

文章编号: 0258-7025(2009)09-2245-06

飞机损伤的激光抢修技术

胡芳友¹ 回 丽¹ 易德先² 崔爱永² 胡 滨² 王增平² 徐成伟²

(¹海军航空工程学院青岛分院, 山东 青岛 266041
²海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264001)

摘要 飞机损伤的快速抢修是部队作战训练的需要,也是现代高技术战争确保空中优势、取得战斗主动权的重要保障。随着飞机结构新材料大量采用,传统的抢修技术难以适应要求。针对航空用钛合金、铝合金、复合材料及高温合金的战伤、磨损和腐蚀等失效特征,分析了传统飞机战伤抢修技术存在的不足,综述了国内激光加工技术在飞机损伤抢修中的应用研究进展。应用激光技术独特的优越性并引入功能梯度理念,把激光焊接、激光切割、激光熔覆应用于飞机的损伤抢修。其中包括飞机结构激光焊接修复、激光多层熔覆修复的合金粉末体系、组织特征、硬度分布规律、耐磨性和疲劳性能,飞机结构激光切割等。同时指出了飞机结构抢修领域有待解决的问题。

关键词 激光技术;损伤抢修;飞机;钛合金;铝合金

中图分类号 TN249;V267⁺.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093609.2245

Laser Repair of Aircraft Battle Damage

Hu Fangyou¹ Hui Li¹ Yi Dexian² Cui Aiyong² Hu Bin²
Wang Zengping² Xu Chengwei²

(¹Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao, Shandong 266041, China
²Graduate Students Brigade of Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai, Shandong 264001, China)

Abstract Rapid repair technique of aircraft damage is the requirement of military operations and training. It's also an important support to ensure the mastery of the air in modern high-tech war. With the development of new structural materials, traditional aircraft damage repair techniques have failed to meet the demands, with their shortages being analyzed. For its unique superiority, laser technique for the damages repair of aircraft structure is summarized, such as laser cutting, laser welding, and laser cladding used for battle field damage, corrosion and wear, including the conception of functional gradient material. Alloy powder system, microstructure, micro hardness regularities of distribution, resistance to wear and fatigue behavior of laser cladding are investigated. The merits of laser cutting are explained, and a mobile laser material processing system is introduced. Meanwhile, the need for further research is also briefly discussed.

Key words laser technique; damage repair; aircraft; titanium alloy; aluminum alloy

1 引 言

随着航空技术的发展,飞机已成为取得现代战争主动权的重要武器,大批次、大强度密集出动是现代战争航空力量的使用特点。20 世纪以来的历次战争表明,作战飞机战伤数量远大于战损数量,飞机战伤、战损比已达 10 : 1 以上。因此,快速恢复损伤飞机,及时将其补充到战斗序列中,是取得持续制空

权的重要保障^[1]。平时飞机的结构也经常发生腐蚀、磨损等不同形式的损伤,是影响飞机完好率的重要因素。

无论是平时和战时,部队都要求在最短时间内把飞机恢复到可执行任务的完好状态。因此对飞机结构抢修技术的基本要求是快速高效和适合外场条件下使用^[2]。传统的铆接抢修技术适用范围窄,效

收稿日期: 2008-10-14; 收到修改稿日期: 2008-11-03

基金项目: 国家博士后科学基金(20060391000)资助课题。

作者简介: 胡芳友(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事航空结构损伤激光维修工程与航空机械设计等方面的研究。

E-mail: fangyouhu@hotmail.com

率较低,且无法适应钛合金、复合材料、高温合金等新材料的修复要求,因此激光技术以其独特的优越性能成为战伤抢修技术的新亮点。

2 传统飞机修理技术之不足

铆接修理技术:二代和部分三代战机以铝合金为主要结构材料,机体结构的连接主要为铆钉连接,因此其损伤修理的工艺也是以铆接为主。铆接施工需要双面接近损伤部位方能实施。而飞机结构损伤部位、范围具有随机性,不可预见,许多部位难以接近与观察,抢修施工十分困难,甚至需要另开工艺孔,增加了辅助工作量和时间,对结构强度造成不必要的削弱。更重要的是对于现代战机的钛合金、复合材料损伤,铆接技术已不能满足需求。

