

圆形倾斜薄壁件的激光熔覆成形

王续跃 王彦飞 江 豪 徐文骥 郭东明

(大连理工大学机械工程学院精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要 航空发动机燃烧室是由向外倾斜、直壁和向内倾斜 3 部分组成的圆形薄壁件。面向燃烧室结构的圆形薄壁件, 依据偏移无支撑熔融粉末不塌陷的临界条件和单道熔覆层高度建立了熔覆成形倾斜角度数学模型, 研究了激光熔覆向内倾斜和向外倾斜圆形薄壁件的偏移量、成形高度和倾斜角度, 并进行了试验验证。研究表明在单层等偏移量条件下, 几何形状的差异导致了向内倾斜圆形薄壁件较向外倾斜圆形薄壁件偏移总量较大、成形高度较小和倾斜角度较大, 最后试验熔覆出了航空发动机燃烧室模拟件。研究结果为圆形薄壁件激光熔覆成形应用提供了理论和试验依据。

关键词 激光器; 熔覆成形; 圆弧薄壁件; 倾斜角度; 偏移量

中图分类号 TG665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0103006

Laser Cladding Forming of Round Thin-Walled Parts with Slope Angle

Wang Xuyue Wang Yanfei Jiang Hao Xu Wenji Guo Dongming

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract Aero-engine combustion chamber is a round thin-walled part comprised of outward, upright and inward walls. For the characteristic of the round thin-walled parts, the mathematical models are developed based on the critical condition of offset melting powder without support and the cladding height of single-layer. Both inward and outward thin-walled parts are investigated for the offset value, forming height and angle of inclination. The results show that, due to the difference of geometry the inward thin-walled parts have longer offset, higher forming height and bigger slope angle than those of outward thin-walled parts under equal offset condition. The simulated parts of aero-engine combustion chamber are formed in the experiment. The results provide further understanding for laser forming round thin-walled parts both in theory and application.

Key words lasers; cladding forming; round thin-walled parts; slope angle; offset value

OCIS codes 140.3390; 050.6875; 140.3580; 350.1515

1 引 言

薄壁零件如燃烧室、涡轮叶片、机匣等都具有倾斜特征, 目前加工方法难以满足航空发动机性能要求。激光熔覆成形(LCF)是一种新型的快速增材制造技术, 能够实现各种高性能、复杂结构金属零件的快速、无模具、全致密近净成形。激光熔覆成形薄壁类零件已得到了广泛关注与研究。为进一步提高激光熔覆成形技术在薄壁件制造方面的应用, 国内外众多学者十分重视对倾斜薄壁件的激光熔覆成形研究。

在三轴数控工作台上, 熔覆出的倾斜薄壁件一般不具有复杂性, 现有文献大多是研究优化工艺参数。伯明翰大学 Wu 等^[1]采用优化后工艺参数制造出了具有 30° 倾斜角的薄壁件。尚晓峰等^[2-3]对侧壁倾斜极限作了研究, 推导出倾斜极限角度及极限层间搭接率的计算公式。Qi 等^[4]通过激光功率对熔覆层宽度进行调节, 制造出了飞机发动机叶片。刘杰等^[5-6]通过调节熔覆成形方向和能量输入提高了激光熔覆悬垂结构质量。本课题组利用变参数法(送粉量、激光

收稿日期: 2013-07-15; 收到修改稿日期: 2013-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(50975041, 51375073)

作者简介: 王续跃(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事精密与特种加工等方面的研究。

E-mail: wbxzd@dlut.edu.cn

功率、扫描速度)和变 Z 轴提升量法分别熔覆出了薄壁机匣模拟件和发动机燃烧室壳体,有效减小了熔覆台阶效应,提高了熔覆成形质量^[7-9]。

在三轴数控工作台基础上增添 1 个或 2 个旋转轴能大幅提升 LCF 技术制备倾斜薄壁件能力,理论上能成形任意角度的倾斜件,同时提高了对硬件设备的要求,且需要掌握更高的数控编程技术。Li Yanmin 等^[10]通过对粉末流及粉末送入点的研究,改善了成形过程氧化及粘粉现象,采用四轴激光立体成形系统制造出倾斜件; Milewski 等^[11]采用螺旋轨迹扫描在五轴制造系统上加工出全致密薄壁半球零件,验证了 LCF 技术加工复杂零件的可行性; Dwivedi 等^[12-14]通过数学算法合理规划轨迹路径及激光头角度,在一个配有六轴机械手的五轴成形系统上制造出了复杂倾斜叶轮。

