

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0027-04

冲击工艺对铝合金激光熔覆的影响

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 通过有效控制 Nd:YAG 脉冲式激光器电流、脉冲宽度、频率、光斑直径、扫描速度、离焦量等有关工艺参数, 对模拟腐蚀损伤的铝合金试样表面激光熔覆 Al-Y(1.4%) 合金, 并对其中的一组试样进行机械冲击, 充分时效后进行疲劳实验、疲劳断口分析及金相分析。研究表明, 熔覆后机械冲击试样的疲劳寿命远远高于只熔覆不冲击试样的疲劳寿命, 疲劳断口有明显的疲劳条带, 熔覆层和基体结合得非常紧密, 熔覆层内没有大的气孔和裂纹缺陷。

关键词 光学设计与制造; 铝合金; 激光熔覆; 疲劳寿命; 疲劳断口; 金相组织

中图分类号 TG665 文献标识码 A

Effect of Shock on Laser Cladding of Aluminum Alloys

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

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

Abstract Through control technological parameter of Nd:YAG pulse laser, current, pulse width, frequency, spot diameter, scanning velocity and defocusing, laser surface cladding Al-Y(1.4%) was used to repair corrosive damage of aluminum alloys. One group of the specimens was shocked on every cladding layer. After aging and fatigue test, crack pattern and microstructure were analyzed. The result showed that the fatigue life of the shocked specimens was much longer than the specimens' without shock. The crack pattern of the shocked appeared fatigue strip, the microstructure showed there was no obvious pore and crack in the cladding layer which was metallurgy combination with the substrate.

Key words optical design and fabrication; aluminum alloys; laser cladding; fatigue life; crack pattern; microstructure

1 引 言

航空用铝合金材料工作在含有灰尘、水分甚至含有盐雾的大气环境中, 其表面防护层往往在较短时间内便会失去作用, 使铝合金材料产生腐蚀, 降低使用寿命。针对铝合金材料本身的特点, 人们做了大量的修复工艺研究, 均未取得令人满意的效果。激光熔覆是近年来新兴的一种金属表面强化技术, 同时也是材料表面激光处理领域非常活跃的研究方向。它可以使强化层与被强化材料之间实现冶金结合, 可以在金属表面形成具有特定性能的表层材料, 提高材料的耐磨、耐蚀、耐冲击等性能^[1~4]。作为材料的填充层, 重熔区必定存在相应的缺陷^[5], 影响材料的疲劳性能。稀土元素在熔覆过程中可以起到细晶强化的作用^[6,7], 实验以常用航空材料 LY12CZ 为基材, 在其表

面熔覆 Al-Y(1.4%Y) 合金粉末, 研究了激光熔覆后加机械冲击及只熔覆不冲击材料的疲劳性能, 并对材料的疲劳断口、金相组织进行了对比分析。

2 实 验

2.1 试样制备

用 LY12CZ 板材为原始材料, 包覆纯铝层, 热处理状态为淬火、自然时效, 其结构尺寸按国标/T228-87 执行, 见图 1。共制试样 10 件, 分为两组。一组做熔覆实验, 另外一组熔覆后加机械冲击。在试样的中心用铣削的方法加工出一小坑, 直径为 10 mm, 坑深为 (1.5 ± 0.1) mm, 作用就是模拟飞机结构件上的腐蚀或损伤小坑, 研究激光熔覆修补后铝合金结构件的性能。

