

6061 铝合金表面激光熔覆稀土 CeO_2 + Ni60 组织及摩擦磨损性能

王成磊^{1,2}, 高原², 张光耀²

(1. 桂林电子科技大学 机电工程学院, 桂林 541004; 2. 桂林电子科技大学 材料科学与工程学院, 桂林 541004)

摘 要: 为提高铝合金的表面性能, 利用激光熔覆技术在 6061 铝合金表面制备了添加稀土 CeO_2 的 Ni60 熔覆层, 并通过金相显微镜、SEM、显微维氏硬度计和摩擦磨损试验机等设备研究了 CeO_2 对 Ni60 熔覆层组织结构、硬度及摩擦磨损性能的影响。结果表明, 加入 2% 的 CeO_2 可有效地减少熔覆层中的裂纹、孔洞和夹杂物, 促进晶粒细化, 提高熔覆层的组织均匀性、表面硬度及耐磨损性能; 在相同磨粒磨损条件下, CeO_2 + Ni60 熔覆层的耐磨性是铝合金的 7.1 倍, 是 Ni60 熔覆层的 1.6 倍; Ni60 熔覆层可以显著降低铝合金表面摩擦系数, 而添加稀土 CeO_2 能提高 Ni60 熔覆层的摩擦系数稳定性, 从而改善 CeO_2 + Ni60 熔覆层的耐磨性能。

关键词: 激光熔覆; 稀土; 铝合金; 摩擦磨损

中图分类号: TG 456.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)07-0013-04

0 序 言

铝合金具有密度小、易加工、热膨胀系数低、热导率高、比刚度和比强度高等诸多优异性能, 应用广泛。但随着工业进一步发展, 对铝合金的表面性能提出了更高的要求, 铝合金自身存在的一些问题, 阻碍了它在某些特殊领域的应用^[1,2], 在铝合金表面进行激光表面熔覆将成为研究的热点。激光表面熔覆技术可以在廉价的金属材料表面制备出高性能的合金层, 使熔覆层与基体材料之间实现良好的冶金结合, 提高材料的耐磨、耐蚀、耐冲击等性能。降低了成本, 节约了贵重稀有金属材料, 生产效率高, 是一项为众多工业领域所接受的表面处理新技术^[3,4]。

目前一些研究者采用稀土元素进行激光熔覆的研究证明, 适量的稀土元素对金属表面性能的提高是多方面的, 并且效果十分显著^[5,6], 但稀土元素对铝合金激光熔覆方面的研究较少。文章利用激光熔覆技术在铝合金上分别制备了添加有稀土 CeO_2 的 Ni60 熔覆层和未加稀土的 Ni60 熔覆层, 对熔覆层组织、表面形貌和显微硬度进行了检测和分析, 并对各试样熔覆层的摩擦磨损性能进行了研究。

1 试验方法

试验采用的基体材料为 6061 铝合金, 平均硬度为 145 HV0.05, 尺寸为 60 mm × 50 mm × 12 mm。

熔覆层材料采用 Ni60 合金粉末和稀土 CeO_2 (纯度大于等于 99.99%), 粒度为 60 ~ 106 目, Ni60 的化学成分如表 1 所示。激光熔覆时分别制备了添加有 2% (质量分数) 稀土 CeO_2 的 Ni60 熔覆层和未添加稀土元素的 Ni60 熔覆层。

表 1 Ni60 合金粉的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of Ni60 alloy powders					
C	Si	Fe	W	Cr	Ni
0.7 ~ 0.8	3.0 ~ 3.5	< 15	3.5 ~ 6.5	12 ~ 16	余量

首先采用机械和化学方法消除铝合金表面的氧化膜, 工艺路线为铝合金表面采用细砂纸打磨 - 化学试剂 (10% 的盐酸) 浸泡 - 清水清洗 - 丙酮清洗 - 烘干。

混合粉末经球磨充分混合后采用粉末预置法平铺在基体上, 厚度为 1.2 mm, 利用 6 kW 大功率 HANS GS 通用型激光热处理成套设备进行多道激光熔覆, 激光熔覆工艺参数为功率 3 800 W, 光斑直径 5.5 mm, 扫描速度 900 mm/min。

