

# 激光熔覆绿色再制造快速工艺规划技术研究

田 威 许 波 廖文和

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要** 通过激光熔覆工艺实现金属零部件的再制造,是目前行业内的一个研究热点,但快速工艺规划是其中的一个难点。首先阐述了再制造激光熔覆工艺规划的内容和总体方案,在此基础上探讨了路径规划和工艺参数规划的方法,并最终通过一个实验试件,验证了上述方法。实验结果表明,通过激光熔覆横截面几何特性模型可以实现对激光熔覆工艺的快速规划。

**关键词** 光学制造;绿色再制造;工艺规划;激光熔覆;几何特性模型

**中图分类号** TG159.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.111401

## Fast Process Planning Technology of Laser Cladding for Green Remanufacturing

Tian Wei Xu Bo Liao Wenhe

(Mechanical and Electrical Engineering School, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract** Laser cladding is a common remanufacturing method for metal parts. However fast process planning technology of laser cladding is one of the difficulties. The content and overall program of laser cladding are brought out firstly. Then path planning and process parameter planning are discussed. Finally the method is verified by an experiment. The results show that laser cladding process is able to be fastly planned with geometric properties model.

**Key words** optical fabrication; green remanufacturing; process planning; laser cladding; geometric properties model

**OCIS codes** 140.3390; 220.4610; 350.3850; 350.3390

## 1 引言

随着各个行业零部件报废量的增多,社会对绿色再制造提出了规模化、产业化的要求。为适应大批量再制造模式,需制定统一的再制造基本工艺方案。零部件进厂后首先进行拆卸和清洗,然后通过相关的测试设备对失效区域进行检测鉴定,获得失效区域的基本信息。根据检测获得的信息,进行激光熔覆再制造工艺规划及再制造。最后对再制造后的零部件进行外形恢复及性能检测。其中,激光熔覆再制造是整个工艺方案的核心,而工艺规划则是激光熔覆再制造的关键所在,直接关系到再制造零部件的性能<sup>[1]</sup>。合理的激光熔覆再制造工艺规划不仅能够改善产品质量、提高劳动生产率,而且可以降低加工成本、缩短生产周期并优化利用资源。因此,激光熔覆再制造工艺规划的研究是十分必要的。

激光熔覆再制造工艺规划都是围绕再制造零部件进行,在已知零部件具体信息(材料、几何形状、失效形式等)的基础上,规划零件再制造形式、熔覆材料、熔覆路径和工艺参数,每一项规划的好坏都对再制造后的零部件质量产生较大影响。其中,工艺参数的规划不仅影响激光熔覆再制造的质量,同时也是实现熔覆层几何特征控制的关键。

## 2 熔覆路径规划

激光熔覆路径设计对再制造效率及再制造件的质量有着重要的影响。合理的熔覆路径可以减少再制造件的翘曲变形,降低层内及层间的热应力,使残余应力降到最低,防止裂纹的产生<sup>[2]</sup>。主要的扫描方式有两种:

收稿日期: 2011-06-07; 收到修改稿日期: 2011-06-14; 网络出版日期: 2011-09-03

作者简介: 田 威(1977—),男,副教授,主要从事绿色再制造工程及数字化柔性装配技术方面的研究。

E-mail: tw\_nj@nuaa.edu.cn

### 1) 长边扫描和短边扫描

对一个矩形平面,可以采用平行长边扫描或平行短边扫描<sup>[3]</sup>,如图 1(a)和(b)所示。对于平行长边扫描和平行短边扫描来说,各次扫描线的起点可以位于再制造件的同侧,也可以位于异侧。因此,平行长边扫描和平行短边扫描又各分为两种类型,如图 1(c)和(d)所示。