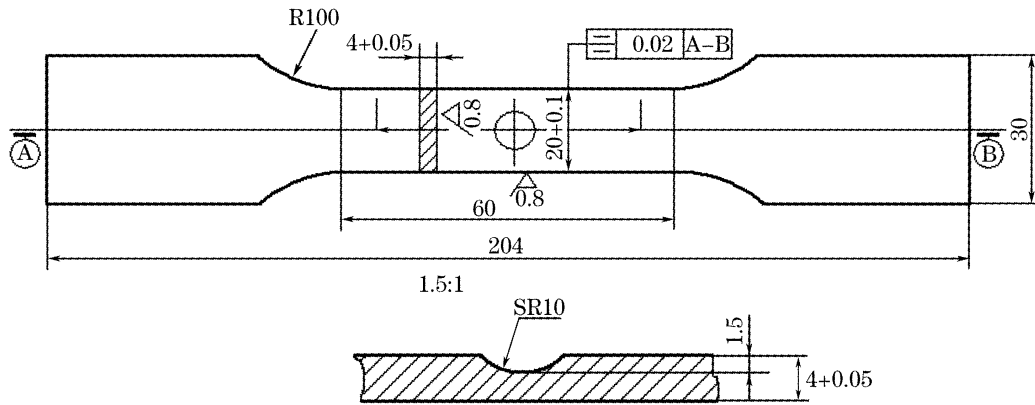


图1 LY12CZ 激光熔覆前的标准试样

Fig.1 Standard specimens of LY12CZ

2.2 实验条件与方法

2.2.1 实验条件

使用 Nd:YAG 脉冲式激光器,采用激光多层多道扫描。试样表面由 Ar 气保护,光斑直径为 0.6~1.0 mm,激光工作电流 180~320 A,脉冲频率 1~4 Hz,脉冲宽度 1.5~3.5 ms,激光扫描速度 0.2~1.4 mm/s。在这个范围内选取一系列参数值进行正交实验,并根据其性能,得到一组经优化后的工艺参数值,电流 250 A,脉冲宽度 3 ms,频率 2 Hz,光斑直径 1 mm,扫描速度 0.5 mm/s,离焦量 -2 mm。

2.2.2 实验方法

熔覆实验分为两组,一组是熔覆 Al-Y(1.4%Y)合金外加机械冲击,另外一组只熔覆不冲击。激光熔覆的过程是铺粉,进行多层多道扫描,每熔覆一层后进行机械冲击。冲击的工具为钢制小锤,重 0.4 kg,重叠率为 100%~200%,目的是消除熔覆层内应力、气孔和裂纹等缺陷。熔覆后室温放置四天以上,使试样充分时效。

2.3 疲劳实验

2.3.1 实验及结果

将已完成熔覆并且已经时效的试样,进行疲劳实验。疲劳试验机为立式 INSSTRON-8502 型电液伺服疲劳试验机。实验条件为正弦波形,频率 8 Hz,最大应力 $\sigma_{\max}=275$ MPa,最小应力 $\sigma_{\min}=55$ MPa,负荷控制(其中负荷 -100%,变形 -50%),疲劳实验结果见表 1。

表 1 疲劳实验结果(周次)

Table 1 Result of the fatigue test (cycle)

Cladding Al-Y	10425	8441	12538	11477	9412
Cladding Al-Y added shock	50545	60386	57171	68406	54741

2.3.2 分析与讨论

通常铝合金材料疲劳性能观测值母体为正态分布。由于实验采用的应力水平为屈服强度极限的

60%以上(LY12 的 $\sigma_b=415$ MPa, $\sigma_{0.2}=430$ MPa, $\sigma_{\max}=275$ MPa),母体的分散性应较小。每组试件数量为 5,属于小子样,可以用小子样数据估计母体参数。

根据表 1 数据及公式

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg Ni = \hat{\mu}, \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \right] / (n-1)} = \hat{\sigma}, \quad (2)$$

计算得子样平均值 \bar{X} 和标准差 s 。取可靠度为 99%,查得标准正态分布偏量: $u_p = -2.326$,代入

$$\hat{X}_p = \hat{\mu} + u_p \hat{\sigma} = \bar{X} + u_p s, \quad (3)$$

$$\hat{N}_p = \lg^{-1} \hat{X}_p, \quad (4)$$

求出对应 99%可靠度的对数安全寿命估计量 \hat{X}_p 和安全寿命估计量 \hat{N}_p ,结果见表 2。可以看出,熔覆 Al-Y(1.4%Y)加机械冲击后,试样的安全寿命比只熔覆不冲击试样的安全寿命提高了 528%。

表 2 安全寿命估算及对比

Table 2 Contrast of safety life estimation

	\bar{X}	s	\hat{X}_p	\hat{N}_p
Cladding Al-Y	4.015	0.0689	3.855	7161
Cladding Al-Y added shock	4.763	0.0474	4.653	44977

2.4 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。

2.4.1 熔覆 Al-Y(1.4%Y)试样的断口分析

图 2 是激光熔覆 Al-Y(1.4%Y)合金断口形貌。图 2(a)是熔覆层的整体形貌,从断口上可以看出熔覆层的 Al-Y(1.4%Y)合金与基体有明显的差异,基体断口细密,而熔覆层气孔、孔隙等缺陷很多。裂纹源就在一个大的孔隙处,见图 2(b)。这个孔隙不是焊接时产生的气孔,而是熔覆前涂覆金属粉末时留下的孔隙,在它的下方还有一道大的裂纹。裂

