

激光熔覆修复航空发动机风扇机匣 TC4 钛合金静子叶片

罗奎林, 郭双全, 何 勇, 付俊波

(成都航利(集团)实业有限公司, 成都 610041)

摘 要: 结合航空发动机大型风扇机匣 TC4 钛合金静子叶片的修复需求,研究了损伤叶片的激光熔覆修复工艺,对熔覆层成分、组织、显微硬度及力学性能进行了分析。试验结果表明,激光熔覆层 TC4 钛合金的 O、N、H 元素成分满足标准要求;激光熔覆区为具有魏氏体组织特征的柱状晶,柱状晶内部为细密的马氏体组织,热影响区为柱状晶和双态组织的混合组织,并逐渐过渡到基体的双态组织;激光熔覆层显微硬度平均比母材高 15%,过渡平缓;激光熔覆 TC4 试样的室温拉伸、400 ℃ 高温拉伸、热暴露试验的强度结果均高于母材试样,断后延伸率稍低。采用单道多层熔覆工艺对受损叶片进行修复,验收合格后,风扇机匣得到使用。

关键词: 风扇机匣; TC4 钛合金; 静子叶片; 激光熔覆; 微观组织; 力学性能; 修复

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)06-0141-06

Repairing TC4 Titanium Stator Blade of Aero-Engine Fan Casing by Laser Cladding

LUO Kui-lin, GUO Shuang-quan, HE Yong, FU Jun-bo

(Chengdu Holy (Group) Industrial Co., Ltd., Chengdu 610041)

Abstract: To repair TC4 titanium stator blades of large aero-engine fan casing, the repair process of damaged blades by laser cladding was researched, and the compositions, microstructure, microhardness and mechanical properties of the laser cladding zone were analyzed. The experimental results indicate that contents of elements such as O, N, H in the laser cladding zone comply with the standard requirements. The laser cladding zone consists of columnar grain with typical Widmanstatten structure in which fine martensite structure is distributed. The heat affected zone consists of the mixture structure of columnar grain and duplex microstructure, transiting from mixture structure to duplex microstructure as getting close to the base metal. The average microhardness of the laser cladding zone is 15% higher than that of the base metal, and the microhardness transition from the laser cladding zone to the metal base is mild. The tensile strengths by room-temperature tensile test, elevated temperature tensile test (at 400 ℃) and thermal exposure test for laser cladding TC4 titanium sample are all higher than those for the base metal, while the elongations are slightly lower. The damaged stator blades are repaired by single-path and multi-layer laser cladding method. The fan casing is put into use after acceptance.

Keywords: fan casing; TC4 titanium; stator blades; laser cladding; microstructure; mechanical properties; repair

0 引 言

随着航空发动机不断追求高的推重比,大型整体化与轻质化结构件得到更多的运用,大型整体结构件的损伤及修复问题日益紧迫^[1]。大型

风扇机匣组件起着整流、扩压、提高效率的作用。风扇机匣的重要零件静子叶片通过电子束焊与机匣连接为整体,在服役过程中由于异物打伤叶片的进排气边而导致机匣报废。由于钛合金

收稿日期: 2015-07-15; 修回日期: 2015-11-26

通讯作者: 罗奎林(1987—),男(汉),工程师,硕士生;研究方向: 航空发动机、地面燃气轮机零部件再制造; Tel: (028) 8389 8120;

E-mail: Jonhsonluo@126.com

网络出版日期: 2015-12-09 08:35; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20151209.0835.018.html>

引文格式: 罗奎林, 郭双全, 何勇, 等. 激光熔覆修复航空发动机风扇机匣 TC4 钛合金静子叶片 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 141-146. Luo K L, Guo S Q, He Y, et al. Repairing TC4 titanium stator blade of aero-engine fan casing by laser cladding [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 141-146.

