

# Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对铝合金表面激光增材制造组织及耐蚀性影响

王成磊, 高原, 张光耀

(桂林电子科技大学, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 利用激光增材制造技术, 在 6063Al 基体表面制备了 Ni60-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金层, 并通过金相显微镜、XRD、SEM 和电化学腐蚀测试仪等设备进行分析和测试, 研究稀土 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对 6063Al 表面激光增材制造镍基合金层与基体结合界面处的组织结构及耐腐蚀性能的影响。结果表明, 镍基合金层与基体结合界面处呈冶金结合, 与未添加稀土的 Ni60 合金层相比, Ni60-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金层的气孔和裂纹大幅降低, 孔隙率减小, 晶粒度变大且细化作用明显, 晶粒分布较弥散, 具有较好的组织形貌; Ni60 合金层表面主要相结构为  $\beta$ -NiAl (Cr)、Al<sub>3</sub>Ni、AlNi<sub>3</sub>、Al 等, 添加 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 后的合金层中出现了 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、YAl<sub>3</sub>、AlNiY、Ni<sub>17</sub>Y<sub>2</sub> 等稀土化合物的衍射峰; 耐腐蚀性研究表明, 在 1 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中, 添加 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 Ni60 合金层的耐酸腐蚀性是 Ni60 合金层的 4.07 倍; 在 3.5% NaCl 溶液中, Ni60-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金层的耐腐蚀性是 Ni60 合金层的 4.3 倍; 在 1 mol/L NaOH 溶液中, Ni60-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金层的耐腐蚀性是 Ni60 合金层的 2.3 倍。可见, 加入稀土 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 使 Ni60 合金层晶粒细化、组织改善, 并明显提高了合金层的耐腐蚀性能。

**关键词:** 激光增材制造; 氧化钇; 镍基; 腐蚀

中图分类号: TG146.2<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)03-0812-06

增材制造(Additive manufacturing, AM)技术<sup>[1-5]</sup>是近 20 年来信息技术、新材料技术与制造技术多学科融合发展的先进制造技术, 是采用材料逐渐累加的方法制造实体零件的技术, 相对于传统的材料去除-切削加工技术, 是一种“自下而上”的制造方法。增材制造被誉为有望产生“第 3 次工业革命”的代表性技术, 是大批量制造模式向个性化制造模式发展的引领技术。增材制造应该定位在传统制造技术难以低成本、高效率完成的复杂结构制造。因此, 利用增材制造的原理, 拓展增材制造的应用是增材制造与传统制造技术竞争的必由之路。

目前, 增材制造技术已经成功应用到大型整体钛合金关键结构件, 突破了钛合金、超高强度钢等难加工大型整体关键构件激光成形工艺、成套装备和应用关键技术, 解决了大型整体金属构件激光成形过程零件变形与开裂“瓶颈难题”和内部缺陷及内部质量控制, 飞机构件综合力学性能达到或超过钛合金模锻件, 已研制生产出了我国飞机装备中迄今尺寸最大、结构最复杂的钛合金及超高强度钢等高性能关键整体构件, 并在大型客机 C919 等多型重点型号飞机研制生产中得到应用<sup>[6-11]</sup>。

Ni60 合金粉末<sup>[12]</sup>是由镍、铬、硼、硅、碳等元素而构成, 它是以镍铬碳硅固溶体和低熔点、镍基共晶体所组成, 并弥散分布着许多碳化物、硼化物等硬质相, 特别是含有不锈钢主要成分的镍、铬元素。因此具有较好的耐腐蚀、耐磨损和抗氧化性能等, 是自熔性合金中应用最广的一种。为了提高增材制造的耐腐蚀性能, 选用 Ni60 合金粉末作为原料, 采用增材制造技术, 在 6063Al 表面获得添加稀土 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 Ni60 合金层, 实现逐层激光熔覆, 每层厚度在 800~1000  $\mu$ m, 最终得到三维金属零件。本实验只研究获得一层镍基合金层后, 稀土 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对 6063Al 表面 Ni 基合金层与基体结合界面的组织结构及耐腐蚀性的影响, 探讨稀土 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的作用效果和机制, 以期对激光增材制造后续研究提供有力的技术支撑。

