

文章编号: 0258-7025(2007)08-1159-04

# 激光表面重熔对 LY12CZ 性能的影响

孙福娟, 刘洪军, 胡芳友

(海军航空工程学院青岛分院, 山东 青岛 266041)

**摘要** 通过控制 CO<sub>2</sub> 连续激光器的有关工艺参数, 对 LY12CZ 铝合金进行了激光表面重熔, 并对重熔后的试样进行了疲劳实验、疲劳断口分析、金相分析及显微硬度测试。研究表明, LY12CZ 铝合金经过激光重熔后, 疲劳寿命与未经激光处理试样相比无显著差异, 疲劳断口显示疲劳裂纹源区出现在重熔区的表层, 疲劳裂纹沿着柱状晶的晶界扩展, 在基材处瞬断。激光重熔后表层金相组织明显细化, 使得材料表层的显微硬度比基体硬度提高了 40%。

**关键词** 激光技术; 铝合金; 激光重熔; 疲劳寿命; 金相; 显微硬度

**中图分类号** TG 665 **文献标识码** A

## Effect of Laser Surface Remelting on Performance of LY12CZ

SUN Fu-juan, LIU Hong-jun, HU Fang-you

(Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao, Shandong 266041, China)

**Abstract** Through controlling the related processing parameters of continuous wave CO<sub>2</sub> laser, LY12CZ surface was remelted by laser and after remelting the fatigue test, fatigue fracture, microstructure and micro-hardness were analyzed. The result showed that there was no obvious difference between the fatigue life of specimen with and without laser remelting. The fatigue fracture indicated that the fatigue crack resource was at the surface of remelting region, and the crack extended along the grain boundary of the columnar crystal and broke suddenly in the substrate. After remelting, the grains at the surface were obviously fined, and the micro-hardness of the surface was improved by 40% in contrast to substrate.

**Key words** laser technique; aluminum alloys; laser remelting; fatigue life; microstructure; micro-hardness

## 1 引言

激光表面重熔采用聚焦的激光束照射材料, 使材料表面层熔化, 然后依靠材料自身冷却快速凝固<sup>[1~4]</sup>。激光具有功率密度高、工件变形小、工艺简便等特点, 特别是冷却速度很快, 可以获得超细组织和结构, 从而提高材料的硬度、耐磨性和耐腐蚀性能。这使其在世界各国都得到了广泛而又迅速的应用<sup>[5~10]</sup>。针对航空常用材料 LY12CZ 的特点, 选取优化的激光功率、光斑直径、扫描速度等工艺参数, 研究了激光重熔条件下, 材料的疲劳寿命、疲劳断口、金相组织及显微硬度, 并与不作激光处理的标准试样做了相应的对比。

## 2 实验与分析

### 2.1 试样的制备

实验采用 LY12CZ 板材为原始材料, 包覆纯铝层, 热处理状态为淬火和自然时效。规格尺寸如图 1 所示(单位: mm), 按国标/T228-87 执行。

实验共制试样两组十件, 其中一组(五件)用于表面重熔实验, 另外一组(五件)作为对比试样。重熔试样需进行表面预处理, 其工艺流程为打磨、脱脂、碱洗、黑化。打磨的目的是除去包铝层, 脱脂、碱洗的目的主要是去除油污, 增加附着力, 而黑化的目的则是增加表面对激光的吸收率。

收稿日期: 2006-11-07; 收到修改稿日期: 2007-01-29

作者简介: 孙福娟(1970—), 女, 硕士研究生, 主要从事航空材料的激光焊接及激光表面处理工艺研究。

E-mail: sunfujian1970@126.com

导师简介: 胡芳友(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 目前从事激光加工技术在航空飞行器维修领域中的应用研究和新材料新技术的研制开发。E-mail: fangyouhu@hotmail.com