TC4 静子叶片的型面复杂、进排气边薄,常规修复方法难以解决氧化、变形以及修复成型要求,且力学性能损失达 50%^[2],因此开发一种新型的修复技术十分迫切。

与目前普遍采用的氩弧堆焊、等离子堆焊等技术相比,激光熔覆技术具有修复精度高、热输入和热影响区小、修复层及界面结合强度高、自动化程度高的优点,因其在保证零件修复质量方面的优势,现已逐渐成为航空发动机零件修复的重要方法^[3-4]。国内目前研究主要集中在小型的、单个叶片的维修^[5],对于整体构件的静子叶片修理国内未见报道。

文中结合某型航空发动机大型风扇机匣组件的 TC4 钛合金静子叶片的修复需求,研究激光熔覆 TC4 钛合金的工艺、组织、力学性能、显微硬度分布,并对该结构件的损伤部位进行了修复。

1 试验过程与方法

1.1 试验设备

激光熔覆设备主要由 YLS-1000 激光器、六轴机器人手、喷嘴、送粉系统、防氧化环境箱等构成。激光器最大功率为 1 kW,机器人手具有六轴联动数控能力。采用“氩气置换+铜触媒净化”方法使环境箱中的水氧含量降低至 5 mg/L 以下,防止 TC4 钛合金被 N、H、O 元素污染。

1.2 试验材料

激光熔覆试验使用的基体材料为 TC4 钛合金锻材,试片尺寸为 30 mm×15 mm×1.5 mm。熔覆粉末采用等离子旋转电极法(PREP 法)制备的 TC4 球形粉末,粉末粒度为 45~150 μm,形貌如图 1 所示。

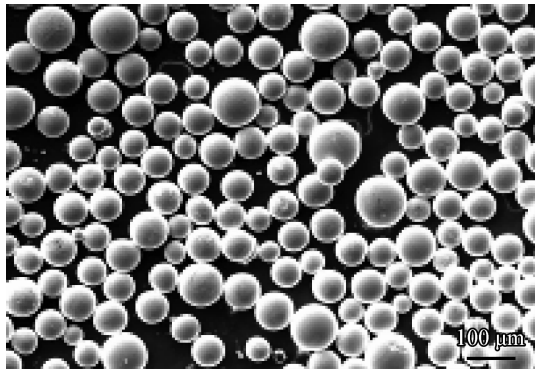


图 1 激光熔覆 TC4 钛合金粉末形貌
Fig. 1 Morphology of TC4 titanium powder for laser cladding

1.3 试验方法

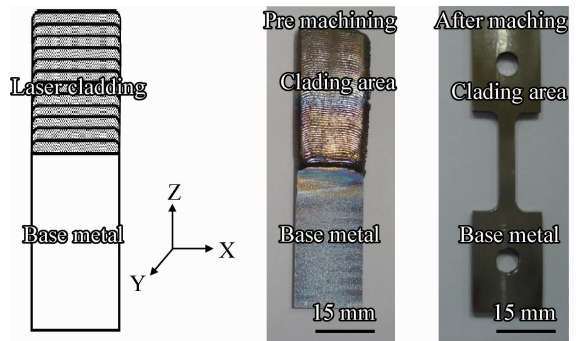
在离焦量保持 5 mm 的条件下利用单道熔覆方法,采用三因素两水平全因子正交试验分析影响激光熔覆质量的 3 个重要参数:激光功率、扫描速度、送粉量,考察对未熔合、气孔、裂纹以及显微组织的影响,确定最优的参数为激光功率 325 W,扫描速度 5 mm/s,送粉量 5 g/min。设置的全因子试验设计表格如表 1 所示。

表 1 激光熔覆试验的全因子试验设计
Table 1 Full factor design of the laser cladding experiments

No.	Laser power/ W	Scanning speed/ (mm·s ⁻¹)	Powder rate (g·min ⁻¹)
1	400	5	5
2	325	5	5
3	400	8	5
4	325	8	3.5
5	325	5	3.5
6	325	8	5
7	400	5	3.5
8	400	8	3.5

