

文章编号: 0258-7025(2008)02-0303-04

# 铝合金的激光熔覆修复

郭永利 梁工英\* 李 路

(西安交通大学理学院, 陕西 西安 710049)

**摘要** 通过对航空航天用超高强 7050 铝合金进行激光熔覆修复的实验研究,探讨了激光熔覆修复铝合金的可行性。实验采用 5 kW CO<sub>2</sub> 连续激光器作为加热源,在惰性气体保护隔离箱中,对 7050 铝合金的板状试样进行了激光单道熔覆、多道搭接熔覆、多层堆积熔覆的实验研究。得到优化的激光熔覆工艺参数,制备了激光熔覆修复试样,并观察了不同激光熔覆区的微观组织以及拉伸断口形貌。实验结果表明,优化激光熔覆工艺参数是:激光功率密度为  $1.84 \times 10^4 \sim 2.12 \times 10^4$  W/cm<sup>2</sup>,扫描速度为 5 mm/s,送粉量为 1.8~2.4 g/min,搭接宽度为 1.5 mm。采用优化工艺参数熔覆,基底和熔覆区形成良好的冶金结合,熔覆后工件表面平整且基底没有变形。同时,采用干燥的氩气加强对激光熔池的保护可以有效消除铝合金激光熔覆中的缺陷。

**关键词** 激光技术;激光熔覆;修复;显微组织;铝合金

中图分类号 TG 665 文献标识码 A

## Laser Cladding Repair of Aluminum Alloy

Guo Yongli Liang Gongying Li Lu

(School of Sciences, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

**Abstract** Experiment of repairing aluminum (Al) alloy 7050 (Al 7050) by laser-cladding techniques was investigated. A 5 kW CO<sub>2</sub> laser was used as the heat source. Experiments of single trace cladding, multi-trace overlapping cladding, and multi-layer cladding were performed on the Al 7050 plates shielded in a closed box with inert gas. A set of optimized laser-cladding repair parameters for damaging Al 7050 samples were found, and the microstructures in different cladding regions and micro-appearances of fracture surface were studied. The optimized laser-cladding repair parameters were laser power of  $1.84 \times 10^4 \sim 2.12 \times 10^4$  W/cm<sup>2</sup>, scanning speed of 5 mm/s, powder feeding rate of 1.8~2.4 g/min, and overlapping width of 1.5 mm. With the optimized repairing parameters, the cladding zone displayed a superior metallurgical bonding with its substrate, the repaired sample surface appeared smooth without any substrate distortion, and the defect formation in the cladding zone was effectively prevented by strengthening shielding of the molten pool with dry argon.

**Key words** laser technique; laser cladding; repairing; microstructure; Al alloy

## 1 引 言

零件在使用过程中容易产生应力开裂、机械磨损等情形,在制造过程中也会因误加工引起缺陷,这些缺陷的存在将显著影响整个工程构件的使用性能,甚至导致报废,从而造成巨大的经济损失。面对这种情况,人们对修复技术做了大量的研究,如激光熔覆、焊接、钨极氩弧堆焊和热喷涂等。而激光熔覆修复技术以其质量高、操作方便、热影响区小等优点受到人们的普遍关注<sup>[1~3]</sup>。

目前,人们对激光熔覆技术用作修复和表面改性等方面做了大量研究<sup>[4~13]</sup>,但是大都集中在钢铁材料、高温合金和钛合金领域。而铝合金在熔覆过程中易氧化、且易产生裂纹和气孔,本文研究了在惰性气体保护下,通过优化激光熔覆参数,避免了修复铝合金试样中容易出现的宏观和微观缺陷。因此,将激光熔覆修复技术应用到铝合金领域,具有广阔的发展前景。

