

基于离焦技术的光内送粉堆积变径体壁厚控制研究

蔡 伟 傅戈雁* 石世宏 张 甲 朱 萍 张迎宾

(苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021)

摘要 分析了光内同轴送粉激光熔覆技术堆积变径回转体时壁厚“越堆越薄、薄厚不均”现象的成因,提出控制离焦量来逐层补偿熔池液态金属流失的方法,以保持熔覆层宽度不变。基于大量的实验数据得出离焦量变化量与变径回转体斜率之间的关系式,从而可在堆积过程中根据变径回转体斜率的变化实时控制离焦量的变化。通过实时控制离焦量,同时控制送粉量与激光功率,得到了表面质量较好、壁厚均匀的几个典型的变径回转体。成形件的金相组织细密,力学性能优良。对成形件进行了硬度测量,总体硬度相对基体较高且分布均匀。

关键词 激光器;激光熔覆;离焦技术;均匀壁厚变径回转体;光内同轴送粉

中图分类号 TF124;TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.0703003

Research on Thickness Control of Variable Diameter Solid with Coaxial Inside-Beam Powder Feeding Laser Cladding by Defocusing Technique

Cai Wei Fu Geyan Shi Shihong Zhang Jia Zhu Ping Zhang Yingyin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China)

Abstract After analyzing the cause of the phenomenon of heaping thinner and uneven thickness in the wall thickness when coaxial inside-beam powder feeding laser cladding is used in the accumulation of variable diameter solid, we propose to control the amount of defocus layer by layer to compensate the pool of liquid metal loss and to keep the cladding layer width. Through a large number of experimental data, we demonstrate the relationship between the variation of defocus amount and slope of the variable diameter solid, and thus in the accumulation process the control of defocus amount can be changed in real time according to the variable rotary slope. By real-time controlling the amount of defocus, and correspondingly controlling the amount of the powder feeding and laser power, a few typical variable diameter rotating solid with good surface quality and uniform thickness are got. The molded parts show fine microstructure and excellent mechanical properties. The hardness of the molded parts is measured, the overall hardness is higher than that of the substrate and evenly distributed.

Key words lasers; laser cladding; defocusing technique; uniform thickness variable diameter rotating solid; coaxial inside-beam powder feeding

OCIS codes 140.3390; 350.3390

1 引 言

激光熔覆成形技术能够直接成形出传统工艺无法加工的复杂形状零件,但这些零件的成形精度与工业需求仍存在一定的差距^[1],而成形精度主要取决于所采用的工艺参数。采用光内送粉熔覆工艺堆积高层变径回转体时,堆积出的成形件壁厚不均匀,

表面粗糙。以往对该现象的研究主要集中在扫描速度、激光功率、送粉速率的最佳配比以及在此最佳工艺参数下的成形堆积^[2~4],对离焦量的影响并未做过系统研究。文献[5]表明光斑直径与熔池宽度相当,成形过程中离焦量不发生变化,光斑直径与熔覆层宽度也不会变化,但是在变径体堆积过程中,熔道

收稿日期: 2012-02-09; **收到修改稿日期:** 2012-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(50975187,61078019)和苏州市工业攻关基础项目(SYG201036)资助课题。

作者简介: 蔡 伟(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光熔覆成形方面的研究。E-mail: 978567434@qq.com

导师简介: 傅戈雁(1959—),女,教授,博士生导师,主要从事激光制造与表面强化技术等方面的研究。

E-mail: fugeyan@suda.edu.cn(通信联系人)

是没有支撑的^[6,7],熔池总有部分金属液体流出,基体损失掉,使凝固后的熔覆层宽度变窄,从而使下一熔覆层的基体变窄,这样就会陷入恶性循环,高层的熔池损失越来越多,形成“越堆越薄、薄厚不均”的现象。本文建立了变径体堆积斜率与堆积离焦量的数学模型,并根据该模型实时控制离焦量,堆积出了典型的均匀壁厚零件,讨论了零件的微观组织,并分析了其硬度分布。

2 试验材料及方法

试验采用高功率横流 CO₂ 激光器,基体材料为 45# 钢,采用氮气作为保护气体,粉末选用 Fe313 合金粉末,粒度为 -140~+325 目(45~109 μm),成分如表 1 所示。

表 1 Fe313 合金粉末成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical composition of Fe313 powder
(mass fraction, %)

Cr	C	Si	B	Fe
14.2	0.1	1.71	1.38	Bal.