1.3.1 制备及测试方法

使用最优激光熔覆参数在试片侧面进行熔覆,试片从风扇机匣的静子叶片上切取,熔覆后试样不进行热处理。采用 Olympus MX1000 金相显微镜进行组织分析,显微组织观察面为熔覆层的侧面(Y-Z 面),如图 2(a)所示。沿熔覆方向 Z 向制备拉伸试样,使熔覆层与基体的界面位于试样的中心,如图 2(b)所示。



(a) Observation plane (b) Laser cladding (c) Tensile specimen

图 2 观察面示意图、熔覆形貌及拉伸试样结构
Fig. 2 Schematic diagram of observation plane and morphologies of laser cladding on base metal and tensile specimen

室温拉伸、400 ℃ 拉伸试验分别按照 GB/T228-2002《金属材料室温拉伸试验方法》、HB 5195-1996《金属高温拉伸试验方法》进行。热暴露试验时拉伸试样先在 450 ℃ 温度下暴露 2 h, 然后按照室温拉伸方法进行测试。

1.3.2 显微硬度试验

采用 DuraScan 维氏硬度计进行测量, 载荷选择为 100 g, 硬度坑间距为 0.5 mm。试样的制备与显微组织试样相同, 在侵蚀前进行显微硬度测试。

表 2 TC4 钛合金激光熔覆试样的元素成分

Table 2 Chemical composition of TC4 titanium laser cladding sample								(w/%)
Elements	Al	V	Fe	O	N	H	Ti	
Laser clading area	6.19	4.08	0.14	0.18	0.002 9	0.005 4	Bal.	
China aviation material handbook	5.5-6.8	3.5-4.5	≤0.30	≤0.20	≤0.005	≤0.015	Bal.	

2.2 显微组织

图 3 为激光熔覆 TC4 钛合金试样的显微组织。从图 3(a)中可知, 熔覆试样可分为熔覆接长区+热影响区+母材区, 熔覆区和母材结合良好, 熔覆层内部及界面无气孔、裂纹等冶金缺陷。如图 3(b)所示, 激光熔覆接长区为粗大的 β 柱状晶转变组织, 柱状晶宽约 300~500 μm, 长度可贯穿整个试样, 熔覆层之间具有明显的外延生长特点^[7]。在柱状晶内分布细密的马氏体组织, 部分晶界上有魏氏体形貌的 α 相。

如图 3(c)所示, 激光熔覆热影响区内组织呈现从熔覆区向母材区连续过渡的混合组织特征。α 相有明显的回溶现象, 离熔覆区越近, α 相数量越少, 晶粒度越大。在靠近熔覆区一侧为晶粒较大的等轴状、柱状晶组织, 宽度约 100~200 μm, 内部为马氏体组织; 在靠近母材一侧为晶粒较小的等轴状组织, 宽度约 20~50 μm, 内部为马氏体组织。母材区的组织如图 3(d)所示, 为典型的等轴双态组织, 其强度、塑性均衡, 韧性良好, 但抗裂纹扩展能力稍低。

激光熔覆的凝固过程冷速极快(>10⁴ ℃/s), 凝固及固态相变为非平衡过程。β→α 固态相变将偏离平衡状态发生, 进而产生大量非稳态相, 发生马氏体相变。粗大的柱状晶内部存在细小的亚晶粒, 每个亚晶粒内初生 α 相短时间内大量形核, 形成细小的组织。在不同的亚晶粒内得到

2 结果与分析

2.1 化学成分

激光熔覆过程必须对杂质元素 O、N、H 进行控制。若 O 含量过高, 将在表面形成富 O 的 α 相, 该相硬度高、韧性差, 容易产生裂纹^[6]; 而元素 H 将诱发钛合金产生延迟裂纹。对激光熔覆层进行化学分析, 结果如表 2 所示。从表中可知, 激光熔覆层的 O、N、H 均未超出标准要求。

多种随机取向的 α/β 片层组织^[7]。同时由于原始 β 晶粒粗大、冷却速度快, 在 β 晶粒的原始晶界处, 将诱发 α 相沿着晶体学惯习面以“短程扩散长程切变”的机制析出, 形成具有取向一致、羽毛状的魏氏体组织。由于 α 相为高温非稳定相, 在升温过程中将逐渐转变为 β 相。因此在热影响区中, 离熔覆区越近, 温度越高, α 相回溶越多, β 晶粒尺寸长大愈充分, 在随后的快冷过程中, β 晶粒以马氏体组织团形式保留, 而 α 相数量则大大减少。

