

光内送粉激光熔覆堆积变径回转体工艺参数的控制

李洪远 石世宏 傅戈雁 王永康 蔡齐飞 王 晨 孙后顺

(苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021)

摘要 基于“光束中空,光内送粉”的专利技术,采用新型光内同轴送粉装置,在 45# 钢基体上进行变径回转体堆积。分别对变径回转体斜度、Z 轴增量及功率进行控制,并分析各自的影响;斜面堆积中倾斜角度与偏移量、扫描速度成正相关,与送粉速度和粉末利用率成负相关,极限倾斜角度与偏移量成正相关,与熔覆层高度成负相关;随着堆积的进行,粉末利用率降低,离焦量变大;在高层熔覆堆积过程中,熔池由三维散热变为二维散热,散热降低,熔池温度上升,应相应减小功率。得到的成型件外观光滑、粗糙度低、成型质量较高,为变截面的三维堆积试验提供参考。

关键词 激光技术;激光快速成型;光内同轴送粉;工艺参数

中图分类号 TN249; TF124 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0803012

Control of Process Parameters of Reducing Solid of Revolution with Coaxial Inside-Beam Powder Feeding Accumulation

Li Hongyuan Shi Shihong Fu Geyan Wang Yongkang Cai Qifei

Wang Chen Sun Houshun

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

Abstract Based on the patent technology of “hollow laser beam and internal powder feeding”, the accumulation experiments of the reducing solid of revolution are carried out on the substrate of 45# steel with a novel device of coaxial inside-beam powder feeding. In the experiment, we respectively control the axially symmetrical rake, Z axis incremental and power, and analyze their respective influence. The conclusions are as follows: In the inclined wall depositing process, the skew angle is in direct ratio to offset and scanning rate and is inversely proportional to powder delivery rate and powder utilization ratio. The limit skew angle is in direct ratio to the offset and is inversely proportional to the height of the cladding layer. With the cladding layers increasing, the utilization rate of the powder is reduced and the defocus distance becomes bigger. In the process of high-rise cladding accumulation, molten pool changes from 3D cooling into 2D heat dissipation and formed pool temperature arises, and so the power rate should be reduced correspondingly. The quality of molding parts that this experiment gets finally is higher with smooth appearance and lower roughness. It can provide reference to the test of the variable cross-section 3D accumulation.

Key words laser technique; laser rapid forming; coaxial inside-beam powder feeding; process parameters

OCIS codes 140.0140; 350.3850; 140.3390; 350.3390

1 引 言

激光熔覆快速成形是先进制造技术的一个重要研究方向^[1~5],激光熔覆能快速制造出较复杂的金属零件,在制备单件小批量金属零件时,能缩短时间,提高效率^[6~8]。但是由于设备及工艺的限制,要

顺利进行高精度的堆积一直是个较难解决的问题^[9]。

在激光熔覆堆积成型中,存在三方面问题:1)熔覆层的生长与光头的升高不同步,引起离焦量发生变化,离焦量的变化会导致光斑尺寸大小不同,最终

收稿日期: 2011-03-21; **收到修改稿日期**: 2011-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(10972150,61078019,50975187)和苏州市工业攻关项目(SG0923,SYG201036)资助课题。

作者简介: 李洪远(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光熔覆再制造方面的研究。E-mail: 5andyou@163.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。

E-mail: shishihong@suda.edu.cn(通信联系人)

造成粉末的熔凝不稳定;2)高层熔池温度过高现象,温度过高会使熔池凝固缓慢,造成熔覆层不稳定;3)在堆积斜面时,上下层的错位造成部分光粉会落在外面,由于熔池只能依靠张力存在,位错过大会造成熔池流淌,因此必须选取合适的斜度防止错位过大。这些问题制约了激光熔覆成型的发展^[10,11]。本文采用光内同轴送粉方式^[12],重点对堆积变径回转体中的斜率、层高、功率控制进行了研究和探索。通过对变径回转体斜度、Z轴增量及功率进行控制,分析了各因素的影响。

2 试验材料、设备与试验方法

2.1 试验材料及设备

试验采用GS-TFL-10 kW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,熔覆材料选用-140/+325目(45~109 μm)的F313合金粉。