以上倾斜薄壁件熔覆重点在于优化工艺参数或者提高设备性能,而事实上由于内、外倾斜薄壁件几何关系的差异会导致激光熔覆时成形状态不完全相同,如偏移量、成形高度和倾斜角度等。本论文对内、外倾斜薄壁件偏移极限和单道熔覆高度建立了数学模型,并在三轴激光器上做了单层等偏移量熔覆验证试验,为提高复杂倾斜薄壁熔覆零件质量提供了理论和技术基础。

2 圆形薄壁件激光熔覆数学建模

2.1 基本原理

图 1 为本文激光熔覆圆形倾斜薄壁结构示意图。在 3 轴数控工作台上熔覆成形倾斜薄壁件,采用水平偏移的方法进行多层堆积。将每一熔覆层截面简化为矩形形状,如图 2 所示。每层熔覆层高度为 h ,熔覆层宽度为 ω ,每层偏移量为 x ,逐层熔覆堆积可得到成形高度为 H 、偏移总量为 l 的倾斜薄壁

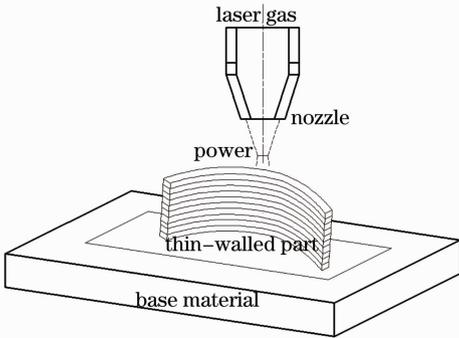


图 1 激光熔覆倾斜薄壁圆弧结构示意图
Fig. 1 Schematic of laser cladding forming inclined thin-walled part

件。其倾斜角度 α 为

$$\alpha = \arctan\left(\frac{l}{H-h}\right) = \arctan\left(\frac{x}{h}\right). \quad (1)$$

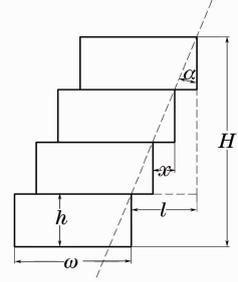


图 2 倾斜薄壁件成形示意图

Fig. 2 Schematic of inclined thin-walled part forming

2.2 熔覆倾斜角度数学建模

2.2.1 假设条件

研究对象为各层熔覆宽度与第一层熔覆宽度相等的内、外倾斜圆形薄壁件,为方便建立数学模型,作以下假设:

- 1) 每层熔覆层熔覆状态完全相同,忽略粉末冲击力影响;
- 2) 将熔覆层简化为规则长方体;
- 3) 同轴送粉条件下,粉末空间浓度在粉末汇聚中心呈现高斯分布^[15];
- 4) 激光能量足够大,粉末充足,且粉末进入熔池不考虑反弹等因素。

2.2.2 熔覆偏移极限数学建模

图 3 和图 4 分别为向内和向外倾斜圆形薄壁件示意图,两者第一层熔覆半径均为 R ,熔覆宽度和高度分别为 ω 和 h ,偏移量为 x 。若能成功熔覆出倾斜件,必须保证在熔覆过程中偏移无支撑熔融粉末不塌陷,其临界条件为粘性力 F 等于无支撑重力 mg , m 为质量, g 为重力系数,其中粘性力 F 为在悬臂截面上与无支撑部分重力大小相等,方向相反的作用力,单位为 N,如图 3 与图 4 所示。

对于向内倾斜圆形薄壁件,其偏移无支撑部分重力 m_1g 为

$$m_1g = \rho Vg = \rho gh \pi \left[(R - \omega/2)^2 - \left(R - \frac{x}{2} - x_1 \right)^2 \right], \quad (2)$$

