

钛合金零件的激光成形修复*

Laser Forming Repair of Titanium Alloy Parts

西北工业大学凝固技术国家重点实验室 林 鑫 薛 蕾 陈 静 黄卫东



林 鑫

2007 年被聘为博士生导师。2008 年被聘为凝固技术国家重点实验室副主任。主要从事凝固原理、液态和半固态成形、高能束流加工及成形等方面的研究工作。发表学术论文 160 余篇,其中 SCI 收录 81 篇, EI 收录 103 篇, ISTP 收录 11 篇,他人引用 260 余次。出版国防重点专著《激光立体成形》。授权国家发明专利 7 项。获省部级一等奖一项,二等奖一项。

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好、耐热性高和良好的生物活性等特点,近年来被广泛应用于航空、航

激光成形修复技术的技术基础是激光熔覆表面修复技术和快速成形技术。常规的激光熔覆技术只是一种表面强化和改性技术,可用于修复一些没有成形形状要求的表面缺陷。激光成形修复则是把激光立体成形技术应用于修复过程,可以实现具有三维形状缺陷的零件的成形修复。

天、航海、汽车、冶金、化工、医学等领域^[1]。而其中, α/β 型两相钛合金 Ti-6Al-4V 由于具有优异的综合机械性能,使用温度范围较宽($-196^{\circ}\text{C} \sim +400^{\circ}\text{C}$),合金组织和性能比较稳定,合金化简单,应用最为广泛。不过,钛合金本身所具有的高熔点、高熔融态活性以及大的变形抗力的特点使得钛合金从原材料到制备成形的成本都大大提高^[2]。另外,零件的加工过程中难免会出现一定的失误而导致半成品件或近终加工件的报废,而且,恶劣的零件服役环境也会导致零件的损伤,进而导致更大的经济损失。如果对零件整体进行报废或更换,不仅生产和更新周期较长,而且由于零件加工费用以及原材料费用昂贵,也会造成极大的浪费。如果对这些钛合金零件进行修复和再制造,不但可以降低损失,而且可以大

大缩短生产周期,降低成本。

目前所采用的传统的修复和再制造技术主要有:电刷镀、钎焊、TIG 焊、MIG 焊、热喷涂等等^[3-7]。总体来说,这些修复方法都有各自的优点,但是也存在很多不足,例如:热喷涂涂层与修复基体为机械结合,抗冲击性能较差,同时电刷镀和热喷涂所获得的修复层较薄,通常仅适用于零件的表面修复和改性;常规熔焊修复时热输入量大,热影响区较大,易产生较大的残余应力和变形,同时,修复后性能损失较大;钎焊修复时,修复层与修复基体之间性能通常差别较大,且与基体的结合较熔焊弱;电子束焊接由于要求真空环境且受设备规格的限制,在修复中应用较少。

20 世纪 90 年代以来,随着激光立体成形技术的不断发展^[8-12],

2010 年第 8 期·航空制造技术 55

* 新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-06-0879),国家自然科学基金(50971102)和西工大基础研究基金(No.NPU-FFR-JC200808)资助项目。

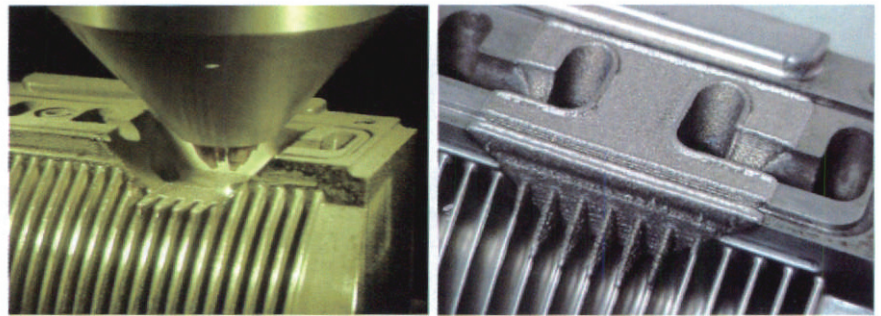
该技术开始应用于钛合金零件的成形。这项技术可以用于承受强大力学载荷的三维实体零件的快速制造,大大提高了材料的利用率,降低了生产成本;而且在此基础上所发展的激光成形修复技术,还可应用于零件上具有较复杂形状、一定深度制造缺陷、误加工损伤或服役损伤的修复和再制造。激光成形修复技术弥补了传统修复技术在修复件外形尺寸及组织性能控制所存在的不足,在钛合金零件的修复领域展示出巨大的前景。