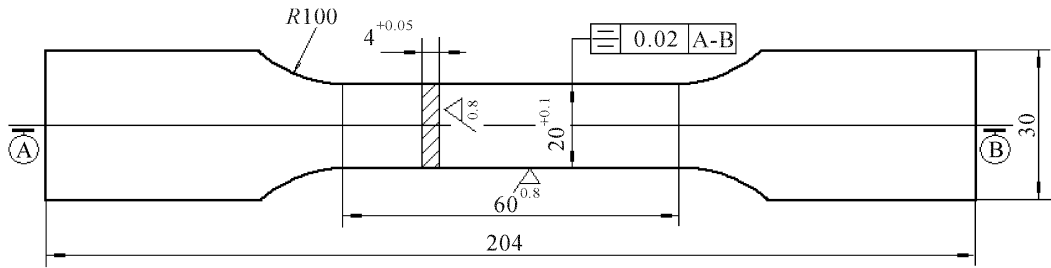


图1 LY12CZ 标准试样

Fig. 1 Standard specimen of LY12CZ

## 2.2 正交实验

实验采用横流、管板式、多模 CO<sub>2</sub> 连续激光器, 波长为 10.6 μm, 最大输出功率为 2 kW。重熔时在试样正反两面全部采用激光多道扫描, 试样表面由 Ar 气保护, 光斑间距 1.6 mm。采用光斑直径、激光功率、激光扫描速度做三因素三水平正交实验。其中光斑直径为 1.8 ~ 2.5 mm, 激光功率 300 ~ 1000 W, 激光扫描速度 5 ~ 40 mm/s, 最终得到一组优化后的工艺参数, 功率 700 W, 光斑直径 1.8 mm, 扫描速度 20 mm/s。

## 2.3 激光重熔处理应注意的问题

两道重熔光斑的重叠率不能太大, 一般应低于三分之一, 否则, 重复加热会降低铝合金的强度; 扫描速度和激光的功率应适当搭配, 防止铝合金试样的过热, 即防止晶粒的长大, 消除晶粒长大对性能的不利影响; 另一方面温度过高, 或者激光作用时间太长, 会产生过烧现象, 引起晶界的严重氧化, 大大降低铝合金件的强度; 黑化处理应均匀, 否则会由于局部吸收率过低, 产生软点, 容易成为裂纹源。扫描后放置 96 h 以上, 自然时效充分进行。

## 2.4 疲劳实验

将已完成时效的试样和未进行重熔的两组试样进行疲劳实验。所用的疲劳实验机为国产红山疲劳实验机。实验条件为负荷控制(其中负荷 -100%, 变形 -50%), 载荷为拉-拉载荷, 正弦波形, 频率为 8 Hz, 峰值 22 kN, 谷值 4.4 kN。实验结果见表 1。

表 1 疲劳实验结果(周次)

Table 1 Result of fatigue test (times)

Contrast specimens	46370	51550	59418	48758	52760
Remelting specimens	53896	47369	47070	41144	44247

通常铝合金材料疲劳性能观测值母体分布规律为正态母体分布或威布尔分布<sup>[11]</sup>, 这里假设为正态母体分布, 则有

$$\text{子样平均值 } \bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i,$$

$$\text{子样方差 } S^2 = \frac{\sum X_i^2 - \frac{1}{n} (\sum X_i)^2}{n-1},$$

由表 1 计算得:  $S_1^2 = 0.00987$ ,  $S_0^2 = 0.00164$ 。

F 检验:

$$F = \frac{S_1^2}{S_0^2} = 6.018,$$

设给定显著水平为  $\alpha = 10\%$ , 则  $F_{\alpha/2} = 6.39$ 。因为  $F < F_{\alpha/2}$ , 所以认为两个母体标准差相等, 即  $\sigma_1 = \sigma_2$ , 此时认为两个正态母体方差无显著差异。

t 检验:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{(n_0 - 1)S_0^2 + (n_1 - 1)S_1^2}{n_1 + n_0 - 2} \times \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} = 0.898,$$

自由度  $V = n_1 + n_0 - 2 = 8$ , 取显著水平  $\alpha = 10\%$ , 查表得  $t_{\alpha/2} = 1.8595$ 。因为  $t < t_{\alpha/2}$ , 所以认为疲劳寿命无显著差异。

