

文章编号:1673-9981(2009)02-0123-04

## 涡轮叶尖激光熔覆涂层技术探索\*

孟庆武<sup>1</sup>, 杨胜群<sup>2</sup>, 耿林<sup>1</sup>, 曲伸<sup>2</sup>, 祝文卉<sup>2</sup>, 刘佳涛<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 沈阳黎明航空发动机公司, 辽宁 沈阳 110043)

**摘要:**为了探索涡轮叶尖端部型腔涂层的制备工艺,以堆焊用镍基合金焊条加工成的粉末为原材料,分别采用激光熔覆及氩弧堆焊技术,在铸造镍基合金试样表面上制备涂层。结果表明:激光熔覆涂层在成型性上优于堆焊涂层,激光熔覆涂层的组织细小致密,硬度高于堆焊涂层的硬度;在涡轮叶尖上进行激光熔覆涂层工艺探索也获得成功。

**关键词:**涡轮叶尖;激光熔覆;镍基合金;涂层

**中图分类号:**TG 456.7

**文献标识码:**A

涡轮叶片是重型燃气轮机的关键部件,叶片的端部结构为气冷型腔结构<sup>[1-3]</sup>。叶尖端部的型腔要求所堆砌涂层的宽度窄而高度高,造成工艺难度大。目前,叶尖端部型腔主要采用氩弧堆焊技术成型,该堆焊成型技术存在成型精度低、热影响区深、堆焊层耐磨性差、界面处有裂纹等缺点,而激光熔覆涂层技术具有高能量集中的优势,非常适合制备这种耐磨涂层<sup>[4-5]</sup>。

由于国内的激光熔覆涂层技术主要用于涡轮叶片的铸造缺陷的修复及使用后的裂纹修复方面,还未直接用于叶尖端部的型腔成型方面<sup>[6-8]</sup>。因此,为了提高我国涡轮叶片制造技术的水平,本文以制造涡轮叶片的铸造镍基合金材料为试样底材,将堆焊用的镍基合金焊条制备成粉末,做为原材料,利用大功率激光器,制备了窄而高的激光熔覆涂层,且对叶尖端部型腔的制备工艺进行了探索,为叶尖端部型腔的制备提供了新的技术途径。

## 1 实验部分

### 1.1 材料

试验基底材料为涡轮叶片的铸造镍基合金,用

线切割机将其切成厚度为10 mm的片状试样,其表面经水砂纸磨削加工平整,去除氧化层,试样成分列于表1。委托北京矿冶研究总院,将堆焊用的镍基合金焊条粉碎,经热轧烧结制成粉末,其粒度为40~80 μm,粉末化学成分列于表2,粉末形貌见图1。

表1 铸造镍基合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of casting Ni-base alloy

成分	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ni
含量 w/%	0.05	16.0	10.5	5.3	2.0	3.0	4.6	余量

表2 镍基合金粉末的化学成分

Table 2 Chemical composition of Ni-base alloy powder

成分	C	Cr	Co	Si	B	Ni	其它
含量 w/%	1.5	25.0	20.0	3.5	2.0	45.0	3.0

### 1.2 涂层的制备

用沈阳大陆激光器公司生产的DL-HL-T5000型横流CO<sub>2</sub>工业激光器,采用同步送粉的激光熔覆工艺,通过调整送粉量来保证涂层的堆砌高度约为3 mm。激光熔覆工艺参数为:激光器输出功率3000 W,

收稿日期:2009-03-10

\* 基金项目:黑龙江省博士后专项基金资助(LBH-Z07167)

作者简介:孟庆武(1968-),男,黑龙江省大庆人,副教授,博士。

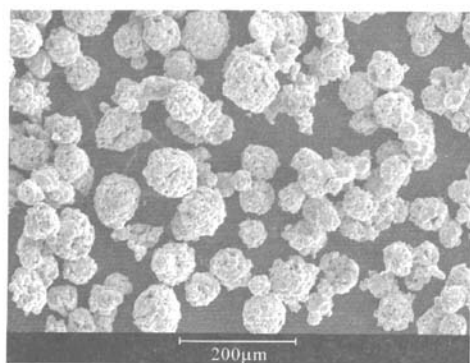


图1 镍基合金粉末的颗粒形貌

Fig. 1 Morphology of Ni-base alloy powder.

光斑直径为 3 mm, 扫描速度为 5 mm/s. 为了进行对比分析, 采用相同材质成分的焊条, 利用氩弧堆焊技术制备堆焊涂层.