## 1 实验

实验选用 6063Al 作为基材, 尺寸 50 mm×60 mm×12 mm, 其化学成分为(质量分数, %): Si 0.5, Fe 0.35, Cu 0.10, Mn 0.10, Mg 0.45~0.9, Cr 0.10, Zn 0.10, Ti 0.15, Al 余量。粉末材料选用 Ni60 合金与稀土 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末的混合物, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纯度 $\geq$ 99.99%, 粉

收稿日期: 2016-03-20

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

作者简介: 王成磊, 男, 1985 年生, 博士生, 讲师, 桂林电子科技大学, 广西 桂林 541004, E-mail: clw0919@163.com

末粒度为 20~60  $\mu\text{m}$ , Ni60 粉末的粒度为 35~100  $\mu\text{m}$ , 化学成分(质量分数, %): C 0.7~1.0, Si 3.5~3.5, Fe 3.5~5.0, B 3.5~4.5, Cr 15~20, Ni 余量。

首先,采用机械和化学混合方法消除 6063Al 表面的氧化膜,具体工艺路线:6063Al 表面细砂纸打磨-化学试剂(8%的盐酸)腐蚀-清水清洗-丙酮清洗-烘干。在 Ni60 合金粉末中加入 5%的  $Y_2O_3$ (质量分数,下同)制备 Ni60- $Y_2O_3$  混合粉末,将混合粉末经球磨充分混合后备用。设备采用 GS-TFL-6000 型 6 kW 大功率激光设备,整个激光增材制造在自制的氩气保护装置内进行,内部放置烘干的铝合金基材,预先充入一定流量的高纯氩气( $\geq 99.99\%$ ),使腔内氧含量小于 70  $\mu\text{L/L}$ ,激光处理过程在 Ar 气的保护氛围中进行,以防止熔池的吸氧和合金的氧化。激光工艺参数为:功率 4000 W,光斑直径 6 mm,扫描速度 600 mm/min。实现逐层激光熔覆,每层厚度在 800~1000  $\mu\text{m}$ ,最终得到三维金属零件。在相同工艺条件下,实验中同时制备了不添加  $Y_2O_3$  的 Ni60 合金层试样,以便进行对比研究。

用 ZEISS AXIO 型金相显微镜分析熔覆一层后的合金层的截面形貌;用 Bruker-axs-D8 型 X 射线衍射仪检测熔覆一层后的合金层的相结构;采用 JEOL/JSM-5610LV 扫描电镜(SEM)对熔覆一层后的合金层组织形貌进行观察分析;耐腐蚀性实验采用 PS-268A 型电化学测量仪,电解池为三电极系统,铂电极为辅助电极,饱和甘汞电极为参比电极,以将要测试的腐蚀试样为工作电极。腐蚀试样为:(1) 6063Al;(2) 熔覆一层后的 Ni60 合金层;(3) 熔覆一层后的 Ni60- $Y_2O_3$  合金层,腐蚀表面积均为 1 cm $\times$ 1 cm。腐蚀溶液:1 mol/L  $H_2SO_4$  溶液,3.5% NaCl 溶液,1 mol/L NaOH 溶液。

## 2 结果与分析

### 2.1 合金层截面形貌

图 1 是熔覆一层后的 Ni60- $Y_2O_3$  合金层和 Ni60 合金层的截面形貌,其中白色明亮的区域是 Ni 基合金层,平均厚度在 800~1000  $\mu\text{m}$ ,与基体结合界面处呈冶金结合。图 1a 的 Ni60- $Y_2O_3$  合金层中无气孔、裂纹,具有良好的熔覆形貌;图 1b 为未添加稀土的 Ni60 合金层,合金层内出现明显的气孔和裂纹,截面形貌较差。合金层中气孔主要是由 Ni60 复合粉末、Al 基体间隙中残存的气体和  $H_2O$  以及合金粉末中的 C、H 等元素与 O 反应生成的 CO、 $CO_2$  和水蒸气等造成。激光加热时,合金层表层与与保护气体接触,底部与 Al 基体接触,均具有较快的冷却速度,气体通过熔池对流和自然浮力快速上浮,但合金层表层的快速凝固会