## 2.5 疲劳断口分析

断口分析是在 JXA-8800R 电子探针上对试样断口进行扫描得出的结果。

### 2.5.1 对比试样的断口分析

图 2 为对比试样的疲劳断口。从图 2(a) 看出, 图形的左上端为裂纹源, 裂纹源是在试样的表面。原因主要是材料锻造、热处理过程造成的微观缺陷, 或在加工标准试样时在外圆角处产生的应力集中, 以及激光重熔时材料表面合金元素的烧损、氧化等。这些裂纹或缺陷部位的应力均高于其他部位的应力, 所以疲劳裂纹的扩展优先在这些部位上开始。在循环载荷作用下, 这些裂纹和缺陷处不需要经历裂纹成核阶段而立即开始扩展。由于铝合金对于表面状态非常敏感, 裂纹源大多从表面产生, 也有一部分裂纹从材料内部产生, 如图 2(b) 所示, 这是放大的次表面断口, 可以清晰地看到一些已经产生但并

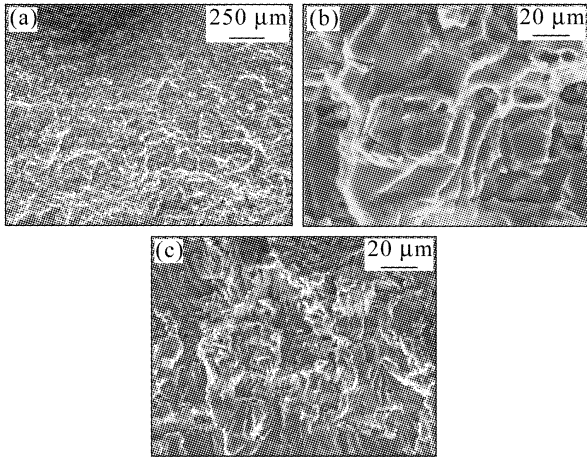


图 2 对比试样的疲劳断口

(a) 裂纹源;(b) 次表面裂纹;(c) 裂纹扩展区

Fig. 2 Fatigue fracture of the contrast specimens

(a) source of crack; (b) crack on the subsurface; (c) extension of crack

没有扩展的二次裂纹。图 2(c)为裂纹扩展区。从断口可以看出,裂纹扩展以穿晶断裂为主,断口出现了山脊状、松枝状等断裂线。

2.5.2 重熔试样的断口分析

图 3 为重熔铝合金的疲劳断口。由图 3(a)可以看出图中的亮白处为疲劳裂纹源,也就是上边缘光斑处。图 3(b)是放大的断口组织。上部为表面重熔时形成的柱状晶区,下部为基体的断裂区。由于没有应力集中,裂纹的扩展大致分为两个阶段:

第一阶段是从试样表面上的软点或非金属夹杂物处沿着最大切应力的方向即与拉应力成 45°方向的晶面向试样内部扩展。

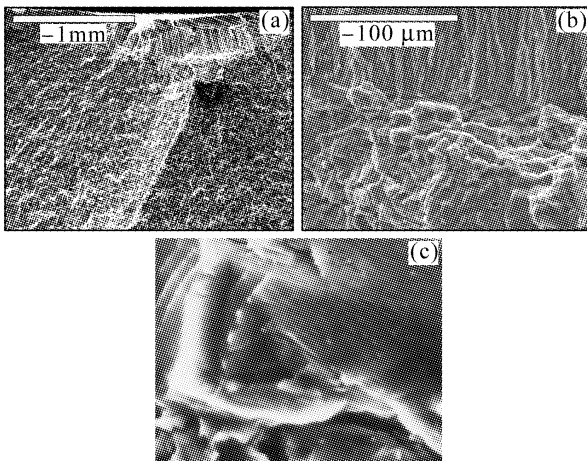


图 3 重熔铝合金的疲劳断口

(a) 裂纹源;(b) 过渡区;(c) 疲劳条带

Fig. 3 Fatigue fracture of the remelted LY12CZ

(a) source of crack; (b) transition area of remelting and substrate; (c) fatigue ribbon

第二阶段裂纹的扩展是沿着柱状晶的晶界扩展的。这是由于柱状晶的性能有较强的方向性。沿柱状晶的生成方向具有较大的强度,而在与柱状晶垂直的方向上强度较小,因而裂纹沿着晶界扩展,扩展速度较快,在基材处瞬断。在裂纹扩展区观察到了疲劳条带,见图 3(c),这是典型疲劳断裂的特征。