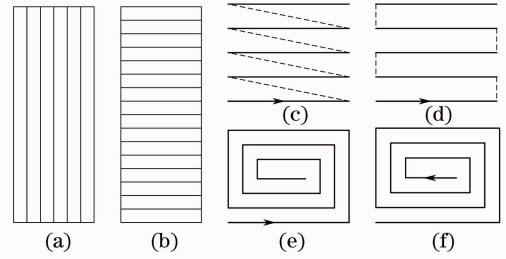


图 1 激光熔覆扫描路径规划

Fig. 1 Scan path planning of laser cladding

### 2) 环形轮廓扫描

环形轮廓扫描是沿平行于边界轮廓线的方向从内向外或者从外向内扫描,如图 1(e)和(f)所示。此种扫描方式遵循热传递变化规律,使激光辐射产生的热量能较均匀地分布在熔覆区上,削弱了在温度降低过程中产生的内部残余应力,减少了零件的翘曲变形,使得再制造区域较光滑<sup>[3]</sup>。

从再制造件精度的角度出发,短边扫描优于长边扫描,异侧扫描优于同侧扫描,向外循环扫描优于向内循环扫描<sup>[4]</sup>。相邻两层可以采用长边与短边、同侧与异侧、向内循环与向外循环交替扫描的方式。

## 3 工艺参数规划

激光熔覆工艺参数对零件再制造性能及精度有着非常重要的影响。在最佳工艺参数范围内进行激光熔覆时,不仅可以获得低稀释率、无气孔和裂纹的高质量熔覆层,而且熔覆层外观平整、连续,经再制造的零部件也会达到或超过原有的性能<sup>[4]</sup>。然而,工艺参数选择不当则会大大降低熔覆层的质量。影响激光熔覆再制造的主要工艺参数有激光功率、光斑直径、扫描速度和送粉速率。

激光熔覆工艺参数的选择应在保证熔覆层与基体冶金结合的前提下尽量减小稀释率,减少气孔裂纹。在激光熔覆再制造时,再制造区域要经过多道搭接和多层叠加等形式才能实现,采用何种形式取决于熔覆层的具体尺寸要求。表 1 是激光熔覆工艺参数对成形质量和几何特征的影响规律。

表 1 工艺参数对成形质量的影响

Table 1 Effects of process parameters on forming quality

	Clad width	Clad height	Clad depth	Rate of dilution	Degree hardness
Laser power	+	+	+	+	-
Spot diameter	+	-	-	-	+
Scanning speed	-	-	-	-	+
Powder feed rate	+	+	-	-	+

在其他工艺参数不变的情况下,增大激光功率或减少送粉量,使单位质量的熔覆层接收的激光能量增大,熔池保持时间增长,从而减少了激光快速结晶中形成的缩孔、气孔、夹杂等缺陷,降低了熔覆层的开裂倾向。增大熔覆速度,则单位质量的熔覆层接受的激光能量减少,不利于气孔和夹杂的消除,增大了熔覆层内部微观裂纹的出现机率<sup>[5]</sup>。

因此,最佳工艺参数的确定可以实现对熔覆层质量和几何特征的控制,同时也为激光熔覆再制造工艺规划提供依据。

## 4 工艺规划试验研究

为实现激光熔覆几何特征模型在再制造工艺规划中的应用,对一试件上的 V 形槽进行激光熔覆再制造。试件材料选用 A3 钢,熔覆粉末选取 Ni60 合金粉末,其成分如表 2 所示。Ni60 合金粉末具有优良的综合性能,如耐腐蚀、抗氧化、耐热、耐低应力磨粒磨损及良好的冲击韧性,且熔点低,固液相温度区间宽,对多种基体和 WC 颗粒等有强的润湿能力<sup>[6]</sup>。其硬度为洛氏硬度(HRC)58~62。

表 2 Ni60 合金粉末成分

Table 2 Alloy powder composition of Ni60

Material	C	B	Si	Cr	Fe	Ni
Mass fraction /%	0.7~1.1	3.0~4.0	3.5~5.0	15.0~17.0	≤5	Bal.