纹是沿着柱状晶的晶界方向撕裂的,表现为韧性断裂,有涟波花样。同时发现熔覆层内分布着许多形状规则的气孔,从熔覆的过程分析,其来源主要是空气、金属蒸气、保护气体氩气、粉末黏结剂等。图 2(c)

是熔覆过渡区组织。由于熔池与基体的温差,熔覆层底部形成了与散热方向一致的柱状晶,因为其长大的方向与应力方向几乎垂直,具有较强的开裂倾向,因而使试样的疲劳寿命明显降低。

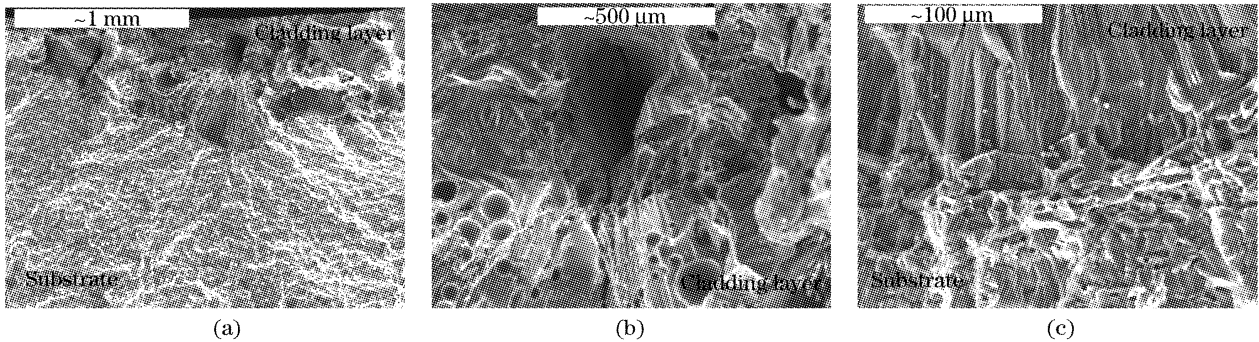


图 2 激光熔覆 Al-Y(1.4%Y)试样的断口。(a) 熔覆层全貌;(b) 裂纹源区;(c) 熔覆层与基体过渡区

Fig. 2 Crack of the specimens cladded Al-Y(1.4%Y). (a) Pattern of the cladding; (b) source of the crack; (c) transition of the layer and substrate

2.4.2 熔覆 Al-Y(1.4%Y)加冲击试样的断口分析

由于每层熔覆都经过锤击处理,因而从图 3(a)看出熔覆层与基体基本熔为一体,缺陷很少。但是熔覆层与基体表现出不同的断裂性质。图 3(b)是结合处的放大照片,熔覆层与基体没有明显的界限。由于使用了机械冲击工艺,在熔覆层内没有气孔,基体与熔覆层结合紧密。同时,经过机械冲击,熔覆层底部的柱状晶变形后已改变形状,冲击释放了熔覆

层的拉应力,熔覆层内的缺陷经变形后对裂纹萌生的影响已减小,抑制了裂纹的萌生与扩展,从而延长了试样的疲劳寿命。图 3(c)是在基体内观察到的疲劳条带,呈现出典型的疲劳断裂特征。从图上可以看出,由于相邻晶粒的位向不同,会使疲劳裂纹的扩展从一个平面转移到另一个平面,所以不同区域的疲劳条带会分布在不同高度的平面上,甚至由于结晶排列不同,有的相邻小面内实际没有疲劳条带。

