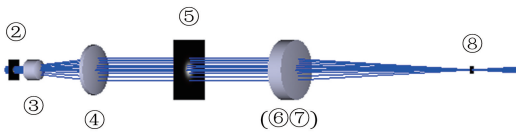


图 4 非序列模式下的光路系统示意图

Fig. 4 Diagram of optical system with non-sequence mode

3 测量结果及分析

3.1 镜间距和倾斜度改变对离焦量的影响

将聚焦镜最后一面到像面的距离(表 1 中第 9 面的厚度)设为变量,即所求的焦距值,其他参数设为固定值。改变扩束镜两镜的间距值(表 1 中第 3 面的厚度),变化范围为 $-2 \sim 2$ mm,每隔 0.2 mm 取一点进行测量。根据初始的间距和焦距计算出扩束镜镜间距变化量和离焦量,两者之间的关系如图 5 所示。通过线性拟合,求得离焦量与镜间距变化量的函数关系为

$$\Delta f = 4.372\Delta d, \quad (2)$$

式中 Δd 为间距差,拟合优度 $R^2 = 0.99923$ 。拟合结果表明,从初始位置 $A(0,0)$ 起,随着扩束镜镜间距的增大,正离焦量线性增大;随着扩束镜镜间距的减小,负离焦量线性增大。

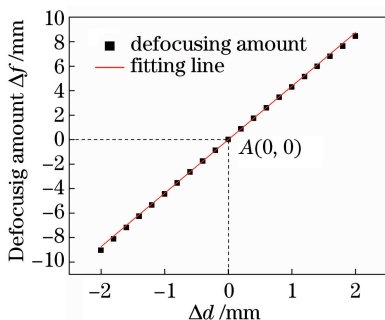


图 5 离焦量随扩束镜镜间距的变化

Fig. 5 Relationship between defocusing amount and distance between beam expanders

图 6 为扩束镜倾斜角示意图,由于透镜关于光轴(z 轴)呈中心对称,因此选取绕 x 轴顺时针方向的旋转为研究对象。实际调节过程中,扩束镜倾斜度的变化很小,因此角度变化范围选择 $0^\circ \sim 5^\circ$ 。改

变扩束镜负透镜的倾斜度,每隔 0.5° 测量一组数据。以 0° 时的焦距为初始值计算出离焦量,测量结果如图 7 所示。由图 7 可得,随着透镜偏转角度的增加,系统的负离焦量增大。当偏转角度增加至 5° 时,离焦量变化了 0.05 mm。

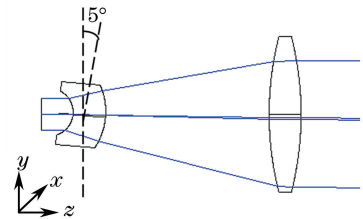


图 6 扩束镜倾斜角示意图

Fig. 6 Schematic of tilt angle of beam expander

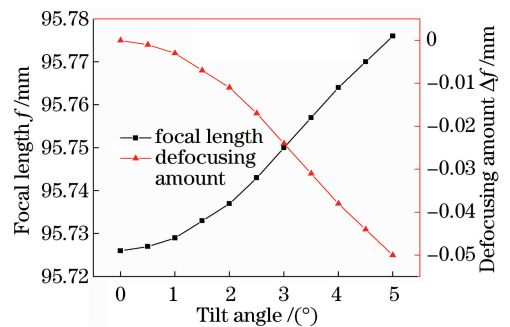


图 7 焦距、离焦量与扩束镜倾斜度的关系

Fig. 7 Relationship among focal length, defocusing amount and tilt angle of beam expander

3.2 镜间距和倾斜度改变对工作面光斑能量分布的影响

对应序列模式下所取的不同间距,改变表 2 中 4 号透镜的 z_{position} ,记录各探测器上的光斑能量分布情况。8 号探测器的 z_{position} 保持初始值不变,表示聚焦镜与工作面的间距固定。为避免扩束镜倾角改变导致后续元件随之发生偏转,在测量扩束镜倾斜度的影响时,需先将所有元件的参考物体设为 0。参考物体改变后,各元件的 z_{position} 需要重新设置,如表 3 所示。改变 3 号元件(即系统的第 1 个透镜)的倾斜度,使其变化范围为 $0^\circ \sim 5^\circ$,每隔 0.5° 记录各探测器上光斑的能量分布情况。