激光成形修复的原理

激光成形修复技术的技术基础是激光熔覆表面修复技术和快速成形技术。常规的激光熔覆技术只是一种表面强化和改性技术,可用于修复一些没有成形形状要求的表面缺陷。激光成形修复则是把激光立体成形技术应用于修复过程,可以实现具有三维形状缺陷的零件的成形修复。

激光成形修复的技术原理是:以损伤零件为基体,通过计算机控制激光头、送粉喷嘴(或送丝头)和工作台按指定空间轨迹运动,在待修复区域逐层堆积粉末或丝材,最后生成与缺陷部位近形的三维实体(图1),在不破坏零件本体性能的前提下,恢复零件的几何性能和力学性能,使损伤零件再次达到使用要求。

尽管激光成形修复技术和激光立体成形技术原理相同,但是侧重的方向有所不同。激光立体成形技术是以与加工材料相同或相近的材料为基材,在其上进行零件成形,主要侧重于进行复杂零件和难加工材料零件的三维立体成形,即制造一个完整的零件;而激光成形修复技术是以损伤零件为载体,直接三维成形缺陷部位,相当于在特定的基材上成形特定的三维几何体。激光成形修复技术的柔性化制造特点使得这项技



(a) 成形修复过程

(b) 修复后

图1 激光成形修复 (Optomec Inc.)

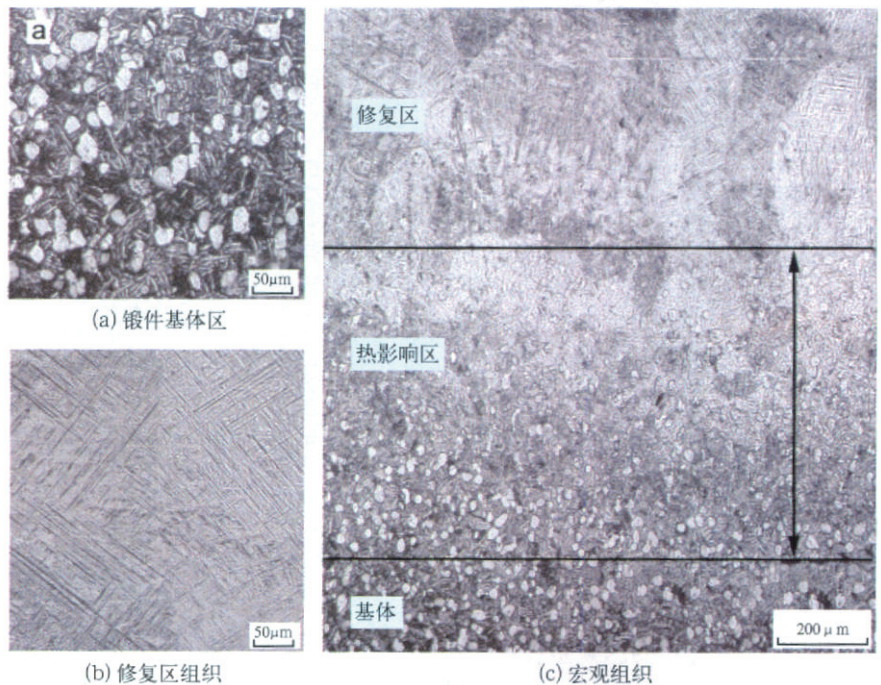
术可以最大限度地满足多种形状损伤部位的修复。

激光成形修复技术克服了传统修复技术结合力弱、修复位置难以控制等不足,可以获得良好的修复件组织和性能;同时也消除了激光熔覆技术对零件复杂程度和修复层厚度的限制。由于激光能量在功率密度和时空分布上的可控性远远高于其他能源,因此可以最大限度地减小修复加热过程对被修复零件带来的负面影响,如减少变形、热影响区等等。特别是传统上对于不同工艺制造的零件进行修复时,由于制造工艺和传统修复工艺通常差别很大,因此非常

