

文章编号: 0258-7025(2009)06-1585-06

AlSi12 粉激光成形修复 7050 铝合金组织

王小艳 陈 静 林 鑫 张 方 黄卫东

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 采用 300 W YAG 激光器对 7050 铝合金预拉伸板进行激光成形修复实验研究。实验中选用的粉末是 AlSi12, 通过多道多层激光修复实验, 得到了优化的工艺参数。分析了冶金缺陷产生的原因及消除措施, 并分析激光修复区的组织形成和分布规律。实验结果表明, 修复过程中产生的冶金缺陷主要有界面熔合不良、气孔和液化裂纹。通过对基材表面进行化学处理、优化修复工艺参数、改变粉末状态等方法获得了修复区内无气孔、裂纹, 同时界面熔合良好的修复试样。组织分析结果表明, 修复区底部为 α -Al 固溶体树枝晶和少量的枝晶间 Al-Si 共晶组织, 随着熔覆层数的增加, 共晶体积分数不断增加, 同时 α -Al 固溶体树枝晶组织不断细化, 并发生柱状晶/等轴晶转变, 在修复区顶部获得了完全细化的等轴晶组织。

关键词 激光技术; 显微组织; 激光成形修复; 冶金缺陷; 7050 铝合金

中图分类号 TG665 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093606.1585

Microstructures of Laser Forming Repair 7050 Aluminum Alloy with AlSi12 Powder

Wang Xiaoyan Chen Jing Lin Xin Zhang Fang Huang Weidong

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract Laser forming repair pre-tensile 7050 aluminum alloy with AlSi12 powder was studied using 300 W YAG laser. The optimized process parameters were obtained in multi-trace and multi-layer laser repair experiment. The elimination measures of metallurgical defects and the microstructures distribution of repaired zone were analyzed. It is found that the metallurgical defects including illbond, porosities and liquefied cracks can be eliminated through chemical treatment for the substrate surface, optimizing the process parameters and changing the powder condition. The microstructure at the bottom of the repaired zone is composed of the α -Al solid solution dendrite and a small number of Al-Si eutectic. With the increasing of the cladding layers, the eutectic volume fraction increases continuously, the α -Al solid solution dendrite is refined and the transformations from columnar grain to equiaxed grain take place. Finally, the completely refined equiaxed grains are achieved at the top of the repaired zone.

Key words laser technique; microstructure; laser forming repair; metallurgical defect; 7050 aluminum alloy

1 引 言

高强铝合金作为一种重要的轻金属材料, 以其优良的物理、化学和机械性能, 在航空航天工业中被广泛应用^[1]。高强铝合金结构件在使用过程中容易产生疲劳裂纹及腐蚀缺陷, 这些缺陷的存在将显著降低零件的使用性能, 严重时会导致零件报废, 造成

巨大的经济损失。因此有必要寻求一种适合高强铝合金的修复方法。

传统的修复技术主要有电镀、电弧或火焰堆焊、热喷涂(火焰、等离子体)等。这些修复技术已经在零件修复中获得了重要应用, 但是这些技术本身还存在一定的不足之处。

收稿日期: 2008-11-18; 收到修改稿日期: 2008-12-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50131010)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0879)、国家 863 计划(2006AA03Z0449)和国家 973 计划(2007CB613805)资助课题。

作者简介: 王小艳(1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光修复方面的研究。E-mail: wangxiaoyan1022@126.com

导师简介: 陈 静(1970-), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: phd2003cjj@nwpu.edu.cn (通信联系人)