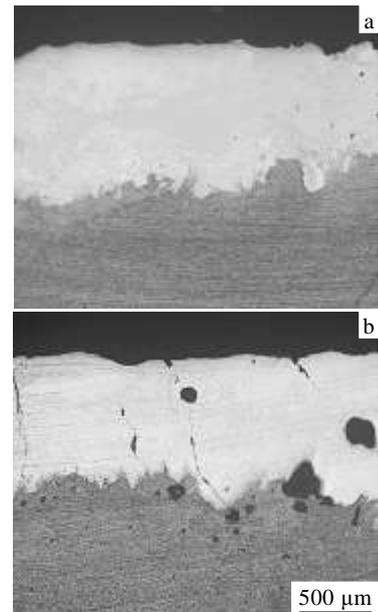


图 1 合金层的截面形貌

Fig.1 Section-morphologies of alloy layers: (a) Ni60- $Y_2O_3$  and (b) Ni60

使其底部气体无法逸出,其底部的快速凝固又使气体更易固封于合金层和基体的界面中。同时,激光熔覆的快速凝固时极易在凝固组织内部产生较大的热应力,凝固后造成残余拉应力,这些残余应力易沿晶界产生微裂纹,继而迅速沿脆性组织特定的晶面扩展、劈开,导致 Ni 基合金层的解理断裂,从而使合金层中出现大量裂纹。

因为适量的稀土氧化物在激光熔覆过程中可以提高熔池中熔体的流动性,促进气体排出,可以减少合金层中的孔洞。另外,稀土元素具有变质和细化晶粒的作用,其化学活性很强,与合金中 H、S 等杂质元素有较强的结合力,形成稳定的稀土化合物,抑制这些杂质元素引起组织疏松、气孔的出现,减小合金层中因组织不均匀产生的应力集中,从而控制了裂纹生成的概率;而且根据 Hall-Patch 公式,晶粒细化可以提高合金层组织的强韧性,减小裂纹的扩展,弱化 Ni 基合金的沿晶断裂倾向。故与未添加稀土的 Ni60 合金层相比, Ni60- $Y_2O_3$  合金层中气孔和裂纹大幅降低,具有较好的组织形貌。

### 2.2 合金层的相结构

图 2 是 Ni60- $Y_2O_3$  合金层和 Ni60 合金层的表面 XRD 图谱。可见,2 种合金层的主要相结构均为  $\beta$ -NiAl (Cr)和少量的  $Al_3Ni$ 、 $AlNi_3$ 、Al 等。Ni60- $Y_2O_3$  合金层中出现  $Y_2O_3$ 、 $YAl_3$ 、 $AlNiY$ 、 $Ni_{17}Y_2$  等多种稀土化合物的衍射峰,说明在 Ni60- $Y_2O_3$  合金层中形成

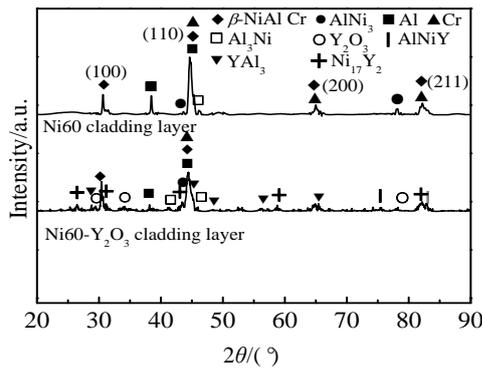


图 2 合金层的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of alloy layers

了稀土化合物，极少量  $Y_2O_3$  在 Ni60 合金层中以稳定的夹杂物形式存在于组织中。另外，从衍射图中可以看出添加稀土以后 NiAl 相的(110) 有序峰强度有显著降低，这可能与其晶粒的细化有关。