2.6 金相分析

2.6.1 对比试样的金相分析

用混合酸浸蚀研磨并抛光试样,观察 LY12CZ 的金相组织,如图 4 所示。基体为灰白色,主要是铜、镁、锰溶入铝中形成的固溶体,还溶有硅、镍、锌等杂质元素。在铝合金的基体上分布着许多亮白色和灰色的小颗粒,这些小颗粒就是铝合金在时效时的析出相,主要是 Al<sub>2</sub>Cu( $\theta$ )相, Al<sub>2</sub>CuMg(S)相,还存在其他杂质相,如 Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe, Al<sub>6</sub>(MnFeSi), Al<sub>6</sub>(MnFe), Al<sub>3</sub>Fe。这些析出相在沿铝合金型材轧制的方向上被明显地拉长,形成了锻造流线组织。

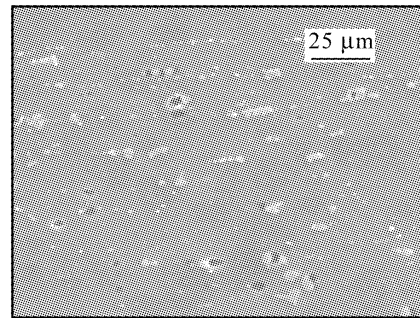


图 4 对比试样的金相组织

Fig. 4 Microstructure of the contrast specimens

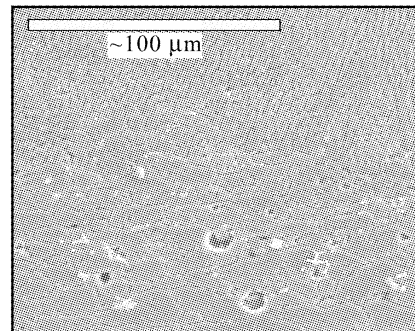


图 5 重熔试样金相组织

Fig. 5 Microstructure of the remelted specimens

2.6.2 重熔试样的金相分析

由图 5 可以看出重熔区和基体有明显的分界线。重熔区的金相组织比基体的组织要细小。重熔层的深度约 1.5 mm,呈极细的柱状晶组织。这是在激光辐照熔化后,由于能量集中,冷速极快,在这里产生了很大的过冷度和很大的温度梯度,由于温度

梯度大,冷却时结晶产生了强烈的方向性,因而形成了细小的柱状晶区。而基体的晶粒比较粗大,在沿着铝型材轧制的方向上晶粒有被明显拉长的痕迹。基体中的晶粒尺寸约  $20\sim 40\ \mu\text{m}$ ,柱状晶区晶粒的尺寸约  $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 。重熔后晶粒明显细化。在过渡区没有明显的过热现象,说明工艺参数适当。在基体上分布着化合物相,其成分与对比试样相同,其中的小坑是浸蚀试样时易腐蚀相被腐蚀后留下的。

## 2.7 显微硬度测试

显微硬度的测试是在 HVA-5 型低负荷维氏硬度计上进行的。沿激光重熔光斑的中心线由基体内向表面测量,载荷  $1600\ \text{g}$ ,测量点之间的间距为  $0.25\ \text{mm}$ ,测量结果见图 6。

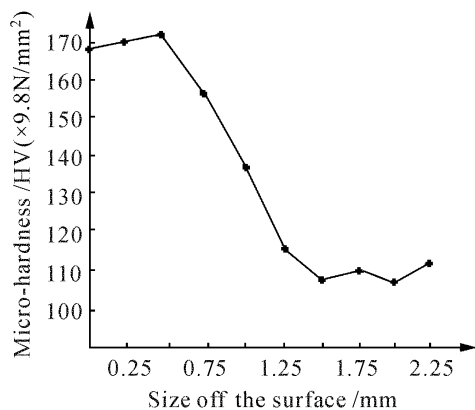


图 6 重熔试样显微硬度的分布曲线

Fig. 6 Micro-hardness curve of the remelted specimen

由测试结果可以看出,试样的硬度由心部向表层逐渐增大,其平均值  $\text{HV}=1559.87\ \text{N}/\text{mm}^2$ ,比基体高出  $40\%$ 。这主要是由于重熔时过快的冷速产生了极大过冷度,获得了高硬度的细晶粒组织。