表3 非序列模式下改变扩束镜倾角时各元件的参数

Table 3 Parameters of optical system with non-sequential mode when lens tilt angle is changed

Item	Object type	Reference object	z position	Tilt angle / ($^{\circ}$)
1	Source Gaussian	0	0	0
2	Detector rect	0	5.000	0
3	Standard lens	0	15.000	5
4	Standard lens	0	46.300	0
5	Detector rect	0	101.400	0
6	Standard lens	0	151.400	0
7	Standard lens	0	158.900	0
8	Detector rect	0	257.126	0

表4给出了非序列模式下初始位置时三个探测器上光斑的能量分布情况,经拟合得到:

1) 对于2号探测器, $R^2=0.99993$,其能量分布表达式为

$$E(x, y) = -0.03 + 14109.53 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x+0.03}{1.00} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{y-0.33}{1.00} \right)^2 \right]; \quad (3)$$

2) 对于5号探测器, $R^2=0.99897$,其能量分布表达式为

$$E(x, y) = 3.93 + 1356.08 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-0.15}{2.89} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{y+0.15}{2.89} \right)^2 \right]; \quad (4)$$

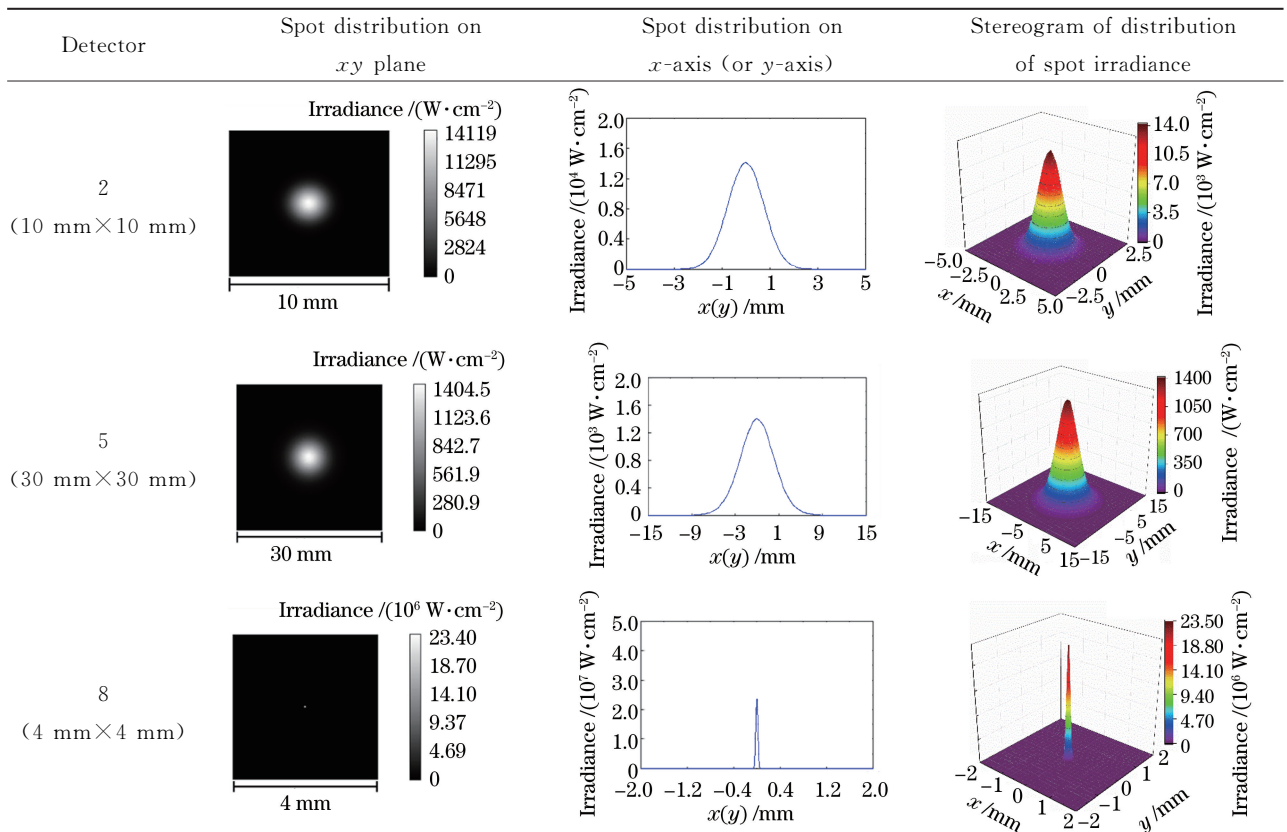
3) 对于8号探测器, $R^2=0.9982$,其能量分布表达式为

