

## 钛合金单道激光熔覆工艺的研究

项坤<sup>1</sup>, 王维<sup>1</sup>, 杨光<sup>1</sup>, 卞宏友<sup>1</sup>, 钦兰云<sup>2</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 尚纯<sup>1</sup>, 崔宝磊<sup>1</sup>

(1. 沈阳航空航天大学 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 沈阳 110136;

2. 沈阳航空航天大学 机电工程学院, 沈阳 110136)

**[摘要]** 为获得钛合金单道单层激光熔覆的最优工艺参数, 采用正交实验方法, 进行激光熔覆成形试验。先找出激光功率、扫描速度和送粉速率对熔覆层几何尺寸的影响规律, 再对比不同工艺条件所得熔覆层的表面及截面质量。通过对比分析, 得到一组用于单道单层激光熔覆的最佳工艺参数组合, 为以后激光熔覆成形试验提供了数据参考。

**[关键词]** 钛合金; 激光熔覆成形; 几何尺寸; 工艺参数

**[中图分类号]** TG174.44

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2013)01-0091-03

## Study on Titanium Alloy Single Track Laser Cladding Process

XIANG Kun<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, YANG Guang<sup>1</sup>, BIAN Hong-you<sup>1</sup>,

QIN Lan-yun<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, SHANG Chun<sup>1</sup>, CUI Bao-lei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**[Abstract]** In order to obtain the best process parameters of the titanium alloy single-track and single-layer laser cladding, the orthogonal experiment method was used, and have designed laser cladding forming test, found out the influencing rule of laser power, scanning speed and powder feed rate on the cladding layer geometric size. And contrast different process conditions of the cladding layer surface and cross section's quality, through the contrast analysis, get a group of fine process parameters for single-track and single-layer cladding and provide data reference for later laser cladding forming test.

**[Key words]** titanium alloy; laser cladding forming; geometric size; process parameters

钛合金是一种优良的结构材料, 具有比强度高、屈服强度高、耐腐蚀性好等突出特点。近年来, 随着加工技术的不断发展, 钛合金在航空、航天、舰艇、兵器等领域中获得越来越多的应用<sup>[1-2]</sup>。为了节约时间和成本, 针对结构复杂的零件发展近净形工艺技术, 是近年来钛合金制造技术发展的总趋势。

激光熔覆成形技术的基础是激光熔覆快速成形技术<sup>[3]</sup>, 其本身也是一种涂层技术, 实践性很强, 需要经过大量实验摸索才能获得最佳工艺参数。激光熔覆成形是通过单道单层逐步过渡到多道多层而累积起来, 以此形成所要制造的实体形状。单道单层熔覆层的质量直接影响到整个熔覆层的质量, 因此对单道单层激光熔覆的研究非常重要<sup>[4-8]</sup>。材料不同, 熔覆的工艺

参数也不同, 为了奠定钛合金激光熔覆成形的基础, 文中主要探讨激光功率、扫描速度和送粉速率对熔覆层宏观质量的影响规律, 拟找出一组最佳的单道单层熔覆工艺参数。

## 1 实验

所用基体材料为锻造 TA15 板材, 试样尺寸为 100 mm×100 mm×10 mm。熔覆前, 试样表面预先用砂纸磨去氧化层, 并用丙酮进行表面清洗, 以去除油污, 之后烘干备用。熔覆合金粉末为球形 TA15 钛合金粉末, 粒径范围为-100 目~200 目, 化学成分见表 1, 使用前需先烘干。

**[收稿日期]** 2012-09-06; **[修回日期]** 2012-09-30

**[基金项目]** 辽宁省高校创新团队项目 (LT2011004); 辽宁省自然科学基金项目 (201202173); 中航工业产学研创新工程项目 (CX2011SH16); 辽宁省教育厅科学技术研究项目 (L2011026)

**[作者简介]** 项坤 (1986—), 男, 辽宁人, 硕士, 助理工程师, 主要从事激光加工技术方面的研究。

表1 TA15 合金粉末成分

Tab.1 The composition of TA15 alloy power

元素	H	O	N	C	Si	Fe	V	Al	Mo	Zr	Ti
质量分数/%	0.0082	0.091	0.0078	0.012	0.034	0.065	2.16	6.28	1.72	2.18	余量

