

基于自适应镜的可变圆光斑激光熔覆光学系统

秦应雄*, 张怀智, 昌思怡, 潘新宇, 唐霞辉

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

摘要 为实现不等壁厚复杂零件的激光增材制造,设计开发了一种基于自适应镜的可变圆光斑激光熔覆光学系统。系统由反射式抛物准直镜、反射式自适应镜和反射式抛物聚焦镜等组成。通过气压比例阀调节自适应镜腔内气压,改变自适应镜表面曲率半径,使光束以不同程度的会聚角或发散角入射到反射式抛物聚焦镜,从而改变作用在工件表面的激光光斑大小。建立了基于自适应镜变斑光学系统的物理模型,通过 Matlab 和 Zemax 软件仿真分析了自适应镜焦距的变化范围、反射式抛物准直镜与反射式抛物聚焦镜的焦距和位置,以及光纤激光光源参数等对系统变斑特性的影响。采用 6 kW 光纤激光器,按照变光斑、变功率、等速度、等功率密度的方案进行激光熔覆工艺实验,实现了壁厚由 3 mm 渐变到 8 mm 的椭圆形工件的激光熔覆增材制造。

关键词 激光熔覆; 增材制造; 可变光斑; 自适应镜; 光学系统

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0302007

Laser Cladding Optical System with Variable Circular Light Spot Based on Adaptive Mirror

Qin Yingxiong*, Zhang Huaizhi, Chang Siyi, Pan Xinyu, Tang Xiahui

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

Abstract In order to realize the laser additive manufacturing of complex parts with unequal wall thickness, a variable circular spot laser cladding optical system based on adaptive mirror is proposed. The system consists of reflective parabolic collimating mirror, reflective adaptive mirror and reflective parabolic focusing mirror. The air pressure proportional valve is used to adjust the gas pressure in the adaptive mirror cavity, to change the radius of curvature of the adaptive mirror surface, and make the beam incident on the reflective parabolic focusing mirror at different convergence angles or divergence angles, so as to change the spot size acting on the surface of the workpiece. Physical model is established based on adaptive mirror variable spot optical system, and using Matlab and Zemax softwares, the effects of the range of the adaptive mirror focal length, the focal length and position of the reflective parabolic collimating mirror and the reflective parabolic focusing mirror, and the parameters of the fiber laser source on the variable spot characteristics of the system are analyzed. A 6 kW fiber laser is used to carry out cladding experiment according to the scheme of variable spot, variable power, constant speed and constant power density, and an elliptical workpiece with a wall thickness of 3–8 mm is realized.

Key words laser cladding; additive manufacturing; variable spot; deformable mirrors; optical system

OCIS codes 220.4830; 350.3390; 220.2740

1 引言

激光增材制造是基于分层制造原理,利用高能量的激光作为能量源逐层熔凝固化材料,直接将数字化模型变成实体零件的新型制造技术,用来加工

各种复杂结构零件^[1-2]。航空发动机涡轮叶片、球缺、桶形件等,都是变壁厚结构,为达到减轻质量和降低成本的目的^[3-5],大量采用增材制造技术来制造。目前,激光增材制造普遍采用固定光斑的激光熔覆喷头,加工变壁厚复杂零件时,采用多道搭接填

收稿日期: 2019-09-27; 修回日期: 2019-10-24; 录用日期: 2019-10-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1100302)、国家自然科学基金(61575072)

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

充的方法^[6]或者加大薄壁位置变成等厚零件进行加工,往往造成零件加工尺寸精度差,材料浪费,零件质量增加等问题,因此开发变斑激光熔覆技术实现不等壁厚复杂零件激光增材制造是一个重要的研究方向^[7-9]。

国内外众多激光研究机构和企业提出了多种变斑激光熔覆方案,主要有离焦法、准直镜移动变焦法和变焦镜组变斑法等。离焦法是通过调节工件表面与出射光学系统距离改变投射到工件表面的光斑大小,苏州大学采用光内送粉离焦法,成功制作了基于阶梯型单道的薄壁叶片熔覆成型件^[10-12]。德国通快推出的 D70 变斑激光熔覆系统通过移动准直镜位置改变焦点位置,从而改变工件表面的光斑大小^[13],光粉耦合位置与工件表面距离保持固定,改变相同光斑尺寸,准直镜移动变焦法的移动行程为移动聚焦镜法行程的 1/5 左右,实现了快速变斑。德国 Laserline 公司采用变焦镜组方法开发了可变矩形光斑和可变圆形光斑的光学系统^[14]。华中科技大学秦应雄课题组研究了四镜组的变斑变焦光学系统,实现了聚焦光斑图像放缩比 1~3.75 可调^[15]。

