

航空钛合金激光 3D 梯度改性去应力修复研究

崔爱永¹ 胡芳友¹ 魏华凯¹ 刘浩东¹ 黄飞² 王志¹

¹ 海军航空工程学院青岛校区 航空机械系, 山东 青岛 266041

² 中国人民解放军海军装备部 航空技术保障部, 北京 100071

摘要 为实现航空钛合金关键结构的改性去应力修复,在钛合金表面 Nd:YAG 激光制备了梯度改性修复层,扫描电镜(SEM)观察了微观组织,用能谱分析仪(EDAX)分析了元素成分和含量,测量了抗热震和热疲劳性能。结果表明,修复层微观组织主要为粗大和不完整的树枝晶、相对较细小的等轴和近等轴晶及细小短纤维状形态;随 Cr₃C₂ 含量增加,树枝晶的数量、大小均呈上升趋势。梯度修复层比传统复合涂层具有更优异的抗热疲劳和热震性能。修复层表面氧化膜均匀致密,主要为连续的短纤维状组织,Ti600 基体的氧化膜主要为疏松的金红石结构的颗粒状 TiO₂ 晶粒,以多面体规则形状堆垛,且晶粒粗大。

关键词 激光技术;梯度去应力;热震;热疲劳

中图分类号 TG146

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.s103007

Research on Laser Gradient Modified Destressing Restoration of Aerial Titanium Alloy Impairment

Cui Aiyong¹ Hu Fangyou¹ Wei Huakai¹ Liu Haodong¹ Huang Fei² Wang Zhi¹

¹ Aerial Mechanical Department, Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering College,

Qingdao, Shandong 266041, China

² Department of Aviation Technology Support of NED, Beijing 100071, China

Abstract To realize laser gradient modified destressing restoration of aerial titanium alloy impairment, experiments of functionally gradient reparative layers (FGRL) and non functionally gradient layers (N-FGL) on Ti600 substrate by pulsed Nd:YAG have been carried out. The microstructures and elementary distribution regularities of FGRL are investigated. The thermal shock and thermal fatigue properties of FGRL and N-FGL are examined contrastively. It is found that a rapidly solidified microstructure consisted of in situ synthesized TiC reinforced phase distributed on FGRL in the form of globular grains has three main different shapes: bulky or imperfect arborescent crystal, fine or approximately equiaxial crystal and chopped fibriform crystal. With the increasing of original Cr₃C₂ content, the number and size of arborescent crystal increase obviously. Resisting thermal shock and thermal fatigue properties indicate that gradiently transitional components of FGRL can relax thermal stress effectively. The main surface oxidation morphology of FGRL possesses densely fine fibrous crystal. Otherwise, that is uniformly polygonal and crassitude TiO₂ crystal to Ti600.

Key words laser technique; gradient destressing; thermal shock; thermal fatigue

OCIS codes 140.3390;310.1515;310.3840

1 引 言

钛合金比强度高,高低温性能好,耐腐蚀,广泛应用于航空航天等工程领域,是飞机和发动机结构的主体材料之一^[1-2]。但钛合金耐磨性差、高温高速摩擦易燃,限制了性能潜力的发挥。激光表面改性技术可在恢复损伤构件尺寸的同时,显著改善材料表面的性能,实现在修复中主动控制损伤过程^[3-4]。但对于航空发动机的热端,由于修复层与基材热物性参数相差较大,易在结合界面处产生较大热应力,导致剥落或龟裂失效^[5-7]。为开

收稿日期: 2015-01-23; 收到修改稿日期: 2015-03-01

基金项目: 国防基础科研项目(A3520061304)、国家博士后科学基金资助项目(20110491882)