激光成形修复技术是将激光立体成形技术应用用于零件上具有较复杂形状、一定深度缺陷或损伤的高性能成形修复。其主要特点是热输入小、变形小以及热影响区小,这对金属结构件的修复是非常重要的^[2]。目前,国外在高强铝合金修复方面已经取得了一些进展,澳大利亚的斯温伯尔尼工业大学对 7075 铝合金的激光熔覆修复进行了研究,主要分析了工艺参数对熔覆特性的影响^[3]。国内在铝合金表面改性方面做了大量的研究^[4~12];北京工业大学对高强铝合金的激光填粉焊接进行了研究^[13];西安交通大学采用 5 kW CO₂ 激光器对 7050 铝合金的激光熔覆修复组织及性能进行了研究^[14]。为了尽可能地减小热输入,从而控制修复结构的变形问题,本文主要研究以 300 W 小功率 YAG 固体激光器为光源时,在激光成形修复 7050 铝合金过程中产生各种冶金缺陷的原因及其消除措施,并分析 3 个不同区域(激光修复区、热影响区和基材)的组织形成和分布规律。

2 实 验

2.1 激光成形修复系统

本实验是在西北工业大学凝固技术国家重点实验室建立的移动式激光成形修复系统上完成的,该系统由 300 W YAG 固体激光器、FANUC 六轴机器人、粉末输送系统、控制系统等集成。整个修复过程在防氧化保护箱中进行。修复前对防氧化保护箱进行氩气置换,以防止 7050 铝合金发生氧化。保护气和载粉气均采用纯氩。

2.2 实验材料

修复基材为 7050 铝合金预拉伸板,基材成分见表 1;熔覆材料为 AlSi12 合金粉末,粉末颗粒尺寸为 40~160 μm,粉末成分见表 2。

表 1 7050 铝合金成分(质量分数,%)

Table 1 Compositions of the 7050 aluminum alloy (mass fraction, %)

Si	0.12	Cr	0.04
Fe	0.15	Zn	5.7~6.7
Cu	2.0~2.6	Ti	0.06
Mn	0.10	Zr	0.08~0.15
Mg	1.9~2.6	Al	bal

粉末是如图 1 所示的规则球形粉末,实验前将粉末在 120 ℃ 的真空炉中烘干 5 h;待修复试样为 90 mm×50 mm×8 mm 的 7050 铝合金预拉伸板材。为了去除机械加工带来的油污和氧化膜,先在

70 ℃,质量分数为 8% 的 NaOH 溶液中浸泡 3 min 后,然后在体积分数为 30% 的 HNO₃ 溶液中浸泡直到表面恢复金属亮色,最后用清水冲洗、烘干。

表 2 AlSi12 合金粉末成分(质量分数,%)

Table 2 Compositions of the AlSi12 alloy powder (mass fraction, %)

Si	11.25	Zn	<0.01
Fe	0.14	C	0.008
Cu	<0.01	Al	bal
Mg	0.048		

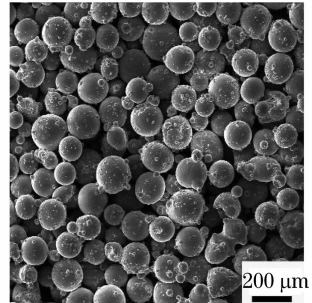


图 1 AlSi12 合金粉末颗粒形貌

Fig. 1 Morphology of AlSi12 alloy powder

2.3 实验方法

修复工艺参数为:单点能量输入 180~300 J,光束移动速度 2~4 mm/s,单层移动行程 0.1 mm,送粉率 3~8 g/min,搭接率 30%~40%。激光成形修复后,沿垂直于光束扫描方向将试样切开,用 Keller's 腐蚀剂进行腐蚀,腐蚀剂成分为 HF, HNO₃, HCL 和 H₂O 的混合溶液。在光学显微镜下观察冶金缺陷和组织结构,在扫描电子显微镜(SEM)下观察微观形貌及组织特征。

3 实验结果与分析

3.1 冶金缺陷

3.1.1 界面结合

图 2 所示为激光成形修复 7050 铝合金界面结合处照片,图 2(a)为界面熔合不良缺陷。可以看到熔覆层与基材之间有明显的界限,而熔覆层内部没有出现熔合不良缺陷,这主要是由于激光成形修复工艺参数不匹配所造成的。谭华^[15]采用比色测温计测量薄板试样激光立体成形熔池温度变化时曾经发现,初始熔覆层的熔池温度通常较低,但熔池温度随着熔覆层数的增加快速升高,当熔覆层数超过 3 层时,熔覆过程中熔池温度已经基本保持稳定,即熔覆过程达到热稳定状态。实际上,由于铝合金的导热率高,同时对激光的反射率高达 80% 以上,激光