上述几种光学系统都是采用透射式结构,限制了其在大功率激光熔覆中的应用。本文提出一种基于自适应镜的全反射式变斑激光熔覆光学系统,建立了变斑光学系统的物理模型。通过 Matlab 仿真模拟相关物理参数的影响规律,并用 Zemax 进行验证,经激光熔覆实验验证,能实现 3~8 mm 可变壁厚的激光熔覆零件的加工。

2 系统结构

全反射式变斑激光熔覆光学系统的整体结构如图 1 所示,包括反射式抛物准直镜、反射式自适应镜和反射式抛物聚焦镜等光学部件。从光纤端出射的激光束依次经过准直镜、自适应镜、聚焦镜到达工作平面。自适应镜是一个表层为薄铜片的空腔结构,初始为凹面,通过调节自适应镜腔内的气压,使薄铜片反射面发生凹凸曲率变化,从而改变自适应镜的焦距。图 2 给出了系统的等效光路,反射式自适应镜可以等效为一个焦距正负可调的透镜,当自适应镜的反射面为凹面时,相当于在原有准直聚焦系统中加入了凸透镜,光束为会聚状态入射到聚焦镜上,焦点上移;当自适应镜的反射面为平面时,系统焦点为原来聚焦镜的正常焦点位置;当自适应镜的反射面为凸面时,相当于在系统中加入了凹透镜,光束为发散状态入射到聚焦镜上,焦点下移。将工作平面固定在远焦点的位置,实现光斑大小可调,如图 2 所示。

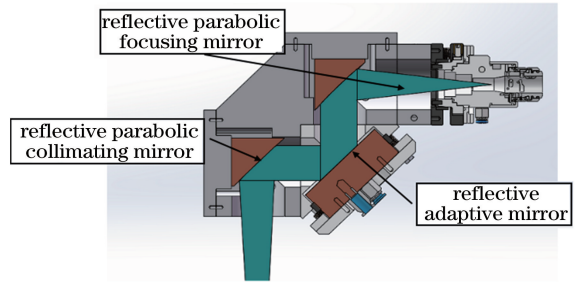


图 1 反射式可变光斑激光光学系统

Fig. 1 Reflective variable spot focusing system

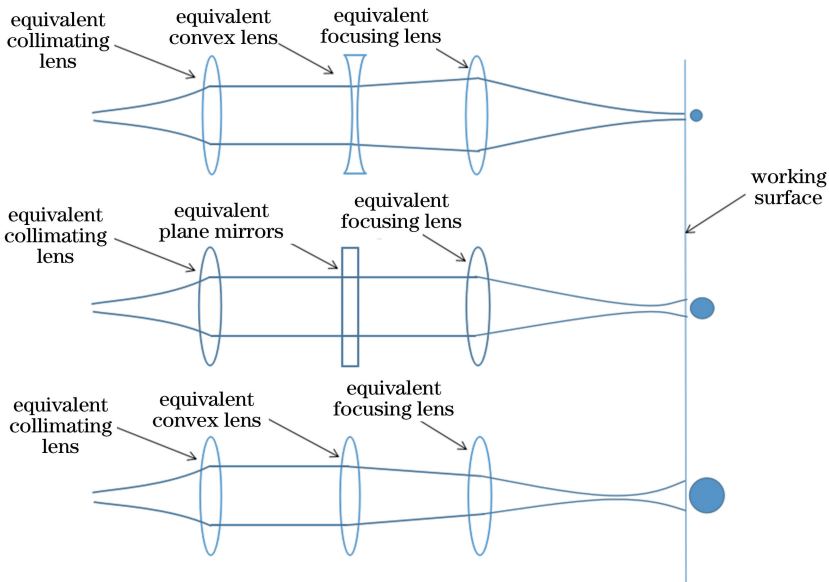


图 2 可变光斑光学系统等效光路图

Fig. 2 Equivalent optical path diagram of variable spot optical system

3 仿真设计

为确定光学系统的具体参数,利用激光 q 参数理论建立可变光斑光学系统的物理模型,通过 Matlab 分别对光学系统参数如自适应镜的焦距、准直镜的焦距、聚焦镜的焦距、准直镜与自适应镜的距离、自适应镜与聚焦镜的距离、聚焦镜到工作平面的距离、光纤的发散角、光纤的芯径进行仿真优化,并通过 Zemax 验证系统结构。