采用光内同轴送粉激光熔覆^[8,9],其原理图如图 1 所示,通过特殊的光学系统将传统的圆锥形聚焦激光束转换为中空锥形聚焦激光束,粉管居中使合金粉末在保护气载送下垂直输送到中空光斑中。该方案实现了粉、气、光真正意义上的同轴,消除了光外送料出现的方向性问题,具有光粉耦合好、成形质量好、粉末利用率高的优点。

3 变径回转体壁厚控制原理

较多零件存在侧壁倾斜的几何特征,定义侧壁与垂直面之间的夹角为堆积斜率角 α ,如图 2 所示,其中 Δ 为每层偏移量, H 为每层提升高度。

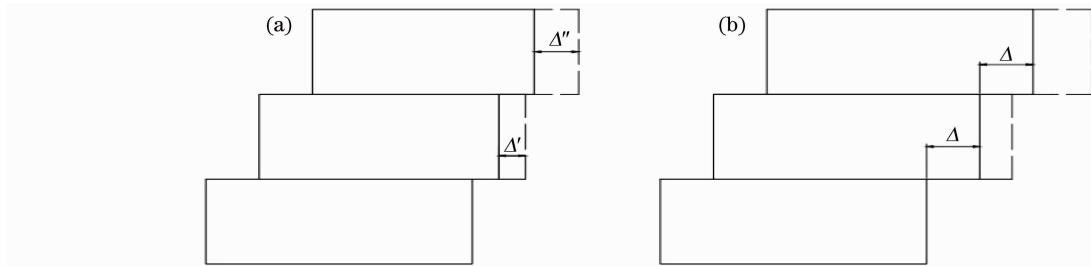


图 3 堆积剖面图。(a)离焦量保持不变;(b)离焦量逐层增大
Fig. 3 Sectional schematic of the accumulation process. (a) Amount of defocus is invariable;
(b) amount of defocus increases

综上所述,欲使回转体壁厚保持不变,熔池宽度 d_2 应比基体宽度 d_1 大,以补偿熔池的损失,如

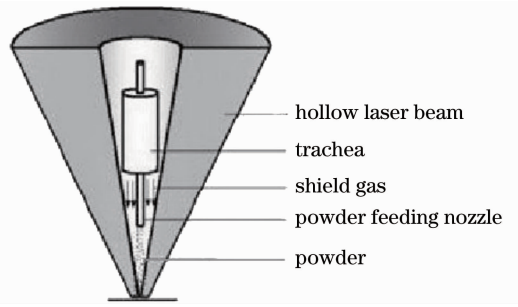


图 1 光内送粉熔覆原理图
Fig. 1 Schematic of inside-beam powder feeding laser cladding

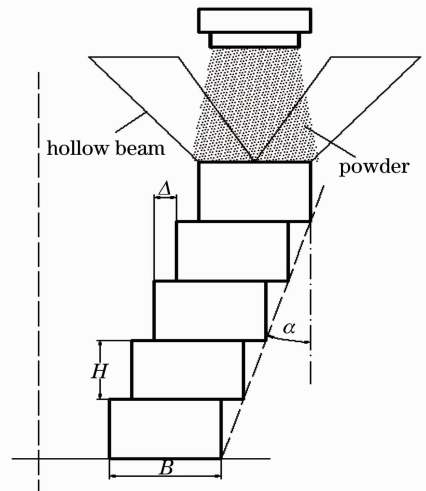


图 2 变径体堆积过程示意图
Fig. 2 Schematic diagram of variable diameter solid accumulation process

堆积变径回转体过程剖面如图 3 所示,离焦量保持不变,理论的熔池宽度不变(如虚线所示),因为没有支撑,总有部分熔池金属流失,导致凝固后的熔覆层宽度变窄(如实线所示),下一层堆积时基体变窄,熔池流失的液体金属更多,如图 3(a)中 Δ 所示,在宏观上如图 4 所示。

