

激光熔覆周向倾斜薄壁圆环成形工艺的研究

孙佳钰^{**}, 于天彪^{*}, 赵雨, 杨林, 关闯

东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819

摘要 通过建立周向倾斜薄壁圆环模型,得到了周向偏移量和倾斜角之间的关系;通过优选周向偏移角,并基于激光熔覆近净成形技术,获得了结构稳定、高度和宽度误差较小的周向悬臂薄壁圆环。结果表明,满足熔覆要求的熔覆件的偏移角为 0.75° ,倾斜角为 25.95° ;周向倾斜薄壁圆环成形较优的工艺参数组合是周向偏移量为 0.11 mm ,Z 轴提升量为 0.224 mm 。

关键词 激光技术;激光近净成形;悬臂结构薄壁件;周向偏移角

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0802004

Research on Laser Cladding Forming Process of Circumferentially Inclined Thin-Walled Cylinders

Sun Jiayu^{**}, Yu Tianbiao^{*}, Zhao Yu, Yang Lin, Guan Chuang

School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China

Abstract The relationship between circumferential offset and inclination angle is obtained via the establishment of the model of the circumferential thin-walled cylinder. By the optimization of circumferential offset angle and based on the laser cladding net shaping technique, a circumferential cantilever thin-walled cylinder with stable structure and relatively small errors in height and width is obtained. The results show that the requirements of cladding can be met when the offset angle is 0.75° and the inclination angle is 25.95° of cladding specimens. In addition, the circumferential deviation of 0.11 mm and Z-axis increment of 0.224 mm are the optimal process parameter set.

Key words laser technique; laser engineered net shaping; cantilever-structure thin wall part; circumferential offset angle

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 000.2170

1 引言

激光熔覆加工技术在对悬臂架构薄壁件的加工中具有传统加工方式不具备的优势^[1]。王续跃等^[2]通过激光熔覆 136 层薄壁圆环,验证了变 Z 轴提升量法熔覆成形圆弧截面倾斜薄壁件的有效性。石拓等^[3]沿着生长的切线方向连续变角度送粉堆积,成形了悬垂薄壁件,实现了大倾角悬垂结构的无支撑成形。王聪等^[4]进行了空间密排多元扭曲薄壁件的成形研究,获得了各部位组织致密、显微硬度分布较均匀的密排薄壁件。

径向悬空方向的薄壁件以及扭曲薄壁件的成形受到广泛关注^[5]。其中周向悬臂薄壁件的制造工艺

可以有效提高工件加工的稳定性和精度^[6]。本文通过激光近净成形技术,研究了周向薄壁悬空结构的制造工艺,建立了周向倾斜薄壁圆环模型,验证得到了熔覆周向悬空结构的最优偏移角,获得了周向倾斜薄壁 1/4 圆环。

2 实验设备及材料

2.1 实验设备和原理

激光近净成形的实验设备和原理如图 1 所示。首先,通过建模软件建立模型,按照工艺要求对模型进行切片分层,将三维零件转化为二维平面图形,设计每一层的加工参数和扫描路径,驱动基体或激光头运动。激光系统由激光发生器产生激光并且由透镜

收稿日期: 2018-01-30; 修回日期: 2018-03-01; 录用日期: 2018-04-08

基金项目: 国家工信部绿色系统集成重大专项(201675514)、沈阳市重点实验室课题(F15153100)

