

# 中空环形激光离焦量对熔道凹凸缺陷自愈合效应的影响

杨 轶 石世宏 傅戈雁 史建军 孟伟栋 王 涛

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

**摘要** “形貌自愈合效应”是激光金属直接成形过程中可能出现的一个重要现象,在堆积过程中依靠自身工艺参数的调整,可以控制多层堆积的熔道从堆积表面可能出现的凹凸不平状态重新恢复到平整状态。在“中空激光、光内送粉”新工艺的方法下,通过调整环形激光离焦量能产生明显的熔道凹凸缺陷的自愈合效应。对激光离焦量与单层堆积厚度影响规律进行了理论分析,获得激光离焦量与单层熔覆高度的关系曲线,并在具有“栅栏凸起”的304不锈钢基板上堆积多组薄壁墙试样进行试验验证,同时利用游标卡尺、扫描电镜及显微硬度计对愈合完好的薄壁墙的宽度、微观组织及显微硬度进行了分析。结果表明,不同的激光离焦量对其形貌自愈合能力影响显著,当离焦量为0~3 mm时,薄壁墙形貌原有的起伏不平“自愈合现象”并不会出现;当离焦量为-3 mm~-5 mm时,薄壁墙形貌的起伏不平随层数增加被逐渐修复,若干层后表面光滑平整,“自愈合现象”得到验证;通过自愈合修复的薄壁墙,宽度变化很小,与基体冶金结合良好,组织致密均匀,从墙顶至基体硬度值呈缓慢下降趋势。

**关键词** 激光技术;激光立体成形;中空光内送粉;自愈合效应;环形激光离焦量

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0503002

## Impact of Hollow Ring Laser Defocused Amount on Melting Channel Bump Defect Self Healing Effect

Yang Shi Shi Shihong Fu Geyan Shi Jianjun Meng Weidong Wang Tao

School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

**Abstract** “Morphology self healing effect” is an important phenomenon that may happen in the direct laser melt forming process, which can adjust the process parameters of itself and control the multi-level melting channel accumulation surface from a bump unstable state to a stable state in the process of accumulation. By adopting the new process of “hollow laser, internal laser powder feeding”, adjusting the ring laser defocused amount can effectively result in self healing effect of melting channel bump defect. The impact of laser defocused amount on monolayer thickness accumulation is theoretically analyzed and resulted in a curved diagram between laser defocused amount and monolayer thickness accumulation and it has been tested as accumulate multiple thin wall samples in 304 stainless steel substrate with “fence bulge”. At the same time, the thin wall width, microstructure and thickness have been analyzed by vernier caliper, scanning electron microscope and micro hardness instrument. The study has shown that there is a significant impact of different laser defocused amounts on the self healing capabilities. When the defocused amount is 0~3 mm, the surface topography of the thin wall is undulating, and “the self healing phenomenon” has not been shown. While the defocused amount is -3 mm~-5 mm, the thin wall undulating surface will become smooth gradually in several levels, and the “self healing phenomenon” has been verified. The thin wall by self healing repair combines well with the substrate metallurgy and the width slightly changing. The structure is dense and uniform, and the hardness value from the wall top to the substrate increases slowly.

收稿日期: 2014-11-04; 收到修改稿日期: 2014-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(61475107, 11172191)

作者简介: 杨 轶(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光快速成形方面的研究。E-mail: 284339063@qq.com

导师简介: 石世宏(1956—),男,博士,教授,主要从事激光快速成形方面的研究。E-mail: shishihong@suda.edu.cn(通信联系人)

**Key words** laser technique; laser solid forming; internal laser powder feeding; self healing effect; ring laser defocused amount

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 000.2170

## 1 引 言

激光立体成形技术能够实现高性能复杂结构金属零件的无模具、快速、全致密近净成形,因此激光熔覆制造和修复技术在航空航天、冶金、矿山、机械制造等行业中发展很快<sup>[1-3]</sup>。在熔覆堆积成形的过程中,工艺控制是一个非常重要的方面,通常在最初的几层材料堆积过程中,成形表面可能会出现波动现象,若不能得到控制,若干层堆积后表面将会出现凹凸不平,严重影响成形质量,甚至使堆积成形过程无法继续进行<sup>[4-9]</sup>。黄卫东等<sup>[10]</sup>首先提出形貌自愈合概念并从抬升量与堆积厚度方面解释了形貌自愈合现象,宁国庆等<sup>[11]</sup>通过对系统中送粉量实现闭环控制来消除凹凸不平现象,Bi等<sup>[12]</sup>采用基于路径的闭环功率控制等不同方法提高了薄壁零件的成形精度。