作者简介: 崔爱永(1981-),男,博士,讲师,主要从事激光技术在航空制造与维修领域的应用方面的研究。

E-mail: caylaser@163.com

发具有缓和热应力特性的新型耐磨梯度功能修复层(FGRL),使大温差下强化涂层和基体热物性差得到充分补偿,在前期工作的基础上^[8-13],采用 Nd:YAG 激光增材再制造技术,以 Ti600 合金为基材,制备原位合成 TiC 强化相的 FGRL,探讨 FGRL 组织的梯度分布规律及 FGRL 和传统层状非梯度材料(N-FGL)的热应力缓和行为有着十分重要的工程意义,是判明 FGRL 是否满足使用要求及推广应用的依据。

2 实验材料及方法

实验所用基材为 Ti600 合金,试样尺寸:30 mm×20 mm×5 mm,其化学成分为:Ti-6Al-2.8Sn-4Zr-0.5Mo-0.4Si-0.1Y。FGRL 合金粉末质量分数为:71.7%~85.2% Ti、6%Al、2.8%Sn、0.5%~5%Mo、0.4%Si、4%Zr、0.1%Y、1%~10%Cr₃C₂,纯度 99.9%,颗粒直径 20~40μm,研磨后充分机械混合。同轴送粉法制备 FGRL 总 10 层,每层厚度 0.3 mm。N-FGL 为单层,组元取 FGRL 最外层的合金粉末。

实验采用 JHM-1GX-200B 型脉冲 Nd:YAG 激光器。工艺参数为:单脉冲能量 15~30J,扫描速度 3~6 mm/s,脉宽 8~15ms,频率 6~12Hz,光斑直径 2.5 mm。高纯氩气保护。多道搭接率为 30%。

使用丰田日立 S-3500N 型扫描电镜(SEM)分析形貌和组织形态;英国牛津 INCA Energy-X 射线能谱仪(EDS)分析化学成分。抗热震实验采用 2kW 的 CO₂ 激光器为热源,FGRL 和 N-FGL 试样尺寸 10 mm×10 mm,样品表面温度采用 PT300E(工作范围:500℃~3000℃)红外测温仪测量,激光光斑大小 10 mm×10 mm,激光功率范围 1~1.5kW。将样品在 8 s 内加热至 1040℃,后迅速放入 20℃冷水中,冷却 15 s,循环加热冷却直至出现裂纹。热疲劳试验在箱式电炉中加热至 800℃,保温 20 min 后以压缩空气冷却至 110℃,循环加热、冷却。沿着裂纹、垂直裂纹及与裂纹成 45°三个方向切开试样观察截面裂纹分布规律。

3 结果分析

3.1 微观结构

图 1 为 FGRL 试样第 2、5、8、10 梯度层 SEM 微观形貌。可见,微观组织主要呈三种不同的形态:粗大的树枝晶或不完整的树枝晶形态,相对较为细小的等轴或近似等轴形态和细小短纤维形态。较小的增强体一部分沿晶界析出,一部分弥散分布在不规则的区域,如图 1(c)。这是因为原位合成的 TiC 为 Na-Cl 对称型晶体结构,在凝固过程中,以形核-长大机制析出,在对称晶面生长速率相同,易形成中心对称结构,即以等轴、球状生长。由于激光辐射时间短,成分过冷度较大,部分析出的 TiC 生长成枝晶形态,快速冷却产生的细小枝晶有利于改善材料性能。原位合成的 TiC 构成了形核的核心,故随 Cr₃C₂ 含量增加,更易形成成