* E-mail: tianbiaoyudyx@gmail.com; ** E-mail: sunjiayudewo@gmail.com

改变激光光路,采用氩气作为保护气和送粉气,送粉系统在送粉气的作用下向熔覆头输送粉末,保护气由独立的送气系统输送到熔覆头中,金属粉末通过送粉

装置和喷嘴送到激光成形的熔池中,熔化的金属粉末在基体表面凝固,重复上述过程,逐渐熔覆出具有有一定宽度和高度的熔覆层,最终成形完整零件^[7]。

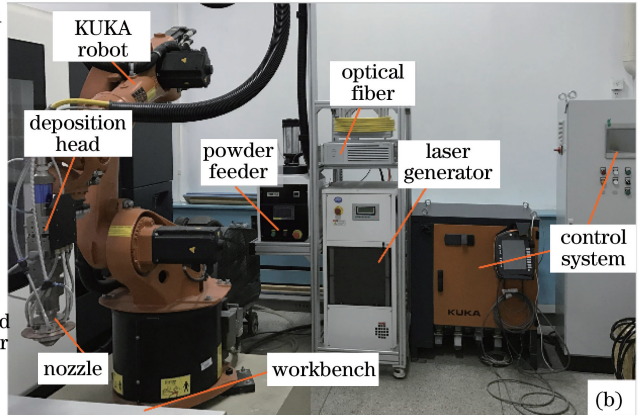
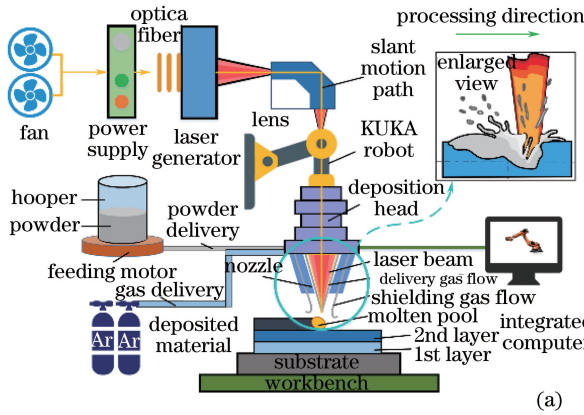


图 1 实验装置。(a)原理图;(b)设备

Fig. 1 Experimental setup. (a) Schematic; (b) equipment

激光熔覆设备为德国 KUKA ZH30/60 III 型机器人,在 KUKA-KR15-2 型机械臂上集成了熔覆头和喷嘴,激光器用水冷却机为同飞制冷设备有限公司生产的 L400 型水冷却机;保护气、送粉气都采用氩气;熔覆激光头采用中国科学院煜晨激光技术有限公司生产的 RC52 同轴激光熔覆头;载气式同轴送粉器采用中国科学院煜晨激光技术有限公司生产的 RC-PGF-1 单筒单孔式送粉器;半导体激光器采用德国 IPG 公司生产的 YLR-500 型光纤激光器。

粉末,粉末的直径为 53~150 μm ,其化学成分见表 2。

表 1 熔覆实验参数

Table 1 Parameters of cladding experiment

Parameter	Value
Laser power /W	350.000
Scanning speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	5.500
Powder feed rate /($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	11.650
Shielding gas flow rate /($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	15.000
Z-axis increment /mm	0.224
Height of first layer /mm	0.316
Radius of powder jet /mm	0.093-0.150
Radius of laser beam /mm	1.000
Density of powder /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	4520.000

2.2 实验参数和材料

熔覆实验参数见表 1。

采用 45 号钢作为基体材料,316L 不锈钢作为熔覆

表 2 316L 不锈钢粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of 316L stainless steel powder (mass fraction, %)

Element	C	Cr	Mo	Si	Ni	Mn	Fe
Theoretical value	0.050	12.00-16.00	2.00-3.00	0.30-0.80	10.00-15.00	0.80-1.60	Bal.
Measured value	0.03	18.62	2.53	0.54	12.72	1.35	Bal.

3 实验方法

3.1 周向倾斜薄壁圆环模型的建立

含有倾斜角薄壁件的假设:1)激光功率密度在光斑内均匀分布;2)粉末粒子间对流和热辐射均匀稳定,吸收率与反射率恒定为一常数;3)熔覆层简化为规则的长方体,熔覆层宽度 b 等于光斑直径 d ;4)粉末空间浓度在粉末汇聚中心呈高斯分布;5)粉末充足,进入熔池不考虑反弹因素。熔覆模型示意图如图 2 所示,其中 h 为熔覆层厚度, ΔY 为偏移量; α 为倾斜角度^[8-9]。