2.2 试验方法

本试验利用中空环形激光进行三维堆积试验。图1为光内送粉激光熔覆的原理示意图,粉管在环形激光中间并相互同轴,粉末外围是环形保护气体,保护气体起保护激光反射镜和准直粉束的作用,环形保护气外围是同轴的环形激光。该方案充分实现了粉、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。光粉耦合处截面为光斑包围粉斑,由于粉嘴离熔池存在一定距离,粉束流会出现发散现象,如图1所示,在焦点位置处通过调整粉管到焦点的位置,使粉束直径接近光斑直径,此时粉末熔化充分,粉末和激光利用率都最高,很少有未熔粉末黏附在熔道两侧。当耦合处截面粉末直径过小于光斑直径时,参与熔覆作用的激光较少,会造成激光的利用率降低。因此对于光内送粉激光熔覆,必须合理控制加工位置处粉斑与光斑的大小。较之光外送粉,光内送粉方式可有效提高粉末利用率和熔覆层表面质量^[13,14]。

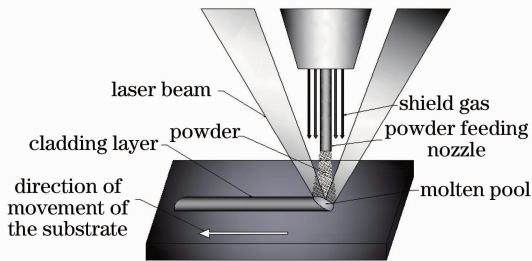


图1 光内送粉激光熔覆示意图

Fig.1 Schematic of direct laser deposition with coaxial inside-beam powder feeding

3 变径回转体斜度的控制及参数选取

为了方便研究,在不失有效性的前提下提出如下假设:熔覆层宽度等于光斑直径,堆积过程中熔覆层宽度和熔覆层厚度大小均不变。建立变径回转体斜面堆积模型如图2所示。由图2可见在斜面堆积中,上下层的错位会造成部分光粉落在外面,错位的熔池依靠张力存在,试验发现当偏移量过大时会出现熔覆层悬伸端产生塌陷的现象,从而影响连续成形加工进程。

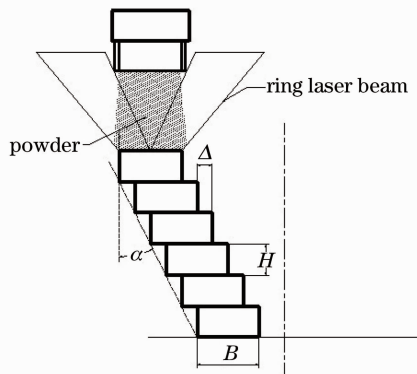


图2 变径回转体斜面堆积模型

Fig.2 Inclined wall accumulation model

图2中B为熔覆层的宽度,H为单道熔覆层高度,Δ为层间偏移量,α为倾斜角度。由图2可知:

$$\tan \alpha = \frac{\Delta}{H} \quad (1)$$

另有

$$m = \rho H L B \quad (2)$$

式中m为单道熔覆层的质量,ρ为熔覆材料密度,L为单道熔道长度。且

$$m = V_f t \eta \quad (3)$$

式中V_f为送粉速度,t为单道熔覆时间,η为粉末利用率。由(2),(3)式可知

$$H = \frac{V_f t \eta}{\rho L B} \quad (4)$$

又因为

$$L = V t \quad (5)$$

式中V为扫描速度。将(4),(5)式代入(1)式求得

$$\alpha = \arctan \frac{\Delta \rho V B}{V_f \eta} \quad (6)$$

由(6)式可知,倾斜角度α与偏移量Δ、扫描速度V成正相关,与送粉速度V_f和粉末利用率η成负相关。为了方便研究,根据(1)式只分析在不同的单道熔覆层高度和层间偏移量下,倾斜角度的极限试验结果,参数如表1所示。

分析表1,序号1和序号4具有相同的倾斜角

度,当熔覆层高度较小时,斜壁堆积成功;当熔覆层高度较大时,斜壁堆积失败。其中熔覆层宽度主要由离焦量决定,而熔覆层高度主要由送粉量和扫描速度共同决定。根据(1)式结合表 1,可以得出,极限倾斜角度不但和偏移量有关,而且与单道熔覆层的高度有着密不可分的关系。由此,本试验设计了

表 1 倾斜度与各个参数间的关系

Table 1 Relationship between various parameters with the inclination angle

Sequence number	Cladding layer width B /mm	Cladding layer height H /mm	Offset Δ /mm	Test result	Inclination angle α /($^{\circ}$)
1	3	0.1	0.1	OK	45
2	3	0.2	0.1	OK	26.6
3	3	0.2	0.15	OK	36.87
4	3	0.2	0.2	Fail	45
5	3	0.3	0.1	OK	18.4
6	3	0.3	0.2	Fail	33.7