$$E(x, y) = -974.80 + 2.56 \times 10^7 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-0.04}{0.06} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{y+0.01}{0.06} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

三者均为高斯分布。

表4 初始位置光斑能量分布情况(滤波后)

Table 4 Spot energy distributions in initial position (after filtering)



3.2.1 对光斑直径和峰值功率的影响

非序列模式下测得扩束镜不同镜间距变化量下光斑直径与峰值功率的关系曲线如图 8 所示,由图可知:在初始位置($d = 26.1$ mm)处,光斑直径达到最小值 0.056 mm,峰值功率达到最大值 31142 $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。随着扩束镜镜间距的增大,工作面上光斑的直径增大、峰值功率迅速下降后趋于平缓,且两者的变化趋势关于初始位置对称。

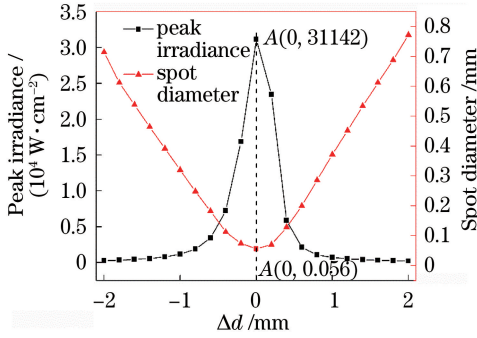


图 8 峰值功率、光斑直径与扩束镜镜间距变化量的关系

Fig. 8 Relationship among peak power, spot diameter and distance between beam expanders

图 9 给出了峰值功率、光斑直径与扩束镜偏转角度之间的关系。随着透镜偏转角度的增大,工作面上光斑的峰值功率迅速减小并趋于平缓,变化范围处于同一数量级上;光斑的直径呈线性增加,当偏转角度从 0° 增加至 5° 时,光斑直径增大了 0.04 mm。

扩束镜镜间距改变对光斑直径和峰值功率的影响远大于倾斜度改变所带来的影响,原因在于镜间距改变导致系统焦平面远离工作面,而倾斜度改变时,焦平面与工作面仍存在交集。

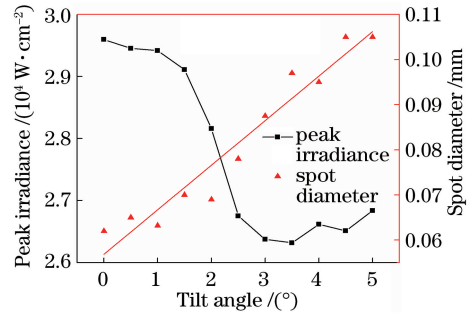


图 9 峰值功率、光斑直径与扩束镜偏转角度的关系

Fig. 9 Relationship among peak power, spot diameter and tilt angle of beam expander