收稿日期:2007-06-19;收到修改稿日期:2007-08-27

基金项目:西北工业大学国家重点凝固实验室对外开放基金资助项目。

作者简介:郭永利(1969—),女,陕西人,工程师,主要从事激光熔覆方面的研究工作。E-mail:gyli89307@163.com

\* 通信联系人。E-mail:gyliang@mail.xjtu.edu.cn

## 2 实验材料、装置及方法

实验选取超高强 7050 铝合金板材为基底材料, 试样尺寸为 40 mm × 50 mm × 10 mm, 成分如表 1 所示。为提高铝合金表面对激光能量的吸收, 在激光熔覆前, 对试样表面进行喷砂处理。熔覆材料为球形粉末, 颗粒直径为 50~100 μm, 成分为 98% Al, 2% Cu(质量分数)。

表 1 铝合金 7050 的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 7050 Al-alloy  
(mass fraction) (%)

Zn	Mg	Cu	Zr	Si	Fe	Al
6.2	2.25	2.3	0.1	≤0.12	≤0.15	Bal.

实验用的激光器为 ROFIN-SINAR850 型 5kW 横流式连续 CO<sub>2</sub> 激光器, 该激光器稳定的输出功率在 700~3500 W 之间。机械操作台为 LPM-480 型数字控制工作台。试样在 x-y 方向的移动靠加载试样的工作台来完成, 而 z 轴方向的移动由激光头来完成。送粉器为自行设计的 JPSF-1 型送粉器。

激光熔覆修复原理如图 1 所示。由于铝合金易氧化, 所以熔覆过程是在充有氩气的置换式隔离仓中进行的。仓中氩气流量为 30 L/min, 激光器侧吹气流量为 25 L/min, 载气流量为 4.5 L/min。多层堆积熔覆时, 为保证到达试样表面的激光功率密度相对稳定, 将激光器工作头沿 z 轴移动 0.5 mm。送粉角度调整到 45° 左右<sup>[14]</sup>, 以减小激光经过粉末云后的衰减效应。

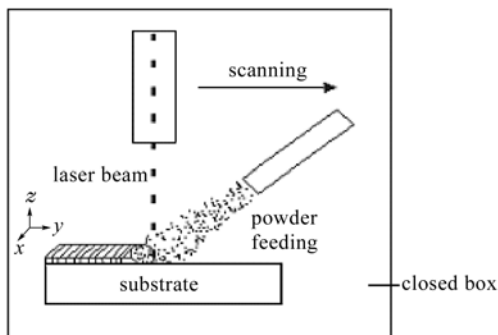


图 1 同步侧向送粉法激光熔覆原理示意图

Fig. 1 A schematic illustration of the side injection laser cladding repair

## 3 实验结果和分析

### 3.1 熔覆层宏观形貌及微观组织

图 2(a) 为激光熔覆工艺参数没有达到最佳匹配时所得的宏观形貌图。由于激光功率密度太低或送粉量过大, 扫描速度相对过快, 导致熔覆层和基底

之间没有形成良好的冶金结合, 且熔覆粉末没有完全熔化, 熔覆层表面出现泪珠状团体, 易脱落。图 2(b) 所示正好与图 2(a) 所示情况相反, 激光能量密度过大, 基底吸收的能量过多而造成大幅度的变形, 破坏了原始基底材料的几何尺寸。图 2(c) 为采用优化激光熔覆工艺参数对试样进行熔覆后的宏观形貌照片, 从图中可看出, 熔覆层表面平整, 没有宏观裂纹出现, 熔覆层组织致密, 且基底没有发生宏观变形。

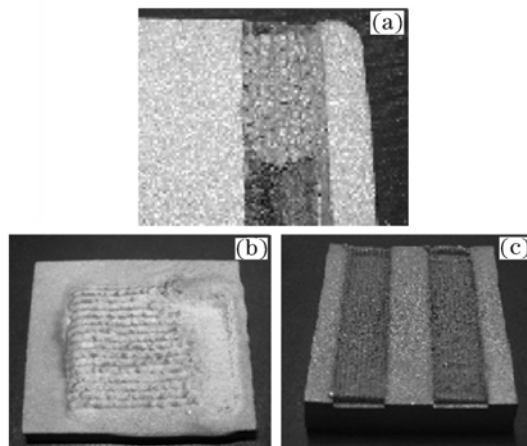


图 2 三种宏观形貌图。(a) 熔覆不完全形貌; (b) 基底变形形貌; (c) 正常熔覆形貌

Fig. 2 Three kind of macro-appearance. (a) brittleness of cladding coat; (b) deformation of substrate; (c) high quality of laser cladding