图 3(b)所示,逐层增大离焦量补偿熔道损失,使实际熔道宽度相等(如实线所示),显然 d_2/d_1 的值与

斜壁的斜率有关。为了推导出关系式,做了 3 组不同斜率斜壁堆积的试验并求其平均值,试验数据如表 2 所示。

表 2 各斜率熔覆层的宽度比

Table 2 Width ratios of the cladding layer with different slopes

Slope $a / \%$	Basic width of the cladding layer d_1 / mm	Width after the loth-layer /mm	Width of the second layer d_2 / mm	Cladding layer width ratio $(d_2/d_1) / \%$
3	2	1.82	1.98	99.10
4	2	1.76	1.97	98.80
5	2	1.73	1.97	98.65
6	2	1.69	1.96	98.45
7	2	1.64	1.96	98.20
8	2	1.62	1.96	98.10
9	2	1.58	1.95	97.90
10	2	1.50	1.95	97.50

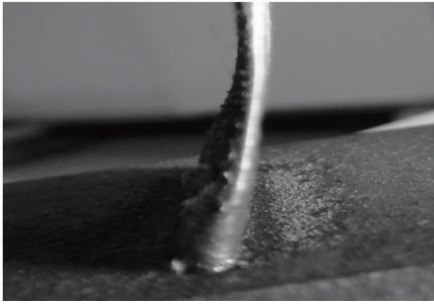


图 4 壁厚不均现象图

Fig. 4 Phenomenon of uneven thickness

根据表 2 中的数据可以拟合出未补偿前熔覆层宽度比 (d_2/d_1) 与斜率 a 的关系为线性函数:

$$d_2/d_1 = -0.2a + 99.65\% \quad (1)$$

为了补偿熔池的液态金属流失,熔池宽度 d_2 (光斑直径)与基体宽度 d_1 的关系应为

$$d_2/d_1 = 1/(-0.2a + 99.65\%) \quad (2)$$

根据文献[10]对所采用的光内同轴送粉喷头的建模转换分析可知,熔池宽度 d_2 (光斑直径)可以采用下式算出: $d_2 = 2 + 0.5z$ (z 为离焦量)。所以离焦量与基体宽度的关系式为

$$z = 2d_1/(-0.2a + 99.65\%) - 4 \quad (3)$$

对于确定的斜壁零件,其基体宽度和斜率是已知的,根据(3)式即可得到每一层的离焦量变化值,并将其代入控制程序即可堆积出均匀壁厚的变径体。

4 典型零件的堆积

4.1 母线为 R16 圆弧(回转体 a)变径回转体堆积试验方案

如图 5 所示,首先堆积 20 层直径为 50 mm 的圆环,所采用的成形工艺每层堆积层高为 0.75 mm,

形成高度约为 15 mm 的基体圆柱,过程中离焦量不变,每层光头 z 轴增量等于层厚 0.75 mm。第 21 层开始进入母线为 $R = 16$ mm 的一段圆弧的变径回转体,到第 30 层停止。

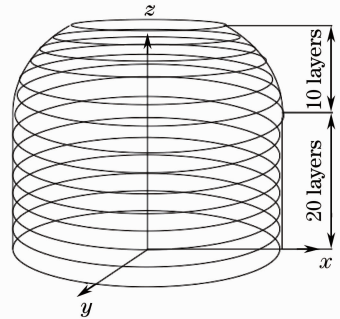


图 5 堆积过程图

Fig. 5 Accumulation process diagram

如图 6 所示,取半径 $R = 16$ mm 的圆 $0^\circ \sim 68^\circ$ 之间的圆弧作为母线,基体宽度始终为 2 mm,根据勾股定理可以得出第 n ($n > 20$) 层斜率为

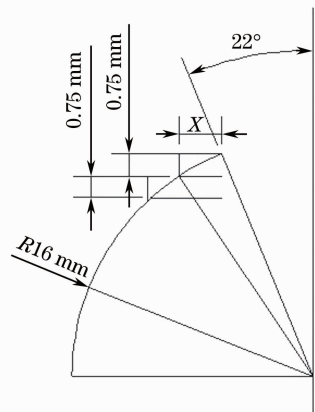


图 6 母线为 R16 的变径回转体斜度计算原理图

Fig. 6 Slope calculation schematic of the R16 bus bar adjustable rotary solid

$$a_n = (\sqrt{16^2 - [a75(n-21)]^2} - \sqrt{16^2 - [a75(n-20)]^2})/2, \quad (4)$$