一般来说, 钛合金的马氏体相变因点阵畸变形式与钢不同而导致强化效果不强烈^[8]。但从图 3 可知, 由于柱状晶内部的组织细小, 强烈分割粗大柱状晶, 增加相界数量和大角度晶界比例, 提高硬度、强度以及抗裂纹扩展能力。

2.3 显微硬度

图 4 为激光熔覆试样的显微硬度, 在各典型区域有相应的显微组织。熔覆区的平均硬度值比母材区高约 55 HV_{0.1}, 在熔覆层的顶端硬度值达到峰值, 接近 410 HV_{0.1}。虽然熔覆区的平均硬度值比母材区高约 15%, 但过渡较平缓; 同时从图 3 可知, 各区域的显微组织变化连续, 组织相容性较好。

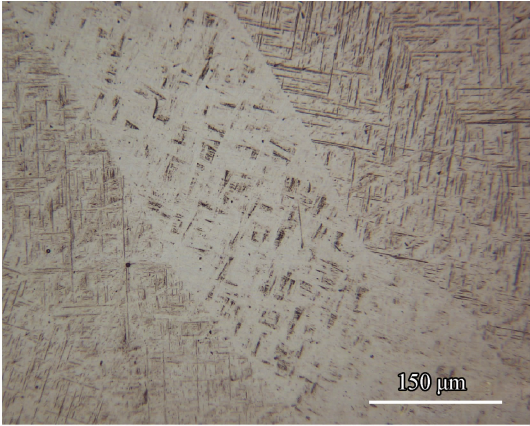
在激光熔覆区内, 虽然存在粗大的 β 柱状晶转变组织, 但由于密集的马氏体有分割作用, 使熔覆区内的强化效果明显, 因而显微硬度值比母材区高。在激光熔覆区的中、下部, 垂直方向的

温度梯度大、生长速度小,长成柱状晶;在激光熔覆区的顶端,垂直方向的温度梯度小、生长速度大、凝固速度快,长成晶粒细小的等轴晶^[9]。另

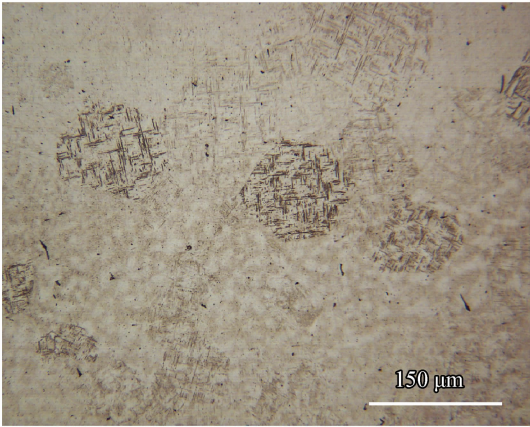
外,顶端的马氏体组织并未受到热循环, α 板条没有粗化,从而其组织较熔覆区的中部更为细小,因此其硬度值比熔覆的中部区域高。



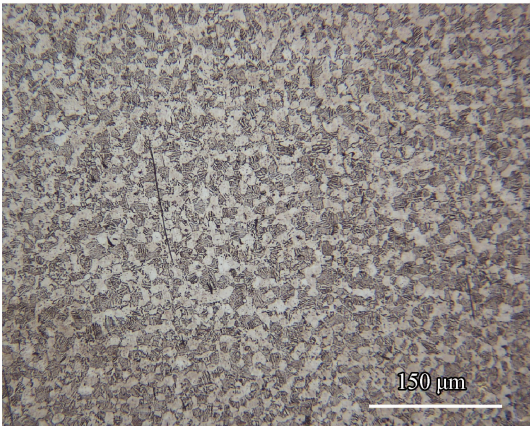
(a) Macrostructure of laser cladding sample