3.2.2 对光斑位置的影响

由图 10(a)可看出,随着镜间距的变化,光斑中心的位置不变,始终在 xy 平面坐标的原点处,即探测器的中心。由图 10(b)可看出,随着透镜的偏转,光斑中心在探测器上移动,当倾斜度从 0° 增加至 5° 时,光斑中心的位置向 y 轴负方向移动。由于透镜关于光轴(z 轴)呈中心对称,当透镜绕 x 轴顺时针旋转时,工作面上的光斑沿 y 轴向负方向移动;当透镜绕 x 轴逆时针旋转时,光斑沿 y 轴向正方向移动;当透镜绕 y 轴旋转时同理。当顺时针和逆时针旋转相同的角度时,两者中心的位置关于坐标原点对称。图 10(c)给出了扩束镜倾斜度与工作面上光斑中心位置的关系曲线,拟合得到

$$y = -0.07435x, \quad (6)$$

式中 y 为位移, x 为倾斜角, $R^2 = 0.99973$ 。

综上,扩束镜镜间距和倾斜度的改变对激光聚焦特性有较大影响,直接影响激光加工质量,并且镜间距的影响更为显著。倾斜度改变引起的光斑位置变化会使激光扫描线位置发生改变,相当于加工区域整体发生位移。

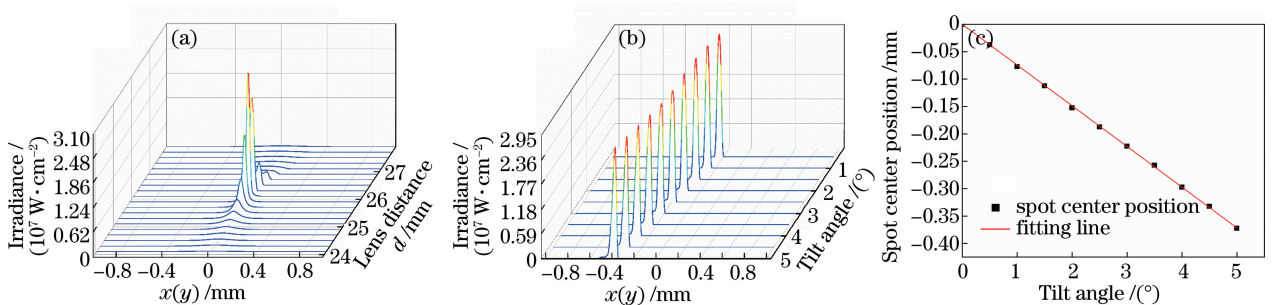


图 10 (a)不同镜间距下工作面光斑能量分布;(b)不同倾斜度下工作面光斑能量分布;(c)光斑中心位置与扩束镜倾斜度的关系

Fig. 10 (a) Distribution of spot energy at different lens distances; (b) distribution of spot energy at different tilt angles; (c) relationship between spot center position and tilt angle of beam expander

4 实验验证

实验所用的设备为华中科技大学武汉光电国家实验室自主研发的 SLM-300 型激光选区熔化成形设备,该装备的激光器为 IPG 公司的 500 W 连续光纤激光器,其扩束镜参数与模拟所用参数相同。采用倾斜钢板法验证扩束镜镜间距对离焦量的影响,实验装置及方法示意图如图 11(a)、(b)所示。激光从钢板较低一端向较高一端沿直线扫过,扫描路径垂直于钢板底边。调节光路系统中扩束镜镜间距,每隔 0.2 mm 在钢板上扫描出相邻的两条线段。通过观察发现激光扫描后在钢板上烧蚀出的痕迹为中间细且向两端逐渐变粗的线段。激光焦点处的光斑

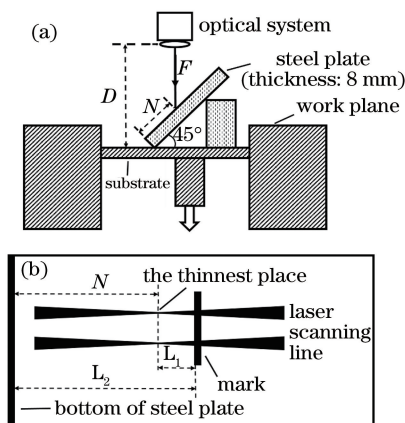


图 11 (a)测量焦点位置实验装置示意图;(b)测量方法示意图;(c)实验测得离焦量与镜间距变化量的关系

Fig. 11 (a) Schematic of experimental setup for measuring focus position; (b) schematic of measuring method; (c) relationship between defocusing amount and lens distance measured in experiment