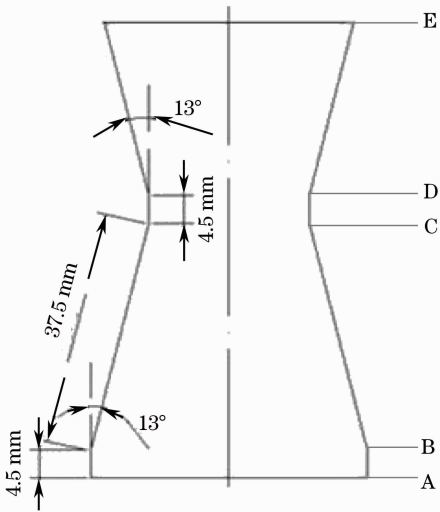


图 3 变径回转体模型

Fig. 3 Reducing solid of revolution model

4 Z轴增量的控制及结果分析

试验表明,随着熔覆层的增加,熔覆层的生长与光头的升高不同步,这会引引起离焦量发生变化^[15]。在激光熔覆成型过程中,熔覆层的形状及成型表面平整度与激光能量密度密切相关,中空环形光的能量密度数值计算公式为

$$E = P / (DV), \quad (7)$$

式中 E 为激光能量密度, P 为激光功率, D 为环形光光斑外圆直径。在激光功率和扫描速度不变的情况下,离焦量的改变会导致环形光光斑的外圆直径变化。离焦量越靠近焦点,环形光光斑外圆直径越

如图 3 所示的变截面回转体。各参数为 $P=3 \text{ kW}$, $V=5 \text{ mm/s}$, $V_f=8 \text{ g/min}$, $B=3 \text{ mm}$, $H=0.3 \text{ mm}$, $\Delta=0.07 \text{ mm}$,斜壁堆积成功。其中设定 A-B 为第 1~15 层, B-C 为第 16~120 层, C-D 为第 121~150 层, D-E 为第 151~267 层。

小,激光能量密度越大,这两个因素易造成熔覆层宽度变小或过烧;相反,能量密度太小,会引起粉末不能充分熔化,黏附在熔覆层表面造成表面粗糙。因此在不同的离焦量下,熔池温度会发生变化,若不控制则会导致熔覆质量的不稳定。图 4 为 ΔZ 控制不当导致堆积失败的零件图。因此在变截面堆积过程中对光头上升高度的控制是十分必要的。在本试验中采用高速 CCD 实时监测激光喷头与成型件,并且把两者的影像实时传递到计算机上,在计算机上设立固定的标尺,实时测量两者之间的距离。高层回转体堆积层数较多, Z 轴增量在不断地调整。随着堆积的进行,若离焦量增大,通过 PMAC 控制系统调整程序,减小 ΔZ 。依据此原理,最终可以保证离焦量的不变。

图 5 为堆积过程中 Z 轴增量变化图。试验中,前 15 层堆积直壁圆柱,从图 5 中可以看出,前 13 层



图 4 缺少高度控制导致表层凹凸起伏的堆积件
Fig. 4 Accumulation of surface fluctuations without height control

Z轴增量基本不变,这说明直壁部分堆积熔覆层很稳定。随着堆积的进行,通过 CCD 观测到离焦量逐渐变大,于是减小 Z 轴增量。到第 16 层开始堆积变截面回转体,离焦量还在变大,一直减小 Z 轴增量至 0.1 mm,离焦量趋于稳定。121 层开始堆积直壁,离焦量减小,于是增大 Z 轴增量。150 层开始堆积变截面回转体,Z 轴增量再次逐渐减小。由此变化可以看出,在直壁堆积时,单道熔覆层较高,说明粉末熔化较多,粉末利用率较高,熔覆层比较稳定,相应增量也比较稳定;而在堆积变径斜壁时,单道熔覆层高度较小,说明熔化的粉末少,粉末利用率相对较低。

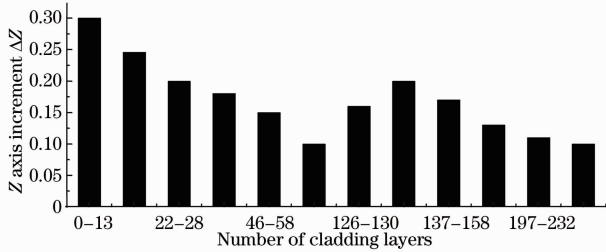


图 5 堆积过程中 Z 轴增量变化直方图
Fig. 5 Z axis variation histogram in the accumulation process