束加热的热量只有很少一部分能够被吸收。在这种条件下基材加热熔化形成熔池需要的能量相对较高,当成形修复工艺不匹配导致输入能量不足时就会导致初始熔覆层熔池温度较低,若此时送粉量较大,熔池将不能充分熔化进入熔池的粉末,造成基材与熔覆层界面处出现熔合不良现象。随着熔覆层数的增加,层与层之间存在温度累积效应,熔池温度逐渐升高,当熔覆到一定层数时,熔池温度将快速达到

热稳定状态,使得界面熔合不良缺陷消除。因此,消除界面熔合不良缺陷的措施是通过调整激光修复工艺参数。例如提高单点能量输入,可以得到图 2(b)所示界面,可以看出,当单点能量输入由 160 J 增加到 190 J 时界面结合有所改善,但还存在少量断续的熔合不良缺陷。适当将单点能量输入增加到 220 J,将脉宽由 3 ms 增加到 5 ms 时,得到图 2(c)所示的界面结合良好的试样。

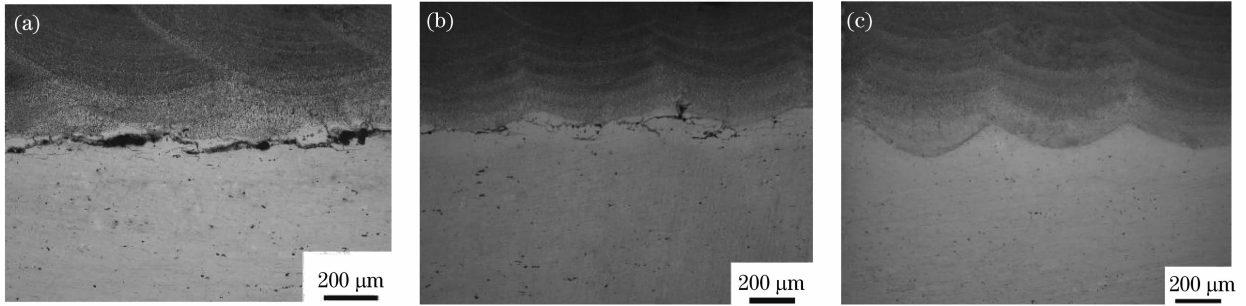


图 2 AlSi12 激光成形修复 7050 铝合金界面。单点能量和脉宽分别为 (a) 160 J, 3 ms; (b) 190 J, 3 ms; (c) 220 J, 5 ms
Fig. 2 Interface of AlSi12 laser forming repair 7050 aluminum alloy, with the single-point energy and pulse width of 160 J and 3 ms (a); 190 J and 3 ms (b); 220 J and 5 ms (c), respectively

3.1.2 气孔

图 3 所示为采用球形 AlSi12 粉末进行 7050 铝合金激光成形修复过程中出现的气孔缺陷。气孔主要有两类:熔覆层与基材的界面处产生的氧化膜气孔[图 3(a)所示气孔 I]和熔覆层内部产生的球形气孔[图 3(b)所示气孔 II]。

分析认为气孔产生的原因主要有两方面,一是由于基材表面残留的氧化膜引起的(气孔 I)。当熔覆第一层时,熔池底部的温度低,而氧化膜的熔点很高(Al_2O_3 的熔点约为 2050 $^{\circ}\text{C}$),基材表面未除净的氧化膜不能完全熔化而残存下来。氧化膜中的水分

因受热分解析出氢,并在氧化膜上萌生气泡。由于气泡是附着在残存的氧化膜上,所以不容易脱离浮出。二是由于粉末放置较长时间受潮而引起的(气孔 II)。当粉末中含有水分时,受到激光束加热就会有大量的气体产生,部分气体来不及逸出便被“包裹”在金属中,形成图 3(b)所示的球形气孔。