用德国蔡司 Carl Zeiss Axio Scope A1 型金相显微镜、日本 JEOL/JSM-5610LV 扫描电镜 (SEM) 观察

收稿日期: 2013-12-19

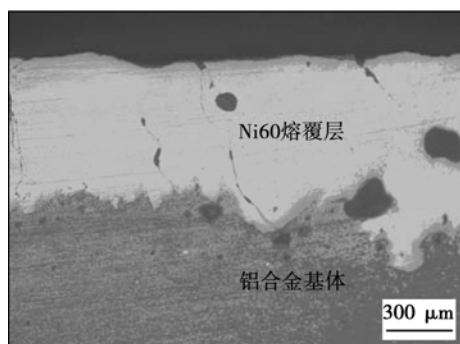
基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (51201043); 国家自然科学基金资助项目 (51264007); 广西科学研究与技术开发科技攻关计划资助项目 (桂科攻 12118020-2-2-1); 广西信息材料重点实验室资助项目 (桂科能 1210908-07-Z); 广西信息材料重点实验室资助项目 (1210908-214-Z)

熔覆层组织,用日本岛津 HV1000 显微维氏硬度计测试熔覆层横断面的硬度分布,用 ML-100 型磨粒磨损试验机进行磨粒磨损试验,用 HSR-2M 型高速往复摩擦磨损试验机进行高速往复摩擦磨损试验。

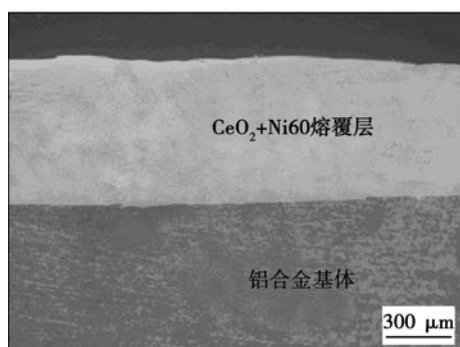
2 试验结果与分析

2.1 熔覆层组织

图 1 为 Ni60 熔覆层和 $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层界面形貌,上侧浅色区域为激光熔覆层,下侧深色部分为铝合金基体。由图 1 可知,未加稀土的 Ni60 熔覆层和 $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层都与基体呈冶金结合,熔覆层厚度为 $886 \mu\text{m}$ 左右,但未加稀土的 Ni60 熔覆层中有大量气孔和裂纹,组织不均匀;而 $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层中没有气孔和裂纹,组织均匀,熔覆层质量明显较好。原因:(1)稀土元素能提高熔池流动性,既可使熔融态的元素混合均匀,又可使反应生成的气体逸出,减少疏松、气孔等缺陷。(2)稀土元素可使合金中的杂质重新分布,细化晶粒,净化晶界^[7]。



(a) Ni60熔覆层



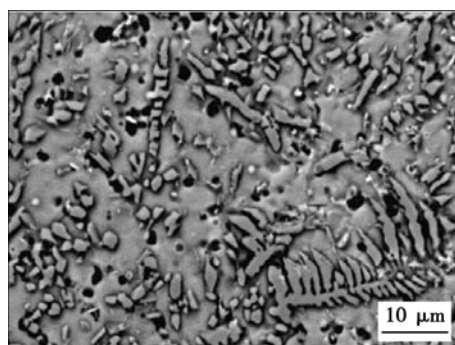
(b) $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层

图 1 熔覆层截面形貌

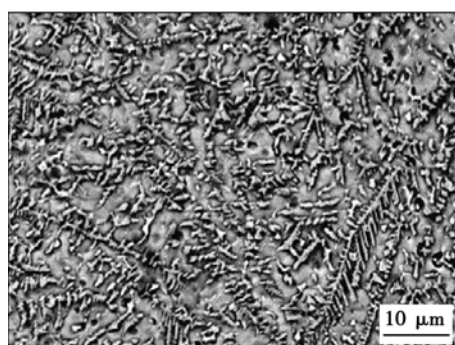
Fig. 1 Cross section morphology of cladding layers