5 功率的控制及结果分析

在高层熔覆堆积过程中,熔覆层质量好坏与熔池的稳定性有关,熔池的稳定又靠温度保证,温度过高会引起熔覆层过烧,温度过低会造成金属粉末的液相减少,熔覆不充分。一方面中空环形光的能量密度数值为 $E = P / (DV)$,在扫描速度 V 不变的情况下,由于离焦量的变化会引起光斑外圆直径 D 变化,只有通过调整激光功率 P 才能保证激光能量密度 E 的不变。另外一方面,在高层堆积中总能量

$$E_T = E_A + E_L, \quad (8)$$

其中 E_A 为熔池吸收的能量, E_L 为损耗能量。熔池温度由 E_A 来保证,而 E_L 主要由熔池的散热情况决定,随着堆积层数的增加,熔池由三维散热变为二维散热, E_L 减小,为了使 E_A 保持不变需相应减小 E_T ,因此需实时减小功率。本实验室采用红外测温仪来实时检测熔池的温度,较好地解决了由散热减小带来热量累积的问题。

图 6 为堆积过程中功率变化直方图。从图中可以看出,开始功率较大,主要是因为基体没有经过预热,初期熔池热量迅速向基体传递,需要在一段时间内保持较高功率,随着熔覆层数的增加,三维散热变

为二维散热,熔覆层的散热越来越小,熔池热量不断累积,需要将功率逐渐下降,每次下降幅度为 200~300 W。图 6 中可见功率总体呈现下降趋势,关键因素是熔覆层的增加,散热减小,熔池温度会上升,功率值也相应地调小。

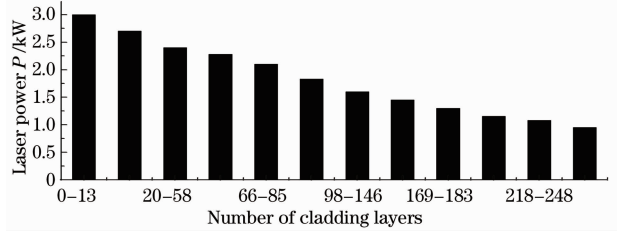


图 6 堆积过程中功率变化直方图
Fig. 6 Power change histogram in the accumulation process

图 7 是熔池温度变化图。从图中可以看出,前 13 层熔池温度最高,达到 1500 °C 以上,这是由于图 6 中前 13 层功率值较高引起的。此时若功率不变,由于散热减慢,熔池温度会继续上升,熔池温度将会过高。由于实际试验中,实时控制功率的下降,可以保持熔池温度的稳定性,在 1450 °C~1550 °C 之间变化。从该图中可明显看出,熔池温度总体上是在 1480 °C 左右,这说明靠功率调节来维持熔池温度是可行的。图 7 中温度波动是由于加工散热的不稳定、功率难以精确控制造成的,进而导致熔池温度有一个较小的波动,这是不可避免的。但波动控制在一定范围内,对成型件表面质量影响不大。

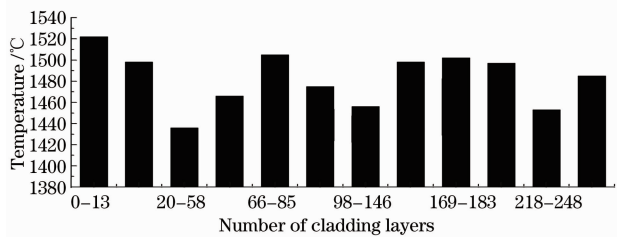


图 7 堆积过程中熔池温度变化直方图
Fig. 7 Molten pool temperature change histogram in the accumulation process