通过对基材表面进行化学处理,彻底清除基材表面的氧化膜。同时对粉末进行真空干燥处理,可以减少和消除 7050 铝合金激光成形修复气孔缺陷,如图 3(c)所示。

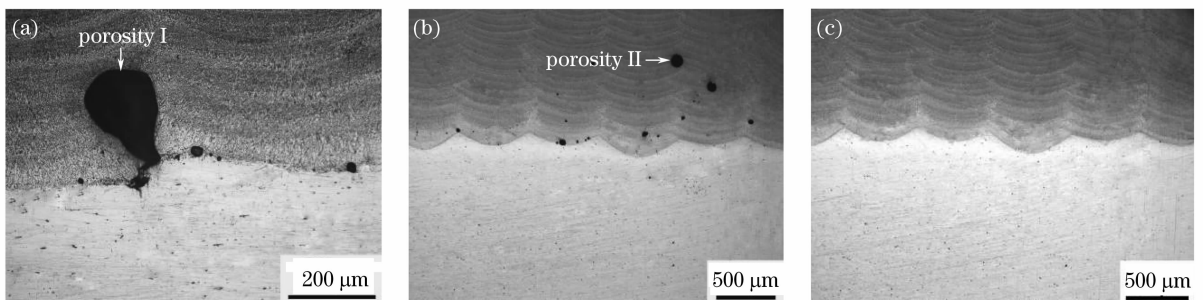


图 3 激光修复试样气孔缺陷照片。(a) 基材表面未进行化学处理;(b) 基材表面化学处理;(c) 无气孔缺陷
Fig. 3 Porosity in the laser repaired sample. (a) substrate surface without chemical treatment; (b) substrate surface with chemical treatment; (c) no porosity

3.1.3 裂纹

图 4(a)所示是铝合金激光熔覆过程中在热影响区靠近基材一侧产生的液化裂纹。这主要是由于

在 7050 铝合金激光成形修复过程中,热影响区晶界发生过烧,导致晶界低熔点共晶发生局部熔化。由于 7050 铝合金凝固区间宽,熔覆层凝固时产生的较

大的拉伸应力将会把晶界拉开,从而形成液化裂纹。实验中发现,当单点能量较大,送粉率较小时,激光熔覆第一层时重熔深度大,增加了热影响区的宽度,易于形成液化裂纹。避免热影响区液化裂纹的主要

措施是适当调整工艺参数,降低点单能量输入,适当增大送粉率,减小重熔深度,降低热影响区宽度。图4(b)显示了当调整工艺参数后,试样的热影响区没有液化裂纹。

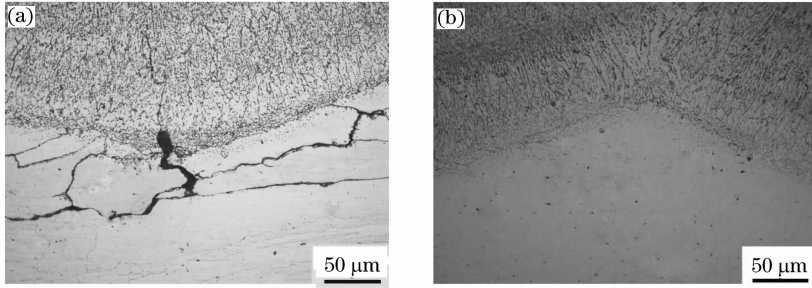


图4 激光修复7050铝合金试样裂纹缺陷。(a)单点能量为250 J;(b)单点能量为220 J

Fig. 4 Crack defect in the laser repaired 7050 aluminum alloy sample. (a) single-point energy is 250 J; (b) single-point energy is 220 J

3.2 组织分析

图5所示为典型的7050铝合金激光修复试样的微观组织,从宏观上看,修复试样组织由3部分组成:底部为7050铝合金基材区,中部为热影响区,上部为激光修复区。从图中可以看出,热影响区中组织略有长大。