(b) Microstructure of laser cladding zone



(c) Microstructure of heat affected zone (HAZ)



(d) Microstructure of base metal (TC4 titanium)

图 3 激光熔覆 TC4 钛合金的显微组织
Fig. 3 Microstructure of laser cladding TC4 titanium sample

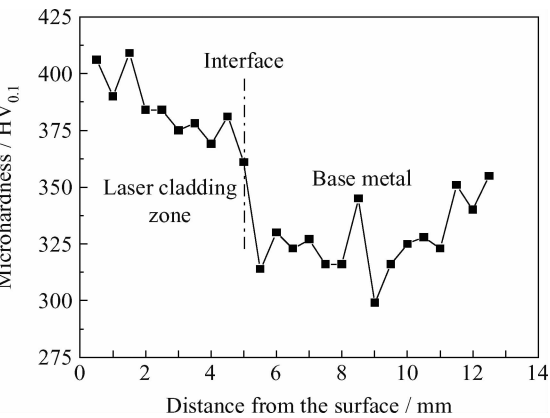


图 4 TC4 钛合金激光熔覆显微硬度沿层深方向分布
Fig.4 Distribution profile of microhardness across the TC4 titanium laser cladding

风扇静子叶片在使用过程中,往往发生异物打伤叶片进、排气边的尖端而报废。利用梯度材料的思想,在叶片进、排气边的边缘保留熔覆层的顶端,有利于增加抗异物打伤能力。

2.4 力学性能

对激光熔覆对接试样进行了室温拉伸、400 ℃ 高温拉伸、450 ℃ 热暴露后室温拉伸试验,每组测试 3 个试样,取结果的平均值,与母材试样进行了对比,结果如表 3 所示。

表 3 激光熔覆对接试样与母材试样拉伸力学性能
Table 3 Tensile strength properties of the laser cladding and base metal samples

Test condition	Mechanical properties	Base material	Laser cladding
At room temperature	σ_b /MPa	960	980
	δ /%	11	8
At 400 ℃	σ_b /MPa	629	636
	δ /%	17	13
After heat exposure at 450 ℃	σ_b /MPa	930	952
	δ /%	12	8

从表 3 中可以看出,激光熔覆对接试样的室温拉伸、400 ℃ 高温拉伸、450 ℃ 热暴露后室温拉伸的强度结果均优于母材试样,断后延伸率略低于母材试样,断裂位置均在母材一侧。

因在熔覆区得到了硬度高、强化效果明显的马氏体相,因此熔覆对接试样的强度要高于母材试

样。但由于马氏体相的塑性比等轴双态组织差,因而熔覆对接试样的断后延伸率略低于母材试样。

由于风扇静子叶片主要考虑抵抗异物打伤,并承受一定的低应变高周疲劳,因此,激光熔覆的高强度、中等塑性结果能较好地满足该服役条件^[10]。

3 风扇机匣静子叶片的修复

图 5 为待修复的某型航空发动机大型风扇静子机匣组合焊接件的局部图。在静子叶片的进、排气边有数十处因异物撞击而导致不同程度的掉块、变形,如图 5(a) 所示。



(a) Fan casing stator blades damaged by foreign matters



(b) Blades after laser cladding repair

图 5 风扇机匣叶片焊接组合件局部形貌
Fig. 5 Part morphologies of welding assembling unit consisting of the fan casing and blades

激光熔覆前应对叶片损伤处进行前处理,打磨好的缺口应为 U 型,且长宽比不小于 6。转角处圆滑过渡,不能遮挡送粉。由于叶片边缘部位非常薄(最薄处约 0.5 mm),为避免焊接咬边缺陷,使用低功率、单道多层熔覆的工艺进行修复,按照前期最优参数执行。为控制热输入量,每道

