

弧形悬垂实体结构激光熔覆成形

邓志强, 石世宏, 周斌, 贾帅, 王聪

(苏州大学机电工程学院, 江苏苏州 215021)

摘要: 运用 6 轴机器人及光内送粉技术进行弧形悬垂实体结构成形, 提出了空间变姿态径向搭接方法: 熔覆头沿圆弧切线方向连续变姿态, 径向多道搭接。探讨了熔覆喷头堆高自适应区间, 推导了离焦量在 $-5.5 \sim -1.5$ mm 时, 单道熔层生长量随离焦量变化的量化关系式, 并加以实验验证。对成形悬垂实体件检测结果表明: 成形件表面平整, 过渡平缓无阶梯效应; 不同倾角下成形件厚度长度均匀, 各尺寸精度均接近建模要求; 电镜组织分析表明不同倾角下各处显微组织均匀致密无明显差别。对成形件作硬度检测, 其硬度分布与电镜组织保持相同变化规律。

关键词: 变姿态激光熔覆; 悬垂实体; 径向搭接; 光内送粉

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1006004

Laser cladding forming of arcuate cantilevered entity part

Deng Zhiqiang, Shi Shihong, Zhou Bin, Jia Shuai, Wang Cong

(School of Mechatronics Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China)

Abstract: By using 6-axis robot and inside laser powder feeding technology to form the arcuate cantilevered entity part, and a way of variable posture and radial overlap laser cladding was proposed. This experiment discussed the cladding nozzle self-healing effect and deduced the quantitative relation between the single track height and the laser defocus when the defocusing amount ranged from -5.5 mm to -1.5 mm, and verified it by experiment. The experiment result shows that the surface of formed part is flat and smooth without staircase effect; the thickness and length of formed part are uniform under different angle, and all the dimension precision meet the requirements of modeling, different angle almost has the same microstructure. The hardness keeps the same change rule with microstructure by testing the forming part hardness.

Key words: variable posture laser cladding; cantilevered entity part; radial overlap; inside laser powder feeding

收稿日期: 2017-02-10; 修订日期: 2017-03-20

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1100300); 江苏省重点研发项目(BE2015067)

作者简介: 邓志强(1991-), 男, 硕士生, 主要从事激光熔覆快速成形方面的研究。Email: 1174392379@qq.com

导师简介: 石世宏(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光快速成形方面的研究。Email: shishihongstu.suda.edu.cn

0 引言

激光熔覆成形是目前快速制造领域的一个热点,随着激光技术的迅速发展,其应用领域得到迅速扩展。激光熔覆成形将激光熔覆表面强化技术和快速原型制造技术相结合,具有成形零件复杂、结构优化、组织性能优良、加工材料范围广泛、柔性化程度高、能实现梯度功能和无模近终成形等独特优点,可广泛应用于复杂零件的制造和修复^[1-3]。

目前较为成熟的激光熔覆成形技术有:选择性激光熔化(SLM)、激光金属沉积(LMD)^[4-5]。SLM 技术能够成形结构较复杂的零件,但由于成形过程需进行铺粉再熔覆,故成形效率较低;并且受到粉床大小的限制,其成形件尺寸较小。SLM 技术利用粉床对熔层的支撑作用,用分层错位可成形悬垂薄壁等结构,但成形倾角有限且表面阶梯效应明显,成形件容易出现空隙,缩孔等缺陷。而 LMD 技术对粉末的使用利用率较高,成本相对低廉,且可成形更致密大尺寸结构件,但 LMD 受到其成形工艺的限制,对于一些具有悬空结构的悬垂零件成形较为困难,比如膝关节、航空发动机叶片,机匣等具有悬空结构的特征件^[6]。西安交通大学通过增材制造技术对 3D 模型直接加工,树脂成型后经硅胶翻模、制作蜡模、成壳、浇铸等,获得定制化膝关节假体,但流程相当麻烦^[7]。参考文献 [8] 利用变 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,将单层位错偏移量有 0.04 mm 增大至 0.09 mm,但表面光洁度较差。参考文献 [9] 采用离焦技术建立了变径体堆积的壁厚补偿模型对变径体壁厚加以控制,较大改善了成形件表面质量,而成形件却为薄壁零件。