### 2.3 合金层微观组织

图 3 是 Ni60- $Y_2O_3$  合金层和未加稀土 Ni60 合金层的表面 SEM 形貌，合金层组织是呈铸态的 NiAl-Cr 共晶组织，为浅灰色的初生 NiAl 相和镶嵌在其上的沉淀相  $\alpha$ -Cr 相。对比图 3a、3b 可知，Ni60- $Y_2O_3$  合金层比未加稀土 Ni60 合金层孔隙率大幅降低，晶粒度变大且细化作用明显，晶粒分布较弥散。分析原因：稀土是表面活性元素，可以降低金属液体的表面张力，降低形核功，增加结晶核心数量；稀土 Y 易沿晶粒的

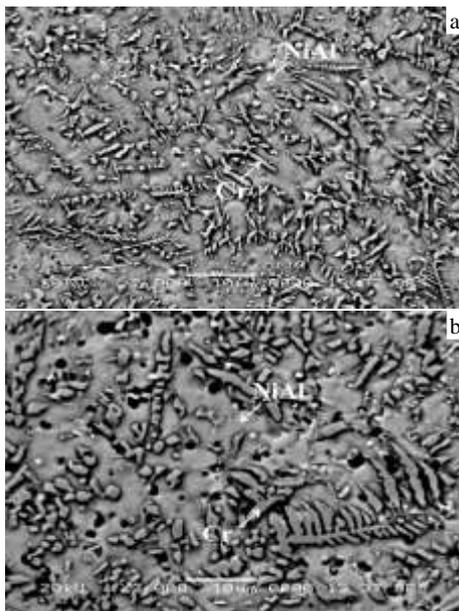


图 3 合金层的表层形貌

Fig.3 Surface morphologies of alloy layers: (a) Ni60- $Y_2O_3$  and (b) Ni60

晶界、位错等处扩散渗入，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，从而阻碍晶体的扩散和生长。稀土  $Y_2O_3$  和其分解产生的 [Y] 可与 H、S、O 等杂质化合形成夹杂物粒子作为非自发结晶核心促进形核率的提高。故稀土  $Y_2O_3$  可以改善 6063Al 表面 Ni60 合金层的组织，促进晶粒细化和组织分布均匀。

### 2.4 合金层的耐腐蚀性

#### 2.4.1 腐蚀极化曲线

图 4 是试样在 3 种不同溶液中的极化曲线，根据图 4a、4b、4c 分别得到表 1、表 2 及表 3 中的自腐蚀电位  $E_k$  和自腐蚀电流密度  $i_{corr}$  等结果，由自腐蚀电流密度计算出试样相对耐蚀性。由图 4a 可知，在 1 mol/L  $H_2SO_4$  溶液中，随着电位升高，在阴极极化阶段，Ni60 合金层的电流密度随之逐渐降低，Ni60- $Y_2O_3$  合金层电流密度几乎不变，且远低于 Ni60 合金层的电流密度。Ni60- $Y_2O_3$  合金层在电位升高到其自腐蚀电位  $E_k = -437.71$  mV 时进入阳极极化，其自腐蚀电位与 Ni60 合金层试样 ( $E_k = -408.06$  mV) 相差不大。在阳极腐蚀阶段，Ni60- $Y_2O_3$  合金层在相同电位时的电流密度远小于 Ni60 合金层，同一电位下，极化电流密度越大的试样失去电子的倾向越大，耐腐蚀性降低。结合表 1 可知，添加  $Y_2O_3$  的 Ni60 合金层的耐酸腐蚀性有一定提高，Ni60- $Y_2O_3$  合金层耐  $H_2SO_4$  腐蚀性能是 Ni60 合金层 4.07 倍。