式中 ρ 为粉末密度, V 为粉末体积, x_1 为无支撑熔融粉末偏移长度,粘性力为:

$$F_1 = f_1 S_1 = 2\pi h (R - \omega/2) f_1, \quad (3)$$

式中 S_1 表示无支撑熔融粉末接触面面积, f_1 表示单位面积上的粘性力。(2) 式与 (3) 式相等,可得到临界无支撑熔融粉末偏移极限长度 x_1 为

$$x_1 = \frac{1}{2} \left[(2R - \omega) - \sqrt{(2R - \omega)^2 - \frac{4f_1}{\rho g} (2R - \omega)} \right], \quad (4)$$

同理,对于向外倾斜圆形薄壁件,其临界无支撑熔融

粉末偏移极限长度 x_2 为:

$$x_2 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(2R + \omega)^2 - \frac{4f_2}{\rho g} (2R + \omega)} - (2R + \omega) \right]. \quad (5)$$

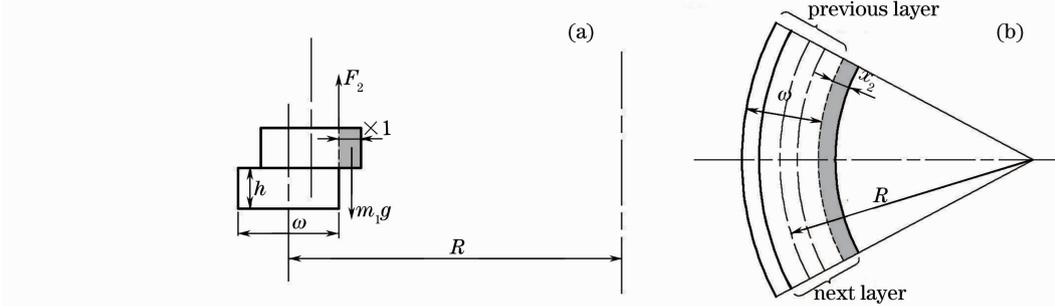


图3 向内倾斜圆形薄壁件示意图。(a) 截面图; (b) 俯视图

Fig. 3 Schematic of inward thin-walled part forming. (a) Sectional view; (b) top view

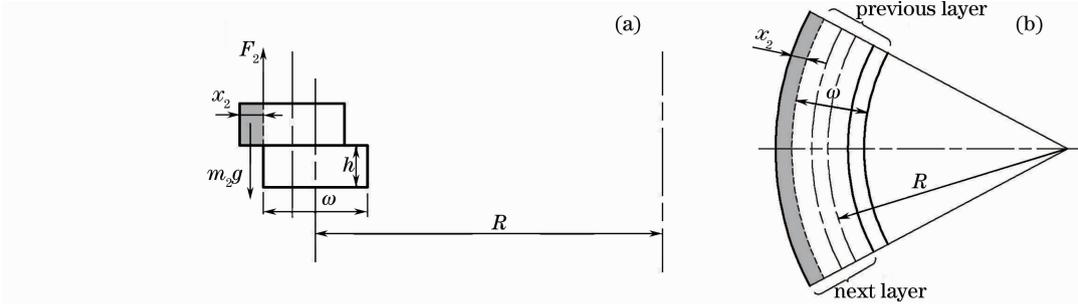


图4 向外倾斜圆形薄壁件示意图。(a) 截面图; (b) 俯视图

Fig. 4 Schematic of outward thin-walled part forming. (a) Sectional view; (b) top view

2.2.3 单道熔覆层高度数学模型

2.2节内、外倾斜薄壁件偏移量数学模型并没有考虑熔覆高度的影响,由于内、外倾斜薄壁件几何形状的差异会导致激光熔覆时间和热累计的不同,以下从熔池尺寸对熔覆高度的影响建立数学模型。

单道熔覆层高度 h 决定了薄壁件成形总高度 H ,进而影响了薄壁件倾斜角度。粉末喷射汇聚建立的数学模型如图5所示, β 为粉末汇聚前的发散角, γ 为粉末汇聚后的发散角, R_p 为粉末汇聚半径, $R(Z)$ 为离焦 Z 时的粉末汇聚半径。