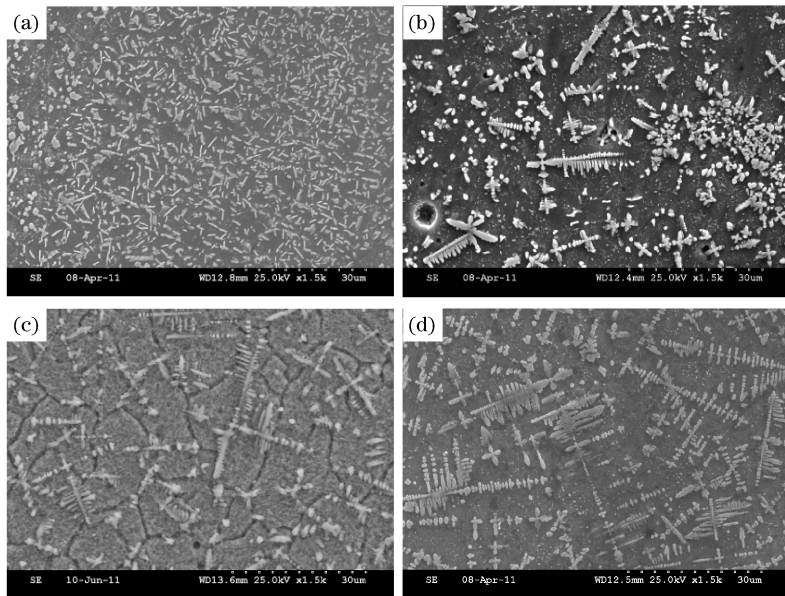


图 1 FGRL 试样 SEM 微观形貌。(a) FGRL2; (b) FGRL5; (c) FGRL8; (d) FGRL10 (160A,10 ms,8 Hz,3 mm/s)

Fig.1 SEM morphology. (a) FGRL2; (b) FGRL5; (c) FGRL8; (d) FGRL10 (160A,10 ms,8 Hz,3 mm/s)

分过冷,树枝晶的数量和大小均呈上升趋势,体现了 FGRL 宏观上的不均匀性和相组成分布形态随位置的变化,这也正是保证 FGRL 发挥其独特优越性的关键。

3.2 热应力缓和效果测试

表 1 为 FGRL 和 N-FGL 的抗热疲劳及抗热震试验结果。图 2 为抗热震性能测试后的截面形貌。可见,FGRL 经 10 次热震后才出现裂纹但整个试样没有发生层间开裂,而 N-FGL 经 3 次热震后截面就出现了裂纹,且裂纹沿层间扩展。裂纹起源于富 TiC 陶瓷相一侧,并沿着应力或者温度的等值线(垂直于板面)向基体扩展,弯曲并分叉。这说明成分的梯度化,使金属和陶瓷物性得到了良好的过渡,有效提高了梯度层间的热应力缓和作用。

表 1 FGRL 和 N-FGL 的热疲劳与热震试验结果

Table 1 Results of thermal fatigue and thermal shock of the FGRL and N-FGL

	Test conditions				FGRL		N-FGL	
	Temperature range / $^{\circ}\text{C}$	Cool-down methods	Heating-up time /s	Cool-down time /s	Cycle index	Results	Cycle index	Results
Thermal shock	20~1040	Cold water	8	15	10	Crack	3	Crack
Thermal fatigue	110~800	Gas cooling	1200(thermal retardation)	120	30	Crack	30	Local flaking

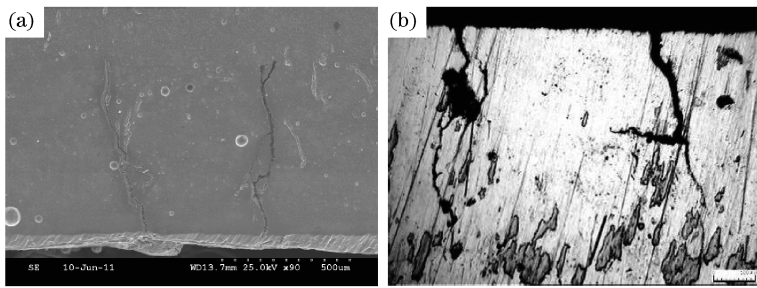


图 2 FGRL 和 N-FGL 热震测试后的截面形貌($\times 90$)。(a)FGRL;(b)N-FGL

Fig. 2 Cross-section morphologies after thermal shock. (a) FGRL; (b) N-FGL

图 3 为 FGRL 和 N-FGL 热疲劳测试后的截面形貌。可见,FGRL 经 30 次循环后出现裂纹,在与基体结合处出现层间开裂。N-FGL 经 30 次循环,局部发生涂层与基体的机械失稳剥落,剥离面凹凸不平。这是因为热疲劳性能取决于热应力大小、颗粒间界面结合强度及修复层与基体结合强度。在交变热应力作用下,修复层层与层之间的过渡区 TiC 硬质相界面及原气孔处逐渐开裂形成裂纹源,裂纹慢慢沿平行于结合带方向扩展成热疲劳裂纹,直至失稳剥落,如图 3(c)和图 3(d)所示。说明通过微观结构与性能的梯度过渡可缓和传统陶瓷/金属直接结合界面的热应力集中引起的开裂问题,克服了富陶瓷表面强化层与金属底层间的物性参数突变现象。