试件几何尺寸为 150 mm×150 mm×30 mm,试件中间铣出深 17 mm、宽 34 mm、长 150 mm 的 V 形槽。熔覆前先进行去污、脱脂及干燥处理。由于 V 形槽形状所限,熔覆路径采用平行长边扫描,这主要是考虑到 V 形槽尺寸的影响,同时长边扫描也减少了扫描次数以及由扫描开始和停止所造成的起停误差,成型精度比短边扫描高。

对 V 形槽的激光熔覆再制造工艺规划流程如图 2 所示。根据经验选取成形质量较好的几组工艺参数,应用激光熔覆几何特征模型计算对应工艺参数下的熔覆层宽度、高度和熔池深度。结合再制造区域的几何形状及尺寸对再制造区进行分层,并确定每层的熔覆道数和搭接系数。最后检验规划结果是否合理,规划不合理则重新选取工艺参数,合理则进行激光熔覆再制造试验。接下来介绍激光熔覆再制造工艺规划的过程。

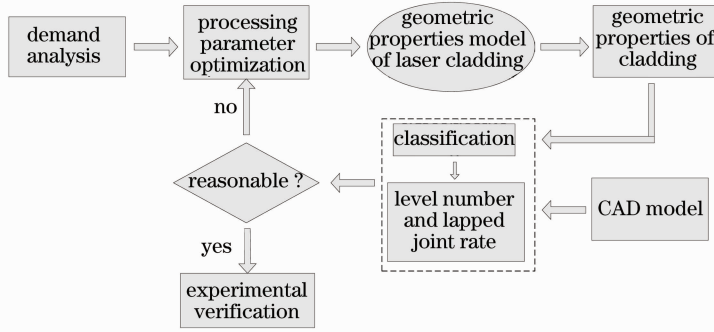


图 2 激光熔覆再制造工艺规划流程图

Fig. 2 Laser cladding remanufacturing process planning

#### 4.1 工艺参数及熔覆层几何特征确定

根据经验可知,当工艺参数为表 3 所示值时,获得的单道熔覆层表面平整,没有明显的裂纹和气孔等缺陷,因此选取表 3 所示工艺参数对再制造区域进行规划及试验。根据文献[7]可知 Ni60 粉末的密度为 8.522 mg/mm<sup>3</sup>,比热为 0.464×10<sup>-3</sup> J/(mg·°C),熔化潜热为 0.248 J/mg。

表 3 最佳工艺参数组合

Table 3 Optimal process parameters

Number	Spot diameter /mm	Laser power /kW	Scanning speed /(mm/min)	Powder feed rate /(g/min)	Gas feed rate /(L/h)	Clad width /mm	Clad height /mm	Clad depth /mm
1	3.5	2.3	350	15	200	2.78	1.38	0.33
2	3.5	3	275	15	200	3.31	1.93	0.19

根据文献[8]建立的几何特性模型如下:

熔覆层宽度  $\bar{W}$  修正模型为

$$\bar{W} = R \sqrt{-2 \ln \left\{ \frac{\pi R^2 r_p \rho_1 [C_1 (T - T_0) + \Delta H_{m1}] + 3\eta P a_p \Delta t}{\pi R^2 [\epsilon \sigma (T^4 - T_0^4) + h^* (T - T_0)]} \right\}} f(D, P, V_s, V_f), \quad (1)$$

熔覆层高度  $\bar{H}$  修正模型为

$$\bar{H} = \frac{3V_f}{2WV_s \rho_1} k(D, P, V_s, V_f), \quad (2)$$

熔池深度  $d$  修正模型为

$$d = \frac{3(1-\eta)P a_p}{2WV_s \rho_2 [C_2 (T - T_0) + \Delta H_{m2}]} \beta(D, P, V_s, V_f), \quad (3)$$