从图 2 可知,

$$\tan \alpha = \frac{\Delta Y}{h}, \quad (1)$$

则

$$\alpha = \arctan \frac{\Delta Y}{h}. \quad (2)$$

由于

$$m = \rho \cdot h \cdot L \cdot b, \quad (3)$$

式中 m 为单道熔覆层质量; ρ 为 316L 不锈钢粉末的密度; b 为熔覆层宽度; L 为单道熔覆层的平均弧长。

$$m = V_f \cdot t \cdot \eta, \quad (4)$$

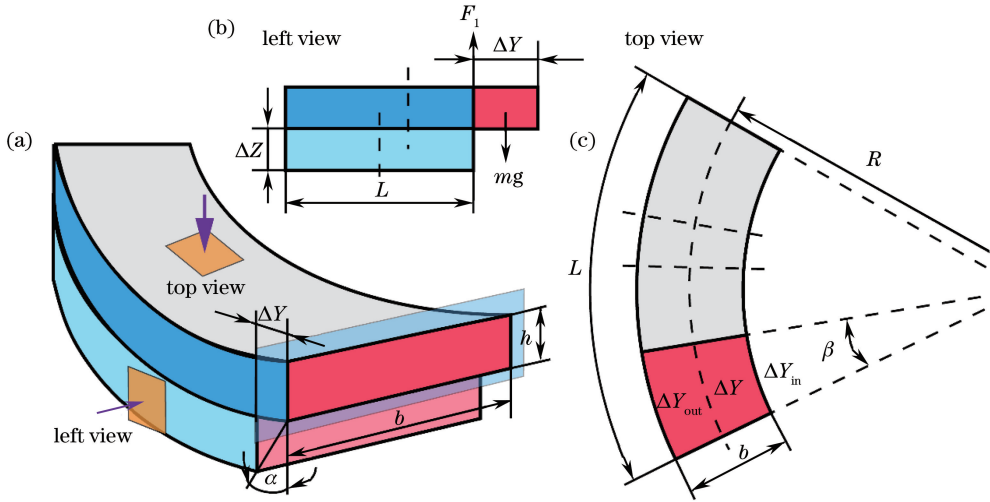


图 2 熔覆模型示意图。(a)主视图;(b)左视图;(c)俯视图

Fig. 2 Schematic of cladding model. (a) Front view; (b) left view; (c) top view

式中 V_f 为送粉速率; t 为单道熔覆时间; η 为激光熔覆效率。由(3)、(4)式可知,

$$h = \frac{V_f \cdot t \cdot \eta}{\rho \cdot L \cdot b} \quad (5)$$

$$L = V_s \cdot t, \quad (6)$$

式中 V_s 为激光扫描速度。故

$$\tan \alpha = \frac{\Delta Y}{h} = \frac{\Delta Y \cdot \rho \cdot V_s \cdot b}{V_f \cdot \eta}, \quad (7)$$

则

$$\alpha = \arctan \frac{\Delta Y \cdot \rho \cdot V_s \cdot b}{V_f \cdot \eta} \quad (8)$$

当光斑直径、熔覆效率和粉末密度一定时,倾斜角度与偏移量、激光扫描速度正相关,与送粉速率负相关。为了保证熔覆件的形状精度和质量,需要使单层提升量 ΔZ 与单层熔覆高度保持一致,在最优激光工艺条件下获得的最优单层提升量为 0.224 mm,以此作为熔覆高度,即

$$\tan \alpha = \frac{\Delta Y}{\Delta Z}, \quad (9)$$

$$\alpha = \arctan \frac{\Delta Y}{\Delta Z} \quad (10)$$

图 2 所示的熔覆薄壁圆环的半径为 R ,内环的偏移量为 ΔY_{in} ,外环的偏移量为 ΔY_{out} ,并定义 $\Delta Y = (\Delta Y_{in} + \Delta Y_{out})/2$ 。要求熔覆的倾斜件不塌陷,则需要满足倾斜体截面黏性力等于无支撑倾斜体重力,即

$$Mg = \rho Vg = \frac{1}{2} \rho g b h \left[\Delta Y_{out} \cdot \left(R + \frac{b}{2} \right) - \Delta Y_{in} \cdot \left(R - \frac{b}{2} \right) \right], \quad (11)$$

式中 M 为倾斜体质量; g 为重力系数; V 为粉末体积。黏性力为

$$F_1 = f \cdot S = f h b, \quad (12)$$

式中 F_1 为黏性力; S 为倾斜体截面面积; f 为摩擦系数。因此,可得

$$\Delta Y_{in} = \left(R - \frac{b}{2} \right) \cdot \beta, \quad (13)$$

$$\Delta Y_{out} = \left(R + \frac{b}{2} \right) \cdot \beta, \quad (14)$$

$$\Delta Y_1 = \frac{\Delta Y_{in} + \Delta Y_{out}}{2} = R \cdot \beta, \quad (15)$$

$$\Delta Y_{out} = 2\Delta Y_2 - \Delta Y_{in}, \quad (16)$$

式中 β 为偏移量 ΔY_2 对应的圆心角。令(11)式和(12)式相等,可以得到临界无支撑倾斜体的极限偏移长度 ΔY_2 ,即

$$\Delta Y_2 = \frac{f}{\rho g \left(R + \frac{b}{2} \right)} + \left[\frac{R^2 - \left(\frac{b}{2} \right)^2 + \left(R - \frac{b}{2} \right)^2}{2 \left(R + \frac{b}{2} \right)} \right] \cdot \beta. \quad (17)$$