图 4 为热疲劳测试后表面形貌。可见,FGRL 和 N-FGL 表面均开裂形成网状裂纹,且发生高温氧化腐蚀。FGRL 表面为条型突起,N-FGL 表面为块状结构,块与块之间沟壑清晰。对表面白色颗粒进行能谱分析(如图 5 所示)可知,氧和钛元素质量分数分别为 37.224%和 22.693%,原子分数达到 64.326%和 13.098%,说明白色颗粒主要为 TiO_2 等氧化物。FGRL 表面生成的氧化膜较均匀致密,主要为连续的短纤维状氧化物,如图 6(a)所示。Ti600 基体由于氧化速率较大,氧化物在氧化初期大量生成,在形成了内层致密氧化膜后,钛原子的趋外扩散氧化占主导,使得外层氧化膜主要为疏松的金红石结构的颗粒状 TiO_2 晶粒,以多面体规则形状堆垛,且晶粒粗大,如图 6(b)所示。

氧化膜和基体热膨胀系数的差异以及氧化膜的脆性,使其达到一定厚度后疏松剥落严重,失去抗氧化能力。由于氧化层的不致密,有利于环境氧穿过外氧化层,加速氧与基体的氧化反应。体积较大且形状不规则的混合氧化物也易诱发应力集中,修复层经多次冷热交变,造成非保护性氧化物生成部位更易成为残余应力水平较高区域,在结合带和各层界面处产生的应力集中越明显,当该应力超过修复层自身韧性及与基体结合

力时,裂纹就会在界面处萌生、扩展、贯通,进而造成修复层从基体材料表面剥离、失效。

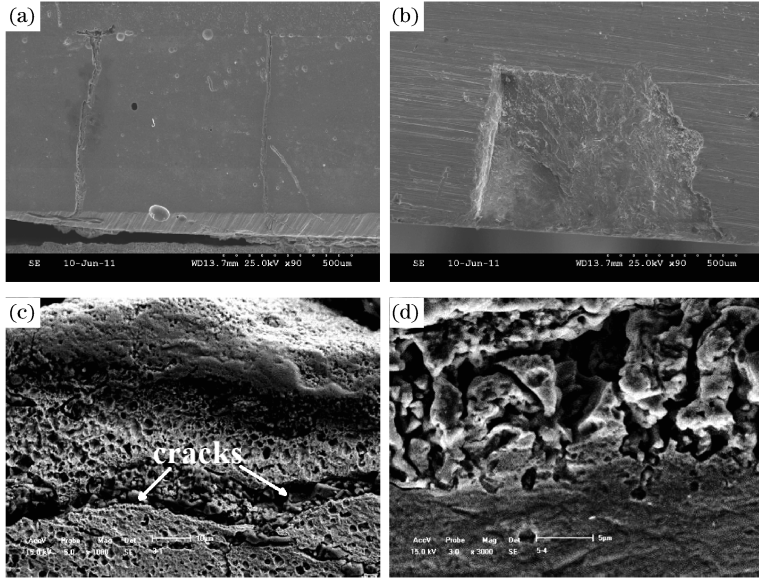


图3 FGRL 和 N-FGL 热疲劳测试后的截面形貌。(a)FGRL 横截面($\times 90$); (b)N-FGL 横截面($\times 90$);(c)结合带形貌($\times 1000$);(d)裂纹区域($\times 3000$)