式中  $\eta$  为遮光率,  $V_f$  为送粉速率,  $r_p$  为粉粒半径,  $\rho_1$  为粉末密度,  $C_1$  为粉末比热,  $\Delta H_{m1}$  为粉末熔化潜热,  $T$  为粉末熔点,  $\alpha_p$  为激光吸收率,  $\epsilon$  为全发射系数,  $\sigma$  为斯蒂芬-玻耳兹曼常数,  $h^*$  为热交换系数,  $V_s$  为激光扫描速度,  $\rho_2$  为基体密度,  $C_2$  为基体比热,  $\Delta H_{m2}$  为基体熔化潜热,  $f$ ,  $k$  和  $\beta$  为修正函数。

将粉末物理参数及工艺参数代入(4)~(6)式,计算获得单道熔覆层几何特征,如表3所示。

#### 4.2 确定再制造区层数、搭接系数及每层熔覆道数

再制造区形状为等边直角V字形,其尺寸如图3所示。

首先,用第一组参数进行单道熔覆试验,对直角区域进行填补,即第1层。根据面积相等原则以及三角几何关系可得

$$\frac{2}{3}WH = \frac{1}{2}h \times 2h, \quad (4)$$

式中  $h$  为规划的熔覆层高度。

假定熔覆后表面近似为平面,计算可得熔覆层的高度  $h=1.6$  mm,则形成的倒梯形底边长 3.2 mm。参照 Fig.3 Planning results of the remanufacturing specimen 表3中的熔覆层宽度,第二层选第一组工艺参数进行试验,熔覆两道,搭接系数的计算公式为

$$Wx - W \times 2xy = Y, \quad (5)$$

式中  $x$  为熔覆道数, $y$  为搭接系数, $Y$  为单层熔覆层宽度, $W$  为单道熔覆层宽。计算得搭接系数为 0.2。填补第二层后,再制造区增高了 1.38 mm,梯形底边长变为  $3.2 + 1.38 \times 2 = 5.96$  mm。同理,应用第一组参数熔覆第三层,熔覆四道,计算搭接系数为 0.23,为方便工程应用取为 0.2。填补第三层后,再制造区增高 1.38 mm,梯形底边长为  $(5.96 + 1.38 \times 2)$  mm。由此可知,熔覆层每增加一层,梯形底边长增大  $2H$ 。依照上述方法,对剩余区域进行规划,结果如表4所示。

表4 激光熔覆工艺规划

Table 4 Laser cladding process planning

Layer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Processing parameter	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Lapped joint rate	—	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
Level number	1	2	4	5	7	9	10	12	14	15	17	11

#### 4.3 规划检验

对再制造区的熔覆层数、每层熔覆道数及搭接系数的规划完成之后,需要对其进行验证。熔覆的目的就是要将V形槽填充完整,因此规划的结果必须使每层熔覆面积加起来大于等于V形槽横截面面积。

根据表4的规划结果,计算得熔覆层总面积为

$$S_g = \frac{2}{3} \times 2.78 \times 1.38 \times (1 + 2 + 4 + 5 + 7 + 9 + 10 + 12 + 14 + 15 + 17) + \frac{2}{3} \times 3.31 \times 1.93 \times 11 = 292.4 \text{ mm}^2.$$

根据几何关系计算V形槽面积为

$$S_v = \frac{1}{2} \times 34 \times 17 = 289 \text{ mm}^2.$$

由上可知  $S_g > S_v$ ,所以表4的规划合理。由于  $S_g > S_v$ ,对V形槽再制造后,熔覆层会超出试件表面,经计算可得超出的高度  $h'$  约为

$$h' = (292.4 - 289) / 34 = 0.1 \text{ mm}$$

#### 4.4 试验结果

试验结果如图4所示。从图中分析可知,再制造后除起始处以外,表面都比较平整,对V形区的再制造情况良好。经检测,再制造区高 18.16 mm,比V形槽高出 1.16 mm,与试验规划存在偏差,比规划结果高出 1.06 mm。这主要是因为激光熔覆再制造过程中,前一层部分未完全熔化的粉末沉积在V形槽内,在熔覆下一层时相当于增加了送粉量,熔覆层厚度增大。随着每一层累积的增加,最终导致总熔覆层高超出规划结果。在宽度方向上,熔覆层已完全将V形槽填满,但从图中可以发现熔覆最后一道时搭接率不一致,这主