中空激光光内同轴送粉是一种新的激光熔覆和成形工艺技术<sup>[13-16]</sup>。其特有的中空环形激光沿扫描线宽方向的能量分布呈“马鞍形”,能消除传统的能量分布呈“高斯形”的圆形光斑所引起的熔道中心热积聚效应和边缘熔不透现象,有利于形成表面平整的熔覆层<sup>[17]</sup>,使堆积件侧面粗糙度大大降低,显著提高其中光内送粉的熔池粉末捕获率,这些在本课题组发表的文献中已有介绍<sup>[18-19]</sup>。同时,在该新工艺方法下,环形激光离焦量的调节能产生明显的熔道凹凸缺陷的自愈合效应。本文通过试验,定量分析不同的激光离焦量下单道堆积厚度,建立并验证自愈合理论模型,确定能够产生自愈合效应的激光离焦量区间,以解决成形过程中可能出现的表面凹凸不平的问题。

## 2 试验条件

### 2.1 试验材料及设备

试验用基体材料为304不锈钢,尺寸为150 mm×100 mm×10 mm,熔覆粉末是粒度为-140/+200目(75~106 μm)的Fe313合金粉末,化学成分如表1所示。试验前基体材料表面预先用砂纸打磨,酒精去除油污后再用丙酮清洗,粉末在200 ℃的烘箱内放置2 h以去除水分。试验设备有IPG YLS-2000-TR高功率光纤激光器系统、KUKA机器人系统、GTV PF 2/2M型送粉器、中空环形激光光内送粉熔覆光头(图1)。光内送粉熔覆光头为单粉管送粉,喷粉管在环形光束中心,与聚焦光束同轴,保护准直气帘紧紧包围粉束,光、粉、气一体同轴垂直于加工表面出射,在离粉嘴12 mm(粉嘴到加工件表面的距离)的试验范围内粉束挺直,发散很小,粉束直径约2 mm,如图2所示,具体试验系统如图3。另外还包括保护气制备系统便携数控(NC)编程器以及其他辅助设备。检测设备包括S-4700冷场发射扫描电镜和MH-5显微硬度计。

表1 Fe313合金粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Fe313 alloy powder (mass fraction, %)

Element	C	Si	Cr	B	Fe
Content	0.1	2.5~3.5	13.0~17.0	0.5~1.5	Bal.

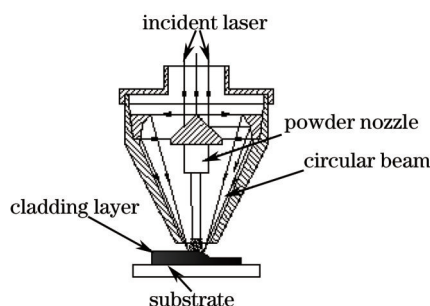


图1 中空环形激光熔覆光头原理图

Fig.1 Schematic diagram of circular laser beam cladding head

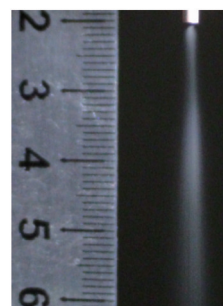


图2 粉末汇聚效果图

Fig.2 Powder gathering rendering

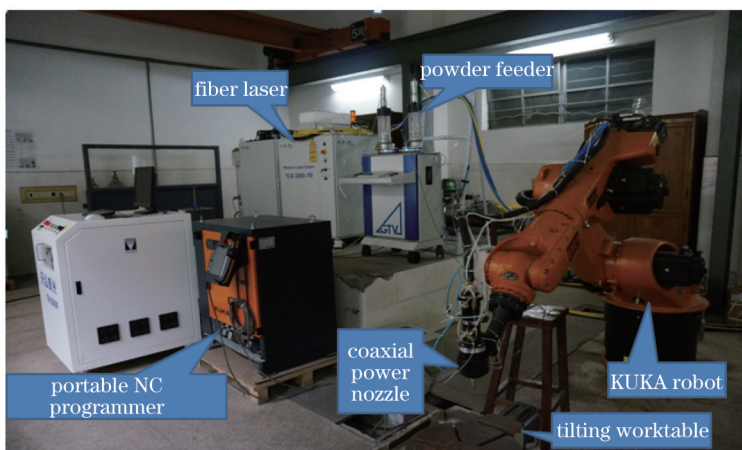


图3 试验系统图

Fig.3 Experimental system diagram

### 2.2 不同离焦量下的单层堆高

经多组正交试验得到优化的基本工艺参数如表2所示。分别取激光离焦量 $z$ 为0、-0.5、-1、-1.5、-2、-2.5、-3、-3.5、-4、-4.5、-5 mm进行单道熔覆试验,每种离焦量重复试验3次,成形轨迹长度为80 mm,每条单道均匀采集4个点,用百分表测量不同离焦量下单层堆积厚度,建立不同离焦量及单层厚度的曲线关系如图4所示。