难以使修复区和零件本体在性能上趋于一致,导致修复后零件性能通常会有所下降。但是,由于激光立体成形过程中可以同步控制成形合金成分和组织,因此可以通过控制修复区成分、组织而使修复区与零件本体的性能保持高度一致,从而实现高性能匹配修复。

钛合金激光成形修复的组织特征与性能

图2显示了Ti-6Al-4V合金锻件激光修复后的组织形态。锻件基体呈现典型的双态状组织(图2a),在层片状的 $\alpha + \beta$ 基体上分布着等



(a) 锻件基体区

(b) 修复区组织

(c) 宏观组织

图2 Ti-6Al-4V合金激光修复件组织

轴状的初生 α 组织。可以看到在热影响区随着逐渐接近修复区,等轴状的初生 α 相的体积分数和尺度逐渐减少,直至到修复区,等轴状的初生 β 组织完全消失,层片状的 $\alpha + \beta$ 基体组织也逐渐转变为修复区的魏氏 $\alpha + \beta$ 板条组织(图 2c)。与基体的细小晶粒组织不同,修复区呈现粗大的初生 β 柱状晶组织,柱状晶主轴基本沿激光沉积方向,晶内呈现典型的魏氏 $\alpha + \beta$ 板条组织(图 2b)。可以看到,尽管修复区组织与修复基体的锻件组织具有较大差别,但是,整体组织由修复基体组织经热影响区向修复区连续变化,呈现良好的冶金结合。

表 1 给出了针对 Ti-6Al-4V 合金零件的三种典型缺陷进行激光成形修复后力学性能测试结果。这三种典型的缺陷形式分别为:(1)铣槽缺陷(简称槽缺陷)——具有凹槽特点的一类缺陷,包括误加工的铣切沟槽、蚀坑、冶金孔洞缺陷等;(2)面尺寸超差缺陷(简称面缺陷)——缺陷为某一表面的尺寸超差,包括加工超差,装配磨损,腐蚀冲刷等;(3)筋板损伤缺陷(简称体缺陷)——为某一方向上存在较大体积的缺陷,包括筋板类零件高度方向的加工超差,端面磨损,以及此类零件的严重损伤。

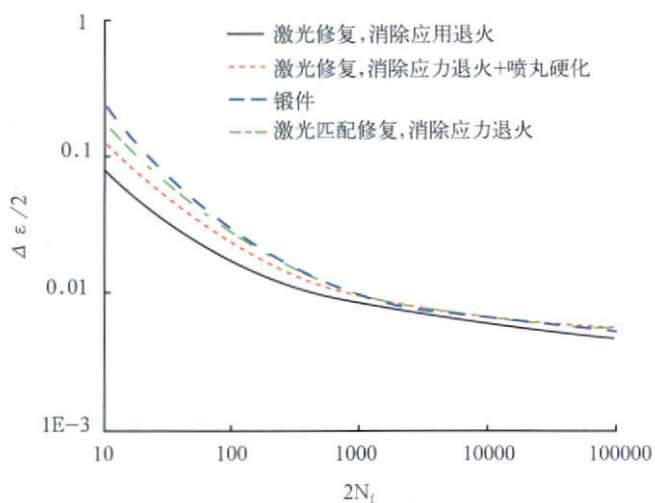


图3 激光匹配修复Ti-6Al-4V合金锻件的低周疲劳曲线

表1 激光成形修复Ti-6Al-4V合金的力学性能

拉伸试样类型	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
槽修复	915 ~ 930	830 ~ 855	12.0 ~ 13.5
面修复	1040 ~ 1060	890 ~ 945	4.8 ~ 9.5
体修复	925 ~ 960	870 ~ 895	11.5 ~ 13.5
锻造退火态标准 HB5224 - 1982	> 895	> 825	> 8 ~ 10
用于修复的锻件基体	910 ~ 930	855 ~ 880	19.5 ~ 20.0
激光成形试样(沉积态)	1170 ~ 1210	1000 ~ 1140	4.0 ~ 6.0