所用激光熔覆设备主要由5 kW CO<sub>2</sub> 激光器、激光加工数控机床和同轴送粉系统组成。保护气体和送粉气体均为氩气,气流量为120 L/min,光斑直径2 mm,焦距为300 mm。

激光熔覆工艺的优化是寻求各参数的最优组合。先进行单因素试验,找出激光功率 $P$ 、扫描速度 $v_s$ 和送粉速率 $v_f$ 对熔覆层几何尺寸的影响规律,之后采取正交试验,找出一组熔覆层质量相对最佳的参数,为激光熔覆成形提供数据参考。正交试验工艺参数的设计见表2。

表2 试验工艺参数

Tab.2 Craft parameters

工艺编号	激光功率/W	扫描速度 $/(mm \cdot s^{-1})$	送粉速率 $/(g \cdot min^{-1})$
1	1200	2	1.6
2	1200	3	2.4
3	1200	4	3.2
4	1500	2	2.4
5	1500	3	3.2
6	1500	4	1.6
7	1800	2	3.2
8	1800	3	1.6
9	1800	4	2.4

## 2 结果与讨论

### 2.1 工艺参数对熔覆件几何尺寸的影响

熔覆件几何尺寸主要体现在熔覆层的高度和宽度上。图1为熔覆层截面示意图,其中 $H$ 表示熔覆层高度, $W$ 表示熔覆层宽度。试验中得到不同工艺参数条件下的熔覆层宏观形貌,如图2所示。图2a中从左至右,激光功率依次为1000,1100,1200,1300,⋯,2000

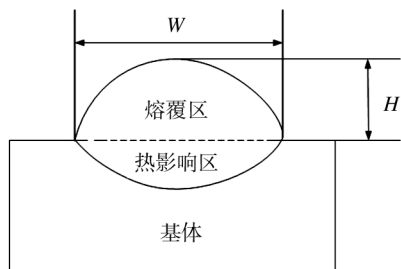
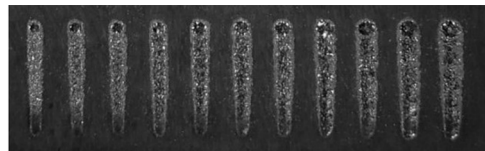


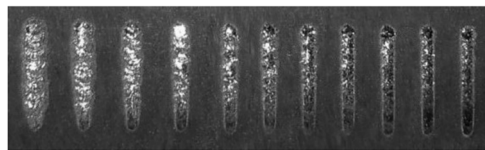
图1 熔覆层截面示意

Fig.1 The schematic of laser cladding layer section

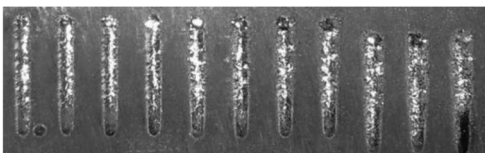
W;图2b中从左至右,扫描速度依次为1.0,1.5,2.0,2.5,⋯,6.0 mm/s;图2c中从左至右,送粉速率依次为1.1,1.6,2.1,2.6,⋯,6.1 g/min。



a 激光功率不同



b 扫描速度不同



c 送粉速率不同

图2 不同工艺参数所得单道熔覆层的形貌

Fig.2 The macro morphology of different process parameters cladding layer

经过对熔覆件几何尺寸进行反复测量,并取平均值,得到熔覆层几何尺寸随激光功率、扫描速度和送粉速率的变化,如图3所示。

从图3a可以看出,扫描速度和送粉速率一定时,随着激光功率的增大,熔覆层高度逐渐增加,但激光功率到达1500 W后,激光功率对熔覆层的高度已无明显影响;熔覆层的宽度则随着激光功率的增加而一直呈增大趋势。主要原因是,当激光功率由1000 W增至1500 W时,由于功率比较适中,粉末利用率较高,因此熔覆层高度逐渐增加;当激光功率达1500 W以后,由于能量过大,在熔覆过程中使粉末飞溅或炸开,导致粉末利用率较低,因此熔覆层高度降低或无明显变化;此外,当激光功率从1000 W增大到2000 W时,传入基板表面的激光能量增加,钛合金粉末在激光照射下于基板上形成熔池,熔池逐渐变宽,因此熔覆层宽度呈逐渐增加的趋势。