钢-钢无润滑静摩擦的摩擦系数是 $f = 0.15$,圆环的半径为 10 mm,熔覆层的宽度为 1.8 mm,重力加速度为 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。由于激光辐照过程中的金属粉末被熔覆为相应的金属结构,其密度得到显著增大,采用 316L 不锈钢密度 ($7.98 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 能够更准确地推导极限偏移量与偏移圆心角间的关系,将其代入(17)式中可以得到 316L 不锈钢极限偏移量与偏移圆心角的关系为

$$\Delta Y_2 = \frac{0.0019181}{\left(R + \frac{b}{2}\right)} + \left[\frac{R^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2 + \left(R - \frac{b}{2}\right)^2}{2\left(R + \frac{b}{2}\right)} \right] \cdot \beta. \quad (18)$$

表 3 两种计算方法得出的偏移量

Table 3 Offsets obtained by two methods

	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
$\beta / (^{\circ})$	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
$\Delta Y_1 / \text{mm}$	0.04	0.07	0.11	0.15	0.18
$\Delta Y_2 / \text{mm}$	0.04	0.09	0.13	0.17	0.22

3.2 等 ΔZ 和等 ΔY 条件下熔覆圆柱面 1/4 圆弧

熔覆示意图如图 3 所示。从图 3(a)可以看出, 当 ΔY 、 ΔZ 相同时, 熔覆轨迹为一条直线, 则 α 恒定。反向扫描方式示意图如图 3(b)所示, 该方式能够有效避免粘粉和堆积, 进行悬臂结构圆环的熔覆实验时, 圆柱的半径为 10 mm, 共熔覆 20 层, 层高为 0.224 mm。在冷却间隔时测量熔覆层宽度, 然后

由(15)、(16)式计算得到的极限偏移量见表 3。由表 3 可知, 通过力学分析且考虑了材料摩擦条件下所得到的 ΔY_1 小于直接通过几何推导得到的 ΔY_2 。为了避免过大的偏移量造成悬空结构熔覆失效的现象, 采用 ΔY_1 作为实验的偏移量 ΔY 。

在顶面 4 个等距测量点以及在周向悬臂结构处的一个等距内的 2 个测量点进行高度的测量, 取平均值作为实际高度; 将 10 层熔覆结构在高度方向上分为最底层部分、中下层部分、中层部分、中上层部分、最顶层部分, 每部分测量 2 组数据取平均值, 5 层数据取平均值作为实际内径, 外径的测量方法与内径相同, 即可得到壁厚的数值, 如图 3(c)所示。

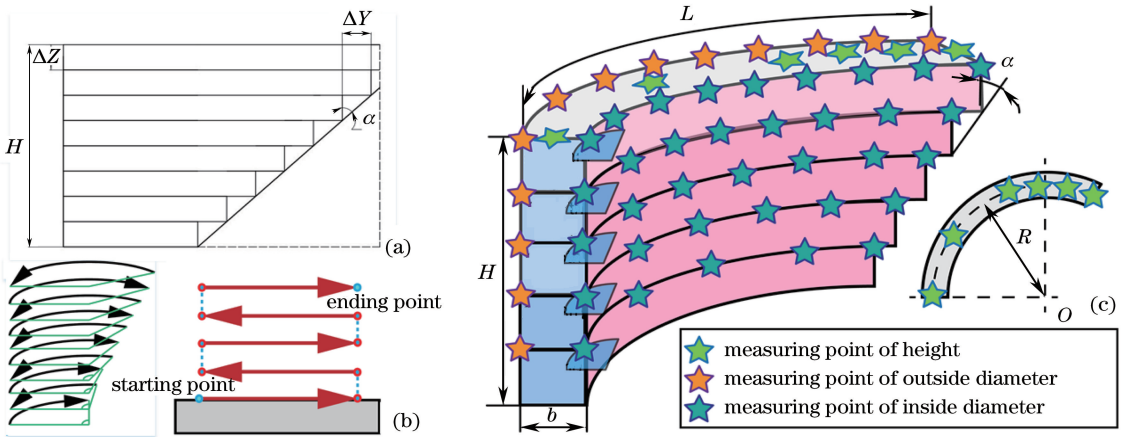


图 3 熔覆示意图。(a)策略图;(b)反向扫描方式;(c)测量方式

Fig. 3 Schematic of cladding. (a) Strategy; (b) reverse scanning method; (c) measurement method