表2 激光立体成形钛合金的室温力学性能

材料	成形工艺及状态	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	Ψ /%	K_{IC} / ($MPa \cdot m^{1/2}$)
TX	激光立体成形沉积态	895 ~ 930	815 ~ 870	10 ~ 14.5	29 ~ 51.5	86.2 ~ 121.3
Ti-6Al-4V	锻造退火态标准 (HB5224 - 1982)	> 895	> 825	> 8-10	> 25-30	> 50

可以看到,修复后零件的性能达到了 Ti-6Al-4V 合金锻件标准。在拉伸强度上,修复件的性能优于修复基体,但是塑性要低于锻件修复基体。同时,槽修复和体修复试样的强度要低于面修复试样,塑性要高于面修复试样。也就是说,通过激光成形修复,钛合金的性能能够得到很好的恢复,而几何性能则可以通过激光成形修复所具有的自由实体成形特性并结合应力及变形控制技术加以保证。

需要指出的是,要实现零件的高性能激光成形修复,还必须克服的一大难题就是热处理限制。已修复的损伤零件不能同新制造件一样自由确定热处理工艺,使得修复区的金属材料难以通过热处理来调节其性能。针对这一难题,我们

重点研究了如何在激光沉积态获得高性能,并对多种合金达到了在激光沉积态实现锻件力学性能的目标,零件修复完毕后只需做适当的退火热处理消除应力,保证零件本体性能不发生变化。表 2 给出了一种新型的 Ti-6Al-4V 钛合金激光匹配修复材料 TX 合金的力学性能。可以看到, TX 合金的力学性能在激光立体成形沉积态下与 Ti-6Al-4V 合金的锻件性能具有良好的匹配。

图 3 给出了采用激光成形匹配修复 Ti-6Al-4V 合金锻件的低周疲劳寿命曲线。在高应变情况下,匹配修复的疲劳寿命有显著提高,仅略低于 Ti-6Al-4V 合金模锻件的疲劳寿命,在低应变情况下的疲劳寿命高于 Ti-6Al-4V 合金模锻件。这表明,经激光成形匹配修复后,修复件的综合性能基本与新件相当,实现了高性能修复。