## 3 结 论

在激光功率  $700\ \text{W}$ ,光斑直径  $1.8\ \text{mm}$ ,扫描速度  $20\ \text{mm}/\text{s}$  的工艺参数条件下,LY12CZ 铝合金激光重熔得到了较好的效果。

1) 疲劳实验表明,铝合金激光重熔的疲劳寿命与对比试样相比无显著差异,分析试样疲劳断口发现,重熔试样的疲劳裂纹主要沿着柱状晶的晶界扩展,在裂纹扩展区观察到了疲劳条带,而对比试样的疲劳裂纹主要是穿晶断裂扩展。

2) 硬度测试结果表明,重熔试样的硬度由心部向表层逐渐增大,其平均值  $\text{HV}=1559.87\ \text{N}/\text{mm}^2$ ,比基体高出  $40\%$ ,这主要是细晶强化的结果。

## 参 考 文 献

- Wang Gui, Zhou Xinchu, Gu Yongqiang *et al.*. Influence of connecting parameter on microstructure and mechanical properties of laser melting solidified layer [J]. *Heat Treat of Metal*, 2001, (6):16~18  
王 贵,周新初,顾永强等. 搭接参数对激光熔凝处理层显微组织和性能的影响[J]. *金属热处理*, 2001, (6):16~18
- Xu Youyi, Zhou Ming. Study on surface hardness and residual stress of 40Cr steel modified by laser rapid solidification [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(4):401~404  
许友谊,周 明. 全 20GrMnTi 表面激光重熔的组织与性能研究[J]. *应用激光*, 2002, **22**(4):401~404
- Yang Sen, Huang Weidong, Liu Wenjin *et al.*. Reconstruction of molten pool during laser surface remelting [J]. *Applied Laser*, 2001, **21**(4):225~227  
杨 森,黄卫东,刘文今等. 激光表面快速熔凝过程中熔区组织重构[J]. *应用激光*, 2001, **21**(4):225~227
- Ying Xiaodong, Li Wushen, Feng Lingzhi. Technology of laser surfacing modification and development situation domestically and abroad [J]. *Welding*, 2003, (1):5~8  
应小东,李午申,冯灵芝. 激光表面改性技术及国内外发展现状[J]. *焊接*, 2003, (1):5~8
- Liu Zhenxia, Huang Weidong, Yang Sen. Numerical simulation of laser surface re-melting and its use in laser directional solidification [J]. *The Chinese J. Nonferrous Metals*, 2002, **12**(3):458~463  
刘振侠,黄卫东,杨 森. 激光熔凝的数值模拟及其在激光定向凝固中的应用[J]. *中国有色金属学报*, 2002, **12**(3):458~463
- Huang Kaijin, Xie Changsheng, Xu Desheng. State of the arts of CO<sub>2</sub> laser remelting and CO<sub>2</sub> laser phase transformation [J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(5):9~13  
黄开金,谢长生,许德胜. 工具钢 CO<sub>2</sub> 激光熔凝和相变硬化的研究现状[J]. *激光杂志*, 2002, **23**(5):9~13
- Zhao Yuzhen, Liu Jianping, Shi Yaowu. Study on the property of laser remelting high-carbon-alloy steel [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(3):205~207  
赵玉珍,刘建萍,史耀武. 高碳高合金钢激光熔凝处理的性能研究[J]. *激光技术*, 2003, **27**(3):205~207
- Ru Jigang, Yi Linna. Surface strengthen process for high strength aluminum alloy [J]. *Chinese J. Rare Metals*, 2004, **28**(1):182~184  
汝继刚,伊琳娜. 高强铝合金表面强化工艺研究[J]. *稀有金属*, 2004, **28**(1):182~184
- Hao Qingwei, Kang Fengdi, Shao Zhongcai *et al.*. Search on surface treatment technology of aluminum and its alloys [J]. *Non-Ferrous Mining and Metallurgy*, 2004, **20**(6):30~33  
郝清伟,康凤娣,稍忠财等. 铝及铝合金表面改性技术[J]. *有色矿冶*, 2004, **20**(6):30~33
- Zhang Yongkang, Gao Li, Yang Chaojun. Theoretical analysis and experiment on deformation of TA2 sheet under laser shock [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1282~1287  
张永康,高 立,杨超君. 激光冲击 TA2 板料变形的理论分析和实验研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1282~1287
- 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