结合(2)、(3)式,可计算出第 21~30 层堆积过程中每层的离焦量,将离焦量变化公式代入控制程序,最终堆积出外形较好、壁厚均匀的成形件,如图 7 所示。



图 7 母线为 R16 的成形件 a

Fig. 7 Molded part a of the R16 bus bar

采用变离焦量法继续堆积了母线为 R50 及 $x^2=6y$ 的变径回转体,如图 8、图 9 所示。在激光熔覆成形中,表面粗糙度是衡量成形质量的首要标准。测得成形件的表面粗糙度分别为 $R_a=6.3 \mu\text{m}$, $R_b=12.5 \mu\text{m}$, $R_c=6.3 \mu\text{m}$,而且壁厚很均匀,等同于半精加工表面,成形质量较好。



图 8 母线为 R50 的回转体 b

Fig. 8 Molded part b of the R50 bus bar



图 9 母线为 $x^2=6y$ 的回转体 c

Fig. 9 Molded part c of the $x^2=6y$ bus bar

4.2 送粉量的调节(回转体 a)

堆积过程中,增大了熔池宽度,为了保持熔道高

度不变,所需的送粉量亦要逐步增大,调节图如图 10 所示。分为两个阶段:堆积圆柱时(1~20 层),送粉量不变;第 21 层开始堆积圆弧时,离焦量开始增大,熔道宽度随之增大,为了保持熔覆层层高,送粉量也应随之增大,到第 30 层时送粉量变为 8.6 g/min。

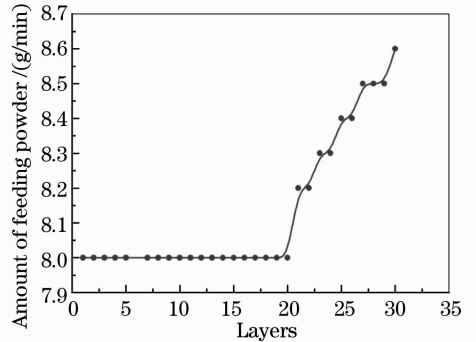


图 10 送粉量调节图

Fig. 10 Adjustment of powder feeding amount

4.3 功率的调节(回转体 a)

功率的调节(如图 11 所示)分为两个阶段:堆积圆柱时功率应逐渐减小,这是由于散热方式由三维变为二维,基体残余热量比较高,功率应逐步降低;在堆积圆弧母线回转体过程中,从第 21 层开始,随着层数增加,斜率和离焦量逐渐增大,熔池宽度变宽,所需要的能量逐渐增多,应逐步调高功率,直至第 30 层时达到 2750 W。

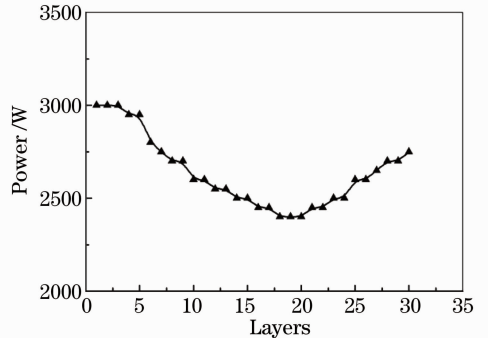


图 11 功率调节图

Fig. 11 Power adjustment

5 成形件性能分析

5.1 变径体截面壁厚分析

用线切割沿回转轴线切开三个变径体,其截面形貌如图 12 所示,从底部开始每隔相同的距离测量变径体的壁厚,绘出曲线如图 13~15 所示。堆积变径体 c 时,从高度 35 mm 处开始变离焦量补偿熔道损失,一直到高度 45 mm 处,壁厚变化区间为 0.2 mm,说明采用离焦技术实现均匀壁厚变径体堆