表2 加工工艺参数

Table 2 Processing parameters

Laser Power /W	Scanning speeds /(mm/s)	Powder feeding rate /(g/min)	Carrier gas flow /(L/min)
600	5	8	3

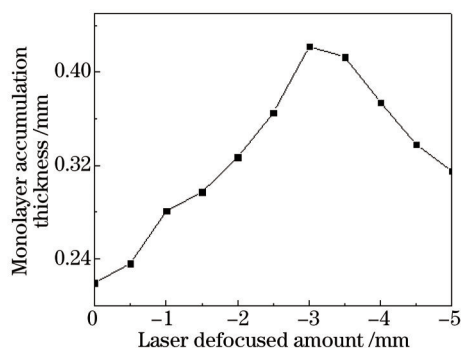


图4 不同离焦量下的单层堆积厚度曲线图

Fig.4 Graph of single layer accumulation thickness

### 2.3 自愈合试验设计

为了验证不同激光离焦量对起伏不平的熔覆层的自愈合效果,沿基板 $x$ 方向熔覆堆积3道凸起的栅栏状薄壁墙,高度2 mm,间距10 mm,如图5所示,即人为预置出凹凸不平的堆积基础面。



图5 预置的凸起薄壁墙

Fig.5 Preset bumped thin wall

采用表2中优化的工艺参数,选6种不同的激光离焦量,分别为0、-1、-2、-3、-4、-5 mm,沿基板 $y$ 方向(与凸起垂直方向)堆积起相应6组薄壁墙,熔覆层数均为20层。

## 3 实验结果与分析

由图4反映的规律可知,当激光处于焦点处时,激光熔池最小,直径约1 mm,此时单层堆积厚度最低。

随着激光负离焦量不断增大,环形光斑直径也逐渐增大,熔池变大,进入熔池的粉末增多,单层堆积厚度随之增高。当离焦量达-3 mm左右时,激光功率密度、环形光斑占空比及粉斑大小达到最佳耦合,此时单层堆积厚度最高。随着激光负离焦量进一步增大,光斑直径逐渐大于2 mm的粉斑直径,熔池面积逐渐扩大,但进入熔池的粉量已不能随之增加,故单层堆积厚度将会逐渐降低。离焦量达到-5 mm时的表面还是比较平整,但随着激光离焦量继续增大,环形激光占空比增大,中空度加大,此时会出现熔道两侧能量继续加大,因熔池张力的原因使熔体向两侧流动,最终会形成熔道截面上中间凹陷、两边微凸的单道形貌,如图6所示为激光离焦量为-6 mm时的单熔道图及截面轮廓图。



图6 激光离焦量为-6 mm时的(a)熔覆单道图及(b)截面轮廓图

Fig.6 (a) Cladding single channel and (b) section outline with laser defocused amount of -6 mm

定义图4所示曲线中离焦量为-3 mm至-5 mm的下降部分为“激光负离焦量自愈合效应区间”,自愈合效应原理图如图7所示,可见单管送粉的粉末被紧紧包围在环形保护准直气帘中,粉末细、挺、直,与中空光束的耦合区间长,但在离开焦深的正负离焦区段,环形光斑会逐渐增大。根据图4,当熔覆表面出现起伏不平时,调整激光离焦量在曲线下降区间(-3~5 mm),控制加工表面的激光离焦量在-4 mm处,这样在凹陷处激光负离焦量减小到-3 mm,此处为最佳耦合点,单道熔覆厚度随之增大,凹陷处被填起;而凸起处的激光负离焦量增大到-5 mm,在此处光斑面积增大,单道熔覆厚度减小,凸起处厚度增加很小。这样多层堆积之后,凹凸现象逐渐消除,薄壁墙表面逐渐趋于平稳。但是,若熔覆表面起伏不平时激光离焦量处在图4曲线的层厚上升区间(0~-3 mm),这样堆积与上述正好相反,凹陷处激光离焦量更小,熔覆厚度越来越小,而凸起处激光离焦量变大,熔覆厚度越来越大,多层堆积以后,将会使凹处越凹,凸处越凸。