在图 4b 中，3.5% NaCl 溶液中 Ni60- $Y_2O_3$  合金层在腐蚀电位升高到其自腐蚀电位  $E_k = -644.65$  mV 时进入阳极极化，Ni60 合金层在  $E_k = -710.62$  mV 时进入稳定的阳极极化，即 Ni60- $Y_2O_3$  合金层  $E_k$  值略高于 Ni60 合金层。自腐蚀电位的高低是判断材料在腐蚀性介质中的耐蚀性强弱的热力学依据，自腐蚀电位越高，表明材料在该介质中具有较好的耐蚀倾向，因此从热力学角度说明 Ni60- $Y_2O_3$  合金层比 Ni60 合金层具有较高的耐盐蚀倾向。在阳极腐蚀阶段，Ni60- $Y_2O_3$  合金层在相同电位时的电流密度同样远小于 Ni60 合金层试样，从腐蚀动力学角度，电流密度越小，则试样耐腐蚀性越强。结合表 2 可知，在 3.5% NaCl 溶液中，Ni60- $Y_2O_3$  合金层的耐腐蚀性是 Ni60 合金层的 4.3 倍。

图 4c 的 1 mol/L NaOH 溶液中，Ni60- $Y_2O_3$  合金层自腐蚀电位  $E_k = -1020.21$  mV，Ni60 合金层在  $E_k = -1171.23$  mV 时进入阳极极化，Ni60- $Y_2O_3$  合金层  $E_k$  值明显高于 Ni60 合金层，从热力学角度分析，Ni60- $Y_2O_3$  合金层具有较好的耐蚀倾向。根据试样自腐蚀电流密度，结合表 3 可知：在 1 mol/L NaOH 溶液中，

Ni60-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金层的耐腐蚀性是 Ni60 合金层的 2.3 倍。

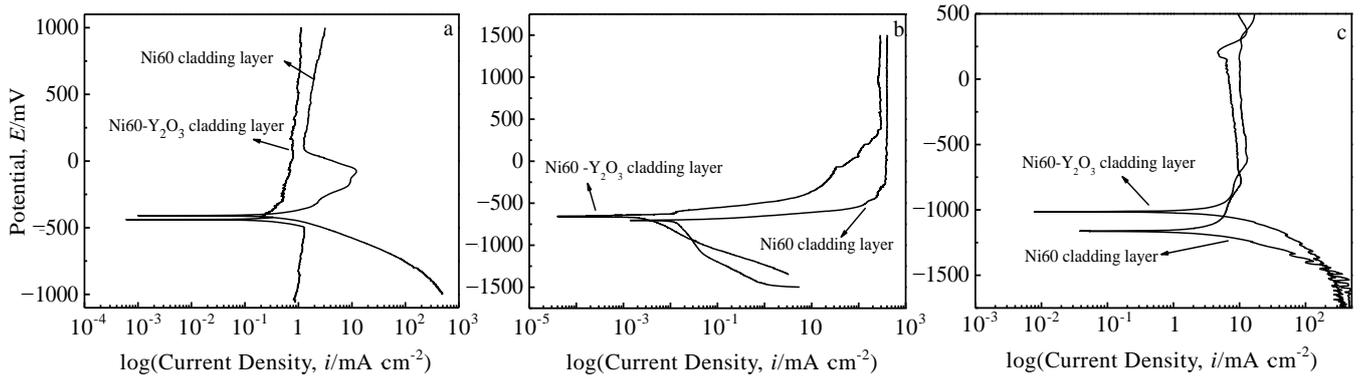


图 4 合金层在 3 种溶液中的极化曲线

Fig.4 Polarization curves of alloy layers in three solutions: (a) 1 mol /L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution, (b) 3.5% NaCl solution, and (c) 1 mol/L NaOH solution

表 1 合金层在 1 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中的腐蚀测试结果

Table 1 Corrosion test results of the samples in 1 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution

Alloy layers	Self-corrosion potential, $E_k/mV$	Initial-passive current density, $i_b/mA\ cm^{-2}$	Passive current density, $i_p/mA\ cm^{-2}$	Self-corrosion current density, $i_{corr}/mA\ cm^{-2}$	Relative corrosion rate
Ni60	-408.06	1.32	12.01	0.6915	4.07
Ni60-Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-437.71	-	0.3216	0.1701	1