图6所示是激光成形修复7050铝合金不同区域微观组织的高倍光学照片。从图6(a)可以看出,基材区晶粒沿着同一个方向被拉长,呈现出纤维状组织。与基材组织相比,7050铝合金激光修复区组织极其细小,从修复区底部到顶部依次出现树枝晶组织、树枝晶+共晶混合组织、等轴晶组织。

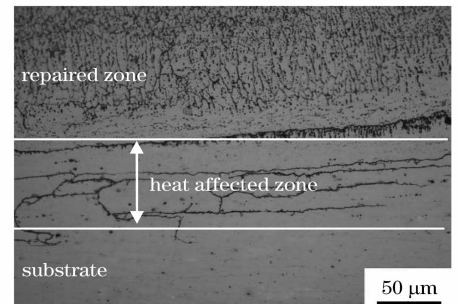


图5 7050铝合金激光修复试样的显微组织

Fig. 5 Microstructures of laser forming repaired 7050 aluminum alloy

在凝固过程中,凝固组织形貌主要取决于局部

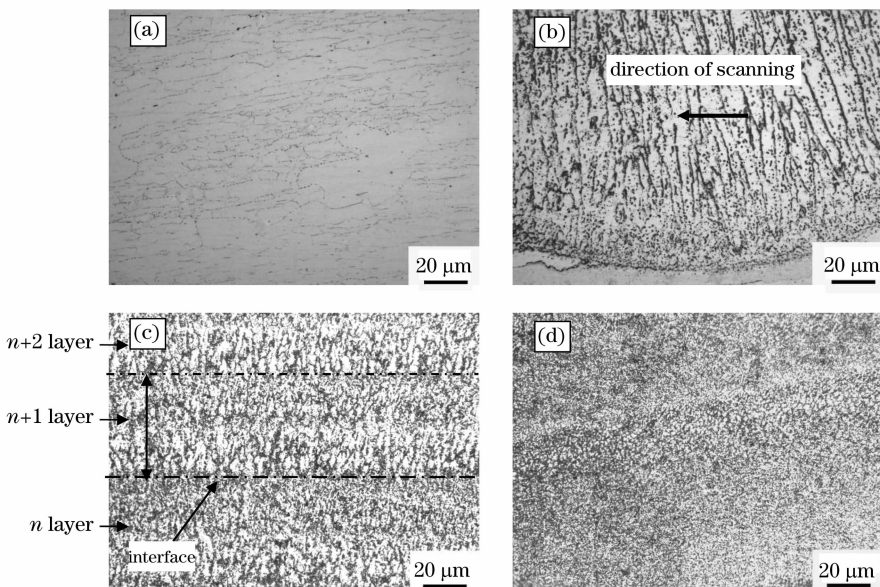


图6 激光修复试样不同区域组织形貌特点。(a)基材;(b)修复区底部;(c)修复区中部;(d)修复区顶部

Fig. 6 Micrograph of the different zones of laser repaired sample. (a) substrate; (b) repaired zone in bottom; (c) repaired zone in middle; (d) repaired zone at the top

凝固条件(凝固速度 V 和固液界面的温度梯度 G)。在激光立体成形过程中,温度梯度高,凝固速度低时容易形成柱状晶;温度梯度低,凝固速度高时容易发生柱状晶向等轴晶的转变。图 6(b)所示的修复区底部是典型的定向凝固柱状树枝晶组织,树枝晶主轴都朝着熔覆沉积方向生长,并略向扫描方向倾斜,呈现明显的外延生长特性。这是因为,基于激光熔池本身的传热特征,凝固始终自熔池底部向熔池顶部进行,而在凝固过程中液态金属与其固相基底始终保持接触。相比于熔池中的形核,熔池与基底界面处的过冷度通常最低,也就是说提供了很好的外延生长基底,进而导致熔池随后的冷却凝固过程呈现出典型的强制性凝固外延柱状生长特点^[16]。图 6(c)所示的修复区中部也是具有定向凝固特征的组织,不过在每一熔覆层顶部出现了明显的柱状晶/等轴晶转变。形成原因是在熔池的底部温度梯度最高,凝固速度最低,而在熔池顶部温度梯度最低,凝固速度最高,特别是随着熔覆层数的增加,熔池整体温度梯度