从图3b可以看出,激光功率和送粉速率一定时,随着扫描速度的加快,单位时间内基板表面所吸收的能量减小,送入熔池的粉末量减少,导致熔覆层的高度和宽度都逐渐减小。

从图3c可以看出,激光功率和扫描速度一定时,

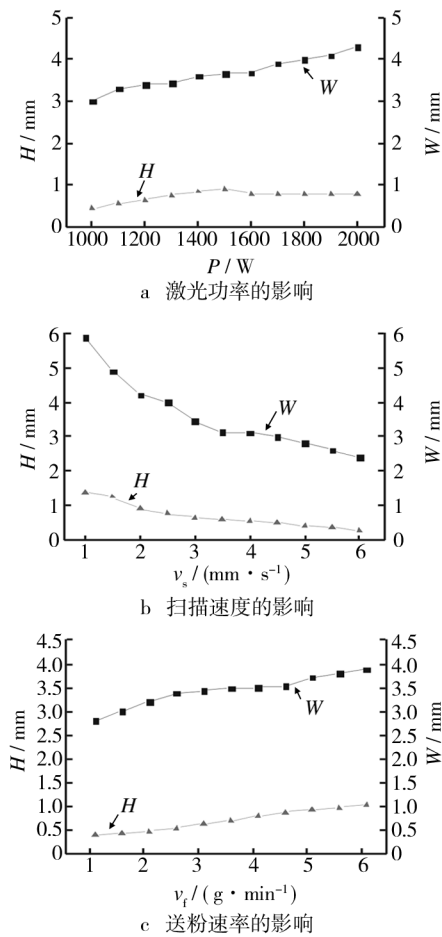


图 3 工艺参数对熔覆层几何尺寸的影响  
Fig. 3 The effect of process parameters on the geometric size of cladding layer

随着送粉速率的增加,熔覆层的高度和宽度逐渐增加,其中宽度受到的影响较为明显。这是由于扫描速度增加,单位时间内送入熔池的粉末增多,粉末熔化后在基体表面的铺展面积增大。

2.2 宏观形貌分析

9 组工艺参数下所得激光熔覆单道单层熔覆层的宏观形貌如图 4 所示。从宏观形貌上看,1—3 号试件表面较不平整,这是由于激光功率较低,造成熔覆件表面熔化不良,导致熔覆质量不理想;7—9 号试件由于激光功率较高,并且送粉速率和扫描速度与之匹配不合理,因此表面出现过烧,平整度差;4 号和 5 号试件

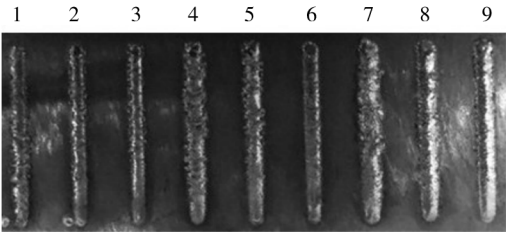


图 4 9 种试件熔覆层形貌

Fig. 4 The topography of nine specimen cladding layer section

的熔覆功率较为适宜,但由于扫描速度和送粉速率没有匹配好,因此有些未熔化的钛合金粉末附着在表面,造成表面粗糙度较大,影响熔覆质量。通过对比观察,6 号试件表面较平整,无粘结粉末且边缘整齐,宏观形貌最佳。