激光光束的 q 参数将描述高斯光束的两个基本特征参数 $\omega(z)$ 和 $R(z)$ 统一在一个表达式中

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi\omega^2(z)}, \quad (1)$$

式中

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right], \quad (2)$$

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2} \right)^2 \right], \quad (3)$$

式中, ω_0 为基模高斯光束的束腰半径, $R(z)$ 为与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相位面的曲率半径, $\omega(z)$ 为与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相

位面上的光斑半径, λ 为激光的波长。

光学系统中,高斯光束传输时 q 参数的变化规律统一表示为

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}, \quad (4)$$

式中, $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 为光学系统对傍轴光线的变换矩阵, $q_1 = q(z_1)$ 为 z_1 处的 q 参数值, $q_2 = q(z_2)$ 为 z_2 处的 q 参数值。即只要知道光学系统的变换矩阵,求得某位置处的 $q(z)$ 后,通过(1)式就可得到光束的光斑大小 $\omega(z)$ 。

3.1 自适应镜焦距的变化对变斑范围的影响

自适应镜焦距的变化范围会直接影响聚焦光斑的变化范围。初步选定光纤芯径 $600 \mu\text{m}$, 激光光束的光束参量乘积(BPP)为 $26.2 \text{ mm} \times \text{mrad}$, 准直镜焦距为 150 mm , 聚焦镜焦距为 350 mm , 光源与准直镜间的距离为 150 mm , 准直镜与自适应镜间的距离为 80 mm , 自适应镜与聚焦镜间的距离为 80 mm , 将自适应镜焦距分别设定为 -2.5 、 -4 、 -10 、 $+10$ 、 $+4$ 、 $+2.5 \text{ m}$ 及平面镜时进行仿真,结果如图 3 所示。

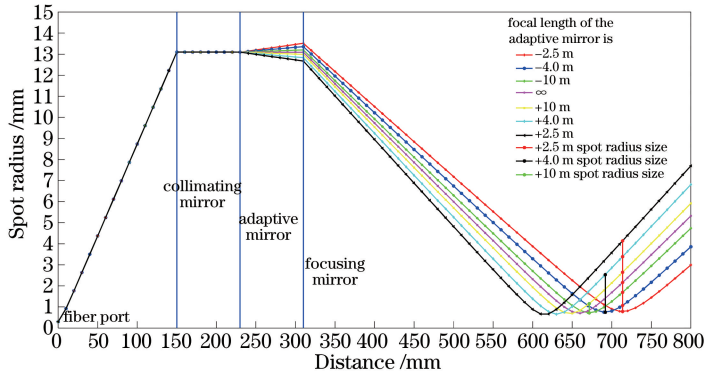


图 3 光斑半径与自适应镜焦距调节范围的关系

Fig. 3 Relationship between spot radius and focal length adjustment range of adaptive mirror

实际激光增材制造中,增加工作距离可以减少镜片污染,通常选择距离聚焦镜较远位置作为工作平面。如图 3 所示,当自适应镜焦距变化范围在 $\pm 2.5 \text{ m}$ 时,取自适应镜焦距为 -2.5 m 时的焦点位置作为工作平面,自适应镜焦距为 -2.5 、 -4 、 -10 、 ∞ 、 $+10$ 、 $+4$ 、 $+2.5 \text{ m}$ 时进行仿真,得到对应的光斑半径大小分别为 0.78 、 1.07 、 1.69 、 2.16 、 2.64 、 3.39 、 4.14 mm 。即当自适应镜焦距范围为 $\pm 2.5 \text{ m}$ 时,光斑半径变化范围为 $0.78 \sim 4.14 \text{ mm}$ 。同理,当自适应镜焦距范围为 $\pm 4 \text{ m}$ 时,光斑半径变化范围为 $0.75 \sim 2.53 \text{ mm}$;当自适应镜焦距变化范围为 $\pm 10 \text{ m}$ 时,光斑半径变化范围为 $0.72 \sim 1.16 \text{ mm}$ 。