Fig. 3 Cross-section morphologies after thermal fatigue. (a) FGRL ($\times 90$); (b) N-FGL after thermal fatigue ($\times 90$); (c) bonding ($\times 1000$); (d) crack zone ($\times 3000$)

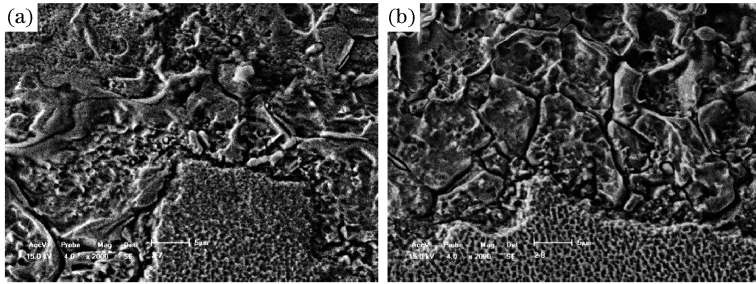


图4 FGRL 和 N-FGL 热疲劳测试后的表面形貌($\times 2000$)。(a)FGRL; (b)N-FGL

Fig. 4 Surface morphologies after thermal fatigue ($\times 2000$). (a) FGRL; (b) N-FGL

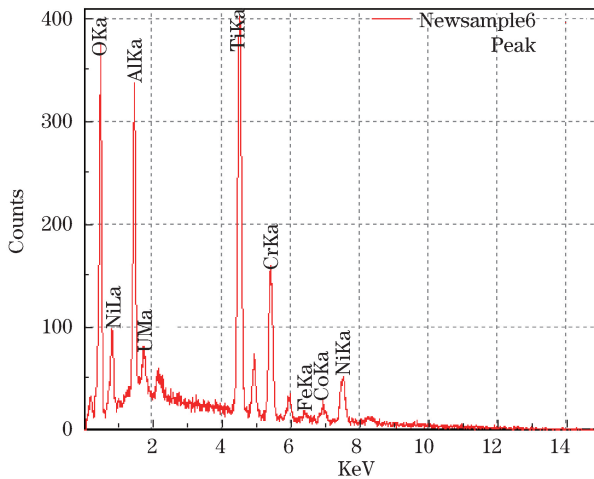


图5 能谱分析

Fig. 5 Energy spectrum analysis

4 结 论

1) 通过工艺优化,成功制备出微观结构成连续梯度变化的修复层,实现航空钛合金损伤的激光梯度改

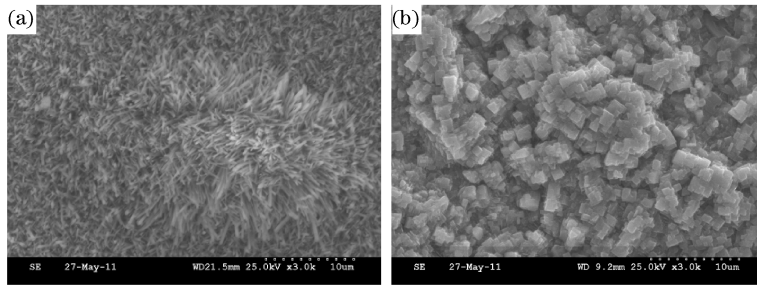


图 6 FGRL 和 Ti600 基体热疲劳测试后的表面 SEM 形貌($\times 3000$)

Fig. 6 SEM surface morphology of FGRL and Ti600 after thermal fatigue

性去应力修复。

2) FGRL 微观组织主要呈三种不同的形态:粗大的或不完整的树枝晶,相对较为细小的等轴或近似等轴晶和细小短纤维状。且随原始 Cr_3C_2 含量增加,树枝晶的数量和大小均呈上升趋势。