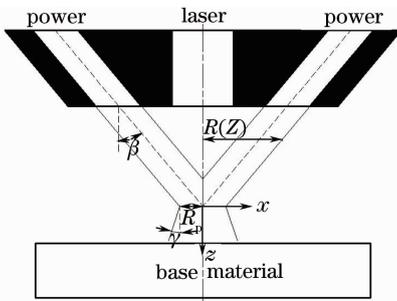


图5 粉末喷射汇聚模型图

Fig. 5 Model diagram of jet powder

粉末空间浓度分布在粉末汇聚中心呈现高斯分布,其函数为^[16]

$$M(X, Y, Z) = M_0 \exp[-2(X^2 + Y^2)/R(Z)^2], \quad (6)$$

$$R(Z) = \begin{cases} R_p + Z \tan \beta, & Z < 0 \\ R_p + Z \tan \gamma, & Z > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中 M_0 为一比例系数,满足上式可得到单道熔覆层厚度 h ^[17]:

$$h = \frac{3Q_p \{1 - \exp[-\omega^2/2R(Z)^2]\}}{2\omega\rho V_s}, \quad (8)$$

式中 V_s 为扫描速度, Q_p 为送粉量, ω 为熔池宽度。联立(7)式和(8)式可得到熔池宽度和其他工艺参数对熔覆层高度的影响。而熔池宽度是关于激光利用率,激光功率,扫描速度,初始温度及材料热物理性参数的函数^[18]。

3 数学模型求解及分析

采用上述模型,采用连续 Nd:YAG 激光器熔覆 316L 不锈钢粉末。激光功率为 390 W,扫描速度为 500 mm/min,激光离焦量为 +2.5 mm,粉末密度

$\rho=5 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$, 送粉量为 2 g/min , 基体为普通低碳钢。

3.1 偏移极限值

采用上述工艺参数, 进行单层熔覆试验, 得到熔覆宽度 $\omega=0.845 \text{ mm}$, 高度 $h=0.2 \text{ mm}$ 的单道熔覆层。取熔覆圆形内、外倾斜薄壁件的第一层熔覆半径为 $R=25 \text{ mm}$ 。将以上参数分别代入(4)式和(5)式, 可得到单位面积粘性力值与偏移极限的函数关系式。

若仅考虑几何形状因素, 不考虑热物理因素的影响, 则有单位面积粘性力值 $f_1=f_2=a>0$, 对内、外倾斜偏移极限值差(x_1-x_2)影响曲线如图6所示。

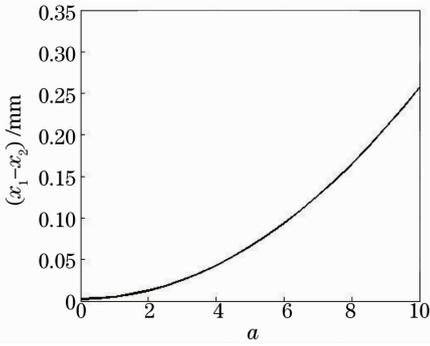


图6 单位面积粘性力值对偏移极限差值影响

Fig.6 Effect of viscosity force in unit area on difference of extreme offset value

由图6可以看出, 熔覆倾斜圆形薄壁件时, 向内倾斜的极限偏移量始终要大于向外倾斜的极限偏移量。即等偏移量下, 向外倾斜无支撑粉末较向内倾斜无支撑粉末更容易塌陷。由此可以得出, 多层熔覆等半径单一角度圆形薄壁件时, (1)式中向内倾斜的偏移总量 l_{in} 要大于向外倾斜的偏移总量 l_{out} 。

3.2 单道熔覆层高度

单道熔覆试验中, 粉末汇聚半径为 1.5 mm , 离焦量 $Z=2.5 \text{ mm}$, 将粉末汇聚后发散角 $\gamma=30^\circ$ 代入(7)式并与(8)式联立, 可得到熔池宽度对单层熔覆层高度的影响, 如图7所示。

由图7可以看出, 在粉末充足的情况下, 随着熔池宽度 ω 的增加, 单层熔覆层高度增加。随着堆积层数的增加, 材料由于吸收激光的能量 P_{abs} 而导致温度不断上升, 这样, 熔池的尺寸也就相对变大, 进入熔池的粉末数量增加, 其单层堆积厚度也逐渐增大。

熔覆多层圆形薄壁件时, 对于向内倾斜薄壁件, 随着熔覆层数的增加扫描半径越来越小; 而对于向外倾斜薄壁件, 随着熔覆层数的增加扫描半径越来越大。几何形状上的差异导致了向内倾斜薄壁件熔