降低,使得在修复区中部的熔覆层出现了柱状晶/等轴晶转变;图 6(d)所示的修复区顶部则表现出极其细小的完全等轴晶组织。这同样是由于顶部熔覆层的熔池温度梯度明显降低导致柱状晶/等轴晶转变区域扩大至在熔池大部分区域发生所致。

图 7 所示是扫描电镜下对修复区底部、中部和顶部组织形貌的进一步观察。图中灰色区域为 α -Al 固溶体, α -Al 固溶体之间的白色发亮的区域为 Al-Si 共晶。图 7(a)所示的修复区底部组织是由 α -Al 固溶体树枝晶和枝晶间分布着少量的 Al-Si 共晶组成的具有方向性的细长树枝晶组成。图 7(b)显示为修复区中部不同熔覆层的界面处组织。可以看到,后续熔覆层的 α -Al 固溶体枝晶由前一层顶部的等轴晶外延生长,同时,枝晶间 Al-Si 共晶组织的体积分数相比修复试样底部明显增多。图 7(c)所示的修复区顶部是由细化的生长方向不一的等轴 α -Al 固溶体和大量细小的 Al-Si 共晶组成的细晶组织,尺度在 $0.5\sim 1\ \mu\text{m}$ 。

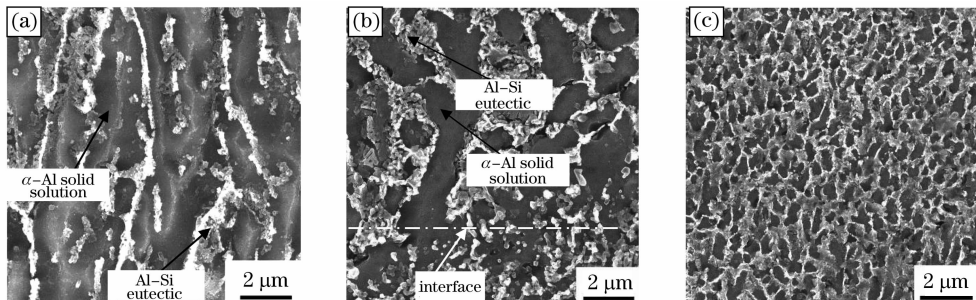


图 7 扫描电镜组织观察结果。(a) 修复区底部;(b) 修复区中部不同熔覆层界面处;(c) 修复区顶部

Fig. 7 Microstructure of the SEM results. (a) repaired zone in bottom; (b) interface of different cladding layers of repaired zone in middle; (c) repaired zone at the top

4 结 论

1) 确定了优化的激光工艺参数为单点能量 220 J,脉宽 5 ms,频率 15 Hz,扫描速度 2 mm/s,送粉量 $3\sim 5\ \text{g}/\text{min}$ 。

2) 修复过程中发现界面熔合不良、气孔和液化裂纹等冶金缺陷,通过选用干燥的球形 AlSi12 合金粉末,采用化学方法彻底清除基材表面的氧化膜,适当选取激光工艺参数等措施可以有效防止冶金缺陷的产生。

3) 修复区底部是由 α -Al 固溶体树枝晶组织和枝晶间少量的 Al-Si 共晶组成的,随着熔覆层数的增加,共晶体积分数不断增加,同时 α -Al 固溶体树枝晶组织不断细化,并在修复区顶部获得了完全等轴和细化的 α -Al 固溶体树枝晶组织。