2.3 截面形貌分析

将熔覆试样沿垂直于扫描方向(横向)切开,观察单道单层熔覆层截面的微观形貌,9 组试件的截面形貌如图 5 所示。从图 5 可以看出:1 号、2 号和 8 号熔覆层有分布不均的小气孔,表明这三组参数的匹配不合适;4 号和 5 号熔覆层的截面存在较大气孔,质量不理想;7 号和 9 号熔覆层有裂纹,说明这两组参数的匹配较差,导致熔合不良,熔覆层质量差;3 号和 6 号熔覆层无气孔和裂纹,质量最好。此外,根据 2.2 小节的分析可知,6 号的表面平整度好于 3 号,因此 6 号工艺的参数组合最佳。

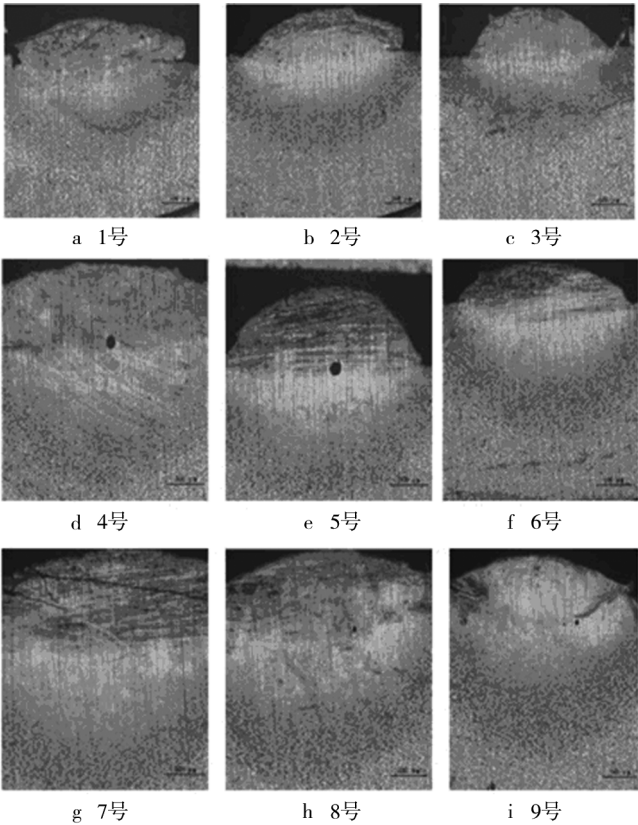


图 5 9 种工艺所得熔覆试件的截面低倍显微图像  
Fig. 5 Nine section's low power microscopic image of laser cladding specimen section

3 结论

1) 在其它条件一定的情况下,钛合金单道熔覆层的宽度随激光功率、送粉速率的增大而增加,随扫描速

(下转第 104 页)

## 4 工艺解析

### 4.1 喷粉的优缺点

喷粉的优点在于:1)使用的粉末不含溶剂,没有挥发性,具有安全和环保的特点;2)膜层可以达到 200  $\mu\text{m}$  厚,具有很强的户外防腐蚀能力,采用合适的粉末涂料和工艺在变形铝合金上喷粉,耐中性盐雾试验不低于 1000 h;3)对于外表面防腐、内表面功能电镀的产品,如通信铝基滤波器模块,喷粉是一种优选的局部电镀的保护工艺;4)根据使用环境的要求,可以单层喷粉,也可以双层喷粉,单层喷粉只针对要求较低的环境,一般耐中性盐雾试验低于 336 h,用于变形铝合金规避结构缺陷时,耐中性盐雾试验可达 500 h,防腐成本远低于烤漆和阳极氧化。

喷粉的缺点在于:1)喷涂层较厚时,不易满足尺寸精度较高的零件的要求,成本较高;2)喷粉设备较大,对环境要求较高,一次投入的成本较高;3)涂层颜色没有喷漆和阳极氧化丰富,而加入色料会使涂层的防腐能力有所降低,且色差控制的成本较高,不能满足外观较细腻的产品需求;4)加入金属粉末会使涂层的防腐性能降低,不易实现通过加入金属粉末来改善涂层的防辐射性能。