图 2 为两种熔覆层的表层 SEM 形貌,熔覆层组织呈铸态的胞晶和柱状枝晶组织,主要成分为 NiAl-Cr 共晶组织,其中浅灰色的为初生 NiAl 相,呈枝晶

或颗粒状分布的沉淀相 $\alpha\text{-Cr}$ 镶嵌在 NiAl 相中。由图 2 可知, $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层比未加稀土的 Ni60 熔覆层孔隙率大幅降低,晶粒度变大且组织细化作用明显,晶粒分布较弥散。稀土元素 Ce 是晶界偏聚元素,其原子半径大于 180 pm ,固溶于晶格内会造成极大的晶格畸变,它在 $\beta\text{-NiAl}$ 和铬相中作为间隙原子的固溶度几乎为零,因此一般沿晶粒的晶界、位错等处扩散,并优先偏聚于这些地方,以降低体系的 Gibbs 自由能,减小晶粒长大的驱动力,从而阻碍晶体的生长,细化晶粒。



(a) Ni60熔覆层



(b) $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层

图 2 熔覆层的表层形貌

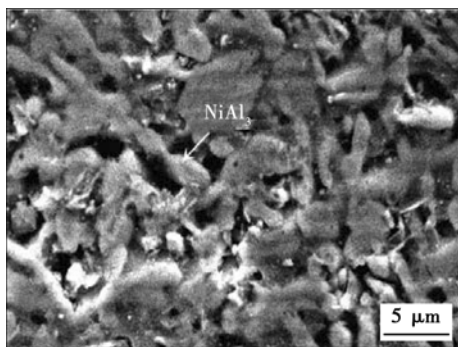
Fig. 2 Bottom morphology of cladding layers

图 3 为未加稀土的 Ni60 熔覆层和 $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层的底层 SEM 形貌,两种熔覆层主要生成相均为 NiAl_3 。由于熔覆层底层稀土含量很少, CeO_2 对提高熔覆层底层组织的作用不明显,这导致熔覆底部晶粒粗大,且有明显微观孔隙存在。

结合图 1、图 2、图 3 可知,加入 2% 的稀土 CeO_2 可有效地减少熔覆层中的裂纹、孔洞和夹杂物,促进晶粒细化,提高熔覆层的组织均匀性。

2.2 熔覆层显微硬度分析

图 4 为从熔覆层表面向基体方向测量的显微硬度数据。由图 4 可知,含 2% CeO_2 的熔覆层硬度较高,未加稀土的 Ni60 熔覆层在相同深度硬度均低于 $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层。稀土可通过扩散改变晶格尺



(a) Ni60熔覆层

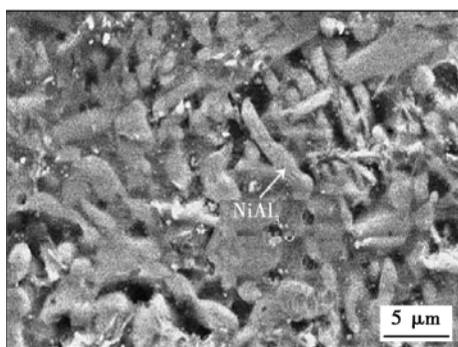
(b) $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层

图 3 熔覆层的底层形貌

Fig. 3 Bottom morphology of cladding layers

寸,在熔覆层形成固溶强化,也可形成一定的含稀土的化合物硬质相,净化晶界,从而提高了熔覆层硬度。 $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层的表层硬度可达 1 180 HV0.05,是铝合金硬度的 8.4 倍。熔覆层硬度由表面向基体逐渐递减,这是因为激光加工时随熔池深度增加,基体中的 Al 元素等受温度影响,熔化并扩散进入熔池,越靠近熔池,稀释率越大,硬度越低。