可知自适应镜焦距变化范围越大,工作平面的光斑半径的变化范围越大。

3.2 抛物面准直镜焦距变化对变斑范围的影响

自适应镜焦距变化范围为 $\pm 2.5 \text{ m}$, 只改变准直镜的焦距,其他参数同 3.1 节,准直镜焦距分别取 110 、 130 、 150 、 170 、 190 mm 时进行仿真,结果如图 4 所示。得到对应的光斑半径变化范围分别为 $1.07 \sim 3.09 \text{ mm}$ 、 $0.90 \sim 3.61 \text{ mm}$ 、 $0.78 \sim 4.14 \text{ mm}$ 、 $0.69 \sim 4.68 \text{ mm}$ 、 $0.62 \sim 5.22 \text{ mm}$ 。可以看出随着抛物面准直镜焦距的增加,工作平面的最小光斑半径减小,最大光斑半径增大。可见,增大准直镜的焦距也是提高光斑变化范围的有效方法,但准直镜的焦距越大,

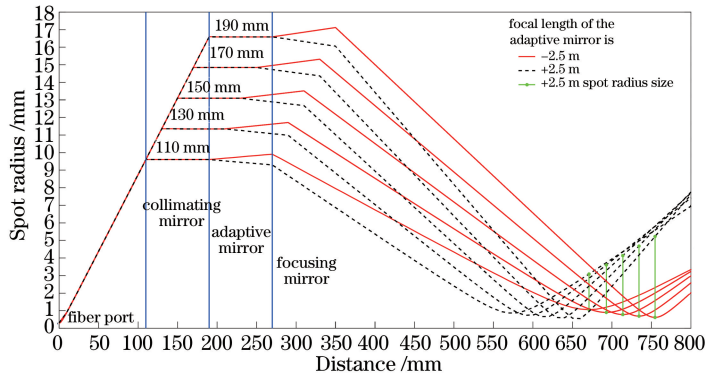


图4 光斑半径与准直镜焦距的关系

Fig. 4 Relationship between spot radius and focal length of the collimating mirror

对应的镜片口径也越大,增大光学系统的尺寸会增加制造成本。

3.3 抛物面聚焦镜焦距变化对变斑范围的影响

自适应镜焦距变化范围为 ± 2.5 m,只改变聚焦镜的焦距,其他参数同3.1节,聚焦镜焦距分别取250、300、350、400、450 mm时进行仿真,结果如图5所示。得到对应的光斑半径变化范围分别为0.54~2.84 mm、0.66~3.48 mm、0.78~4.14 mm、

0.92~4.83 mm、1.05~5.54 mm。可以看出当抛物面聚焦镜焦距增加时,工作平面上的最小光斑和最大光斑半径同时增大,且光斑变化范围也增大。对于整体壁厚较薄的变壁厚零件,可采用焦距较短的聚焦镜;对于整体壁厚较厚的变壁厚零件,可采用焦距较长的聚焦镜。实际应用中,可以配备多种不同焦距的聚焦镜,来满足不同的应用需求。