为了成形出表面质量较好的悬垂实体,建立弧形悬垂结构模型进行激光熔覆成形研究。根据不等高自适应原理,采用光内送粉熔覆头,熔覆头空间连续变姿态改变激光离焦量,进而使单道熔层生长量线性变化。通过空间变姿态熔覆径向搭接的方法成形除了弧形悬垂实体,有效突破了成形角的限制并消除了悬垂结构成形的阶梯效应。讨论了成形件的尺寸精度,对其显微组织及硬度进行了分析。

1 实验原理

1.1 不等高自适应原理

利用光内送粉喷头实验得到单道熔层生长高度随激光离焦量其变化曲线,如图 1 所示。单道熔层高度随离焦量增大呈现先升高后降低的变化规律。激光离焦量越大光斑直径越大,在能量密度足够大的条件下,粉末利用率也随之升高,故实验采取曲线段②进行研究。

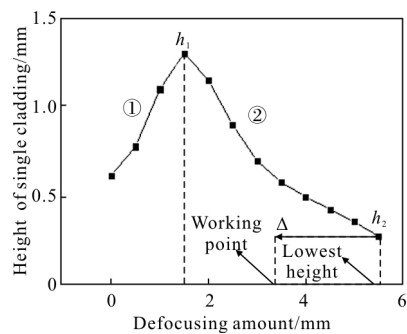


图 1 单道熔层高度随离焦量变化趋势

Fig.1 Height of single cladding vs defocusing amount

实际实验过程中,单道熔层高度为因变量,激光离焦量为自变量,故实验的顺利与否取决于激光离焦量的变化。近似认为曲线段②单道熔层高度与离焦量线性相关,对其线性拟合,可得工作点单道熔层高度相对单道熔层层高度最低时的变化关系。

$$\delta h = h_2 + K\Delta \quad (1)$$

式中: δh 为工作点的生长高度; h_2 为最低单道熔层高度; K 为拟合曲线斜率; Δ 为工作点位置相对于最低单道熔层高度时的工作距离。

1.2 变姿态熔覆径向搭接原理

弧形结构实体由若干个扇形实体单元组成,如图 2 所示,每个扇形单元任意半径 r 处的弧长满足公式(2)。

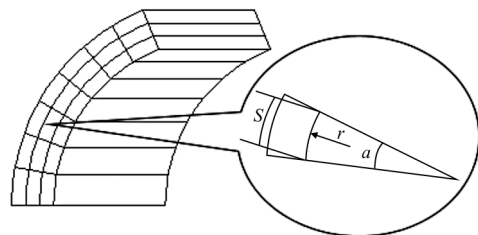


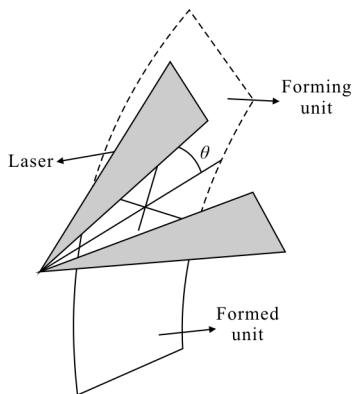
图 2 悬垂实体组成

Fig.2 Composition of cantilevered entity

$$S=r\alpha \quad (2)$$

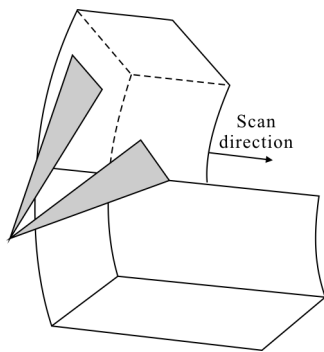
式中： S 为半径 r 处弧长； α 为扇形单元所成夹角。

由于扇形实体单元沿径向熔层高度线性增加，该研究提出了一种变姿态熔覆径向搭接的实验方法。在变姿态熔覆过程中激光轴线与已形成表面成一定夹角 θ 如图 3(a)所示，使得激光离焦量沿径向线性减小，而根据不等高自适应曲线②段，此时的单道熔层生长高度会沿径向线性增加，使得待成形单元表面与激光轴线垂直。激光沿周向扫描如图 3(b)所