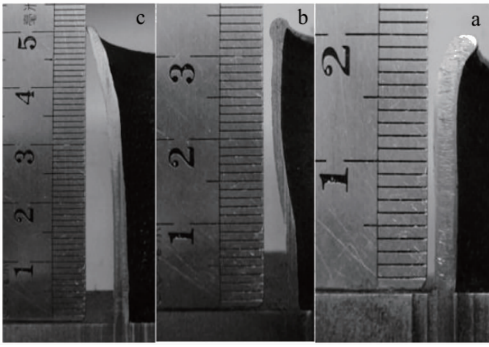


图 12 变径体截面图

Fig. 12 Section of variable diameter solid

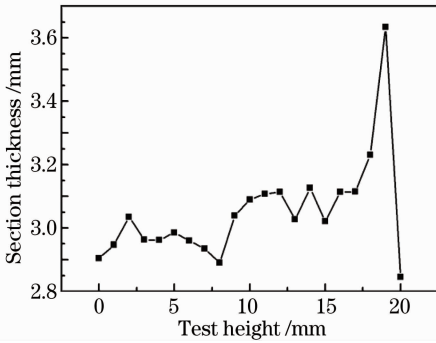


图 13 回转体 a 截面壁厚

Fig. 13 Thickness of the molded part a

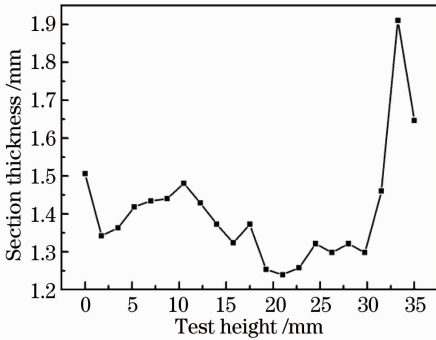


图 14 回转体 b 截面壁厚

Fig. 14 Thickness of the molded part b

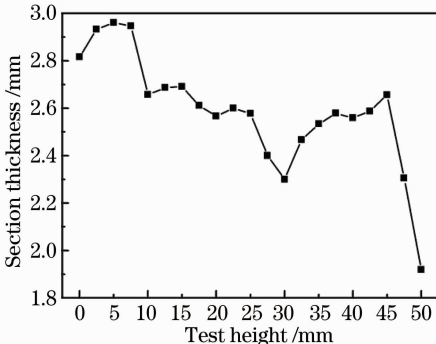


图 15 回转体 c 截面壁厚

Fig. 15 Thickness of the molded part c

积是可行的,精度较高。高度为 45~50 mm 时,壁厚从 2.65 mm 逐渐减小至 1.9 mm,堆积高度的逐渐增加和变径曲率的存在使逐层的偏移量越来越大,为了保持熔池的流动及连续性,熔道宽度的增加是有限的,从而成形件的壁厚越来越薄,说明变离焦补偿熔道适用于一定的曲率范围。变径体 a、b 的情况与 c 类似。

5.2 微观组织分析

成形件 b 底部微观组织如图 16 所示,底部熔覆层与基体在结合界面处发生了一个清晰的组织转变,形成了一层薄薄的平面晶过渡组织,因为初始熔池与基体之间的温度梯度很大,液相不存在成分过冷,所以初始结晶只能以平面形式进行。成形件靠近基体部分的散热速度和过冷度都较大,结晶的形核率高^[11],从而底部组织是沿温度梯度方向生长的致密的胞状树枝晶和部分胞状晶。

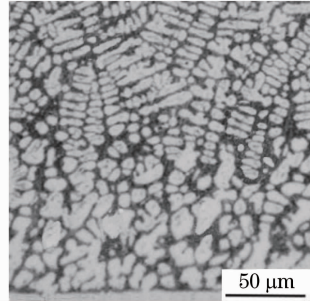


图 16 成形件 b 底部结合区金相组织

Fig. 16 Microstructure of the bottom binding region on the molded part b

成形件 b 曲率最大部分的组织如图 17 所示,该组织为层间结合部组织,结构为方向性不明显的短小枝晶和马氏体-奥氏体(M-A)组元。随着堆积过程的进行,激光对熔道的循环加热,使变径体的散热方向由三维散热变为二维散热,且堆积体的温升较大,温度梯度逐渐减小,结晶沿温度梯度方向生长的趋势逐渐减弱,从而形成了岛状的 M-A 组元和部