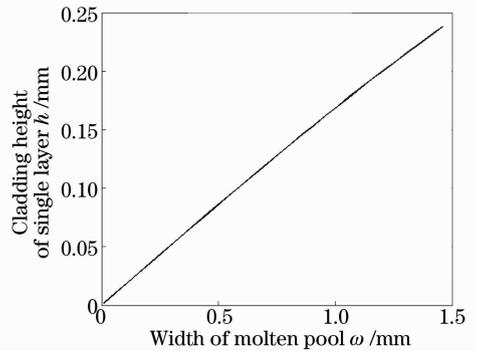


图7 熔池宽度对单层熔覆层高度影响

Fig.7 Effect of width of molten pool on height of single layer

覆长度要小于向外倾斜薄壁件熔覆长度, 这样前者热累计要小于后者, 从而多层熔覆时向内倾斜熔池较向外倾斜熔池小, 由图7可知, 其熔覆高度相应较小。即(1)式向内倾斜的熔覆总高度 H_{in} 要小于向外倾斜的熔覆总高度 H_{out} 。

据3.1节和3.2节的数学计算分析可知, 激光熔覆同等半径相同层数的圆形倾斜薄壁件时, 在同等偏移量下, 向内倾斜偏移总长度 l_{in} 要大于向外倾斜的偏移总长度 l_{out} ; 相反, 向内倾斜的熔覆总高度 H_{in} 要小于向外倾斜的熔覆总高度 H_{out} 。根据(1)式可得到向内倾斜的熔覆角度 α_{in} 要大于向外倾斜的熔覆角度 α_{out} 。

4 试验验证

4.1 试验条件

采用与单道熔覆试验相同工艺参数和同一试验系统, 该系统由 1200 W 连续 Nd:YAG 激光器、三轴数控工作台、DPSF-3 型三筒送粉器、同轴喷嘴、多轴可编程运动 ADV400 控制卡等组成。载粉气体和保护气体均为高纯(99.999%)氩气。金属粉末直径大小为 $45 \sim 90 \mu\text{m}$ 。所用量具为电子数显卡尺, 分辨率为 0.01 mm 。

薄壁件第一层半径为 25 mm 的 $1/4$ 圆弧, 分别熔覆 30 层向内倾斜和向外倾斜薄壁件。试验在偏移量为 $0.04, 0.06, 0.08, 0.09 \text{ mm}$ 时分别熔覆向内和向外倾斜圆弧薄壁件。

4.2 试验结果及分析

图8和图9分别为不同偏移量熔覆成形的向内倾斜薄壁件和向外倾斜薄壁件图。多次测量各参数下熔覆成形总偏移量和总高度, 取平均值, 并计算倾斜角度, 结果如表1所示。

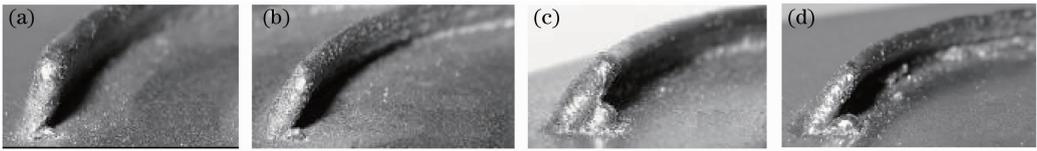


图 8 不同偏移量熔覆成形的向内倾斜薄壁件。(a) 0.04 mm; (b) 0.06 mm; (c) 0.08 mm; (d) 0.09 mm

Fig. 8 Inward thin-walled parts at different offset values. (a) 0.04 mm; (b) 0.06 mm; (c) 0.08 mm; (d) 0.09 mm

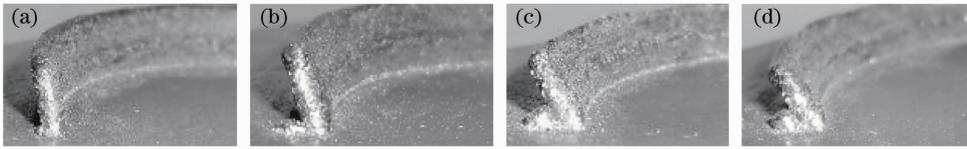


图 9 不同偏移量熔覆成形的向外倾斜薄壁件。(a) 0.04 mm; (b) 0.06 mm; (c) 0.08 mm; (d) 0.09 mm

Fig. 9 Outward thin-walled parts at different offset values. (a) 0.04 mm; (b) 0.06 mm; (c) 0.08 mm; (d) 0.09 mm