参 考 文 献

- Zuo Tiechuan. Laser Materials Processing of High Strength Aluminum alloys[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002
左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- Xue Lei, Huang Weidong, Chen Jing *et al.*. Application of laser forming repair technology on the aerial castings[J]. *Foundry Technology*, 2008, **29**(3): 391~394
薛蕾, 黄卫东, 陈静等. 激光成形修复技术在航空铸件修复中的应用[J]. *铸造技术*, 2008, **29**(3): 391~394
- Y. Durandet, M. Brandt, Q. Liu. Challenges of laser cladding Al 7075 alloy with Al-12Si alloy powder[J]. *Materials Forum*, 2005, **29**: 136~142
- Huang Kaijin, Lin Xin, Li Chaowu *et al.*. Microstructure and wear behavior of laser cladding Zr-based composite coatings on AA7075 aluminum alloy[J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(6): 398~401
黄开金, 林鑫, 李朝武等. AA7075 铝合金表面激光熔覆 Zr 基复合涂层的组织与磨损行为[J]. *应用激光*, 2006, **26**(6): 398~401

- 5 Liu Hongbin, Wang Cunshan, Gao Yali *et al.*. Laser cladding amorphous composite coating of Cu-Zr-Al on magnesium alloy surface[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 709~713
刘红宾,王存山,高亚丽等. 镁合金表面激光熔覆 Cu-Zr-Al 非晶复合涂层[J]. 中国激光, 2006, **33**(5): 709~713
- 6 Niu Xin, Chao Mingju, Wang Wenli *et al.*. In situ synthesized NbC particulate reinforced Ni-based composite coatings by laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 987~992
牛 薪,晁明举,王文丽等. 原位生成 NbC 颗粒增强镍基激光熔覆层[J]. 中国激光, 2006, **33**(7): 987~992
- 7 Liang Gongying, Huang Junda, Su Junyi. Effect of amorphous structure in the laser clad zone on tribological characteristics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(10): 953~957
梁工英,黄俊达,苏俊义. 激光熔覆层中非晶组织对摩擦学的影响[J]. 中国激光, 2000, **A27**(10): 953~957
- 8 Hu Youfang, Liu Hongjun. Effect of laser cladding on aluminum alloy fatigue properties[J]. *Applied Laser*, 2005, **25**(1): 4~6
胡友芳,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
- 9 R. Braun, G. Roth. Laser beam welded T-joints of 6013 aluminium alloy sheet[J]. *Materials Forum*, 2004, **28**: 832~837
- 10 Lu Changliang, Hu Youfang, Cui Aiyong *et al.*. Research on laser cladding of deformed aluminum alloy[J]. *China Surface Engineering*, 2007, **20**(6): 44~47
卢长亮,胡友芳,崔爱永等. 变形铝合金激光熔覆工艺研究[J]. 中国表面工程, 2007, **20**(6): 44~47
- 11 Wang Xinkun, Wang Dongfeng. In-situ rapid renovation process for local corrosion area of aircraft skin[J]. *Electroplating & Finishing*, 2005, **24**(4): 34~35
王新坤,王东峰. 飞机蒙皮局部腐蚀的原位快速修复工艺[J]. 电镀与涂饰, 2005, **24**(4): 34~35
- 12 Yue Canfu, Wu Shidong. Laser cladding and its application to repairing underwater weapons[J]. *Torpedo Technology*, 2007, **15**(1): 1~5
岳灿甫,吴始栋. 激光熔覆及其在水中兵器修复上的应用[J]. 鱼雷技术, 2007, **15**(1): 1~5
- 13 Xiao Rongshi, Chen Kai, Zuo Tiechuan. Development of laser beam welding of high strength aluminum alloys[J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2): 206~208
肖荣诗,陈 凯,左铁钊. 高强铝合金激光焊接新进展[J]. 应用激光, 2002, **22**(2): 206~208
- 14 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
- 15 Tan Hua. Temperature measurement and research on microstructure controlling in laser rapid forming process[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005. 49
谭 华. 激光快速成形过程温度测量及组织控制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005. 49
- 16 Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Laser Solid Forming [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007. 97~128
黄卫东,林 鑫,陈 静等. 激光立体成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007. 97~128