切割:飞机结构损伤的修理需先修整、清理损伤部位,使其形状规则化。主要采用手动、气动工具进行割、孔、锉、铣。这些方法效率低,对操作者的技术要求高,易损伤周围结构。对于钛合金结构常温下手工切割、钻孔困难;对于复合材料结构,手工切割会引起材料分层,造成二次损伤。

焊接:硬铝、超硬铝合金在外场条件下不能焊接。现役飞机发动机的耐热合金、钛合金裂纹损伤常采用氩弧焊(TIG),但因难以进行后续热处理,常引发双侧焊趾裂纹。

3 激光加工技术在飞机损伤抢修中的应用

现代飞机结构的材料已产生较大的进步,以铝合金为主的时代已经过去,取而代之的是比强度更高的钛合金以及性能可设计的复合材料。美国F-22飞机的钛合金占总重的40%,复合材料占总重的26%。这些材料构成的飞机结构损伤和铝合金结构有很大不同,其修理也非铆接技术所能胜任的。

激光经聚焦后光斑的功率密度可达 $10^4 \sim 10^{15} \text{ W/cm}^2$,应用不同的功率密度和作用时间,可实现金属表面热处理、合金化、熔覆、焊接、切割、表面冲击强化等不同的加工目的,是非常理想的多功能修理加工热源。激光表面改性技术已在飞机结构、航空发动机制造领域得到应用^[3~5];用激光熔覆技术熔铸修复航空发动机涡轮叶片冠部、涡轮导向器,成功恢复了损伤件的形状、尺寸和性能^[6,7]。由于激光可以实现光纤软传输,采用惰性气体就可

实现加工区域的局部保护,更适用于外场条件,在飞机结构损伤抢修领域具有显著的应用前景。

3.1 激光焊接

飞机钛合金零件大部分是薄壁结构,损伤形式主要有破孔、穿透性裂纹等,这几类损伤均可采用对接和搭接焊修复。实验表明,CO₂激光焊缝及其热影响区(HAZ)宽度只有TIG焊的1/3左右(如图1所示),且表面平整、光洁,质量稳定,变形微小。焊缝区的组织较均匀,为典型网篮组织,热影响区较窄^[8];采用Nd:YAG激光焊接无论搭接焊还是对接焊均可获得焊缝平整、热影响区达微米级的理想焊缝。因此,激光焊接明显优于手工氩弧焊,是钛合金薄板损伤修复的理想手段。机械性能试验结果表明,钛合金激光焊接的性能好,可以达到基材性能的95%,这是传统手工焊接技术无法比拟的。在战伤抢修条件下,采用盖补法激光焊接不需要双面施工,不会造成结构的二次损伤,可快速完成修复,是大幅度提高抢修效率最具希望的技术。

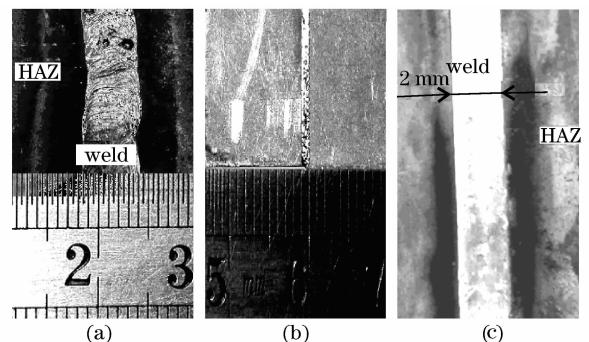


图1 钛合金板材氩弧焊缝与激光焊缝形貌。(a)TIG焊;(b)脉冲Nd:YAG激光焊接(激光功率230 W,频率2 Hz,脉宽6 ms,氩气保护);(c)CW CO₂激光焊接(激光功率1 kW,速度120 mm/min,光斑直径1.9 mm,氩气保护)

Fig. 1 Surface pattern of TIG and laser welding titanium alloy. (a) TIG; (b) Nd:YAG laser welding with laser power of 230 W, frequency of 2 Hz, pulse width of 6 ms and argon shield; (c) CW CO₂ laser welding with laser power of 1 kW, scanning rate of 120 mm/min, spot diameter of 1.9 mm and argon shield