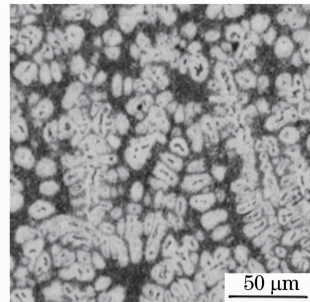


图 17 成形件 b 曲率最大部分金相组织

Fig. 17 Microstructure of the maximum curvature region on the molded part b

分短小枝晶^[12]。成形件 a、c 的金相组织及形成机理与 b 的分析类似。

纵观底部结合区和曲率最大部分的金相组织，可以看出成形件的组织整体过渡均匀，组织相对细小，未出现裂纹、气孔等缺陷，具有良好的激光熔覆成形质量。

5.3 硬度分析

对三个成形件的纵向方向测定了维氏硬度，从基底往上测两层，每隔 0.2 mm 测试一点，所得硬度分布如图 18 所示。

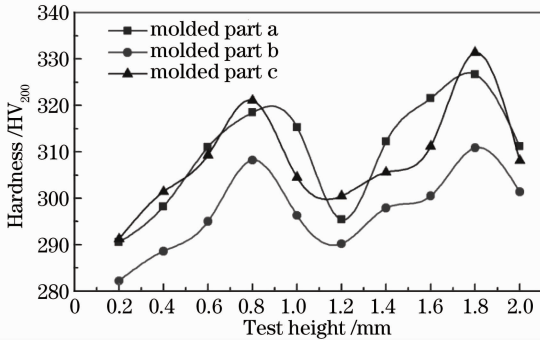


图 18 成形件前两层硬度分布图

Fig. 18 Hardness distribution on the first two layers of the molded parts

由图 18 可知，三个成形件的硬度分布趋势相同，距离基体 0~1.1 mm 为第一层熔道，基体的温度相对较低，熔道与基体之间的温度梯度最大。熔道底部垂直于结合界面生长出粗大的树枝晶，熔道内部散热没有明显的方向性，生成相对细小致密的交叉树枝晶，顶部主要生长细小的胞状晶，硬度应逐渐升高^[13]，但熔覆第二层熔道使第一层熔道变成了两个区域，即重熔区和回火区，第二道熔覆使第一道表面发生了部分重熔，并与第二层熔道冶金结合，热量通过热传导使第一层熔道部分发生了回火，使其硬度从回火区到重熔区逐渐降低。从结合区开始，第二层的晶粒重复第一道的生长过程，硬度先增加再减小^[14]。之后的熔覆层均重复上述过程。

三个成形件试样顶部的显微硬度值如图 19 所示。由图 19 可知，顶层硬度值越接近表面硬度越高。这是由于越接近表层，熔池与空气间的温度梯度越大^[15]，导致凝固后晶粒细密，排列整齐，成形件上表面的硬度值达到最大。三个成形件的堆积高度相差较大，虽然在功率上已经做了控制，但采用的是温度开环控制系统，堆积成形件高层时的温差相差较大，导致成形件 c 的晶粒相对 b、a 的粗大，形成零件顶部的整体硬度差别。

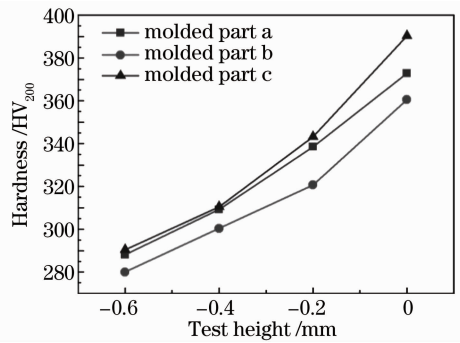


图 19 回转体顶层硬度分布图

Fig. 19 Hardness distribution on the top layer of the molded parts

综合来看，变离焦法堆积的三个成形件的硬度分布趋势类似，总体相差不大，较为均匀。

6 结 论

1) 在光内送粉的基础上，采用离焦技术建立了变径体堆积的壁厚补偿模型，并堆积出三个典型的变径体，其表面质量良好，壁厚分析表明斜壁部分壁厚变化范围为 0.2 mm，补偿精度较高，说明熔道补偿是可以实现的。但当曲率超过一定范围时，为了保持熔池的流动性，熔道宽度增加范围有限，此时补偿效果不佳，需进一步研究。

2) 堆积过程中，随着堆积高度的增加，需逐渐降低激光功率，保持熔池稳定性，提高成形质量。堆积曲率较大部分时，需加大送粉量，以保持熔宽增加时熔道的高度。

3) 成形件的总体硬度相对基体较高且分布均匀，硬度峰值出现在近表层的细晶区，最低硬度则出现在层间重熔区的粗晶区。成形件底部组织主要为胞状树枝晶和部分胞状晶，中部组织为方向性不明显的枝晶和 M-A 组元。

参 考 文 献

- Li Peng. Research on Laser Direct Manufacturing Technology Based on Laser Cladding Three-Dimensional Metal Parts [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. 50~70
李 鹏. 基于激光熔覆的三维金属零件激光直接制造技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005. 50~70
- Shao Qiwen. Study on the Technology of Inside-Laser Coaxial Powder Feeding Cladding and Rapid Prototyping Process of Laser [D]. Suzhou: Soochow University, 2008. 12~33
邵其文. 基于光内送粉的激光熔覆快速成形技术研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2008. 12~33
- Li Hongyuan, Shi Shihong, Fu Geyan *et al.*. Control of process parameters of reducing solid of revolution with coaxial inside-beam powder feeding accumulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, 38(8): 0803012