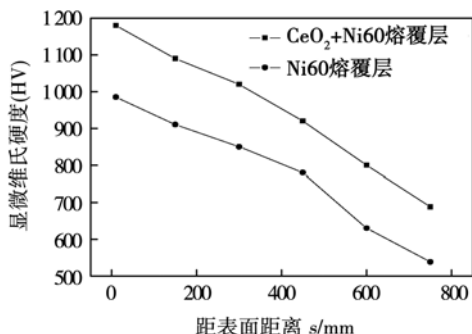


图 4 熔覆层的硬度和深度的关系

Fig. 4 Relationship of hardness and depth

2.3 摩擦磨损性能

2.3.1 磨粒磨损试验

试验前将试样放在超声波清洗仪中用丙酮清洗,最后用去离子水清洗并吹干。磨损试样分别为

Ni60 熔覆层、 $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层和铝合金。

试验条件为 800 号砂纸(砂粒度为 $35 \mu\text{m}$),载荷 2 N,试样直径为 12 mm,磨损半径为 40 mm,磨盘转速为 560 r/min,磨损时间分别为 2, 4, 6, 8 min。

表 2 为不同试样的磨粒磨损结果,图 5 为根据表 2 得出的磨损时间与磨损失重关系曲线。由图 5 可知, $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层的磨损失重明显低于 Ni60 熔覆层,证明了加入稀土 CeO_2 可提高表面熔覆层的耐磨性。两种熔覆层的磨损曲线斜率较低,且相同时间内的磨损量均低于铝合金基体,说明激光熔覆处理可以显著提高铝合金表面耐磨性。

表 2 不同试样磨粒磨损结果

Table 2 Abrasive wear results for different samples

试样	磨损失重 $\Delta m/\text{g}$				总磨损失重 $\Delta m'/\text{g}$
	2 min	4 min	6 min	8 min	
铝合金	0.082 3	0.081 0	0.080 8	0.067 6	0.311 7
Ni60 熔覆层	0.026 0	0.014 8	0.015 7	0.014 9	0.071 4
$\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层	0.009 3	0.015 3	0.013 1	0.006 1	0.043 8

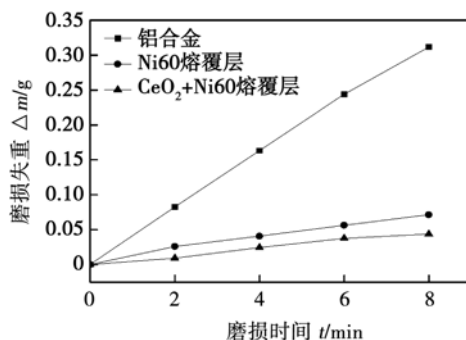


图 5 不同试样磨损时间-磨损失重关系曲线

Fig. 5 Effect of mass loss on wear time for different samples

在评定各种材料耐磨性时,采用标准材料在相同的磨损条件下进行对比试验的方法。文中试验的标准材料选用铝合金基体试样,相对耐磨性也就是 Ni60 熔覆层、 $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层与铝合金的磨损量之比的倒数。在相同磨粒磨损条件下, $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层的耐磨性是铝合金基体的 7.1 倍,是 Ni60 熔覆层试样的 1.6 倍。

2.3.2 高速往复摩擦磨损试验

往复摩擦磨损试验条件:载荷 5 N、转速 480 r/min、半径 8 mm、时间 10 min。

图 6 为铝合金、Ni60 熔覆层和 $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层的摩擦系数变化曲线,铝合金表面的摩擦系数不稳定,升高速度很快,80 s 的时间摩擦系数就超过了量程 2.0;Ni60 熔覆层摩擦系数起初在 0.1 ~ 0.2

范围内波动,但超过 500 s 后,其摩擦系数开始快速升高,整体不够稳定;而 $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层摩擦系数在 0.1~0.2 范围内小幅度波动,稳定性好于 Ni60 熔覆层。可以看出,在铝合金表面制备熔覆层可以显著降低其表面摩擦系数,而添加稀土 CeO_2 能提高 Ni60 熔覆层的摩擦系数稳定性,从而改善耐磨性能。