钛合金激光成形修复的应用

目前,美国及欧洲已将激光成形修复技术应用于飞机,以及陆基和海基系统钛合金零部件的修复。美国

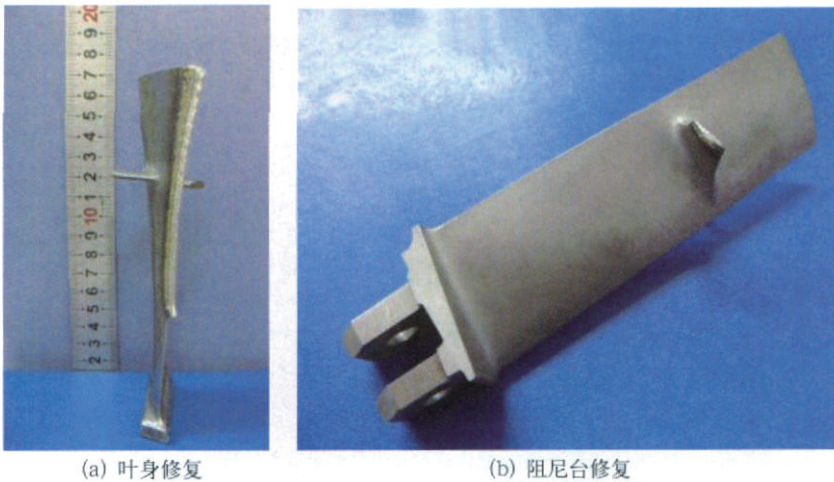


图4 钛合金叶片的激光成形修复

AeroMet 公司在大力发展大型复杂薄壁整体钛合金零件的激光立体成形的同时,也注意到了激光立体成形技术在钛合金零件的快速修复中所具有的重要发展前景,其中包括了误加工零件的快速修复,以及磨损或断裂失效零件的快速修复。AeroMet 公司采用激光立体成形技术使 F-15 战斗机中钛合金机翼梁 (wing spar) 的检修周期缩短到 1 周。德国弗劳恩霍夫激光技术学会 (Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, FHF-ILT) 采用特制的喷嘴,可以脱离气氛保护室对钛基合金进行熔覆。他们采用这项技术实现了 Ti-17 整体叶盘前缘的激光快速修复。近年来,西北工业大学重点针对飞行器结构件和发动机部件的激光成形修复工艺及组织性能控制一体化技术进行了较为系统的研究。图 4 显示了课题组对 TC4、TC6 钛合金叶片的叶身和阻尼台的缺损和磨损进行的激光成形修复,在保证激光修复区与基体形成致密冶金结合的基础上,对叶片的形位进行了良好的恢复。通过对零件在修复中的局部应力及变形控制,实现了对零件几何性能和力学性能的良好修复。

存在的问题及前景展望

尽管钛合金零件激光成形修复

已经能够较好地恢复钛合金零件的几何和力学性能。不过,为了进一步完善和推广钛合金的激光成形修复技术,目前仍然存在一些亟待解决的问题。首先,钛合金在熔融状态的高活性和高温下的高氧化和氮化倾向,使得修复过程中的修复区和本体保护问题成为了制约钛合金零件激光成形修复效率和修复件性能的重要因素。其次,钛合金零件大面积和大体积激光成形修复过程中的应力/应变和变形控制问题也是影响成形修复几何性能控制的关键因素,同时对修复区和本体的界面结合特性具有重要的影响。另外,为了提高钛合金修复件的动载力学性能,还需对钛合金激光成形修复的材料相容性和综合性能的匹配问题进行系统的研究。

总体来说,钛合金激光成形修复所具有的良好微观结构、界面冶金结合特性和优异的力学性能,使得激光成形修复技术在钛合金零件修复方面的应用近年来逐渐受到了国内外研究者及相关厂商的关注。激光成形修复所具有的高柔性、热输入量及方向可控的特点,使得这项技术尤其适合于精密、薄壁钛合金零件的修复,如航空发动机叶片边缘、机匣、燃烧室部件,精密探测、检验仪器等;随着高移动性大功率激光器的发展

和普及,通过与机器人技术结合,激光成形修复技术还可为实现大型钛合金零部件的现场原位修复创造重要的途径。

参考文献

- [1] 谢成木. 钛及钛合金铸造. 机械工业出版社. 2004 年 10 月
- [2] Lee I S. Direct consolidation of Ti-Al-X alloy from elemental powder mixture. Scripta Metallurgica, 1994,31(1): 57-62.
- [3] Tan J C, Looney L, Hashmi M S J, "Component repair using HVOF thermal spraying", Journal of Materials Processing Technology, 1999:92-93, 203-208.
- [4] 马世宁,徐滨士,董世运. 电刷镀修复技术. 设备管理与维修. 2003(2):43-45.
- [5] Zhu S, Guo Y C, Yan G P, "Remanufacturing system based on totally automatic MIG surfacing via robot", Journal of Central South University of Technology, 2005(2), 129-132.
- [6] Ahmad M, Akhter J I, Ali G et al. "Characterization of electron beam modified surface of Zircaloy-4". Journal of Alloys and Compound, 2006,426:176-179.
- [7] Henderson M B, Arrell D, Larsson R, et al. "Nickel based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications", Science and Technology of Welding and Joining, 2004,9(1):13-21.
- [8] Keicher D M, Smugersky J E, Romero J A, et al. "Using the Laser Engineered Net Shaping (LENS) Process to Produce Complex Components from a CAD Solid Model". Proceedings of SPIE. 1995,2293: 91-97.
- [9] Y M Li, H O Yang, X Lin, et al. "The influences of processing parameters on forming characterizations during laser rapid forming", Materials Science and Engineering A, 2003,A360: 18-25.
- [10] Lin X, Yue T M, Yang H O, et al. "Microstructure and phase evolution in laser rapid forming of a functionally graded Ti-Rene88DT alloy", Acta Materialia, 2006,54: 1901-1915.
- [11] Wu X, "A review of laser fabrication of metallic engineering components and of materials", Materials Science and Technology, 2007, 23(6): 631-640.
- [12] Meacock C, Vilar R, "Laser powder microdeposition of CP2 Titanium", Materials and Design, 2008,29(2):353-361.

(责编 侧卫)