激光熔覆是激光能量、送粉量及扫描速度等参数之间相互作用的一种非常复杂的过程, 这些参数对熔覆层微观组织有着极其重要的影响。如果这些参数搭配不当, 就会在熔覆区出现气孔、裂纹和凝固缩孔等缺陷, 而此类缺陷的存在严重影响了修复工件的强度和韧性性能, 图 3 为带有微观缺陷的微观组织照片。

经过实验研究发现, 当激光功率密度提高, 或送粉量减少时, 搭接区域得到充分熔化, 可有效减少搭接处气孔和裂纹的产生; 当扫描速度降低时, 冷却速度变慢, 温度梯度减小, 熔体按一定的顺序凝固, 同时熔体中残存的气体有足够的时间逃逸出熔池, 从而可以防止熔覆层中气孔和裂纹的出现。同时, 采用干燥的氩气加强对激光熔池的保护可以有效消除铝合金激光熔覆中的气孔。

在激光单道扫描时, 当激光功率密度为  $2.12 \times 10^4$  W/cm<sup>2</sup>, 光斑直径为 3 mm, 扫描速度为 5 mm/s, 送粉量为 1.8 g/min 时, 可获得宏观和微观上均没有缺陷的熔覆层。图 4 是垂直于激光扫描方向的横截面微观组织照片。图 4(a) 的上半部分为

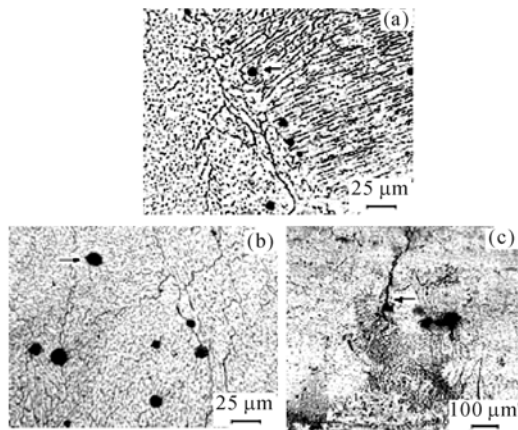


图 3 带有微观缺陷的组织照片

(a) 搭接区气孔; (b) 熔覆区气孔; (c) 搭接区裂纹

Fig. 3 Microstructure of cladding zone with defect. (a) porosity in overlapped zone; (b) porosity in cladding zone; (c) crack in overlapped zone

熔覆区,即熔池的底部,下半部分为基底热影响区。可以看出,激光熔覆区与基底之间存在的结合区是良好的冶金结合,而且在熔覆层和基底中未发现气孔、夹杂和氧化等缺陷。而熔池底部的晶体生长方向是沿着熔池底部向上生长的,为柱状枝晶。从图 4(b)看到熔池中部的晶体为等轴晶。由于熔池的中部温度高,温度梯度极小,所以晶体沿各个方向生长。在熔池上部,由于熔池表面与空气接触,加快了冷却速度,所以显微组织除了等轴晶外,还出现一些方向性较强的枝晶,如图 4(c)所示。

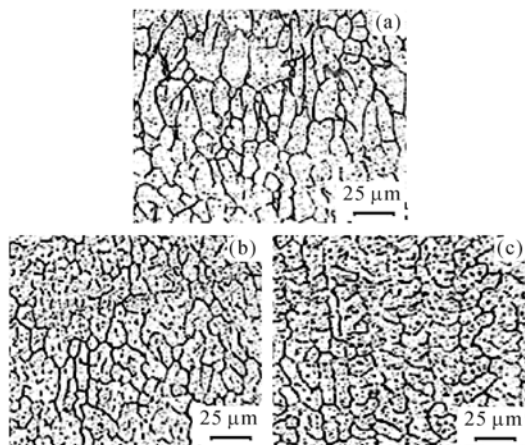


图 4 单道激光熔覆微观组织。(a) 熔池底部微观组织; (b) 熔池中部微观组织; (c) 熔池顶部微观组织

Fig. 4 Microstructure of laser cladding zone by single trace. (a) bottom, (b) midst and (c) top of molten pool