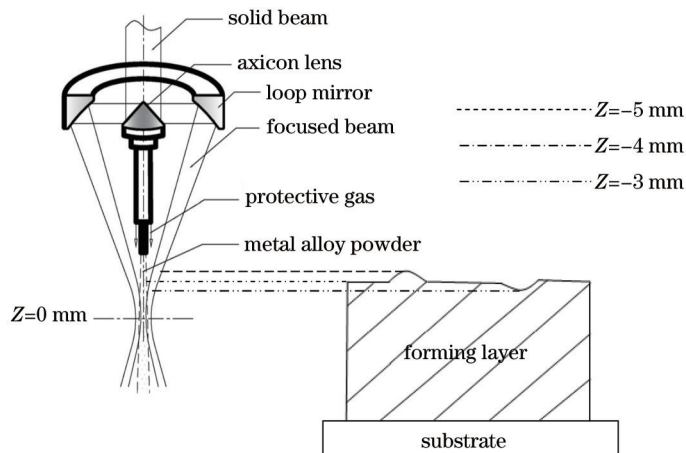


图7 自愈合效应原理图

Fig.7 Schematic diagram of self-healing effect

图8所示为不同离焦量下熔覆堆积5层的效果形貌图。图8(a)为激光离焦量为-2 mm时,随着堆积层数n不断增加,形貌凹凸不平愈发明显,愈合现象并没出现;图8(b)为激光离焦量为-4 mm时,随着堆积层数不断增加,形貌出现了逐渐平稳的趋势。此试验也正好符合图4曲线的趋势。

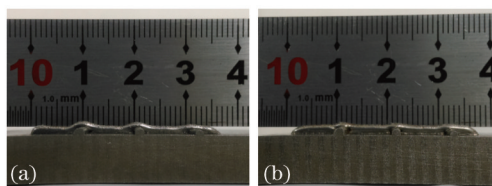


图8 不同离焦量下堆积形貌图。(a)  $Z=-2$  mm; (b)  $Z=-4$  mm

Fig.8 Micrograph of different defocus accumulations. (a)  $Z=-2$  mm; (b)  $Z=-4$  mm

在不同离焦量下沿  $y$  方向熔覆 20 层后的形貌如图 9 所示。当激光离焦量为 0 时,表面严重变形,有粉末黏粘,且在交叉处出现“开裂”缺陷;当控制激光离焦量为  $-1\text{ mm}$ 、 $-2\text{ mm}$  处时,多层堆积之后,凹凸缺陷仍然存在,当离焦量控制在  $-3\text{ mm}$  之后,随着激光负离焦量不断增大,薄壁墙表面形貌逐渐改善,当激光离焦量为  $-4\text{ mm}$  和  $-5\text{ mm}$  时,多层堆积之后,表面光滑平整,凹凸现象自动愈合。

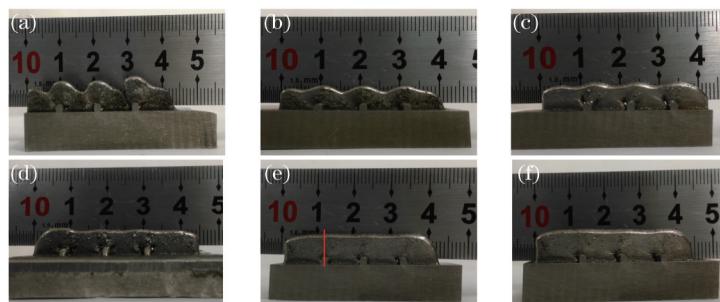


图 9 不同离焦量下堆积形貌图

Fig.9 Accumulation morphology under different defocused amounts

取形貌愈合的堆积墙,在交叉处沿垂直于激光扫描方向的横截面切取试样,镶样并打磨抛光,用扫描电镜(SEM)观察其整体轮廓及内部组织。图 10 为图 9 中  $z=-4\text{ mm}$  试样沿直线切取的截面图,薄壁墙微观组织结构如图 11 所示。图 11(a)中熔合界限向基体内部弯曲,熔覆层与基底间形成了良好的冶金结合;图 11(b)和(c)分别为结合区与顶部的组织形貌,可以看出,堆积层内部组织致密均匀,具有明显的垂直于界面的枝晶生长特征。