采用激光在钢板上烧蚀点的方法测量光斑模式,进而验证扩束镜镜间距变化对工作面光斑能量分布的影响规律。实验装置示意图如图 12 所示,将钢板平放于基板上,调整基板高度使钢板上表面与工作面等高。调节光路系统中扩束镜镜间距,每隔 0.2 mm 在钢板上烧蚀一点,移动钢板位置避免烧蚀点重合,每点的烧蚀时间相同。利用 KEYENCE VHX-1000C 超景深三维显微镜对烧蚀点进行观

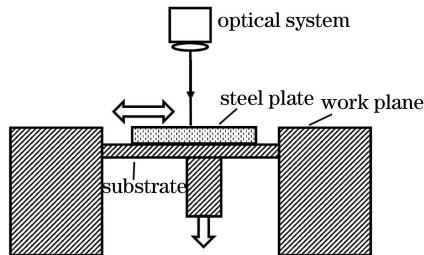


图 12 测量光斑能量分布实验装置示意图

Fig. 12 Schematic of experimental setup for measuring spot energy distribution

尺寸最小,烧蚀的痕迹最细,因此在线段的中部作一个标记,使其尽可能地接近线段中点,借助显微镜找到焦点位置,利用几何关系式

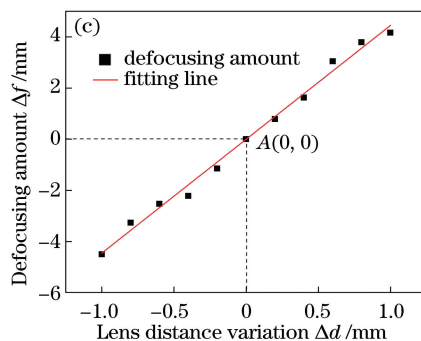
$$N = L_2 - L_1, \quad (7)$$

$$F = D - \left(\frac{N}{\sqrt{2}} + \frac{8}{\sqrt{2}} \right), \quad (8)$$

计算出焦距值 F 。图 11(c)为实验测得离焦量与扩束镜镜间距变化量之间的关系曲线,由图可得两者呈线性关系,拟合得到

$$\Delta f = 4.4496 \Delta d, \quad (9)$$

式中 Δd 为间距差, $R^2 = 0.99221$ 。与仿真测得的关系式[(2)式]对比发现,实验与仿真所得规律基本相同。



察。图 13 给出了部分镜间距变化量对应的烧蚀点能量分布情况,观察发现不同镜间距对应的光斑能量分布均为基模高斯分布,该结果与仿真结果相吻合。

5 结论

使用 ZEMAX 软件对激光加工中常用的光路系统进行了建模,采用序列模式与非序列模式相结合的方法进行测量,研究了激光扩束镜镜间距和倾斜度改变时,离焦量和工作面光斑能量分布的变化规律,最后通过实验验证了该规律的正确性。得到的结论如下:

1) 离焦量与扩束镜镜间距变化量呈线性关系,即从扩束镜两镜焦点重合的初始位置起,镜间距减小,则负离焦量增大;镜间距增大,则正离焦量增大。光斑的位置不随镜间距的改变而变化,光斑中心始终在光轴上。因此,在实际生产中可通过调节扩束