### 4.2 工艺完善

在实际生产中,粉料的选择和工艺的实现有诸多因素制约。当产品需采用喷粉工艺时,应先根据产品的底材选择合适的粉末、合适的前处理工艺,油渍严重和深孔较多时,前处理尽量选用超声波除油工艺<sup>[8]</sup>。

## 5 结论

对两种方案喷粉工艺的研究表明:

(上接第 94 页)

度的加快而减小;高度随送粉速率的增大而增加,随激光功率的增加呈先变高、后无明显变化的趋势,随扫描速度的增加而减小。

2) 在其它参数一定的条件下,TA15 钛合金激光熔覆单道单层的最佳工艺参数组合为:激光功率 1500 W,扫描速度 4 mm/s,送粉速率 1.6 g/min。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 刘荣祥,雷廷权,郭立新. 钛合金激光表面熔覆的研究与进展[J]. 材料科学与工艺,2004,12(5):524—528.
- [2] 崔友爱,胡友芳,张忠文,等. 钛合金表面激光熔覆修复技术[J]. 中国表面工程,2011,24(2):61—64.

1) 喷涂纯聚酯粉末涂料,涂层耐中性盐雾试验能力 $\geq 336$  h;纯环氧树脂粉末涂料不能单独用作户外表面涂层,常用于喷粉底层。

2) 设计时,零件结构上的尖角做成圆滑过渡,且圆角  $R \geq 0.5$  mm,窄槽的深宽比和盲孔的孔深/孔径比不超过 3,密封圈的位置布置在喷粉面上,则成品的耐中性盐雾试验能力可达到 $\geq 500$  h。

3) 增加喷砂或喷丸前处理工艺,可以增强喷粉膜层的耐中性盐雾试验能力。

4) 在各项工艺完成良好的前提下,前处理中采用无铬转化工艺的膜层耐中性盐雾试验能力 $\geq 1000$  h。

5) 喷粉涂层的外观和色彩具有一定的局限性,还需要进一步研究新材料和新工艺来填补。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 朱祖芳. 铝合金阳极氧化与表面处理技术[M]. 第 2 版. 北京:化学工业出版社,2010:1—8.
- [2] 孙凤仙,颜广灵,姚伟,等. “铝及铝合金有机聚合物喷涂膜”国内外标准探析[J]. 表面技术,2012,41(6):122—124.
- [3] 王海军. 热喷涂材料及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2008:4—6.
- [4] 张圣麟. 铝合金表面处理技术[M]. 北京:化学工业出版社,2009:65—75.
- [5] 李双保,陈礼扬,张小林,等. 5052 铝合金 Ti-Ce 转化膜的性能[J]. 材料保护,2012,45(8):18—20.
- [6] 黄旋,苗毅,孙德成,等. 铝合金环保型钝化及其与漆膜的配套性能[J]. 材料保护,2012,45(7):35—38.
- [7] 刘文韬. 铝合金挤压成形技术及表面处理、阳极氧化与喷涂、焊接新工艺和挤压设备、模具设计制造实用手册[M]. 宁夏:宁夏大地出版社,2007:12—20.
- [8] 庄光山,李丽,王海庆,等. 金属表面涂装技术[M]. 北京:化学工业出版社,2010:27—32.

- [3] 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.
- [4] 于君,陈静,谭华,等. 激光快速成形工艺参数对沉积层的影响[J]. 中国激光,2007,34(7):1014—1018.
- [5] 黄凤晓,江中浩,张健. 激光熔覆工艺参数对单道熔覆层宏观尺寸的影响[J]. 热加工工艺,2010,39(18):119—121.
- [6] 张庆茂,王忠东,刘喜明,等. 工艺参数对送粉激光熔覆层几何形貌的影响[J]. 焊接学报,2000,21(2):43—47.
- [7] 姜伟,胡芳友,黄旭仁. 工艺参数对激光熔覆层微观形貌的影响[J]. 表面技术,2007,36(4):57—58,75.
- [8] 朱刚贤,张安峰,李涤尘. 基于 Nd:YAG 的激光熔覆工艺参数的优化[J]. 应用激光,2009,29(5):388—392.