3) 抗热疲劳和大温度落差的抗热震实验表明,FGRL 比 N-FGL 具有更好的抗热疲劳和热震性能,FGRL 微观结构的梯度过渡可有效地缓解热应力。

参 考 文 献

- 1 Wang Guo, Songxiao Hui, Wenjun Ye, *et al.*. Microstructure and tensile properties of low cost titanium alloys at different cooling rate[J]. Rare Metals, 2012, 31(6):531-536.
- 2 Huang Xu, Li Zhenxi, Huang Hao. Recent development of new high-temperature titanium alloys for high thrust-weight ratio aero-engines [J]. Materials China, 2011, 30(6):21-27.
黄旭,李臻熙,黄浩.高推重比航空发动机用新型高温钛合金研究进展[J].中国材料进展,2011,30(6):21-27.
- 3 Yao Jun, G P Sun, C Liu, *et al.*. Characterization and wear resistance of laser surface cladding AZ91D alloy with Al+ Al_2O_3 [J]. J Mater Sci, 2007,42(10):3607-3612.
- 4 C P Paul, P Ganesh, S K Mishra, *et al.*. Investigating laser rapid manufacturing for Inconel-625 components[J]. Optics and Laser Technology, 2007,39(4):800-805.
- 5 Z H Melgarejo, O M Suarez, K Sridharan. Wear resistance of a functionally-graded aluminum matrix composite[J]. Scripta Materialia, 2006,55(1):95-98.
- 6 Wang Chuanqi, Liu Hongxi, Zhou Rong, *et al.*. Effect of tempering on microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-base reinforced particles composite coating[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10):1003006.
王传琦,刘洪喜,周荣,等.回火处理对激光熔覆颗粒增强镍基复合涂层组织及耐磨性的影响[J].中国激光,2012,39(10):1003006.
- 7 Doan Tatkhoa, Li Dichen, Lu Bingheng, *et al.*. Effect of scanning methods on the cracking of the DZ125L superalloy in laser direct metal forming[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10):1003002.
Doan Tatkhoa,李涤尘,卢秉恒,等.扫描方式对激光金属直接成型 DZ125L 高温合金薄壁件开裂的影响[J].中国激光,2012,39(10):1003002.
- 8 Cui Aiyong, Hu Fangyou, Hui Li. Microstructure and wear-resisting property of (Ti+ Al/Ni)/($\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{CeO}_2$) laser cladding on titanium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(3):438-441.
崔爱永,胡芳友,回丽.钛合金表面激光熔覆(Ti+Al/Ni)/($\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{CeO}_2$)复合涂层组织与耐磨性能[J].中国激光,2007,34(3):438-441.
- 9 Hu Fangyou, Cui Aiyong, Hui Li, *et al.*. Wear and corrosion behavior of ti-matrix functional gradient layer[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 1(43):36-38.
胡芳友,崔爱永,回丽,等.钛基梯度功能涂层磨损和腐蚀行为研究[J].功能材料,2012,1(43):36-38.
- 10 Fangyou Hu, Aiyong Cui, Bin Hu, *et al.*. Microstructure and wear behavior of Ti-matrix functional gradient layer[J]. Advanced Materials Research, 2011, 311-313:2093-2098.
- 11 Cui Aiyong, Hu Fangyou, Yi Dexian, *et al.*. Ti-based functional gradient wear-resistant coating prepared by laser [J]. Applied Laser, 2010, 30(5):370-373.
崔爱永,胡芳友,易德先,等.钛基梯度功能耐磨涂层激光制备[J].应用激光,2010,30(5):370-373.
- 12 Cui Aiyong, Hu Fangyou, Lu Changliang, *et al.*. Microstructure and property of laser cladding Ti-matrix functional gradient layer[J]. Laser Technology, 2012, 36(2):262-264.
崔爱永,胡芳友,卢长亮,等.激光熔覆钛基梯度功能涂层组织和性能研究[J].激光技术,2012,36(2):262-264.
- 13 Cui Aiyong, Hu Fangyou, Hui Li, *et al.*. Microstructure and corrosion behavior of Ti-matrix functional gradient layer[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(5):18-21.
崔爱永,胡芳友,回丽,等.钛基梯度功能涂层组织和腐蚀行为研究[J].中国表面工程,2011,24(5):18-21.

栏目编辑:刘丰瑞