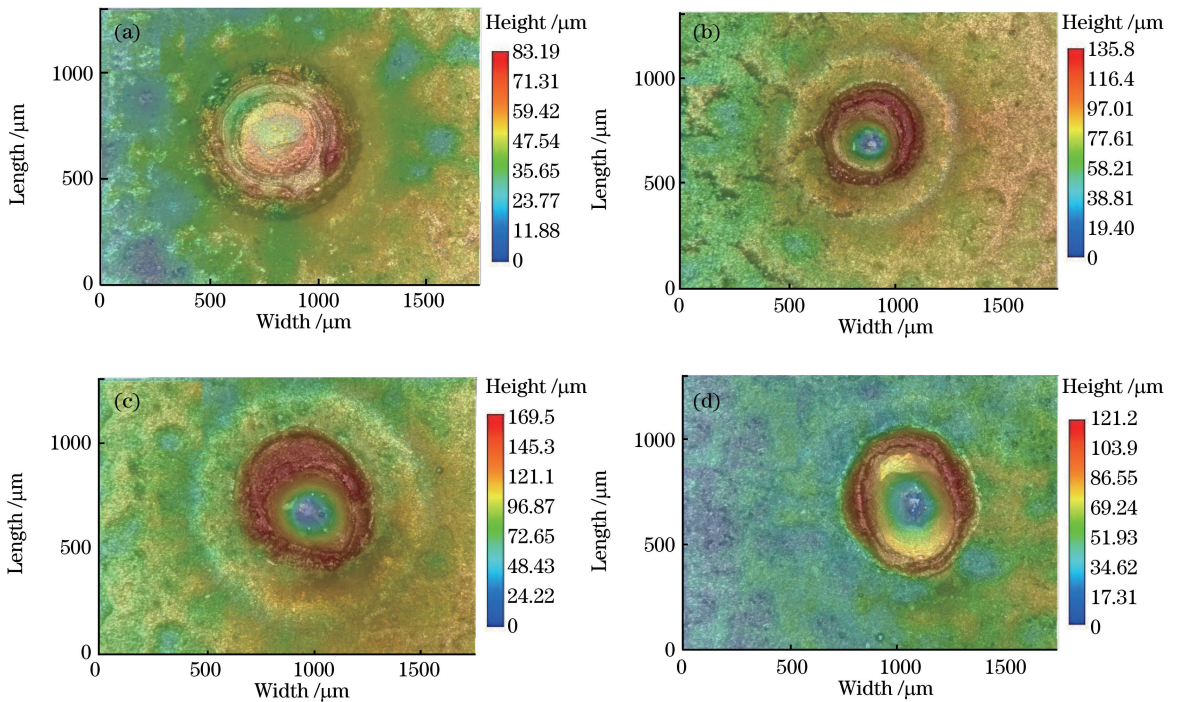


图 13 不同镜间距下光斑能量分布。(a) $\Delta d = 1.0$ mm; (b) $\Delta d = 0.2$ mm; (c) $\Delta d = -0.2$ mm; (d) $\Delta d = -1.0$ mm

Fig. 13 Distributions of spot energy under different lens distances. (a) $\Delta d = 1.0$ mm;

(b) $\Delta d = 0.2$ mm; (c) $\Delta d = -0.2$ mm; (d) $\Delta d = -1.0$ mm

镜间距来满足不同加工材料和工艺对离焦量的不同需求。

2) 随着扩束镜倾斜度的增大,负离焦量增大,其变化幅度给加工质量带来的影响小于镜间距所带来的影响。随着扩束镜的偏转,光斑中心向扩束镜偏转后镜面正对的方向移动,例如:当扩束镜绕 x 轴顺时针旋转时,工作面上的光斑向 y 轴负方向移动。光斑的位移量与偏转角度呈线性关系。因此,倾斜度的改变会使加工区域整体产生位移,在实际生产中应尽量提高光路镜片的安装精度,以减小其对加工质量的影响。

3) 光斑的模式不随扩束镜镜间距和倾斜度的改变而变化,始终为基模高斯分布。

参 考 文 献

- [1] Chen H, Qi J F, Wu S K, *et al.* Influence of beam-focusing characteristics on laser welding [C]// Proceedings of the 17th National Laser Academic Conference, 2005: 5.
陈虹, 祁俊峰, 吴世凯, 等. 光束聚焦特性对激光焊接的影响[C]// 第十七届全国激光学术会议论文集, 2005: 5.
- [2] Zhao M, Liu T, Jiang J, *et al.* Effect of defocusing distance on the contaminated surface of brass ring

with nanosecond laser in a 3D laser scanning system [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 59: 11-18.