表 1 偏移总量和成形高度试验结果

Table 1 Test results of total offset and forming height

Offset value /mm	0.04	0.06	0.08	0.09
L_{in}/mm	1.10	1.60	2.10	2.30
L_{out}/mm	0.90	1.40	1.95	2.20
H_{in}/mm	3.95	3.65	3.20	3.15
H_{out}/mm	4.10	3.85	3.43	3.33

图 10 为不同偏移量下所成形的倾斜偏移角度。

无论是向内倾斜还是向外倾斜,随单层偏移量的增加,倾斜角度也在增大。但随着偏移量的增加其偏移角度增加速率减小,这是因为偏移量已逐渐增至极限偏移量,造成熔覆粉末塌陷加重。等偏移量下,向内倾斜薄壁件成形倾斜角度始终大于向外倾斜成形倾斜角度。但随着等偏移量由 0.04 mm 增加至 0.09 mm,向内倾斜成形倾斜角度增大,向外倾斜成形角度在减小,分别为 5.2°、3.3°、2.7°和 2.1°,这是因为试验偏移量的值已逐渐达到偏移极限值,内、外倾斜成形角度之间的差值也逐渐减小。

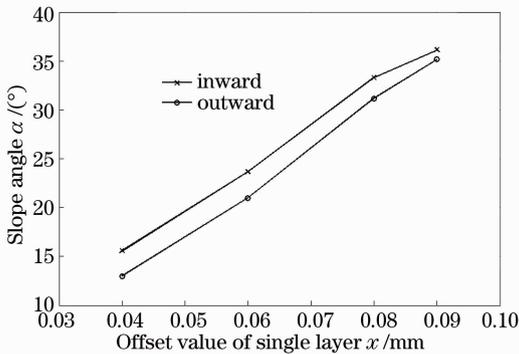


图 10 不同偏移量下内、外倾斜偏移角度

Fig. 10 Effect of different offset values on inward and outward slope angles

图 11 为熔覆出的航空发动机燃烧室模拟件,为内、外倾斜圆形薄壁件。通过不断改变单层偏移量

来改变倾斜角度。熔覆出的向内倾斜的薄壁件成形高度为 16.0 mm,偏移总量为 6.5 mm,顶部倾斜角度达到 39.5°;熔覆出的向外倾斜的薄壁件成形高度为 15.5 mm,偏移总量为 4.9 mm,底部倾斜角度为 39°。

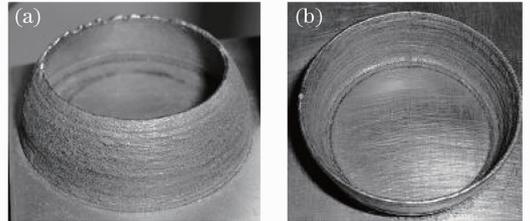


图 11 熔覆成形的航空发动机燃烧室模拟件。

(a) 向内倾斜; (b) 向外倾斜

Fig. 11 Aero-engine combustion chamber models formed by cladding. (a) Inward inclined; (b) outward inclined

5 结 论

1) 激光熔覆倾斜薄壁件根据偏移无支撑熔融粉末不塌陷的临界条件即粘性力 F 等于无支撑熔融粉末重力和单道熔覆层高度的数学模型,研究了激光熔覆过程向内倾斜和向外倾斜薄壁件的偏移量、成形高度和倾斜角度。试验条件下,随偏移量由 0.04 mm 增加至 0.09 mm,内、外倾斜薄壁件成形角度差值也逐渐减小,由 5.2°降至 2.1°。

2) 薄壁件因几何形状影响了偏移极限值和成形高度。向内倾斜薄壁件极限偏移值要大于向外倾斜极限值,熔覆粉末较不易发生塌陷;而激光扫描长度的不同使得内、外倾斜热累计效应不同,熔池宽度不同,造成向内倾斜成形高度小于向外倾斜成形高度。