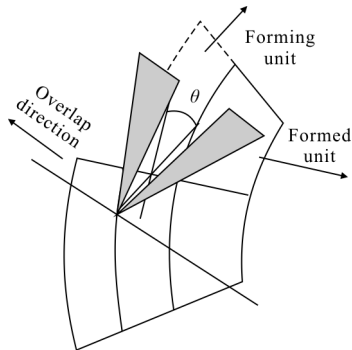
(a) 变姿态激光熔覆

(a) Variable posture laser cladding



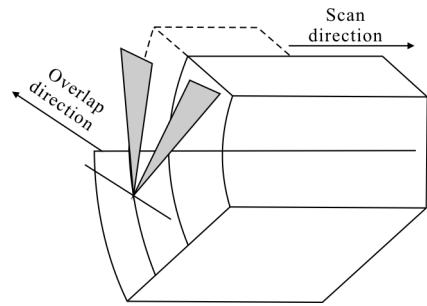
(b) 激光熔覆扫描方向

(b) Scan direction of laser cladding



(c) 径向搭接

(c) Radial overlap



(d) 扫描及搭接方向

(d) Direction of scan and overlap

图 3 变姿态熔覆径向搭接

Fig.3 Variable posture and radial overlap laser cladding

示，此变姿态熔覆过程中已形成扇形实体单元的上表面与待成形扇形实体单元的下表面完全接触，可以有效避免分层错位带来的阶梯效应问题^[10]，得到表面质量较好的成形件。

弧形悬垂实体成形条件需满足扇形实体单元任意半径处的弧长与该处工作点位置的的生长高度一致，即满足公式(3)。

$$S=\delta h \quad (3)$$

在径向搭接过程中如图 3(c)所示，激光轴线与已形成表面成定夹角 θ 的同时沿径向偏移一定距离，使已形成扇形实体单元的外侧与待成形实体单元的内侧完全重合，以保证弧形悬垂实体沿径向保持连续，搭接过程仍然激光沿周向扫描。在多道搭接完成之后关闭激光，熔覆头回到改层起点，旋转 θ 并且提升一定的堆积增量，进行下一层堆积。这样逐道搭接、逐层堆积熔覆成形弧形悬垂实体。

2 实验

2.1 模型设计及实验条件

设计 3 道搭接弧形悬垂实体模型(见图 4)。模

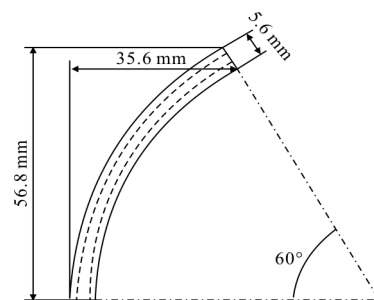


图 4 悬垂实体截面几何模型

Fig.4 Geometry model of cantilevered entity cross section

型侧面 3 道搭接,内侧轨迹半径 60 mm,外部高度 56.8 mm,圆弧宽度 35.6 mm。由于熔覆道单层宽度为 2.4 mm,设偏移量为 1.6 mm,则壁厚为 5.6 mm,相应外侧轨迹半径为 65.6 mm。

实验采用中空激光光内送粉熔覆头,由 6 轴机器人控制做空间运动,其重复精度 $\leq \pm 0.05$ mm。采用 IPG 公司的 YLS-2000-TR 型光纤激光器,德国 GTV PF2/2 送粉器。送粉器载气和粉末准直气均采用氮气。选定激光功率 800 W、扫描速度 6 mm/s、送粉量 8 g/min、内侧弧形激光离焦量 -3 mm,准直气压 0.02 MPa。

基板为 304 不锈钢,粉末为 Fe313,化学成分见表 1。

表 1 Fe313 成分表

Tab.1 Composition of Fe313

Composition	C	Si	Cr	B	Fe
Mass fraction	$\approx 0.1\%$	2.5%–3.5%	13%–17%	2.5%–3.5%	Bal.