图 5 为单层多道搭接熔覆后,熔覆层的金相组织照片。可以看出,基底和熔覆区之间的结合区仍

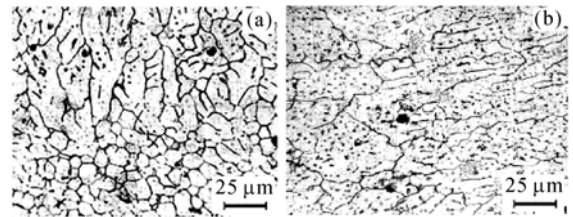


图 5 多道搭接激光熔覆试样的金相组织照片

(a) 基底与熔覆区的过区; (b) 搭接区

Fig. 5 Microstructure of laser cladding zone by multi-trace. (a) microstructure of the bond between substrate and cladding zone; (b) microstructure of overlapping zone

为与基底垂直生长的枝晶组织,但在搭接区域,则出现与基底平行生长的柱状晶组织,在熔池中部和上部则仍为等轴晶。

多层堆积熔覆过程中,由于基底温度升高,对激光的吸收率提高,造成熔覆层晶粒粗大。所以,在此过程中,逐层降低激光功率密度,或者增加扫描速度,以减小单位时间传输到基底表面的激光能量,可获得更好的熔覆质量。

### 3.2 激光熔覆后试样拉伸断口分析

由 INSTRON 电子拉伸仪检测的激光熔覆修复试样的力学性能见表 2 所示,其中 1 号试样为原 7050 铝合金试样,以便与激光修复试样(2 号)相比较。激光熔覆试样采用在平板样品上预加工出 1 mm 深,10 mm 宽的矩形槽,再用激光熔覆修复的方法将其填补,熔覆时保持扫描速度为 5 mm/s,送粉量为 1.8 g/min,搭接量为 1.5 mm,第一层激光功率密度为  $2.12 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ ,第二、三层激光功率密度为  $1.84 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ ,激光修复后的试样被加工成厚度为 5 mm,标距区宽度为 10 mm 的板形拉伸试样。

表 2 激光熔覆修复试样与原始试样的力学性能

Table 2 Mechanical properties of perfect and repaired samples

Sample	$\sigma_b / \text{MPa}$	$\delta / \%$
1	279	12.37
2	252.6	11.97

从表 2 中可以看出,激光修复后试样的抗拉强度  $\sigma_b$  和伸长率  $\delta$  略小于原始试样,可能是由于粉末的合金元素量较少,以及激光熔覆区存在应力。

图 6 为原 7050 铝合金试样拉伸断口的扫描电镜(SEM)照片,该试样经过时效处理。图中所示拉伸断口形貌分析可判断,该试样是以韧窝和准解理相结合的混合性断裂方式,在断面上还可观察到许多微裂纹。

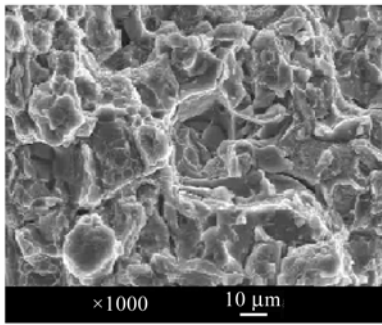


图 6 1 号试样拉伸断口形貌

Fig. 6 SEM images of fracture surface of sample 1

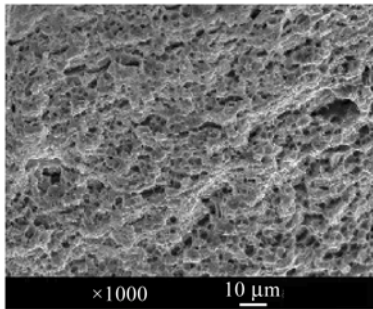


图 7 2 号熔覆区拉伸断口形貌

Fig. 7 SEM images of fracture surface in cladding zone of sample 2

图 7 为激光熔覆修复试样熔覆区拉伸断口微观形貌照片。从图片中看,浅韧窝均匀分布于断面,其断裂方式也是带有准解理与浅韧窝相结合的混合性断裂方式。与 7050 铝合金拉伸断口相比,熔覆区的断裂方式与完好试样基本相同,但是韧窝尺寸减小,断面起伏较差,其强度和韧性均有所降低。