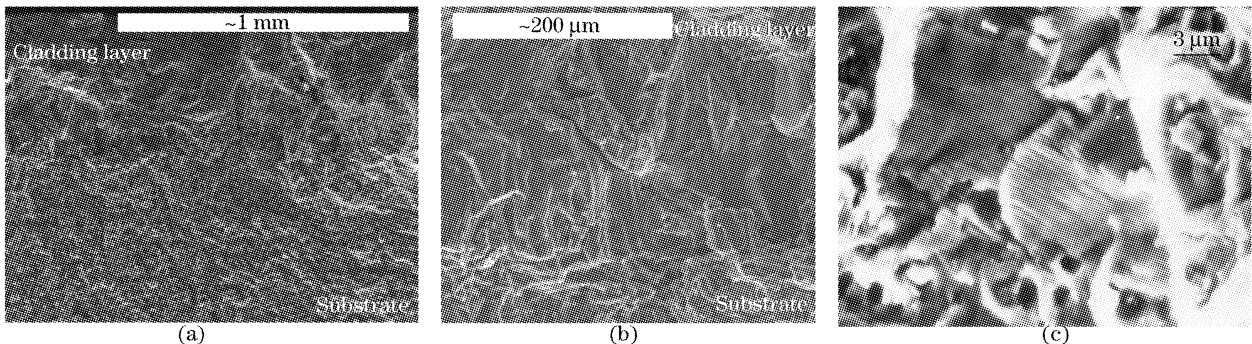


图 3 激光熔覆 Al-Y(1.4%Y)加冲击试样的断口。(a) 熔覆层全貌;(b) 熔覆层与基体过渡区;(c) 基体断口的疲劳条带

Fig. 3 Crack of the specimens cladded Al-Y(1.4%Y)and being shocked. (a) Pattern of the cladding; (b) transition of the layer and substrate; (c) fatigue strip of the substrate

2.5 金相分析

金相分析是在 JXA-8800R 电子探针上对试样断口进行扫描得出的结果。

2.5.1 熔覆 Al-Y(1.4%Y)试样的金相分析

从图 4(a)看出熔覆的 Al-Y(1.4%Y)层与基体的结合比较紧密,但是有较多的缺陷,如有气孔和涂覆熔覆层时留下的孔隙。在熔覆层中看不到析出物,而基体上的析出相却很明显。提高放大倍数,观察到的气孔更加清晰,见图 4(b)。正是由于这些缺陷的大量存在,大大降低了材料的疲劳性能,降低了

疲劳寿命。

2.5.2 熔覆 Al-Y(1.4%Y)加冲击试样的金相分析

从图 5(a)看到,经过机械冲击后,熔覆层与基体结合非常紧密,看不到明显的基体和熔覆层分界线,大的缺陷已经很少,如气孔、粉末间隙在电子探针下基本观察不到。提高放大倍数,能够清晰地观察到组织中深颜色的小坑,见图 5(b)。这是熔覆层粉末留下的孔隙或者是易浸蚀相在浸蚀试样时被腐蚀出的小坑。熔覆层中的柱状晶组织具有很强的方向性,这是激光熔覆后冷速过快形成的细小的柱状

晶。从图 4 和图 5 不难看出,熔覆层经过机械冲击后,一个最显著的优点就是大大减少了熔覆层内的

小孔缺陷,消除了内应力,从而减少了裂纹源,提高了试样的疲劳寿命,进而提高了它的安全寿命。

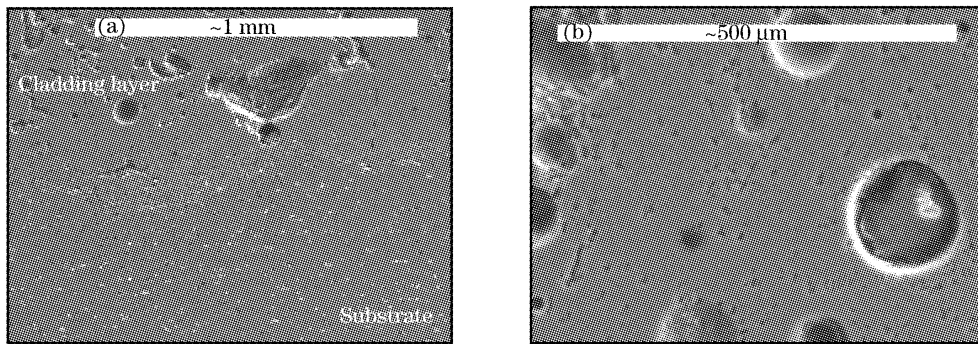


图 4 激光熔覆 Al-Y(1.4%Y)断口的金相组织。(a) 熔覆层与基体过渡区组织;(b) 熔覆层组织
Fig. 4 Microstructure of crack clad Al-Y(1.4%Y). (a) Transition of the layer and substrate;
(b) microstructure of the layer