铝合金广泛应用于二代飞机,仍有抢修新工艺研究需求。但铝合金的导热系数高、熔点低、反射率高,激光焊接相对困难。实验证明,经过严格控制CO₂激光工艺参数,外加合理的辅助工艺可以实现铝合金激光焊接(如图2所示)。其焊缝组织细密,无缺陷,热影响区小^[9~11]。许良红等^[12]也研究了高

强铝合金 2519-T87 的激光焊接接头组织和力学性能特征,并与惰性气体熔化极电弧(MIG)焊接进行对比,证明激光焊缝组织细小,晶界共晶相呈短棒状均匀分布,熔合线附近没有形成等轴晶区,焊接头抗拉强度可达母材的 74%。而 MIG 焊接组织晶粒粗大,焊接头抗拉强度仅为母材的 61%,且激光焊接头热影响区无明显软化区。

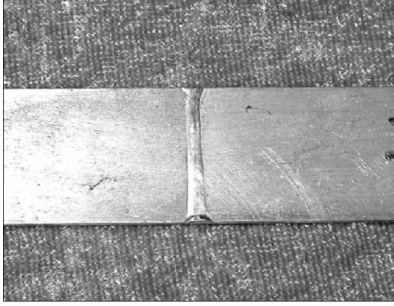


图 2 铝合金激光焊缝外观形貌(激光功率 1700 W,扫描速度 600 mm/min,光斑直径 1.2 mm,氩气保护)

Fig. 2 Surface pattern of laser welding aluminum alloy with laser power of 1700 W, scanning rate 600 mm/min, spot diameter of 1.2 mm and argon shield

3.2 激光熔覆

飞机的非薄壁结构如大梁、接头等,出现裂纹、破孔、腐蚀损伤等(图 1(b)),在无配件更换的情形下,用常规的抢修方法无法修复,采用激光熔覆技术,可在线重建损伤结构。

3.2.1 铝合金损伤修复

激光熔覆修复涡桨发动机螺旋桨叶腐蚀损伤取得了较为实用的进展。应用 LER-2 激光在线加工系统,在 2A12 基材表面进行铝基合金粉末多层熔覆试验,得到的熔覆层内部无明显缺陷,与基体冶金结合良好,经表面机械加工可以良好地恢复损伤件的形状和尺寸精度。经过激光熔覆过程中的逐层机械冲击,可以显著提高损伤部位的疲劳性能。试验表明,由于熔覆层铸态组织底部存在较大尺寸柱状晶,疲劳裂纹多萌生于熔覆层,且从断口形貌可看出熔覆层内裂纹扩展速度大大高于基材,如图 3(a)所示;经过机械冲击,熔覆层的疲劳断口形貌已接近基材,其裂纹扩展速度也显著减缓,接近基材^[13],如图 3(b)所示。同时,对 ZA12 铝合金进行了激光表面重熔,分析了疲劳断口、金相和显微硬度,表明疲劳寿命无明显差异,疲劳断口显示裂纹源出现于重熔区表层,疲劳裂纹沿柱状晶界扩展,金相组织明显细化^[14]。并借助 YAG 脉冲式激光器,模拟飞机疲劳损伤的铝合金试样表面激光熔覆 Al-Y 合金,Al-Si

合金,分析了疲劳断口和金相,证明熔覆 Al-Y 合金试样的安全寿命达到熔覆 Al-Si 合金试样寿命的 339%,熔覆层与基材结合紧密,气孔、夹杂等缺陷较少,疲劳断口裂纹扩展区存在疲劳条带和疲劳台阶^[15]。