- [3] Qi T, Zhu H, Zhang H, *et al.* Selective laser melting of Al7050 powder: Melting mode transition and comparison of the characteristics between the keyhole and conduction model[J]. *Materials & Design*, 2017, 135: 257-266.
- [4] Feng W J, Qin F D, Chen Y Y, *et al.* Analysis of technological parameter for laser cutting stainless steel sheet [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2011(11): 191-192.
冯文杰, 秦丰栋, 陈莹莹, 等. 激光切割不锈钢板工艺参数研究[J]. *机械设计与制造*, 2011(11): 191-192.
- [5] Chen Y X, Gao L. Analysis of processing parameters for laser cutting high-temperature alloy steel by orthogonal method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 111403.
陈宇翔, 高亮. 正交法分析激光切割高温合金钢工艺参数[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(11): 111403.
- [6] Yang Y Q, Luo Z Y, Su X B, *et al.* Study on process and effective factors of stainless steel thin-wall parts manufactured by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(1):

0103001.
杨永强, 罗子艺, 苏旭彬, 等. 不锈钢薄壁零件选区激光熔化制造及影响因素研究[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0103001.
- [7] Xu Z, Ha L, Gan H. The effect of processing parameters on performance of laser welding tailored blanks of different thickness[C]. IEEE Second International Conference on Digital Manufacturing and Automation, 2011: 1279-1283.
- [8] Zhu G, Li D, Zhang A, *et al.* The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(2): 349-356.
- [9] Guo L, Lin Y T, Zhang Z H, *et al.* Mechanism of laser coloration of stainless steel and color prediction based on neural network [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1102008.
郭亮, 林远添, 张震华, 等. 不锈钢激光着色机理及基于神经网络的颜色预测[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1102008.
- [10] Niu W Y, Yu A B, Wu J Z, *et al.* Influence of laser process parameters on taper and heat affected zone of glass ceramic hole[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 031601.
牛威杨, 于爱兵, 吴剑钊, 等. 激光工艺参数对玻璃陶瓷孔锥度和热影响区的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 031601.
- [11] Zhang J, Lin S J, Su S X, *et al.* Effect of defocusing amount on weld shaping in fiber laser welding of aluminum alloy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 121405.
张健, 林仕君, 苏绍兴, 等. 光纤激光焊接铝合金离焦量对焊缝成形的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 121405.
- [12] Bae S W, Kim D S, Choi K H. Development of new laser algorithm in the SFF system using a SLS process [C]. IEEE International Conference on Control, Automation and Systems, 2007: 2583-2586.
- [13] Bae S W, Kim J S, Kim D S, *et al.* An experimental study for rising manufacturing time and accuracy on SLS process [C]. IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing, 2010: 83-87.
- [14] Xu B Z, Liu T G, Wang M, *et al.* Research on laser marking technology for free-form surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2165-2169.
许宝忠, 刘铁根, 王萌, 等. 空间自由曲面激光标刻技术研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2165-2169.
- [15] Zhang H Y, Guo J, Zhao S, *et al.* Experimental property research of far-field focusing of laser beam [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(3): 0302005.
张合勇, 郭劲, 赵帅, 等. 激光远场聚焦特性实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0302005.
- [16] Li W C, Li Y, Zhou X S. Design of a laser beam expander for laser tracking and aiming system [J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(1): 73-76.
李文成, 李岩, 周学仕. 激光跟踪瞄准系统的扩束系统设计[J]. 电光与控制, 2011, 18(1): 73-76.
- [17] Eberle G, Chiron V, Wegener K. Simulation and realization of a focus shifting unit using a tunable lens for 3D laser material processing [J]. Physics Procedia, 2013, 41: 441-447.
- [18] Zhao X. The importance of the beam expander in laser processing system [J]. Laser Technology, 1999, 23(6): 379-380.
赵侠. 扩束系统在激光加工系统中的重要作用[J]. 激光技术, 1999, 23(6): 379-380.
- [19] Yu P, Gao Y G. A laser beam expander with adjustable lens spacing: CN101728730 A [P]. 2009-12-31.
于萍, 高云国. 一种透镜间距可调整的激光扩束器: CN101738730 A [P]. 2009-12-31.
- [20] Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R, *et al.* Laser principle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 79-83.
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 79-83.
- [21] Jia Y. Research on the structural misalignment, optimization and zoom technology of laser beam expanders [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 1-24
贾勇. 激光扩束系统的结构失调分析、优化和变倍技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014: 1-24