3) 单层等偏移量下,激光熔覆向内倾斜薄壁件倾斜角度要大于向外倾斜薄壁件,试验熔覆出了航

空发动机燃烧室模拟件,为激光熔覆精密燃烧室提供了理论分析与试验依据。

参 考 文 献

- 1 X Wu, J Mei. Near net shape manufacturing of components using direct laser fabrication technology [J]. *Materials Processing Technology*, 2003, 135(2-3): 266-270.
- 2 Shang Xiaofeng, Liu Weijun, Wang wei, *et al.*. Slope limit of part made in metal powder laser shaping[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 44(8): 97-100.
尚晓峰, 刘伟军, 王 维, 等. 金属粉末激光成形零件倾角极限[J]. *机械工程学报*, 2007, 44(8): 97-100.
- 3 Lu Yaojun, Chen Guangxia, Hu Qianwu, *et al.*. Research of direct laser fabrication of metallic materials by Nd:YAG laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(s1): 180-184.
卢尧君, 陈光霞, 胡乾午, 等. Nd:YAG 激光熔覆快速制造技术研究[J]. *中国激光*, 2007, 34(s1): 180-184.
- 4 H Qi, M Azer, P Singh. Adaptive toolpath deposition method for laser net shape manufacturing and repair of turbine compressor airfoils[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 48(1-4): 121-131.
- 5 Liu Jie, Yang Yongqiang, Wang Di, *et al.*. Computer-aided optimization of the process parameters for fabricating overhanging structure by selective laser melting[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0503001.
刘 杰, 杨永强, 王 迪, 等. 选区激光熔化成型悬垂结构的计算机辅助工艺参数优化[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0503001.
- 6 Yang Yongqiang, Wang Di, Wu Weihui. Research progress of direct manufacturing of metal parts by selective laser melting[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(6): 0601007.
杨永强, 王 迪, 吴伟辉. 金属零件选区激光熔化直接成型技术研究进展[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0601007.
- 7 Guo Huiru. Laser Cladding Forming of the Simulated Thin-Walled Casing with Variable Parameters [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
郭会茹. 变参数法薄壁机匣模拟件激光熔覆成形研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- 8 Wang Xuyue, Jiang Hao, Xu Wenji, *et al.*. Laser cladding forming of arc-section thin-walled parts with variable Z-increments[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(10): 1003007.
王续跃, 江 豪, 徐文冀, 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.
- 9 Meng Qingxuan, Wang Xuyue, Xu Wenji, *et al.*. Vaporization melt riation mathematical model and experiments of laser cutting sheet metal[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(17): 172-178.
孟庆轩, 王续跃, 徐文冀, 等. 薄板激光切割气熔比数学建模及试验验证[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(17): 172-178.
- 10 Li Yanming, Yang Haiou, Lin Xin, *et al.*. The influences of processing parameters on forming characterizations during laser rapid forming[J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, 360(1-2): 18-25.
- 11 Milewski J O, Lewis G K, Thoma D J. Directed light fabrication of a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition[J]. *Materials Processing Technology*, 1998, 75(1-3): 165-172.
- 12 R Dwivedi, R Kovacevic. An expert system for generation of machine inputs for laser-based multi-diresctional metal deposition [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46(14): 1811-1822.
- 13 R Dwivedi, R Kovacevic. Process planning for multi-directional laser-based direct metal deposition [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2005, 219(7): 695-707.
- 14 Rajeev Dwivedi, Srdja Zekovic, Radovan Kovacevic. A novel approach to fabricate uni-directional and branching slender structures using laser-based direct metal deposition [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 47(7-8): 1246-1256.
- 15 Lin J. Concentration model of the power stream in coaxial laser cladding[J]. *Opt & Laser Technol*, 1999, 31(3): 251-257.
- 16 Andrew J P, Li Lin. Modelling powder concentration distribution from a coaxial deposition nozzle for Laser-based rapid tooling[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, 126(2): 33-41.
- 17 Pi Gang, Zhang Anfeng, Zhu Gangxian, *et al.*. Self-regulation effect in laser direct metal manufacturing[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(11): 77-81.
皮 刚, 张安峰, 朱刚贤, 等. 激光金属直接成形中形貌自稳定效应的研究[J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(11): 77-81.
- 18 Liu Jichang. Effects of powder concentration distribution on fabrication of thin-wall parts in coaxial laser cladding[J]. *Opt & Laser Technol*, 2005, 37(4): 287-292.

栏目编辑:宋梅梅