- 李洪远, 石世宏, 傅戈雁 等. 光内送粉激光熔覆堆积变径回转体工艺参数的控制[J]. 中国激光, 2011, **38**(8): 0803012
- 4 Huang Xiaowei, Xi Juntong, J. L. Lebrun *et al.*. Influences of processing parameters on geometric characterizations of laser cladding forming 316L stainless steel[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(7): 071404
- 黄小伟, 刁俊通, J. L. Lebrun 等. 工艺参数对激光熔覆成形 316L 不锈钢形状的影响规律[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(7): 071404
- 5 Chen Jing, Tan Hua, Yang Haiou *et al.*. Research on the molten pool behavior in the process of laser rapid forming through *in situ* observation technique[J]. *Applied Laser*, 2005, **25**(2): 77~80
- 陈 静, 谭 华, 杨海鸥 等. 激光快速成形过程熔池行为的实时观察研究[J]. 应用激光, 2005, **25**(2): 77~80
- 6 Guo Huiru. Laser Cladding Forming of the Simulated Thin-Walled Casing with Variable Parameters [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. 31~53
- 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. 31~53
- 7 Yu Lingling, Shi Shihong, Di Keyun. Research on the laser cladding inclined wall accumulation based on the internal laser coaxial-powder feeding technology[J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(3): 264~266
- 郁玲玲, 石世宏, 狄科云. 基于光内同轴送粉技术的激光熔覆斜壁堆积成形研究[J]. 激光与红外, 2009, **39**(3): 264~266
- 8 Peng Shanfei. The Influence of Inside-Laser Coaxial Powder Feeding Technology Parameter on Forming under the Action of Annular Facula[D]. Suzhou: Soochow University, 2008. 30~60
- 彭善飞. 环形激光作用下同轴送粉熔覆工艺参数对成形的影响[D]. 苏州: 苏州大学, 2008. 30~60
- 9 Cui Hongwu. Study on the Coupling of Laser Beam and Powder and High-Level Accumulate Technology Based on Inside-Laser Coaxial Powder Feeding [D]. Suzhou: Soochow University, 2009. 20~35
- 崔洪武. 基于光内同轴送粉光粉耦合及高层成型技术的研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2009. 20~35
- 10 Li Chunsheng. Modeling for Transmission and Conversion of Hollow Circular Laser and Analysis on Coupling between Laser and Materials in Three-Dimensional Laser Manufacturing [D]. Suzhou: Soochow University, 2010. 44~52
- 李春生. 三维成形中空环形激光传输转换建模及光料耦合分析 [D]. 苏州: 苏州大学, 2010. 44~52
- 11 Wang Yanfang, Li Li, Lu Qinglong *et al.*. Laser cladding Fe-based amorphous coatings on stainless substrate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603017
- 王彦芳, 栗 荔, 鲁青龙 等. 不锈钢表面激光熔覆铁基非晶涂层研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(6): 0603017
- 12 Yao Biao, Wang Cunshan, Wang Rui *et al.*. Influence of scanning velocity on microstructure and properties of laser clad NiAlBSi high-temperature alloy coatings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1003001
- 姚 标, 王存山, 王 锐 等. 扫描速度对激光熔覆 NiAlBSi 高温合金涂层组织和性能的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(10): 1003001
- 13 Andrew J. Pinkerton, Lin Li. The significance of deposition point standoff variations in multiple-layer coaxial laser cladding (coaxial cladding standoff effects)[J]. *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, 2004, **44**(6): 573~584
- 14 Li Sheng, Zeng Xiaoyan, Hu Qianwu. Influence of multilayer cladding on microstructure and hardness of laser-clad layers[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2007, **32**(7): 44~47
- 李 胜, 曾晓雁, 胡乾午. 多层熔覆对激光熔覆层微观组织和硬度的影响[J]. 金属热处理, 2007, **32**(7): 44~47
- 15 Cai Qifei. Study on the Laser Rapid Prototype Revolved Body Accumulate Based on Inside-Laser Coaxial Powder Feeding [D]. Suzhou: Soochow University, 2010. 33~65
- 蔡齐飞. 激光快速成型光内送粉回转体堆积研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2010. 33~65