### 1.3 组织分析与硬度测试

用线切割机将激光熔覆涂层试样和堆焊涂层试样沿垂直于涂层熔道的方向切开, 获得涂层沿层深方向的横截面, 用水砂纸及金相砂纸进行研磨和抛光后制成金相试样, 采用  $\text{HNO}_3 + \text{HF} +$

$\text{H}_2\text{O}$  的腐蚀剂进行刻蚀, 腐蚀时间约为 0.5 min, 其中  $\text{HNO}_3$  的体积分数为 20%,  $\text{HF}$  的体积分数为 30%. 用日立 S-3400 型扫描电镜 (SEM) 对涂层微观组织进行分析.

用 HVS-1000 型显微维氏硬度计测试激光熔覆涂层及堆焊涂层不同区域的显微硬度, 载荷为 0.2 kg, 加载时间为 15 s. 所测区域分别为试样横截面的涂层区、结合区及基底热影响区, 测量结果为三次测量的平均值.

## 2 结果与分析

### 2.1 涂层的微观组织及形貌

图 2 为激光熔覆涂层及堆焊涂层的微观组织. 从图 2 可以看出: 两种涂层的微观组织均为定向生长的树枝晶, 其由基底向涂层表面生长; 两种涂层与基底的界面形态均呈冶金结合状态. 从图 2(a) 可见, 激光熔覆涂层的晶粒度较小, 且组织致密. 从图 2(b) 可见, 堆焊涂层与基底的界面处存在未熔透的孔隙. 由此可知, 激光熔覆涂层的强度及性能优于堆焊涂层.

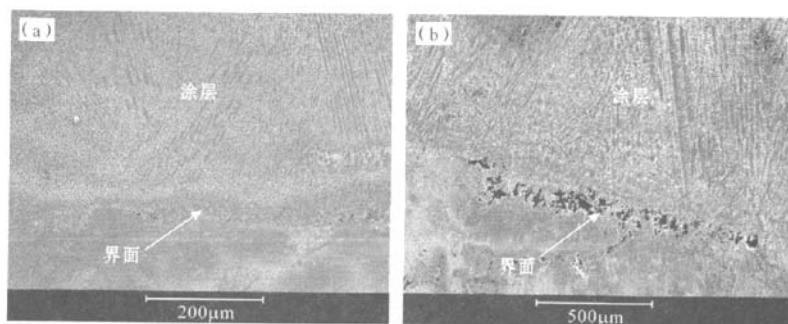


图2 涂层的微观组织

(a) 激光熔覆涂层; (b) 堆焊涂层

Fig. 2 Microstructure of coating

(a) laser cladding coating; (b) surfacing welding coating

图 3 为激光熔覆涂层及氩弧堆焊涂层横截面的宏观形貌. 从图 3(a) 可见, 激光熔覆单道堆砌涂层的宽度约为 3.0 mm, 高度约为 2.8 mm. 由此可知, 激光熔覆涂层堆砌较高, 能满足涡轮叶尖堆砌涂层

窄而高的要求. 从图 3(b) 可见, 当氩弧堆焊单道堆砌涂层的堆砌高度与激光熔覆堆砌涂层相同时, 堆焊涂层的宽度要宽于激光熔覆涂层, 表明激光熔覆涂层在成型性方面要优于堆焊涂层.

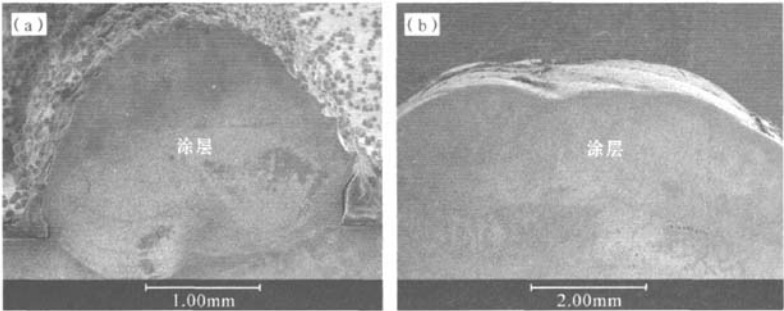


图3 涂层的横截面形貌  
(a)激光熔覆涂层;(b)堆焊涂层  
Fig.3 Cross-section morphology of coating  
(a)laser cladding coating;(b)surfacing welding coating

2.2 涂层的显微硬度

涂层区、结合区及基底热影响区测量的平均维氏硬度值列于表3.由表3可知,激光熔覆涂层的平均硬度值均明显高于堆焊涂层的硬度值.这是由于激光熔覆涂层的微观组织比较致密、晶粒细小均匀及激光熔池的冷却速度快,在组织中形成过饱和固溶体,产生固溶强化效果,从而使其硬度值相对较高.