郭永利等^[16]也通过对航空航天用超高强铝合金 7050 实验,探讨了激光熔覆修复铝合金的可行性,优化工艺参数,实现基底和熔覆区良好的冶金结合。

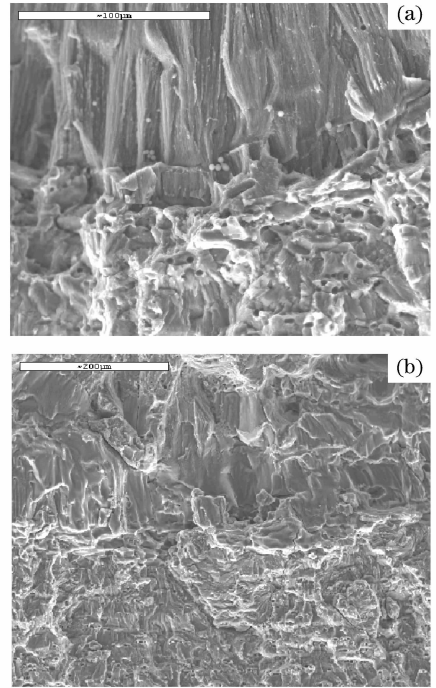


图 3 试样疲劳断口(界面局部)。(a)直接熔覆试样疲劳断口;(b)逐层加机械冲击试样疲劳断口

Fig. 3 Fatigue fracture of sample (local interface), Fatigue fracture of laser cladding (a) and fatigue fracture with layer-by-layer mechanical impact (b)

3.2.2 钛合金损伤修复

钛合金构件在飞机机体、发动机应用广泛,使用中装配面上的微动磨损较为严重(如图 1(c)),为此,本实验室采用了激光熔覆、改性熔覆和性能梯度熔覆三个阶段的研究。

在钛合金基体表面采用脉冲 YAG 激光熔覆金属陶瓷复合涂层,获得表面光洁、内部无裂纹的熔覆层,与基材(TC4)实现良好的冶金结合^[17,18],如图 4 所示。熔覆层组织是细密基体上散布着未熔陶瓷颗粒和白亮球状陶瓷颗粒增强相,显微硬度明显提高,最高可达 1150 HV,平均是基材的 3~4 倍,如图 5 所示。熔覆层和基材实现良好冶金结合,熔合区宽度 10~20 μm 。激光熔覆层干滑动磨损的摩擦系数

在 0.2~0.3 之间,耐磨性比基体钛合金提高约 4~5 倍。王维夫等^[19]为提高钛合金表面强度,在 TA2 钛合金表面激光熔覆制备了 Ni 基 Tribaloy 700 涂层,涂层的显微硬度约比基材高 4~5 倍。

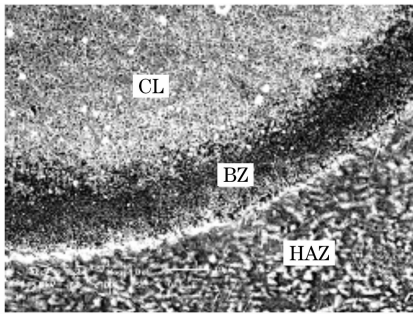


图 4 激光熔覆层横截面的扫描电镜照片(单脉冲能量 20 J, 脉宽 8 ms,扫描速度 66 mm/min,氩气保护)

Fig. 4 SEM cross-section of laser cladding layer with pulse energy of 20 J, pulse width of 8 ms, scanning rate of 66 mm/min and argon shield

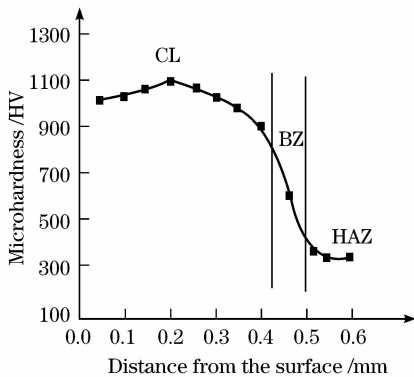


图 5 熔覆层硬度分布曲线

Fig. 5 Microhardness of the laser cladding layer varying with the distance from surface

转子叶片是航空发动机结构件中的关键零部件之一,由于其为高速旋转的动部件,数量多、形体单薄、载荷状况严酷、工作环境复杂,其故障占发动机总故障的 40%以上。为修复某航空叶片损伤,应用 CO₂ 激光进行了表面熔覆涂层试验^[20],得到内部无明显缺陷和基体结合良好的熔覆层。熔覆层显微硬度达到 450 HV,比基体高出 40%~50%;熔覆层的耐磨损性比基体提高约 1~2 倍。以上两种试验均实现了修复钛合金损伤的同时提高性能的目的。