根据修复后试样拉伸断口分析,可从以下方面进一步改进激光熔覆修复试样的力学性能:

1) 增加熔覆粉末中合金元素,形成足够多的固溶强化相,从而提高熔覆层的强度。2) 改善激光熔覆工艺。熔覆层内的残余应力太大,容易形成裂纹,改善熔覆工艺,以降低残余应力。3) 对修复后的试样进行热处理。

## 4 结 论

1) 多层激光熔覆的优化工艺参数为:在第一层熔覆时,激光功率密度为  $1.84 \times 10^4 \sim 2.12 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ ,扫描速度为  $5 \text{ mm/s}$ ,送粉量为  $1.8 \sim 2.4 \text{ g/min}$ ,搭接宽度为  $1.5 \text{ mm}$ ;从第二层熔覆开始,减小激光功率密度,每层熔覆后将激光头和送粉器喷嘴沿  $z$  轴方向提高  $0.5 \text{ mm}$ 。

2) 熔覆区底部的晶粒为垂直于界面生长的柱

状晶,熔覆搭接区的晶粒为沿界面方向生长的柱状晶,熔覆区的中部与上部则以等轴晶为主。

3) 采用优化工艺参数进行熔覆后所获得的试样,其断裂方式是以浅韧窝为主,并带有准解理的混合性断裂方式。

## 参 考 文 献

- 1 Leo Sexton. Laser cladding: repairing and manufacturing metal parts and tools [C]. SPIE, 2003, **4876**:462~469
- 2 Jianli Song, Qilin Deng, Changyuan Chen *et al.*. Rebuilding of metal components with laser cladding forming [J]. *Applied Surface Science*, 2006, **252**(22):7934~7940
- 3 Dae-Young Kim, Jong-Hyun Hwang, Kwang-Soo Kim *et al.*. A study on fusion repair process for a precipitation hardened IN738 Ni-based superalloy [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2000, **122**(3):457~461
- 4 L. Sexton, S. Lavin, G. Byrne *et al.*. Laser cladding of aerospace materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, **122**(1):63~68
- 5 Yali Gao, Cunshan Wang, Man Yao *et al.*. The resistance to wear and corrosion of laser-cladding  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic coating on Mg alloy [J]. *Applied Surface Science*, 2007, **253**:5306~5311
- 6 J. Grum, J. M. Slabe. A comparison of tool-repair methods using  $\text{CO}_2$  laser surfacing and arc surfacing [J]. *Applied Surface Science*, 2003, **208**:424~431
- 7 E. Capello, D. Colombo, B. Previtali. Repairing of sintered tools using laser cladding by wire [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, **164-165**:990~1000
- 8 Jian Gao, Fanet Folkes, Oguzhan Yilmaz *et al.*. Investigation of a 3D non-contact measurement based blade repair integration system [J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, 2005, **77**(1):34~41
- 9 Jianming Zheng, Zhongguo Li, Xi Chen. Worn area modeling for automating the repair of turbine blades [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2006, **29**:1062~1067
- 10 Liu Zhenfeng, Li Zhengjia. Application of laser cladding in aviation industry [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2007, **43**(1):37~40  
刘珍峰,李正佳. 激光熔覆技术在航空工业中的应用[J]. *航空精密制造技术*, 2007, **43**(1):37~40
- 11 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
- 12 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
- 13 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
- 14 Li Junchang. Diffraction of Laser and Calculation on Thermal Acting [M]. Beijing: Science Press, 2002. 486  
李俊昌. 激光的衍射及热作用计算[M]. 北京:科学出版社, 2002. 486