表 2 合金层在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀测试结果

Table 2 Corrosion test results of the samples in 3.5% 的 NaCl solution

Alloy layers	Self-corrosion potential, $E_k/mV$	Initial-passive current density, $i_b/mA\ cm^{-2}$	Passive current density, $i_p/mA\ cm^{-2}$	Self-corrosion current density, $i_{corr}/mA\ cm^{-2}$	Relative corrosion rate
Ni60	-710.62	-	369.12	0.0116	4.30
Ni60-Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-644.65	-	287.35	0.0027	1

表 3 合金层在 1 mol/L NaOH 溶液中的腐蚀测试结果

Table 3 Corrosion test results of the samples in 1mol/L NaOH solution

Alloy layers	Self-corrosion potential, $E_k/mV$	Initial-passive current density, $i_b/mA\ cm^{-2}$	Passive current density, $i_p/mA\ cm^{-2}$	Self-corrosion current density, $i_{corr}/mA\ cm^{-2}$	Relative corrosion rate
Ni60	-1171.23	-	13.18	3.818	2.30
Ni60-Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-1020.21	-	10.70	1.659	1

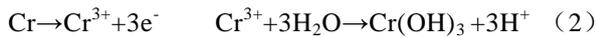
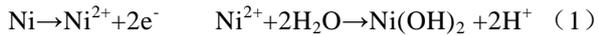
### 2.4.2 腐蚀表面形貌

图 5~图 7 是 Ni60-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金层和 Ni60 合金层分别在 3 种溶液中的表面腐蚀形貌。图 5 为 1 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中的腐蚀形貌, 在高倍放大下可以看出合金层表层明显的沿晶界腐蚀区域, 图 5a 的 Ni60-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金层腐蚀面较为平整, 有较小的晶界腐蚀痕迹, 无组织脱落; 而 Ni60 合金层表面出现严重的晶界腐蚀和组织脱落, 属于较强烈的面腐蚀, 腐蚀程度远高于 Ni60-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金层。晶界处杂质原子偏聚, 缺陷较多, 导致晶内和晶界的腐蚀电位不同, 从而存在腐蚀电位差, 添加 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的合金层气孔和裂纹大幅度减少从而提高了耐蚀性。

图 6 是合金层在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀形貌, 2 种合金层均为面腐蚀, 图 6a 中 Ni60-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金层的腐蚀程度较轻, 图 6b 的 Ni60 合金层腐蚀面上可以看到较大的晶粒组织。由于 NaCl 腐蚀液中存在半径较小的 Cl<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> 会在金属表面上吸附并渗入组织内部, 进入金属表面钝化膜, 并向内部扩散, 减小了膜的保护作用, 使腐蚀速率增大。此外, Cl<sup>-</sup> 可通过降低金属氧化还原电位, 扩大金属腐蚀范围。

图 7 是合金层在 1 mol/L NaOH 溶液中的腐蚀形貌, Ni60-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金层出现微弱的点蚀, Ni60 合金层出现较大的孔蚀和点蚀。在 Ni60 合金层的组织缺陷(如气孔、裂纹)处容易产生应力集中区, 这些区域附近组织的界面能较高, 原子活性较强, 主要元素 Ni、

Cr 易产生化学反应:



NaOH 溶液中的 pH 值较大, 金属溶解所释放的 H<sup>+</sup> 迅速与 OH<sup>-</sup> 反应, 从而加剧了 Ni、Cr 等元素的溶解, 破坏钝化膜。溶解形成的腐蚀点逐步扩大成孔洞, 腐