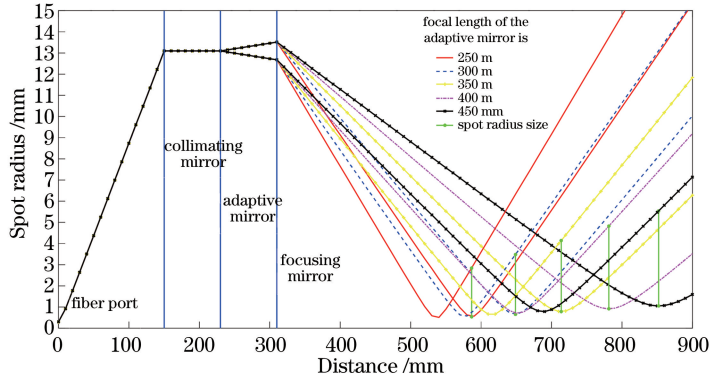


图5 光斑半径与聚焦镜焦距的关系

Fig. 5 Relationship between spot radius and focal length of the focusing mirror

3.4 光纤参数变化对变斑范围的影响

自适应镜焦距变化范围为 ± 2.5 m,只改变光纤芯径,其他参数同3.1节,光纤芯径分别取100、200、300、400、500 μm 时进行仿真,得到对应的光斑半径变化范围分别为0.13~4.11 mm、0.26~4.11 mm、0.39~4.11 mm、0.52~4.12 mm、0.78~4.13 mm。可以发现,当光纤的芯径增加时,工作平面上的最小光斑与芯径成正比关系,最大光斑基本保持不变。用Zemax仿真和测试光斑发现,离焦之后的大光斑存在一定虚光(即光斑边缘部分,其功率密度低于激光熔覆阈值),采用小的光纤芯径,实现大光斑时,虚光现象更为严重。实际应用中,对于整体壁厚较薄的变壁厚零件,可采用小的光纤芯径;对于整体壁厚

较厚的变壁厚零件,采用大的光纤芯径可以获得更好的熔覆效果。

仿真分析光束发散角对变斑范围的影响发现,随着发散角的增大,工作平面的最小光斑半径不变,最大光斑半径增大,光斑变化范围增大。但发散角越大就意味着要用到的反射镜口径越大,增大光学系统的尺寸会增加制造成本。仿真分析准直镜与自适应镜的间距和自适应镜与聚焦镜的间距对工作平面光斑大小的影响发现,镜片的位置关系对光斑大小的变化可以忽略不计。

3.5 工作横截面光场分布

利用Zemax对具体参数如3.1节所述的光学系统进行仿真验证。光源参数:激光波长1080 nm,

光纤芯径 $600\ \mu\text{m}$, BPP 为 $26.2\ \text{mm} \times \text{mrad}$, 在非序列模式下, 利用 Zemax 的半导体光源模型来建模, 工作平面选取在如图 3 所示的离抛物聚焦镜中心 $403.7\ \text{mm}$ 的位置, 图 6(a)~图 6(e) 给出自适应镜焦距分别为 -2.5 、 -10 、 ∞ 、 10 、 $2.5\ \text{m}$ 时工作平面的光场分布。可以发现当自适应镜焦距变化时, 工作横截面上的光斑由小到大, 变化明显。按 $1/e^2$ 计算

得到光斑半径数据与前述 q 参数计算的光斑半径基本一致, 可见, 采用 q 参数方法来对变斑系统进行初步的仿真是可行的。将探测器分别放置在距离抛物聚焦镜中心 $430\ \text{mm}$ 和 $450\ \text{mm}$ 的位置, 发现随着工作距离的增大, 工作平面的最小光斑和最大光斑半径均增大, 光斑变化范围也增大。实际应用中, 可以通过增大工作距离, 来增大变斑范围。