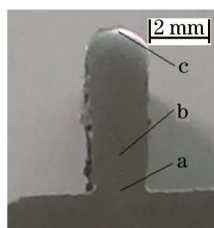


图 10 自愈合横截面宏观结构

Fig.10 Macrostructure of cross section fabricated by self-healing method

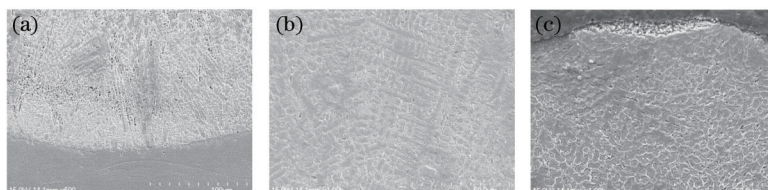


图 11 堆积层 SEM 显微组织形貌。(a) 熔合界限;(b) 结合区;(c) 顶部

Fig.11 SEM micrograph showing microstructure of accumulation layer. (a) Melting line; (b) accumulation zone; (c) layer top

图 12 为堆积层表面至基底方向的显微硬度曲线,由图可以看出从薄壁墙顶部至基体硬度呈下降趋势,硬度分布均匀,变化较为平稳。

图 13 为薄壁墙基底至顶层方向的壁宽变化曲线,由图可以看出,随着熔覆层数的增加,薄壁墙宽度有微小的增大,这是由于每层堆积时的单层厚度与提升量的细小误差造成的,但整体墙面的宽度还是变化不大。

## 4 结 论

1) 中空环形激光光内送粉熔覆工艺具有单粉束汇聚性好,光粉耦合区间长等特性。在本试验条件下发现:加工成形基面始终处于聚焦光束负离焦的区段内,当激光离焦量为  $0\sim-3\text{ mm}$  时,单层堆积厚度随着激光负离焦量的增大而增加;当激光离焦量为  $-3\sim-5\text{ mm}$  时,单层堆积厚度随激光负离焦量的增大而减小。

2) 依据以上特征,在不同的激光负离焦量下对预置了多道平行凸起熔道的基板进行多层交叉堆积,发现:在离焦量为  $-3\sim-5\text{ mm}$  的区段内,随着堆积层数增加,预置的凸起逐渐平整,特别是激光离焦量在  $-4\text{ mm}$ 、