航空发动机涡轮导向器叶片,涡轮叶片的热疲劳、热腐蚀、冲蚀乃至烧损是典型故障。罗根香等^[21]在 K418 镍基高温合金表面制备不同化学成分的 Ni-Cr-Ti-Al 涂层,形成的 TiAl 合金与 K418 合金之间成分和性能良好过渡,为实现 TiAl 合金/

K418 合金异种合金间的扩散连接提供了良好的组织基础。

在此类损伤修复工艺研究中引入了功能梯度材料的概念,以求在保持基体原有性能的前提下显著提高表面的性能,缓和残余热应力。以 Ti600 为基体制备 (Ti+Al/Ni)/(Cr₂O₃+CeO₂) 耐磨耐蚀功能梯度熔覆层的实验取得了明显进展。实验获得了缺陷少、组织均匀的三层梯度熔覆层,如图 6 所示。各梯度层之间可清晰看到垂直于生长高度方向的相对

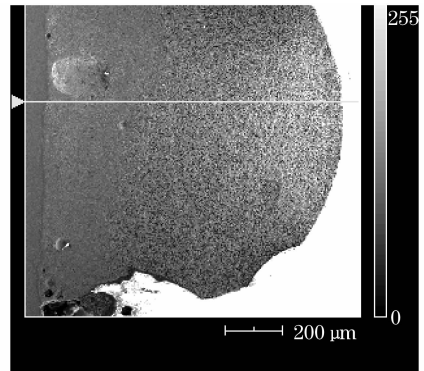


图 6 熔覆层横截面形貌与线扫描的路径

Fig. 6 Cross-section morphology and line scanning path of laser cladding

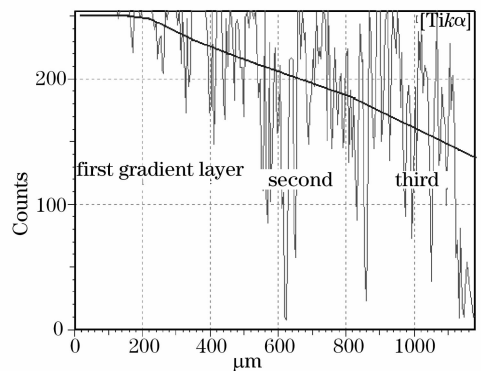


图 7 Ti 元素的梯度分布

Fig. 7 Graded distribution profile of Ti

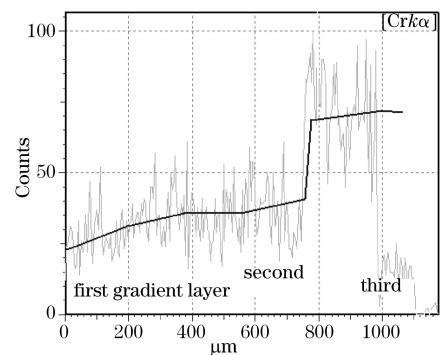


图 8 Cr 元素的梯度分布

Fig. 8 Graded distribution profile of Cr

平行且距离均匀的重熔带存在。元素线扫描结果表明 Ti, Al, Ni, Cr 等元素含量发生了较为理想的梯度变化,如图 7,8 所示。表明随着氧化铬陶瓷颗粒含量的改变,各梯度层组织均发生明显的梯度变化。

3.3 激光切割

激光切割变形小、精度高、切割效率高。在飞机结构战伤抢修领域,应用激光切割技术可以快速切除损伤、变形的结构,为实施修复创造施工条件,与手工切割相比效率可大大提高。

3.3.1 钛合金切割

钛合金具有高的比强度,在多种环境中有良好的耐腐蚀性能。但是由于钛合金塑性差、回弹大,常温下加工比较困难。钛合金的激光切割实验表明,采用氩气、氮气气体保护均可获得外形较为光滑、切口小于 1 mm 的切缝,效率显著高于手工切割,可以满足飞机结构抢修中损伤清理的需求,且使用功率在千瓦级以下的 YAG 激光就可以实现厚度达 4 mm 的钛合金板材的切割,如图 9 所示。