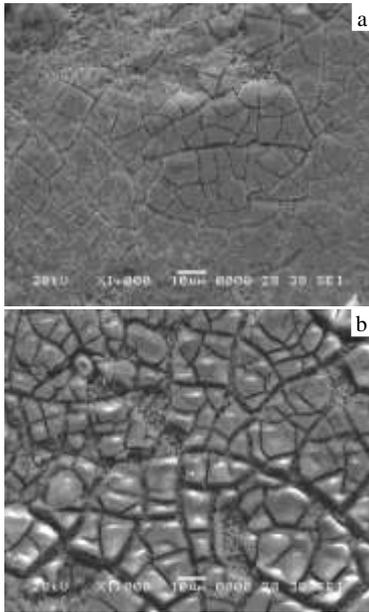


图 5 合金层在 1 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中的腐蚀形貌

Fig.5 Corrosion morphologies of the alloy layers in 1 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution: (a) Ni60-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and (b) Ni60

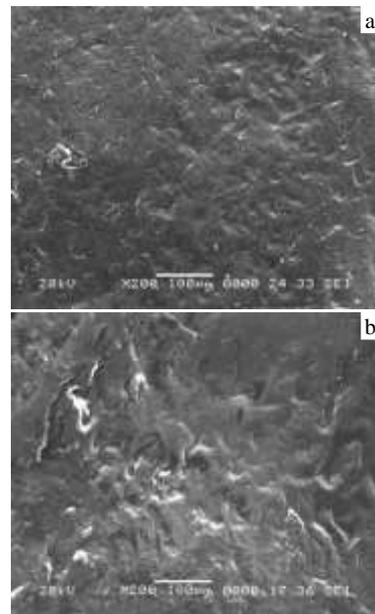


图 7 合金层在 1 mol/L NaOH 溶液中的腐蚀形貌

Fig.7 Corrosion morphologies of the alloy layers in 1 mol/L NaOH solution: (a) Ni60-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and (b) Ni60

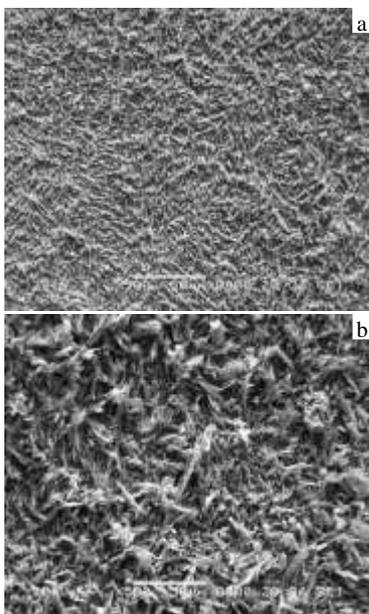


图 6 合金层在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀形貌

Fig.6 Corrosion morphologies of the alloy layers in 3.5% NaCl solution: (a) Ni60-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and (b) Ni60

蚀孔洞会成为腐蚀的中心区域, 随着时间延长, 腐蚀速度因其自催化过程而加快。

结合图 1、图 3 中的合金层组织结构分析可知: 加入稀土 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 Ni60 合金层气孔和裂纹等缺陷大幅减小, 从而有效提高了合金层的耐蚀性。尤其是 Ni60 合金层中大的 Cr 颗粒的存在, 会在晶粒周围产生残余应力场, 形成应力集中, 加剧应力腐蚀倾向; 而加入稀土通过改善组织可以控制在组织缺陷、晶界和晶格畸变处形成的原电池反应, 减小了腐蚀程度。

### 3 结 论

1) 镍基合金层与基体结合界面处呈冶金结合, 与未添加稀土的 Ni60 合金层相比, Ni60-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金层中宏观组织的气孔和裂纹大幅降低, 微观组织中孔隙率减小, 晶粒度变大且细化作用明显, 晶粒分布较弥散, 具有较好的组织形貌。

2) Ni60 合金层表面主要相结构为 β-NiAl(Cr)、Al<sub>3</sub>Ni、AlNi<sub>3</sub>、Al 等, 添加 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 后的合金层中出现了 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、YAl<sub>3</sub>、AlNiY、Ni<sub>17</sub>Y<sub>2</sub> 等稀土化合物的衍射峰。

3) 在 1 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中, 添加 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 Ni60 合金层的耐酸腐蚀性是 Ni60 合金层的 4.07 倍; 在 3.5%