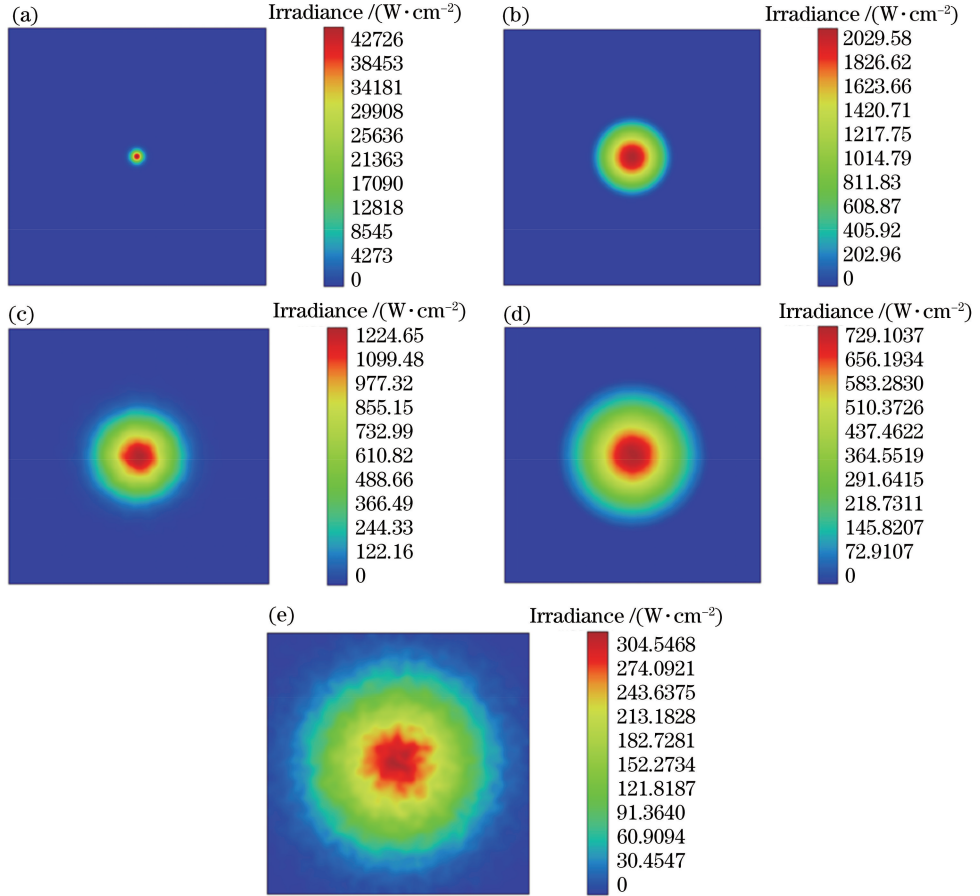


图 6 不同自适应镜焦距下光斑横截面光场分布。

(a) $F_0 = -2.5\ \text{m}$; (b) $F_0 = -10\ \text{m}$; (c) $F_0 = \infty$; (d) $F_0 = +10\ \text{m}$; (e) $F_0 = +2.5\ \text{m}$

Fig. 6 Distribution of light field in the cross-section of light spot under different focal lengths of deforming mirror.

(a) $F_0 = -2.5\ \text{m}$; (b) $F_0 = -10\ \text{m}$; (c) $F_0 = \infty$; (d) $F_0 = +10\ \text{m}$; (e) $F_0 = +2.5\ \text{m}$

4 实验方案及结果

4.1 变斑光学系统开发

为实现不等壁厚复杂零件的激光增材制造, 设计了一种新型的基于自适应镜的可变圆光斑激光熔覆光学系统。系统由反射式抛物准直镜、反射式自适应镜和反射式抛物聚焦镜等组成。选用德国 KUGLER 公司的 AO90/70 自适应镜, 焦距变化范围为 $\pm 2.5\ \text{m}$, 选用意大利 COSYS 公司 P2K40-04GL-0L 的气压比例阀实现对自适应镜腔内气压的调节, 抛物面准直镜焦距为 $150\ \text{mm}$, 抛物面聚焦

镜焦距为 $350\ \text{mm}$, 准直镜与自适应镜的距离为 $80\ \text{mm}$, 抛物面聚焦镜与自适应镜距离为 $80\ \text{mm}$ 。为了制造 $3\sim 8\ \text{mm}$ 变壁厚的零件, 激光器选用武汉锐科光纤激光公司 RFL-C6000 的光纤激光器, 光纤芯径 $600\ \mu\text{m}$, BPP 为 $26.2\ \text{mm} \times \text{mrad}$ 。工作面选取在离抛物聚焦镜中心 $405\ \text{mm}$ 的位置。图 7 为变斑熔覆光学系统实物图, 在距离熔覆头 $405\ \text{mm}$ 距离处, 工作平面上的光斑变化如图 8 所示, 通过改变自适应镜的腔内气压, 实现了在同一工作平面上光斑大小的变化, 且变化的光斑尺寸与仿真结果具有较好的一致性, 同时能够保持很好的圆对称性。