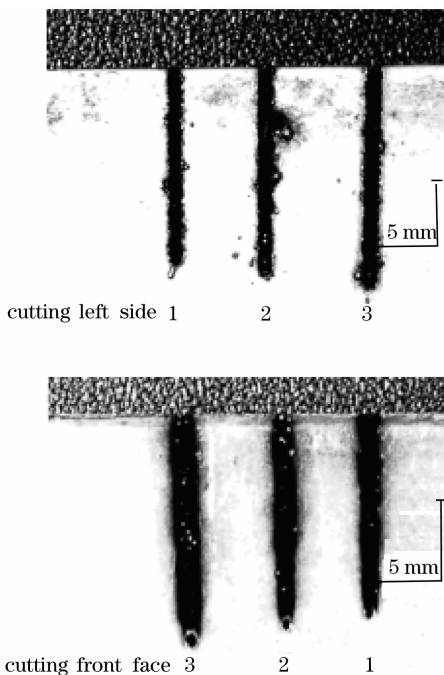


图 9 钛合金激光切割

Fig. 9 Laser cutting of titanium alloy

3.3.2 复合材料切割

复合材料由于具有比强度高、比刚度,抗疲劳、抗腐蚀性能好,力学性能可优化设计等优点,在航空结构的应用中比例逐渐上升。在复合材料结构损伤抢修过程中,采用机械切割工艺切割效率低,质量差,容易产生切口损伤和分层。对于碳纤维增强复合材料,由于纤维表面光滑,与各种树脂基体材料的

结合性能受到限制,所以层间剪切强度低,切割加工的分层现象尤为严重。而激光切割具有切割速度快、切缝小、无二次损伤的优点。实验表明,应用较小的激光功率便可获得光滑、美观、无损伤的切口,是较理想的复合材料损伤部位清理技术。

4 结 论

飞机损伤抢修技术研究是一个系统工程,除了材料与冶金问题外仍有许多工程实际问题有待解决,如加工区域的全方位保护、加工设备的小型化、狭小空间的施工等。所有工艺、设备均需要在外场使用条件下进一步固化、改进。

参 考 文 献

- Hu Fangyou, Hu Baoliang. Meet modern maritime war, accelerate the building of naval aircraft battle damage recovery service[J]. *National Defence Science*, 2008, **29**(3): 61~66
胡芳友, 胡宝良. 适应现代海战需要, 加快我海军飞机战伤抢修建设[J]. *国防科技*, 2008, **29**(3): 61~66
- Hu Fangyou. Naval Aircraft Battle Damage Recovery Service Application Manual[M]. Qingdao: Equipment Department of the Navy, 2006
胡芳友. 海军飞机战伤抢修实用手册[M]. 青岛: 海军装备部, 2006
- L. Sextona, S. Lavina, G. Byrnea *et al.*. Laser cladding of aerospace materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, **122**(1): 63~68
- M. B. Henderson, D. Arrellb, R. Larsson *et al.*. Nickel-based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2004, **9**(1): 13~21
- Petri Vuoristo, Jorma Vihinen. High-performance laser coatings for manufacturing and maintenance of industrial components and equipment [J]. *Kunnossapito*, 2002, **5**: 1~7
- Huang Qingnan, Wan Mingxue, Shen Xiuli *et al.*. Application research on laser cladding on turbine sawtooth shrou [J]. *Gas Turbine Test and Study*, 2002, **15**(2): 50~53
黄庆南, 万明学, 申秀丽等. 涡轮叶片锯齿冠激光熔敷的应用研究[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2002, **15**(2): 50~53
- Jiang Wei, Hu Fangyou, Ji Bolin. Applying study of laser cladding in repairing of engine turbine nozzle wane [J]. *Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute*, 2005, **20**(2): 221~223
姜伟, 胡芳友, 吉伯林. 激光熔覆技术在发动机涡轮导向器修复中的应用[J]. *海军航空工程学院学报*, 2005, **20**(2): 221~223
- Cui Aiyong, Hu Fangyou, Hui Li *et al.*. Technical study on cracks repair with CO₂ laser [J]. *New Technique New Process*, 2007, (2): 61~62
崔爱永, 胡芳友, 回丽等. 钛合金裂纹激光修复工艺研究[J]. *新技术新工艺*, 2007, (2): 61~62
- Sun Fujuan, Tong Chonglou, Hu Fangyou. Study of technological parameters for LY12CZ laser lap welding [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2006, (10): 79~82
孙福娟, 仝崇楼, 胡芳友. LY12CZ 铝合金激光搭接焊工艺研究[J]. *现代制造工程*, 2006, (10): 79~82
- Sun Fujuan, Hu Fangyou, Tong Chonglou *et al.*. Study on canceling the weld's flaw for laser welding of LY12CZ to improve