2.2 成形实验

按照图 3 变姿态径向搭接原理规划路径。提升量为 0.5 mm,则 $\theta \approx 0.48^\circ$ 。利用 6 轴机器人编程控制熔覆头的运动轨迹,每熔覆一层,旋转 0.48° 。实验过程如图 5(a)所示,随熔覆头倾角的增加,始终无火花飞溅现象,成形件表面过渡度平缓无阶梯效应出现,侧面厚度均匀。成形零件去除表面氧化层后,成形件如图 5(b)所示。

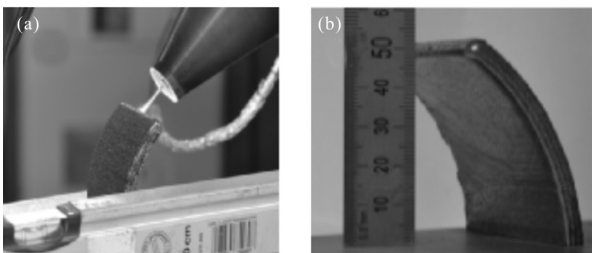


图 5 成形过程及结果

Fig.5 Forming process and result

3 结果与分析

3.1 粗糙度、尺寸精度

利用 TR-200 便携式粗糙度仪对图 5(a)成形件内表面进行粗糙测量,测得粗糙度 $Ra \approx 2.3 \mu\text{m}$ 。图 5(b)成形件测量尺寸与图 4 CAD 建模尺寸误差如表 2

所示。

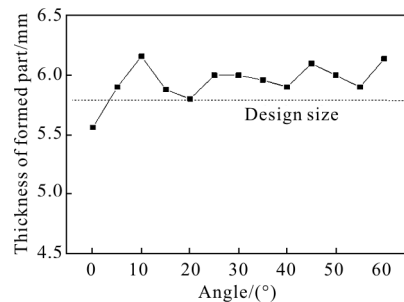
表 2 成形件尺寸误差

Tab.2 Error of formed part

Features	Design size /mm	Absolute error /mm	Relative error
Arc height	56.8	-4.24	-7.46%
Arc width	35.6	-1.4	-3.9%
Initial radius	60	0	0%
End radius	60	-1.45	-2.4%

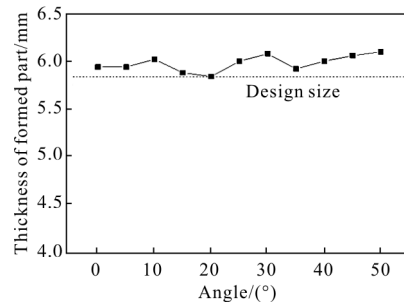
成形件的误差主要出现在圆弧高度未达到建模尺寸,进而导致末端圆弧半径减小。这是由于建模时尾端为理想平面,而实际成形件表面由于液态熔池的表面张力的作用呈现为弧状。

图 6 为成形悬垂实体件厚度沿弧度方向和扫描方向变化图。图 6(a)起点处 $0\sim 3^\circ$ 区间内成形件厚度未达到设计尺寸,这是因为初始阶段熔覆层与基板温度梯度较大,熔层温度迅速向基板传递而散失。 $3\sim 60^\circ$ 区间由于成形件外侧有少许粘粉,测量尺寸略大于设计尺寸,在小范围内波动。



(a) 厚度沿角度变化

(a) Thickness vs different angle



(b) 厚度沿扫描方向变化

(b) Thickness vs scan direction

图 6 成形件厚度

Fig.6 Thickness of formed part

图 7 为成形悬垂实体件长度随角度的变化图。

40°之前成形件尺寸稳定在设计尺寸左右,40°以后成形成度成下降趋势。这是由于机器人变姿态过程中,在旋转面的垂直坐标面中的误差累积,导致扫描末端超出设计行程漏光漏粉所致。