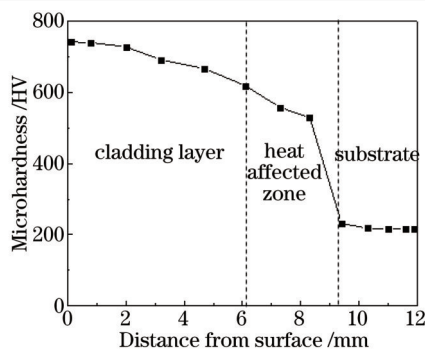


图 12 薄壁墙沿层深方向的显微硬度曲线

Fig.12 Microhardness profile along laser-cladding coating depth direction

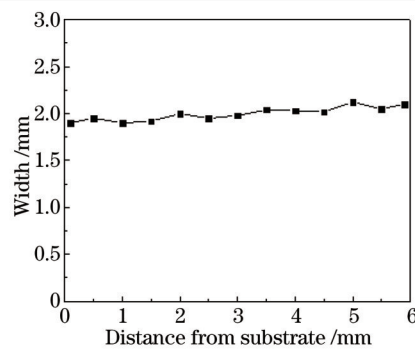


图 13 薄壁墙基底至顶层方向的壁厚变化曲线

Fig.13 Width curve from thin wall base to top

-5 mm 的位置多层堆积之后,其熔道表面更加光滑平整,凹凸现象自动愈合,即在此区间内能使熔覆表面凹处填起,凸处变平,证明了自愈合效应的存在。

3) 通过自修复表面得到改善的堆积层,宽度变化很小;组织相对均匀、致密;硬度从顶部至基底呈平稳下降趋势。

### 参 考 文 献

- Hu Xiaodong, Yu Chengsong, Yao Jianhua. Review of laser cladding in molten pool temperature measurement and control system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(12): 120003.  
胡晓冬, 于成松, 姚建华. 激光熔覆熔池温度监测与控制系统的研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 120003.
- Wang Xuyue, Wang Yanfei, Jiang Hao, et al.. Laser cladding forming of round thin-walled parts with slope angle[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0103006.  
王续跃, 王彦飞, 江 豪, 等. 圆形倾斜薄壁件的激光熔覆成形[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0103006.
- Liu Hao, Yu Gang, He Xiuli, et al.. Three-dimensional numerical simulation of transient temperature field and coating geometry in powder feeding laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2013,40(12): 1203007.  
刘 昊, 虞 刚, 何秀丽, 等. 送粉式激光熔覆中瞬态温度场与几何形貌的三维数值模拟[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1203007.
- Weng F, Chen C Z, Yu H J. Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review[J]. Mater Design, 2014, 58: 412-425.
- Kusinski J, Kac S, Kopia A, et al.. Laser modification of the materials surface layer—a review paper[J]. Bull Pol Acad Sci-Tech Sci, 2012, 60(4): 711-728.
- Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 296-301.  
朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 296-301.
- Yang Xichen, Li Huishan, Wang Yunshan, et al.. Laser refabricating technology for repairing expensive and important equipments[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2003, 40(10): 53-57.  
杨洗陈, 李会山, 王云山, 等. 用于重大装备修复的激光再制造技术[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(10): 53-57.
- Yang Xichen. Laser processing robot and its industrial applications[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2780-2798.  
杨洗陈. 激光加工机器人技术及工业应用[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2780-2798.
- Paul C P, Mishra S K, Kumar A, et al.. Laser rapid manufacturing on vertical surfaces: Analytical and experimental studies[J]. Surf Coat Tech, 2013, 224: 18-28.
- Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing, et al.. Laser Solid Forming—Fast Free Forming of High Performance Dense Metal Parts[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 11.  
黄卫东, 林 鑫, 陈 静, 等. 激光立体成形—高性能致密金属零件的快速自由成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 11.
- Ning Guoqing, Zhong Minlin, Yang Lin, et al.. Research about close-loop control system during laser direct manufacturing metallic components[J]. Applied Laser, 2002, 22(2): 172-176.  
宁国庆, 钟敏霖, 杨 林, 等. 激光直接制造金属零件过程的闭环控制研究[J]. 应用激光, 2002, 22(2): 172-176.
- Bi G J, Gasser A, Wissenbach K, et al.. Characterization of the process control for the direct laser metallic powder deposition[J]. Surf

- Coat Tech, 2006, 201(6): 2676-2683.
- 13 Shi Shihong, Fu Geya, Wang Anjun,etal. Laser Processing, Prototyping and Manufacturing and Inside-beam Powder Feeding Process and Nozzel[P]. Chinese Patent: CN200610116413.1, 2006.  
石世宏, 傅戈雁, 王安军, 等. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头[P]. 中国专利, CN200610116413.1, 2006.
- 14 Shi Shihong, Fu Geyan, Li Long, *et al.*. Realization and research of laser cladding with method of internal wire feeding through a hollow laser beam[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 266-270.  
石世宏, 傅戈雁, 李 龙, 等. 中空激光光内同轴送丝熔覆工艺的实现及其试验研究[J].中国激光, 2010, 37(1): 266-270.
- 15 Zhu Ping, Shi Shihong, Fu Geyan. A Knid of Inside-Beam Coaxial Powder Feeding Cladding Nozzel[P]. Utility Model Patent: CN202898544U, 2013.04.  
朱 萍, 石世宏, 傅戈雁. 一种光内同轴送粉激光熔覆喷嘴[P]. 中国: 专利 202898544U, 2013.04.
- 16 Shi Shihong, Wu Mingjun, Fu Geyan. A Kind of Hollow Laser Inside-Beam Coaxial Powder Feeding Equipment[P]. Utility Model Patent: CN203625467U, 2014.06  
石世宏, 邬明君, 傅戈雁. 一种中空激光光内同轴送粉装置[P]. 中国: 专利 203625467U, 2014.06.
- 17 Tian Meiling. Temperature Field Simulation of Multi-Channel and Multi-Layer Stacking and Research of Solid Parts Forming Process Based on Coaxial Inside-beam Powder Feeding[D]. Suzhou: Soochow University, 2014: 15-17.  
田美玲. 光内送粉多道搭接多层堆积实体成形及温度场模拟研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2014: 15-17.
- 18 Xiao Junyan. The Characteristics of Molten Pool and Cladding Layer Inside the Ring Laser Beam[D]. Suzhou: Soochow University, 2009: 3-8.  
肖军艳. 环形激光光内送粉熔池特征与熔层性能[D]. 苏州: 苏州大学, 2009: 3-8.
- 19 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: 44-58.  
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: 44-58.

栏目编辑: 宋梅梅