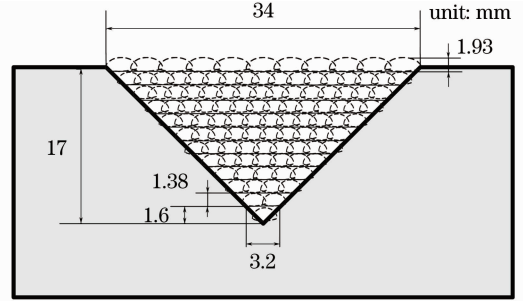


图3 再制造区规划结果

要是前几道熔覆时的累积误差所致,同时这也说明理论规划与具体试验之间存在偏差。总之,按照上述工艺规划进行的激光熔覆再制造试验结果比较理想,在几何外形上达到了再制造的要求,说明了激光熔覆几何特征模型对再制造工艺规划具有指导作用。



图4 激光熔覆再制造工艺规划实验结果

Fig. 4 Experimental results of laser cladding remanufacturing process planning

## 5 结 论

通过利用激光熔覆横截面几何特性模型,能够实现对激光熔覆再制造工件进行快速工艺规划。根据文中提出的工艺规划方法,对一工件上的V形槽进行激光熔覆再制造工艺规划及试验。试验结果表明,激光熔覆再制造工艺规划合理,获得的试验结果比较理想,在几何外形上达到了再制造的要求。激光熔覆几何特征模型在激光熔覆再制造工艺规划中发挥了重要作用。

## 参 考 文 献

- 1 Zuo Tiechuan, Chen Hong. Green manufacture in 21 century: laser manufacturing technology and application[J]. *J. Mechanical Engineering*, 2009, **45**(10): 106~110  
左铁钊,陈虹. 21世纪的绿色制造—激光制造技术及应用[J]. *机械工程学报*, 2009, **45**(10): 106~110
- 2 Sexton Leo. Laser cladding: repairing and manufacturing metal parts and tools[C]. *SPIE*, 2002, **4876**: 462~469
- 3 Wang Junjie, Guo Jiusheng, Hong Jun *et al.*. The study of scanning path and part accuracy in rapid prototyping[J]. *China Mechanical Engineering*, 1997, **8**(5): 54~55  
王军杰,郭九生,洪军等. 激光快速成形加工中扫描方式与成形精度的研究与实验[J]. *中国机械工程*, 1997, **8**(5): 54~55
- 4 Shen Bin, Yan Guangchao, Wu Gang. Laser cladding on complex disc cam[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 244~248  
沈斌,闫广超,吴钢. 复杂盘形凸轮表面激光熔覆工艺[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 244~248
- 5 I. Smurov. Laser cladding and laser assisted direct manufacturing[J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2008, **202**(18): 4496~4502
- 6 E. Capello, D. Colombo, B. Previtli. Repairing of sintered tools using laser cladding by wire[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2005, **164**(5): 990~1000
- 7 Zhang Qingmao, Liu Wenjin, Yang Sen *et al.*. The Cross-section analytical model of the laser cladded coating by powder feeding method[J]. *Transactions of Metal Heat Treatment*, 2001, **22**(4): 65~69  
张庆茂,刘文今,杨森等. 送粉式激光熔覆层横截面面积的分析模型[J]. *材料热处理学报*, 2001, **22**(4): 65~69
- 8 Xu Bo, Tian Wei. The geometrical features of single laser cladding for the green remanufacturing[J]. *Applied Laser*, 2010, **30**(4): 254~258  
许波,田威. 面向绿色再制造的单道激光熔覆几何特征研究[J]. *应用激光*, 2010, **30**(4): 254~258