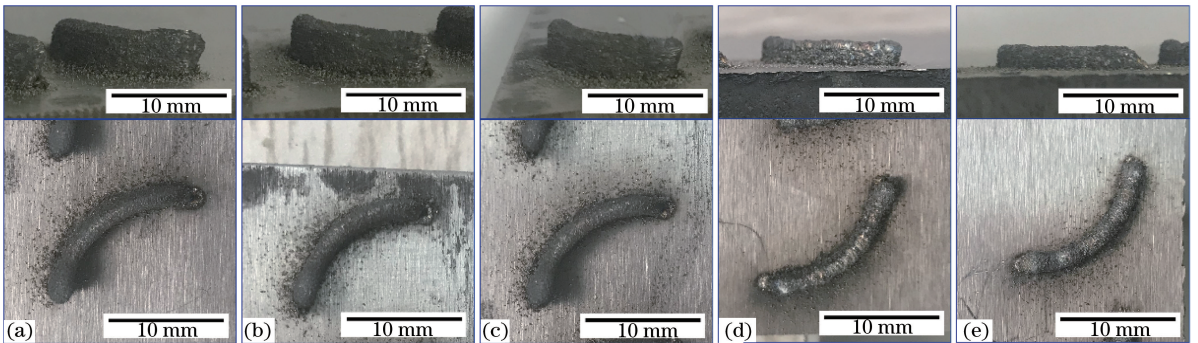


图 4 不同偏移角下熔覆试样的形貌。(a) 0.25°;(b) 0.50°;(c) 0.75°;(d) 1.00°;(e) 1.25°

Fig. 4 Morphologies of cladding specimens under different offset angles.

(a) 0.25°; (b) 0.50°; (c) 0.75°; (d) 1.00°; (e) 1.25°

4 实验结果与讨论分析

不同偏移角下熔覆试样的形貌如图 4 所示。可以看到,当偏移角为 0.25° 时,试样在悬空处有粘粉堆积现象,说明此时的偏移角过小,较多的粉末进入熔池来不及完全熔化,试样成形精度得不到保证。当偏移角为 0.50° 和 0.75° 时,试样具有较好的形貌

表 4 理论值和实验测量值

Table 4 Theoretical value and experimentally measured value

Item	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
$\Delta Z / \text{mm}$	0.224	0.224	0.224	0.224	0.224
$\beta / (^\circ)$	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
$\Delta Y / \text{mm}$	0.04	0.07	0.11	0.15	0.18
$\alpha_0 / (^\circ)$	9.38	18.05	25.95	33.10	39.10
H_0 / mm	4.572	4.572	4.572	4.572	4.572
H / mm	4.63	4.60	4.58	4.29	4.04
$\delta / \%$	1.27	0.61	0.17	6.17	11.64
b_0	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80
b / mm	1.75	1.78	1.82	1.77	1.89
$\varphi / \%$	2.78	1.11	1.11	1.67	5.00

不同偏移圆心角试样的高度和宽度变化如图 5 所示。可以得到,随着偏移角的增大,高度误差先减小后增大,当偏移角为 0.75° 时,试样的高度误差最小,与图 4(e)所示结果一致。这是因为过大的偏移角使得粉末不能有效进入熔池,熔覆效果不能得到保证,而过少的粉末加剧了重熔,使得高度不能得到保证。随着偏移角的增大,试样的宽度误差先减小再增大,当偏移角为 0.50° 时,宽度误差较小;偏移角为 0.50° 和 0.75° 的试样的宽度误差变化不明显,偏移角能够较好地满足要求;偏移角为 1.25° 的试样由于重熔而宽度误差较大,粉末大量堆积,宽度增加,说明这时的偏移量不能达到要求。通过对比发现,在保证宽度误差相近的情况下,偏移角为 0.50° 和倾斜角为 18.05° 时能够满足斜熔覆周向倾斜薄壁圆环的要求。因此,较优的工艺参数组合是周向偏移量为