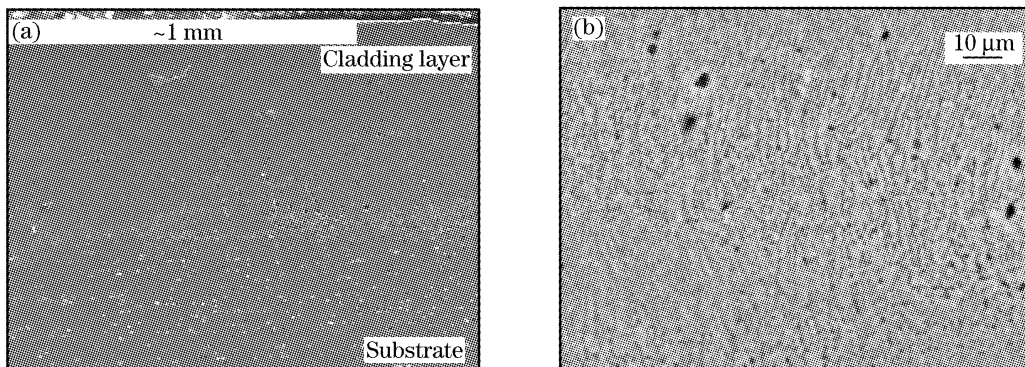


图 5 激光熔覆 Al-Y(1.4%Y)加冲击试样断口的金相组织。(a) 熔覆层与基体过渡区组织;(b) 熔覆层组织
Fig. 5 Microstructure of crack clad Al-Y (1.4%Y) added shock. (a) Transition of the layer and substrate;
(b) microstructure of the layer

3 结 论

在电流 250 A,脉冲宽度 3 ms,频率 2 Hz,光斑直径 1 mm,扫描速度 0.5 mm/s,离焦量-2 mm 的工艺参数条件下,LY12CZ 铝合金激光熔覆 Al-Y(1.4%Y)合金得到了较好的熔覆效果。

多层多道激光熔覆 Al-Y(1.4%Y)加机械冲击能够显著提高试样的安全寿命。

疲劳断口和金相分析表明,熔覆层加机械冲击后,缺陷明显减少,断口区清晰可见疲劳条带。

参 考 文 献

- Zhang Song, Zhang Chunhua, Liu Changsheng *et al.*. Cavitation erosion behavior on aluminium alloy by using laser surface cladding of NiCrBSi[J]. *Raremetal Materials and Engineering*, 2002, **31**(2): 99~102
张松,张春华,刘常升等. 铝合金表面激光熔覆 NiCrBSi 的空泡腐蚀性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2002, **31**(2): 99~102
- Shen Dejiu, Liao Bo, Wang Yulin. Thinning effect of coaxial power feeding on laser cladding microstructures [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(3): 290~292
沈德久,廖波,王玉林. 同轴送粉对激光熔覆组织的细化作

- 用[J]. *应用激光*, 2002, **22**(3): 290~292
- Ju Yi, Guo Shaoyi, Li Zongquan. Status and development of laser surface alloying and laser cladding in China[J]. *Materials Science & Engineering*, 2002, **20**(1): 143~145
居毅,郭绍义,李宗全. 金属表面合金化及熔覆处理的研究进展[J]. *材料科学与工程*, 2002, **20**(1): 143~145
- Huang Kaijin, Zhou Jinxin, Xie Changsheng *et al.*. Crack repair and laser technology[J]. *Heat Treat of Metal.*, 2002, **27**(3): 1~4
黄开金,周金鑫,谢长生等. 裂纹修复与激光技术[J]. *金属热处理*, 2002, **27**(3): 1~4
- Chen Hao, Pan Chunxu, Pan Lin *et al.*. Development of wear-resistant laser cladding[J]. *Heat Treat of Metal.*, 2002, **27**(9): 5~8
陈浩,潘春旭,潘邻等. 激光熔覆耐磨涂层的研究进展[J]. *金属热处理*, 2002, **27**(9): 5~8
- Shang Lijuan, Cai Qingkui, Liu Changsheng *et al.*. Effects of RE doping on properties of co-based alloy coating treated by laser cladding [J]. *Raremetal Materials and Engineering*, 2002, **26**(3): 173~178
尚丽娟,才庆魁,刘常升等. 用稀土改性钴基合金激光熔覆层[J]. *稀有金属材料与工程*, 2002, **26**(3): 173~178
- Luan Jingfei, Luo Wei, Yan Mi *et al.*. Development of laser cladding materials with crack resistance and wear resistance in clad layer of grey iron[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(7): 652~656
栾景飞,罗伟,严密等. 铸铁表面抗裂耐磨激光熔覆材料的研制[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(7): 652~656