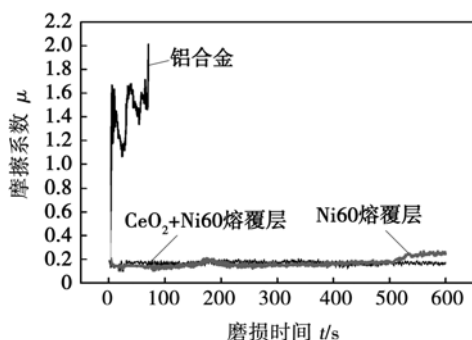


图 6 不同试样的摩擦系数

Fig. 6 Friction coefficient of different samples

3 结 论

(1) 加入 2% 的 CeO_2 可有效地减少熔覆层中的裂纹、孔洞和夹杂物,促进晶粒细化,提高熔覆层的组织均匀性、表面硬度及耐磨损性能。

(2) 在相同磨粒磨损条件下, $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层的耐磨性是铝合金的 7.1 倍,是 Ni60 熔覆层的 1.6 倍。

(3) Ni60 熔覆层可以显著降低铝合金表面摩擦系数,而添加稀土 CeO_2 能提高 Ni60 熔覆层的摩擦系数稳定性,从而改善 $\text{CeO}_2 + \text{Ni60}$ 熔覆层的耐磨性能。

参考文献:

- [1] 庄忠良, 宋 刚, 祝美丽, 等. 激光-MIG 复合热源铝合金层间堆积快速成形[J]. 焊接学报, 2013, 34(5): 71-73.
Zhuang Zhongliang, Song Gang, Zhu Meili, *et al.* Rapid prototyping of aluminum alloy with vertical deposition by laser-arc hybrid

heat source[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(5): 71-73.

- [2] Li Zhanming, Zhu Youli, Xin Yi. Influence of ultrasonic impact treatment on fatigue properties of 2A12 aluminum alloy welded joints[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(2): 28-32.
- [3] 乔 虹, 李庆棠, 符寒光, 等. 激光熔覆原位合成陶瓷相增强铁基熔覆层的组织和性能[J]. 焊接学报, 2015, 36(1): 67-69.
Qiao Hong, Li Qingtang, Fu Hanguang, *et al.* Microstructure and properties of in-situ synthesized ceramic phase reinforced Fe-based coating by laser cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(1): 67-69.
- [4] 李嘉宁, 巩水利, 李怀学, 等. TA15 钛合金激光非晶-纳米晶增强镍基涂层的组织结构及耐磨性[J]. 焊接学报, 2014, 35(10): 57-60.
Li Jianing, Gong Shuli, Li Huaixue, *et al.* Microstructure and wear resistance of laser amorphousnanocrystals reinforced Ni-based coating on TA15 titanium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(10): 57-60.
- [5] 蔡航伟, 高 原, 马志康, 等. 钨钨钨等离子共渗工艺及渗层组织的研究[J]. 表面技术, 2012, 41(2): 16-19.
Cai Hangwei, Gao Yuan, Ma Zhikang, *et al.* Research on W-Mo-Y plasma surface alloying process and microstructure of alloying layer[J]. Surface Technology, 2012, 41(2): 16-19.
- [6] 罗冬雪, 薛 鹏, 薛松柏, 等. 稀土元素 Nd 对 Sn-Zn-Ga 无铅钎料组织及性能的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(6): 57-60.
Luo Dongxue, Xue Peng, Xue Songbai, *et al.* Effects of Nd on microstructure and properties of Sn-Zn-Ga lead-free solder[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(6): 57-60.
- [7] 张光耀, 王成磊, 高 原, 等. 稀土 La_2O_3 对 6063Al 激光熔覆 Ni 基熔覆层微观结构的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103001.
Zhang Guangyao, Wang Chenglei, Gao Yuan, *et al.* Effect of rare earth La_2O_3 on the microstructure of laser cladding Ni-based coatings on 6063Al alloys[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 1103001.

作者简介: 王成磊,男,1985 年出生,博士研究生,讲师. 主要从事激光加工方面的科研和教学工作. 发表论文 40 余篇. Email: clw0919@163.com

通讯作者: 高 原,男,教授,博士研究生导师. Email: gaoyuan-guilin@126.com