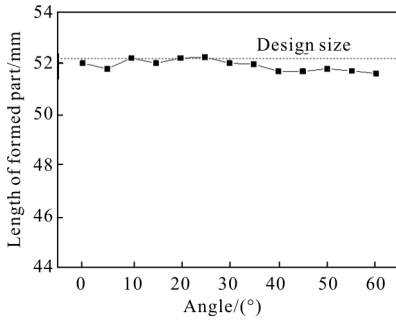


图 7 成形长度沿角度方向变化

Fig.7 Length of the formed part vs different angle

3.2 电镜分析

取图 5(a)成形悬垂实体件侧面剖视图如图 8 所示。将其分为 a、b、c 3 段,经制样抛光腐蚀,利用 S-4700 冷场发射扫描电子显微镜(SEM)进行拍摄,其 SEM 照片如图 9 所示。图 9(a)为成形件与基板结合区,金属粉末快速熔化快速凝固,结合面处形成致密的平面晶层,结合面上部区域晶粒垂直基板生长,晶粒尺寸约为 10×20 μm。图 9(b)~(d)分别对应图 8 对应 a、b、c 3 处附近电镜组织照片,熔层散热由向基板的二维散热转换为向空间的三维散热,晶粒生长失去方向性。主要表现为等轴晶组织,晶粒尺寸约为 1~10 μm。图 9(b)~(d)中区域②处组织略大于①区组织,这是因为多层堆积过程中,前层表面重熔温度梯度减小所致。图 9(d)中区域③为多道搭接重熔区,显微组织特征与区域②相同。

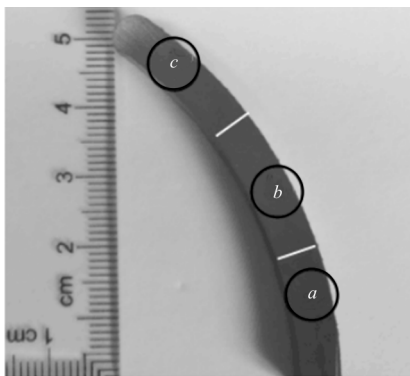
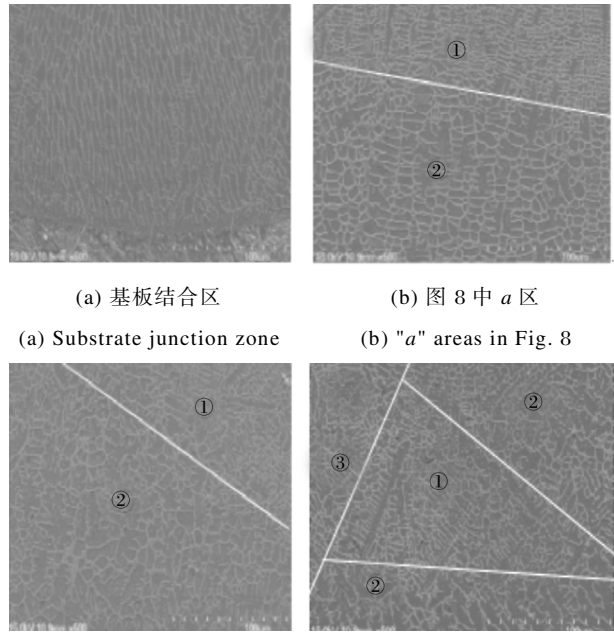


图 8 成形件剖视图

Fig.8 Sectional view of formed part



(a) 基板结合区

(b) 图 8 中 a 区

(a) Substrate junction zone

(b) "a" areas in Fig. 8

(c) 图 8 中 b 区

(d) 图 8 中 c 区

(c) "b" areas in Fig.8

(d) "c" areas in Fig.8

图 9 不同倾角下扫描电镜组织照片

Fig.9 SEM analysis of different inclining angle

3.3 硬度分析

采用 MH5 型显微维氏硬度计,对图 8 样品外侧、内侧、中间,不同倾角下各处硬度进行测量,结果如图 10 所示。基体硬度最低,约为 260 HV,热影响区由于两种不同粉末的融合和快速凝固的特性,其硬度居于熔覆层和基板之间。成形悬垂件随角度变化硬度最终稳定在 700 HV 上下浮动,其中上下峰值分别对应于图 9(b)~(d)不同区域,晶粒越小组织越致密硬度越高。