- intensity[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2006, (6): 78~80
- 孙福娟, 胡芳友, 仝崇楼等. 消除铝合金激光焊接缺陷与提高焊缝强度研究[J]. *现代制造工程*, 2006, (6): 78~80
- 11 Sun Fujuan, Gong Yongfei, Zhang Danfeng *et al.*. Application of gaswelding flux in laser weld of LY12CZ [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2008, (5): 89~92
- 孙福娟, 宫永飞, 张丹峰等. 气焊熔剂在铝合金激光焊接中的应用[J]. *现代制造工程*, 2008, (5): 89~92
- 12 Xu Lianghong, Tian Zhiling, Peng Yun *et al.*. Microstructure and mechanical properties of high strength aluminum alloy laser welds[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 456~461
- 许良红, 田志凌, 彭云等. 高强铝合金的激光焊接头组织及力学性能[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 456~461
- 13 Hu Fangyou, Liu Hongjun. Effect of laser cladding on aluminum alloy fatigue properties[J]. *Applied Laser*, 2005, **25**(1): 4~6
- 胡芳友, 刘洪军. 激光熔覆对铝合金疲劳性能的影响[J]. *应用激光*, 2005, **25**(1): 4~6
- 14 Sun Fujuan, Liu Hongjun, Hu Fangyou. Effect of laser surface remelting on performance of LY12CZ [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1159~1162
- 孙福娟, 刘洪军, 胡芳友. 激光表面重熔对 LY12CZ 性能的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1159~1162
- 15 Sun Fujuan, Hu Fangyou, Huang Xuren *et al.*. Fatigue performance of laser cladding on LY12CZ[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1073~1077
- 孙福娟, 胡芳友, 黄旭仁等. LY12CZ 激光熔覆的疲劳性能[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1073~1077
- 16 Guo Yongli, Liang Gongying, Li Lu. Laser cladding repairation of aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 303~306
- 郭永利, 梁工英, 李路. 铝合金的激光熔覆修复[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 303~306
- 17 Cui Aiyong, Hu Fangyou, Hui Li *et al.*. Microstructure and wear-resisting property of (Ti+ Al/Ni)/(Cr₂O₃+ CeO₂) laser cladding on titanium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 438~441
- 崔爱永, 胡芳友, 回丽等. 钛合金表面激光熔覆(Ti+Al/Ni)/(Cr₂O₃+CeO₂)复合涂层组织与耐磨性能[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 438~441
- 18 Cui Aiyong, Hu Fangyou, Hui Li *et al.*. The laser cladding of (Ti+ Al/Ni)/(Cr₂O₃+ CeO₂) on titanium alloy surface[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(S1): 47~50
- 崔爱永, 胡芳友, 回丽等. 钛合金激光熔覆(Ti+Al/Ni)/(Cr₂O₃+CeO₂) [J]. *中国激光*, 2007, **34**(S1): 47~50
- 19 Wang Weifu, Sun Fengjiu, Wang Maocai. Laser cladding Ni-based Tribaloy 700 coatings on TA2 titanium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1710~1715
- 王维夫, 孙凤久, 王茂才. TA2 钛合金表面激光熔覆 Ni 基 Tribaloy 700 涂层[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1710~1715
- 20 Hu Bin, Hu Fangyou, Jiang Wei *et al.*. Multi-layer laser cladding of K418 nickel-base high-temperature alloy [J]. *New Technique New Process*, 2008, (3): 80~82
- 胡滨, 胡芳友, 姜伟等. K418 镍基高温合金多层激光熔覆[J]. *新技术新工艺*, 2008, (3): 80~82
- 21 Luo Genxiang, Wu Guoqing, Huang Zheng *et al.*. Microstructures of Ni-Cr-Ti-Al laser cladding on K418 superalloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 283~287
- 罗根香, 吴国清, 黄正等. K418 合金激光熔覆 Ni-Cr-Ti-Al 涂层的组织研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 283~287