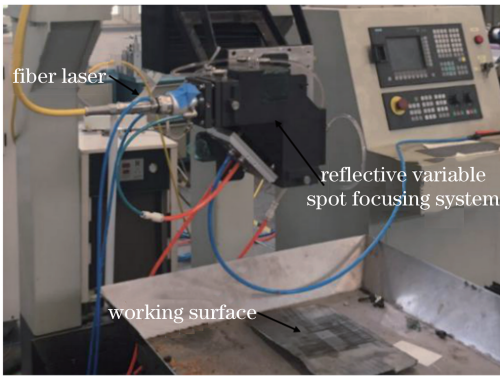


图 7 变斑熔覆光学系统

Fig. 7 Optical system with variable spot for laser cladding

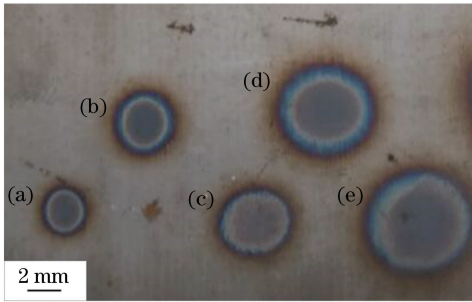


图 8 自适应镜不同腔压下工作平面上的光斑大小。对应的腔压、自适应镜焦距和光斑直径分别为 (a) 550 kPa, -2.97 m, 3.1 mm; (b) 410 kPa, -6.79 m, 4.0 mm; (c) 380 kPa, -9.37 m, 5.7 mm; (d) 300 kPa, 588.23 m, 7.1 mm; (e) 250 kPa, 14.40 m, 7.9 mm

Fig. 8 Laser spot size on working plane at different air pressures of adaptive mirror. Corresponding cavity pressure, focal length of adaptive mirror and spot diameter are (a) 550 kPa, -2.97 m, 3.1 mm; (b) 410 kPa, -6.79 m, 4.0 mm; (c) 380 kPa, -9.37 m, 5.7 mm; (d) 300 kPa, 588.23 m, 7.1 mm; (e) 250 kPa, 14.40 m, 7.9 mm

4.2 实验熔覆方案及结果

为测试变斑熔覆光学系统的效果,设计了3~8 mm变壁厚的工件,工件中心轨迹是长轴为108 mm,短轴为90 mm的椭圆,壁厚由长轴一端的3 mm渐变到另外一端的8 mm,以1 mm左右弧长的工件轨迹进行离散化,采用变光斑、变功率、等速度、等功率密度的方案进行实验。实验中,激光熔覆的等功率密度设定为 $1.1 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$,根据工件的图案来调节光斑大小和激光功率,送粉粉斑为直径9 mm左右的固定粉斑。由于光斑半径的定义采用的是光强下降到 $1/e^2$ 位置的方法,实际激光熔覆的壁厚比光斑尺寸略小,在激光熔覆制造零件前,先对

激光熔覆宽度进行定标实验,确定激光熔覆不同壁厚实际需要的自适应镜的腔内气压和激光功率。变斑激光熔覆实验系统如图9所示。图10给出了实际激光熔覆增材制造的椭圆形工件,将实验样品表面处理后,实际测量得到工件的最小壁厚为2.86 mm,最大壁厚为7.78 mm,与实验预期的结果能够很好地吻合。

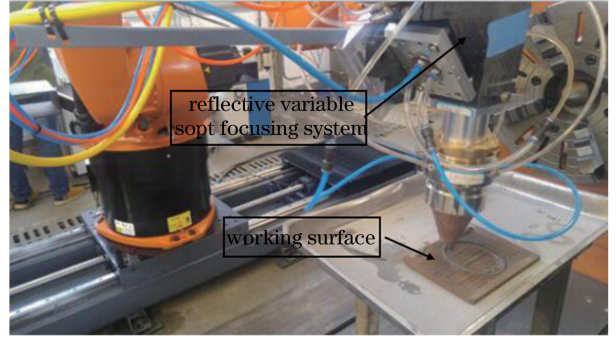


图 9 变斑聚焦系统

Fig. 9 Variable spot focusing system



图 10 激光熔覆制造变斑熔覆工件

Fig. 10 Variable-spot cladding workpiece produced by laser cladding

5 结 论

设计和开发了一种由反射式抛物准直镜、反射式自适应镜和反射式抛物聚焦镜等组成的可变圆光斑激光熔覆光学系统。通过仿真可知,增大自适应镜焦距的变化范围和采用大的准直镜焦距,可以双向扩大光斑的变化范围。对于整体壁厚较薄的变壁厚零件,采用小的光纤芯径或者较短焦距的聚焦镜,可以获得更好的熔覆效果;而对于整体壁厚较厚的变壁厚零件,则需要采用大的光纤芯径或较长焦距的聚焦镜。并进行了变斑激光熔覆工艺试验,最终加工了最小壁厚为2.86 mm、最大壁厚为7.78 mm的椭圆形连续变壁厚的工件。