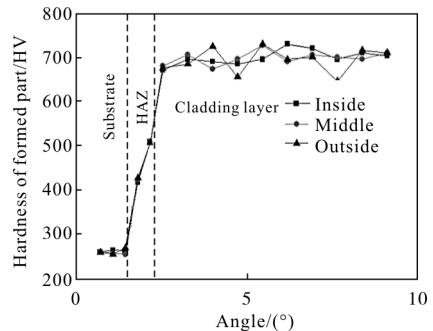


图 10 不同角度下成形件硬度

Fig.10 Hardness of formed part under different angle

4 结论

(1) 根据离焦量在-5.5~-1.5 mm 时的不等高自

适应原理, 提出了弧状零件连续变姿态径向搭接方法: 熔覆喷头沿圆弧切向连续变姿态, 径向搭接熔覆扫描。

(2) 采用连续变姿态径向搭接方法, 基于光内送粉技术和 6 轴机器人, 实现了连续变姿态大倾角无支撑悬垂实体的直接成形。获得 0~60° 连续变姿态无支撑悬垂实体件, 且消除了表面阶梯效应。

(3) 对成形悬垂实体件进行检测分析, 结果表明, 整体形貌良好, 成形件内外表面平整, 过渡平缓无阶梯效应。其中内表面粗糙度 $Ra \approx 2.3 \mu\text{m}$ 。不同倾角下成形件厚度均匀, 由于外表面少许粘粉测量值略大于理论值。而不同角度下成形件长度由于机器人旋转精度问题略小于理论值。成形件硬度大于热影响区硬度, 热影响区硬度大于基体硬度, 成形件硬度最终稳定在 700 HV 上下浮动。

参考文献:

- [1] Li Rui, Yang Xiaojun, Zhao Wei, et al. Effect of femtosecond laser micromachining on the roughness of cladding sidewalls [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3244–3249. (in Chinese)
李睿, 杨晓军, 赵卫, 等. 飞秒激光加工对熔覆层侧壁粗糙度的影响[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3244–3249.
- [2] Song Jianli, Li Yongtang, Deng Qilin, et al. Research progress of laser cladding forming technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(14): 29–39. (in Chinese)
宋建丽, 李永堂, 邓琦林, 等. 激光熔覆成形技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 29–39.
- [3] Yang Lijun, Zhang Hongzhi, Wu Xuefeng, et al. Laser machining technology with the effect of thermal soften and thermal stress[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1038–1043. (in Chinese)
杨立军, 张宏志, 吴雪峰, 等. 应用加热软化和应力效应的激光加工技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1038–1043.
- [4] Xiao Dongming, He Kuanfang, Wang Di. Transient temperature evolution of Selective Laser Melting process based on multilayer finite element model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2672–2678.
- [5] Buchbinder D A, Schleifenbaum H B, Heidrich S B, et al. High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts[J]. *Physics Procedia*, 2011, 35(12): 271–278.
- [6] Wang Su, Wang Chunxia, Guo Jungang. Numerical simulation of laser welding in combustion chamber case shell on aeroengine [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(7): 833–837. (in Chinese)
汪苏, 王春侠, 郭军刚. 航空发动机薄壁机匣激光焊接有限元数值模拟 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(7): 833–837.
- [7] Song Changhui, Yang Yongqiang, Zhang Manhui, et al. Redesign and selective laser melting manufacturing of femoral component base on digital 3D technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 2017–2025. (in Chinese)
宋长辉, 杨永强, 张曼慧, 等. 基于数字化 3D 技术的股骨假体再设计与激光选区熔化制造 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 2017–2025.
- [8] Wang Xuyue, Jiang Hao, Xu Wenji, 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. (in Chinese)
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.
- [9] Cai Wei, Fu Geyan, Shi Shihong, 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. (in Chinese)
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.
- [10] Shi Tuo, Wang Yiqing, Lu Bingheng, et al. Laser cladding forming of cantilevered thin-walled part based on hollow-laser beam inside powder feeding technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 1003003. (in Chinese)
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.