6 成型件表面粗糙度分析

在激光熔覆三维成型中,表面粗糙度是衡量成形质量的首要标准。本试验通过对变径回转体斜率、离焦量及功率的实时控制,最终得到如图 8 所示的成型零件。

利用双管显微镜测得熔覆堆积件外表面 $R_z = 25.5 \mu\text{m}$, $R_a = 6.3 \mu\text{m}$,相当于半精加工表面,成型



图8 变径回转体外观照片

Fig.8 Appearance photo of the reducing solid of revolution

效果良好。

7 结 论

在光内送料的基础上,研究了对变径回转体激光成型关键参数的控制。工艺试验表明:1)在变径回转体堆积中,斜面倾斜角度不宜过大,极限倾斜角度与偏移量成正相关,与熔覆层高度成负相关;2)在堆积中要靠改变Z轴增量来保持离焦量不变,在斜面堆积时,粉末利用率降低,离焦量变大,Z轴增量应相应减小;3)熔覆堆积中要靠功率调节保证熔池的温度,使熔池温度维持相对不变,堆积层数升高,散热降低,熔池温度上升,应相应减小功率。试验得到的成型件表面光滑,无明显粉末黏附,粗糙度低, $R_z=25.5\ \mu\text{m}$, $R_a=6.3\ \mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- Zhong Minlin, Liu Wenjin. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1653~1659
钟敏霖, 刘文今. 国际激光材料加工研究的主导领域与热点[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1653~1659
- Liu Ximing. Laser technology application[J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(5): 470~476
刘喜明. 激光技术的应用[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(5): 470~476
- Zhang Dongyun, Wang Ruize, Zhao Jianzhe *et al.*. Latest advance of laser direct manufacturing of metallic parts [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 18~25
张冬云, 王瑞泽, 赵建哲等. 激光直接制造金属零件技术的最新进展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 18~25
- Yang Sen, Zhong Minlin, Zhang Qingmao *et al.*. New techniques to rapidly manufacture metal parts with laser [J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(4): 254~258
杨森, 钟敏霖, 张庆茂等. 激光快速成型金属零件的新方法[J]. *激光技术*, 2001, **25**(4): 254~258

- Yang Jialin, Wang Yang, Chen Yang. Research present condition and growth trends of rapid prototyping [J]. *New Technology & New Process*, 2003, **1**(11): 28~35
杨家林, 王洋, 陈杨. 快速成型技术研究现状与发展趋势[J]. *新技术新工艺*, 2003, **1**(11): 28~35
- Li Peng. Reserch on Laser Direct Manufacturing Technology Base 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
- Zhong Minlin, Ning Guoqing, Liu Wenjin *et al.*. Fundamental aspects on laser rapid & flexible manufacturing of metallic components[J]. *Applied Laser*, 2001, **21**(2): 76~80
钟敏霖, 宁国庆, 刘文今等. 激光快速柔性制造金属零件基础研究[J]. *应用激光*, 2001, **21**(2): 76~80
- Zhang Yongzhong, Zhang Pingzhi. Research on laser direct forming of metal parts[J]. *Materials Review*, 2001, **15**(12): 15~20
张永忠, 章萍芝. 金属零件激光快速成型技术研究[J]. *材料导报*, 2001, **15**(12): 15~20
- Zhang Yongzhong, Shi Likai, Zhang Pingzhi *et al.*. The newest advance in laser rapid forming of metallic powders[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2000, **29**(6): 361~364
张永忠, 石力开, 章萍芝等. 基于金属粉末的激光快速成型技术新进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2000, **29**(6): 361~364
- Li Lun, Liu Weijun, Shang Xiaofeng. Direct metal deposition based on revolving surface [J]. *J. Basic Science and Engineering*, 2008, **16**(4): 616~626
李论, 刘伟军, 尚晓峰. 以回转表面为基体的金属零件直接成型技术[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2008, **16**(4): 616~626
- Wang Jiajin. Laser Processing Techniques[M]. Beijing: Chinese Metrology Press, 1992. 50~60
王家金. 激光加工技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 1992. 50~60
- Wang Anjun. Study on the Device and Process of Inside-Laser Coaxial Powder Feeding Cladding and Rapid Prototyping Process of Laser [D]. Suzhou: Soochow University, 2007. 41~60
王安军. 激光熔覆快速成形光内同轴送粉装置及工艺研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2007. 41~60
- 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. 13~20
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. 13~20
- Cui Hongwu. Study on the Coupling of Laser Beam and Powder and High-Level Accumulate Technology Based on Inside-Laser Coaxial Power Feeding [D]. Suzhou: Soochow University, 2009. 15~20
崔洪武. 基于光内同轴送粉光粉耦合及高层成形技术的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2009. 15~20
- Wang Haibo. Study on Storey Dynamic Control of Laser 3D Deposition Process Based on PMAC [D]. Suzhou: Soochow University, 2009. 5~15
王海波. 基于PMAC的激光三维堆积层高随动控制研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2009. 5~15