参 考 文 献

[1] Zhu Z Y, Chen C J, Zhang M. Research progress and

- prospect of laser additive manufacturing technique for magnesium alloy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 190006.
- 朱兆雨, 陈长军, 张敏. 激光增材制造镁合金的研究现状及展望[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(19): 190006.
- [2] Frazier W E. Metal additive manufacturing: a review [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(6): 1917-1928.
- [3] Song Y W, Yu W W, Zhu J, et al. Parametric design of turbo-jet blades with unequal thickness[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2008, 20(3): 304-309.
- 宋玉旺, 余伟巍, 朱剑, 等. 变壁厚涡轮叶片参数化设计[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2008, 20(3): 304-309.
- [4] Wang W Z, Feng S S, Li X J, et al. Numerical simulation and experimental verification of the penetrating power performance of hemispherical liner with locally variable-walled thickness [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(4): 420-424.
- 王维占, 冯顺山, 李小军, 等. 局部变壁厚球缺型药型罩侵彻威力性能的数值模拟及试验验证[J]. *火炸药学报*, 2018, 41(4): 420-424.
- [5] Zhou T A. The simulation optimization research of backward extrusion process on deep cylindrical part with variable thickness[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- 周泰安. 变壁厚铝质深筒形件反挤压工艺模拟优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [6] Chen J M, Dou Y, Yan H F, et al. Study on multi-track lap of 316L stainless steel powders by selective laser melting[J]. *Applied Laser*, 2017, 37(6): 787-792.
- 陈继民, 窦阳, 晏恒峰, 等. 选区激光熔化 316L 不锈钢粉多道搭接工艺的研究[J]. *应用激光*, 2017, 37(6): 787-792.
- [7] Deng Z Q, Shi S H, Zhou B, et al. Laser cladding forming of unequal-height curved arc-shaped thin-wall structures[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0902005.
- 邓志强, 石世宏, 周斌, 等. 不等高弯曲弧形薄壁结构激光熔覆成形[J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0902005.
- [8] Zhou X X, Xin B, Gong Y D, et al. Effect of scanning direction on microstructure and mechanical properties of part formed via variable thickness layer cladding deposition [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0802003.
- 周显新, 辛博, 巩亚东, 等. 扫描方向对变厚度熔覆成形件组织与力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0802003.
- [9] Shen T, Shi T, Fu G Y, et al. Laser cladding forming and closed-loop control of thickness-variable eccentric ring structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0302007.
- 沈婷, 石拓, 傅戈雁, 等. 变壁厚偏心圆环结构激光熔覆成形及闭环控制[J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 0302007.
- [10] Cai W, Fu G Y, Shi S H, et al. Research on thickness control of variable diameter solid with coaxial inside-beam powder feeding laser cladding by defocusing technique[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(7): 0703003.
- 蔡伟, 傅戈雁, 石世宏, 等. 基于离焦技术的光内送粉堆积变径体壁厚控制研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0703003.
- [11] Wu J Z, Zhu G X, Lu B, et al. Influence of self-regulation-effect on forming quality of thin-walled parts with variable laser spot cladding[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(1): 145-150.
- 吴继璋, 朱刚贤, 陆斌, 等. 自愈合效应对光内送粉激光变斑熔覆成形薄壁件的影响[J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(1): 145-150.
- [12] Lu B, Zhu G X, Wu J Z, et al. Laser direct forming process of thin-walled blade using variable spot by inside-beam powder feeding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(12): 1203003.
- 陆斌, 朱刚贤, 吴继璋, 等. 基于光内送粉激光变斑直接成形薄壁叶片的工艺研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1203003.
- [13] TRUMPF Laser GabH. D70 laser metal deposition technology package: 22-50-02-A4 71-CR02 [Z]. Germany: TRUMPF Laser GabH, 2013.
- [14] OTZ zoom optics always the perfect spot [M]. Mulheim-Karlich, Germany: Laserline, 2018.
- [15] Ge J Q, Qin Y X, Liu X D, et al. Design of variable spot and zoom optical system for laser cutting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0222001.
- 葛佳琪, 秦应雄, 刘晓东, 等. 变斑变焦激光切割光学系统的设计 [J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0222001.