特征,悬臂结构较明显。偏移角为 1.00° 和 1.25° 的试样的高度明显减小,且偏移角为 1.25° 的试样的悬臂结构失效,过大的偏移角使得粉末不能有效进入熔池。宽度没有保持一致,1/4 圆弧形貌特征明显。

5 组实验的样本理论值与实际测量值见表 4。其中, α_0 为理论倾斜角度, H_0 为理论总高度, H 为实际总高度, δ 为高度误差, b_0 为理论宽度, φ 为宽度误差。

0.11 mm, Z 轴提升量为 0.224 mm。

5 结 论

通过激光熔覆技术,成形了周向倾斜薄壁圆环。通过建立轴向悬空熔覆模型,得到了周向偏移量和周向偏移角之间的关系。结果表明,最优的熔覆件激光近净成形参数组合是周向偏移量为 0.11 mm, Z 轴提升量为 0.224 mm。最优工艺参数组合下得到的熔覆件的偏移角为 0.50° , 倾斜角为 18.05° 。

参 考 文 献

- [1] Fu G Y, Liu Y, Shi S H, *et al.* Control of process parameters for accumulate screwy thin-walled part by laser cladding with coaxial inside-beam powder feeding[J]. *Electromachining and Mould*, 2014(2): 43-46.
傅戈雁, 刘宇, 石世宏, 等. 光内同轴送粉激光熔覆堆积扭曲薄壁件工艺参数的控制[J]. *电加工与模具*, 2014(2): 43-46.
- [2] Wang X Y, Jiang H, Xu W J, *et al.* Laser cladding forming of arc-section inclined thin-walled parts with variable Z-increments[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(10): 1003007.
王续跃, 江豪, 徐文骥, 等. 变 Z 轴提升量法圆弧截面倾斜薄壁件激光熔覆成形研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1003007.
- [3] Shi T, Wang Y Q, Lu B H, *et al.* Laser cladding forming of cantilevered thin-walled part based on hollow-laser beam inside powder feeding technology

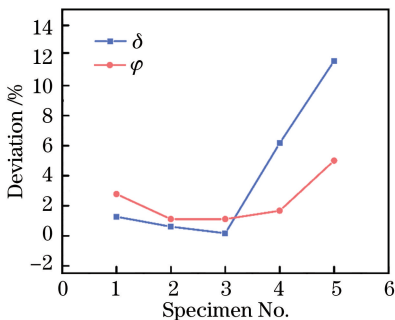


图 5 不同偏移圆心角试样的高度和宽度误差

Fig. 5 Errors in width and height of specimens under different offset central angles

- [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1003003.
- 石拓, 王伊卿, 卢秉恒, 等. 中空激光内送粉熔覆成形悬垂薄壁件[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003003.
- [4] Wang C, Shi S H, Fang Q Q, *et al.* Research on laser cladding forming of close-packed multivariant twisty thin-wall parts[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0602004.
- 王聪, 石世宏, 方琴琴, 等. 空间多元密排扭曲薄壁件的激光熔覆成形研究[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0602004.
- [5] Shi G L, Shi S H, Wang C, *et al.* Study on inside-laser cladding forming temperature field of screwy thin-walled part[J]. Applied Laser, 2014, 34(2): 109-117.
- 石皋莲, 石世宏, 王晨, 等. 扭曲薄壁件内送粉激光熔覆成形温度场研究[J]. 应用激光, 2014, 34(2): 109-117.
- [6] Jiang H. Basic research on laser cladding forming of inclined thin-walled structural parts [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012: 6-13.
- 江豪. 倾斜薄壁结构件激光熔覆成形基础研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012: 6-13.
- [7] Petrat T, Graf B, Gumenyuk A, *et al.* Laser metal deposition as repair technology for a gas turbine burner made of Inconel 718 [J]. Physics Procedia, 2016, 83: 761-768.
- [8] Durejko T, Zietala M, Polkowski W, *et al.* Thin wall tubes with Fe₃Al/SS316L graded structure obtained by using laser engineered net shaping technology[J]. Materials and Design, 2014, 63: 766-774.
- [9] Song C F. The process research and numerical analysis of the thin-walled parts in laser cladding[D]. Suzhou: Soochow University, 2013: 8-10.
- 宋成法. 激光熔覆成形薄壁零件的工艺研究及数值分析[D]. 苏州: 苏州大学, 2013: 8-10.