表3 涂层试样三个区域的硬度值			
Table 3 Average hardness of different areas in the coatings			
涂层	涂层区	结合区	热影响区
激光熔覆涂层	697.0	510.4	396.5
堆焊涂层	487.7	409.6	387.2

2.3 叶尖处制备涂层的探索结果

在激光熔覆涂层试验的基础上,在涡轮叶片上进行了涂层的制备,图4为涡轮叶尖处激光熔覆涂层的形貌.从图4可见,在涡轮叶尖处制备出的激光熔覆涂层窄而高且规整,满足了叶尖型腔结构的尺寸要求.这说明,在涡轮叶尖型腔结构的制备工艺方面,激光熔覆涂层技术可以代替堆焊涂层技术.

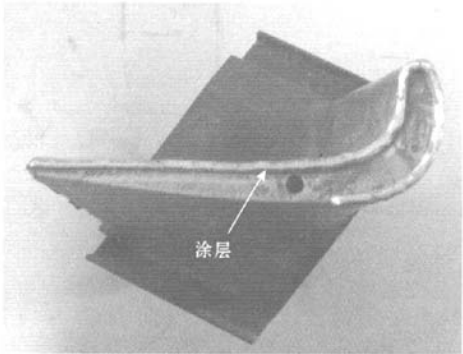


图4 涡轮叶片叶尖处的激光熔覆涂层形貌  
Fig.4 Morphology of laser cladding coating onto turbine blade tip .

3 结 论

- (1)将堆焊用的镍基合金焊条加工成粉末,以其为原材料,在铸造镍基合金表面上制备出质量良好的激光熔覆涂层,涂层的宽度为3.0 mm,高度为2.8 mm,满足了涡轮叶尖堆砌涂层窄而高的要求.
- (2)激光熔覆涂层的微观组织为定向生长的树枝晶且细小致密,激光熔覆涂层的硬度明显高于堆焊涂层的硬度.
- (3)激光熔覆涂层技术可以代替堆焊涂层技术,在涡轮叶片上进行激光熔覆涂层的制备.

## 参考文献:

- [1] 吉桂明, 刘长和. 燃气轮机的技术和应用: 现状和展望[J]. 热能动力工程, 2000, 15 (4): 339-343.
- [2] 张效伟, 朱惠人. 大型燃气涡轮叶片冷却技术[J]. 热能动力工程, 2008, 23 (1): 1-6.
- [3] 倪萌, 朱惠人, 裘云, 等. 航空发动机涡轮叶片冷却技术综述[J]. 燃气轮机技术, 2005, 18(4): 25-38.
- [4] 张魁武. 国外激光熔覆材料、工艺和组织性能的研究[J]. 金属热处理, 2002, 27 (6): 1-8.
- [5] 刘珍峰, 李正佳. 激光熔覆技术在航空工业中的应用[J]. 航空精密制造技术, 2007, 43 (1): 37-40.
- [6] 王茂才, 吴维. 先进的燃气轮机叶片激光修复技术[J]. 燃气轮机技术, 2001, 14(4): 53-56.
- [7] 刘军和, 唐晓辉, 王克亮. 某型发动机高压涡轮工作叶片叶尖裂纹修复方法[J]. 航空发动机, 2008, 34 (3): 22-62.
- [8] 刘其斌, 李绍杰. 航空发动机叶片铸造缺陷激光熔覆修复的研究[J]. 金属热处理, 2006, 31 (3): 52-55.

## Research of laser cladding coating on turbine blade tip

MENG Qing-wu<sup>1</sup>, YANG Sheng-qun<sup>2</sup>, GENG Lin<sup>1</sup>, QU Shen<sup>2</sup>, ZHU Wen-hui<sup>2</sup>, LIU Jia-tao<sup>2</sup>

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Shenyang Liming Aero-Engine Corporation, Shenyang 110043, China)

**Abstract:** In order to research a model structure coating on turbine blade tip, a laser cladding coating and an argon-arc surfacing welding coating were deposited on surface of casting Ni-base alloy samples. A kind of powder made of Ni-base alloy surfacing welding rod was used in laser cladding technology. The experimental results indicate that the material forming of the laser cladding coating is better than that of the argon-arc surfacing welding coating. The microstructure of laser cladding coating is fine and dense. The hardness of laser cladding coating is higher than that of surfacing welding coating. By means of laser cladding technology, a model structure coating was deposited on turbine blade tip.

**Key words:** turbine blade tip; laser cladding; Ni-base alloy; coating