NaCl 溶液中, Ni60- $Y_2O_3$  合金层的耐腐蚀性是 Ni60 合金层的 4.3 倍; 在 1 mol/L NaOH 溶液中, Ni60- $Y_2O_3$  合金层的耐腐蚀性是 Ni60 合金层的 2.3 倍。

#### 参考文献 References

- [1] Edwards P, O'Conner A, Ramulu M. *J Manuf Sci E-T Asme*[J], 2013, 135(6): 061 016
- [2] Thijs Lore, Verhaeghe Frederik, Craeghs Tom *et al. Acta Materialia*[J], 2010, 58(9): 3303
- [3] Liu C M, Wang H M, Tian X J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 590: 30
- [4] Sun Xiaomin(孙晓敏), Liu Dong (刘 栋), Tang Haibo(汤海波) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(4): 724
- [5] Su Haijun(苏海军), Wei Kaichen(尉凯晨), Guo Wei(郭 伟) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2013, 23(6): 1567
- [6] Song M H, Lin X, Huang W D. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2014, 214(3): 701
- [7] Wang Huaming(王华明). *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*(航空学报)[J], 2014, 35(3): 624
- [8] Zhang Ali(张阿莉), Liu Dong (刘 栋), Tang Haibo(汤海波). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(7): 1686
- [9] Li Huaixue(李怀学), Huang Baiying(黄柏颖), Sun Fan(孙 帆) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(S2): 209
- [10] Wang Huaming(王华明), Zhang Shuquan(张述泉), Wang Xiangming (王向明) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2009, 36(12): 3204
- [11] Qu H P, Wang H M. *Materials and Design*[J], 2010, 31: 574
- [12] Gao Yuan(高 原), Wang Chenglei(王成磊), Huang Jiaqiang (黄家强) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(S2): 309

## Effect of $Y_2O_3$ Addition on Interface Structure and Corrosion Resistance of Laser Additive Manufacturing on the Surface of Al Alloys

Wang Chenglei, Gao Yuan, Zhang Guangyao

(Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Ni60- $Y_2O_3$  alloy layers were prepared on the surface of 6063 aluminum alloy by laser additive manufacturing. The effects of rare earth  $Y_2O_3$  addition on microstructure, phase structure and corrosion resistance of bonding interface between Ni60- $Y_2O_3$  alloy layers and substrate were investigated by OM, XRD, SEM and electrochemical corrosion tester. The results show that an excellent bonding between the alloy layers and the substrate is ensured by a strong metallurgical interface. Ni60- $Y_2O_3$  alloy layers have less cracks, holes and porosity, and more refined grain size than Ni60 alloy layers without rare earth addition. The main phase structures of Ni60 alloy layers are  $\beta$ -NiAl (Cr),  $Al_3Ni$ ,  $AlNi_3$ , Al, etc. After adding rare earth  $Y_2O_3$ , the diffraction peaks of  $Y_2O_3$ ,  $YAl_3$ ,  $AlNiY$  and  $Ni_{17}Y_2$  are found in the Ni60- $Y_2O_3$  alloy layers. Electrochemical corrosion tests show that the corrosion resistance of Ni60- $Y_2O_3$  alloy layer is 4.07 times as that of Ni60 alloy layer in 1 mol/L  $H_2SO_4$  solution; in 3.5% NaCl solution, the corrosion resistance of Ni60- $Y_2O_3$  alloy layer is 4.3 times as that of Ni60 alloy layer; in 1 mol/L NaOH solution, the corrosion resistance of Ni60- $Y_2O_3$  alloy layer is 2.3 times as that of Ni60 alloy layer. It is visible that rare earth  $Y_2O_3$  addition refines Ni60 alloy layer grains, improves structure, and significantly increases the corrosion resistance of the alloy layer.

**Key words:** laser additive manufacturing; rare earth;  $Y_2O_3$ ; nickel-base; corrosion

Corresponding author: Gao Yuan, Ph. D., Professor, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, P. R. China, E-mail: 13978375394@163.com