熔覆后停留 15 s。整个过程在氩气保护气氛中进行,激光熔覆后的形貌如图 5(b)所示。采用六轴机器人对复杂型面叶片进行编程,实现数字控制的净近成形修复。

对修复后的风扇机匣经发动机 400 h 长期试车考核后,进行清洗、分解、故障检查,未发生掉块现象,且无损探伤(荧光探伤、X 光探伤)未发现裂纹,通过了试车考核。试验结果表明,采用激光熔覆技术可以实现风扇机匣静子叶片损伤的高质量修复。

4 结 论

(1) 采用“氩气置换+铜触媒净化”方法,可使 TC4 钛合金激光熔覆层的 O、N、H 元素成分满足标准要求。

(2) 激光熔覆修复 TC4 钛合金的熔覆区为柱状晶组织,内部为密集的马氏体,母材为细小的等轴双态组织,热影响区呈现由母材向熔覆区过渡的特点,具有混合组织特点。熔覆区和母材结合良好,界面无冶金缺陷。

(3) 激光熔覆层显微硬度平均比母材高 15%,过渡平缓。

(4) 激光熔覆 TC4 钛合金对接试样的室温拉伸、400 ℃高温拉伸、450 ℃热暴露后室温拉伸的强度均高于母材试样,但断后延伸率稍低。

参考文献

- [1] 黄勇胜,虞文军. 激光修复 TC4 钛合金锻件的工艺和性能稳定性研究 [J]. 应用激光, 2012, 32(4): 272-276.
Huang Y S, Yu W J. Study on stabilities of techniques and properties of laser repairing TC4 alloy wrought components [J]. Applied Laser, 2012, 32(4): 272-276 (in Chinese).
- [2] 薛蕾,陈静,张凤英,等. 飞机用钛合金零件的激光快速修复 [J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(11): 1817-1821.
Xue L, Chen J, Zhang F Y, et al. Laser rapid repair of the aircraft components of titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(11): 1817-1821 (in Chinese).
- [3] Sexton L, Lavin S, Byrne G, et al. Laser cladding of aero-

space materials [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 122(1): 63-68.

- [4] 李嘉宁,陈传忠. 激光熔覆技术在航空领域中的研究现状 [J]. 航空制造技术, 2010(5): 51-54.
Li J N, Chen C Z. Research situation of laser cladding technology in aviation manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(5): 51-54 (in Chinese).
- [5] 汪定江,夏成宝,王东锋,等. 基于激光熔覆技术的航空发动机涡轮叶片裂纹修复新工艺 [J]. 新技术新工艺, 2010(8): 72-78.
Wang D J, Xia C B, Wang D F, et al. A new repair process of aero engine turbine lamina crack based on laser cladding technology [J]. New Technology & New Process, 2010(8): 72-78 (in Chinese).
- [6] 贾蔚菊,曾卫东,俞汉清,等. 热暴露对 Ti60 合金性能及断裂行为的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(6): 1032-1037.
Jia W J, Zeng W D, Yu H Q, et al. Effect of thermal exposure on properties and fracture behaviors of Ti60 alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(6): 1032-1037 (in Chinese).
- [7] 贺瑞军,王华明. 激光熔化沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 钛合金组织特征研究 [J]. 航空材料学报, 2009, 29(6): 18-22.
He R J, Wang H M. Microstructure features of laser deposited Ti-6Al-2Zr-Mo-V alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29(6): 18-22 (in Chinese).
- [8] Leyens C, Peters M. Titanium and titanium alloys [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 5-9.
- [9] 孙晓敏,刘栋,汤海波,等. TC17 钛合金构件激光直接成形固态相变行为及显微组织 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(4): 724-729.
Sun X M, Liu D, Tang H B, et al. Solid-State phase transformation and microstructure of laser direct manufactured TC17 titanium alloy components [J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2013, 42(4): 724-729 (in Chinese).
- [10] 薛蕾,陈静,林鑫,等. 激光成形修复 TC4 合金锻件的低周疲劳性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(7): 1225-1229.
Xue L, Chen J, Lin X, et al. Low cycle fatigue property of laser forming repaired TC4 forgings [J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2011, 40(7): 1225-1229 (in Chinese).

(责任编辑:陈茜)