

稀土 La_2O_3 对 6063Al 激光熔覆 Ni 基熔覆层 微观结构的影响

张光耀 王成磊* 高原 韦文竹 陆小会

(桂林电子科技大学, 广西 桂林 541004)

摘要 利用激光熔覆技术,在 6063Al 表面制备了添加有不同含量 La_2O_3 的 Ni60 合金熔覆层,并通过金相显微镜、X 射线衍射仪(XRD)、扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)等设备进行了测试分析,研究 La_2O_3 含量对铝合金表面激光熔覆 Ni 基熔覆层组织、相结构、成分等微观结构的影响。结果表明:当合金中稀土 La_2O_3 含量高于 5% (质量分数,下同)时熔覆层易出现气孔,低于 2% 时易出现熔覆层开裂、与基体结合不良等缺陷,加入 5% 的稀土氧化物 La_2O_3 可有效地减少熔覆层中的裂纹、孔洞;不同 La_2O_3 含量的熔覆层主要相结构均为 β -NiAl (Cr) 和少量的 Al_3Ni 、 AlNi_3 、Al 等,添加稀土以后 XRD 图中出现了微量的稀土化合物 La_2O_3 、 Al_4La , 且 NiAl 相的 (100) 有序峰几乎消失,晶粒取向偏向于 (110)、(200) 和 (211), 而 (110) 有序峰出现不同程度的偏移;添加 5% La_2O_3 的熔覆层比不添加稀土的 Ni60 熔覆层元素分布均匀,稀释率更低,组织中孔隙率大幅降低,晶粒度变大且细化作用明显;熔覆层主要成分为 NiAl-Cr 共晶组织,稀土元素偏聚在晶界位置并形成了稳定的 Al_4La 等稀土化合物。

关键词 材料; 激光熔覆; 稀土; La_2O_3 ; 镍

中图分类号 TG115 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.1103001

Effect of Rare Earth La_2O_3 on the Microstructure of Laser Cladding Ni-Based Coatings on 6063 Al Alloys

Zhang Guangyao Wang Chenglei Gao Yuan Wei Wenzhu Lu Xiaohui

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

Abstract Ni-Based alloy coatings with different contents of rare-earth La_2O_3 are prepared on the surface of 6063 aluminum alloy by using laser cladding. The effects of rare earth La_2O_3 on microstructure, phase structure and composition of laser cladding Ni-Based alloy coatings on 6063 Al alloys are investigated by means of optical microscope (OM), X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS). The results show that with increasing the amount of La_2O_3 (above 5%), the cladding layer tends to form gas-holes. When the amount of La_2O_3 is in the range of 0% ~ 2% the same below, the cladding layer tends to form cracks, and coating can't bind tightly with the matrix. Gas-holes and cracks in the coatings reduced with the addition of 5% La_2O_3 . The main phase structures of Ni-based alloy coatings with different contents of rare-earth La_2O_3 are β -NiAl (Cr) and a small amount of Al_3Ni , AlNi_3 , Al, etc. After adding rare earth, a little of rare earth compounds La_2O_3 , Al_4La is found in XRD diagrams, and NiAl phase (100) crystallographic orientation peak almost disappeared, grain orientation towards (110), (200) and (211), and (110) crystallographic orientation peaks appear different degrees of migration; Compared with Ni60 cladding layer without adding rare earth, Ni60 cladding layer with 5% of rare-earth La_2O_3 has a uniform element distribution, a lower dilution rate, which significantly reduce the porosity and

收稿日期: 2014-04-16; **收到修改稿日期:** 2014-06-04

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(桂科攻 12118020-2-2-1)、广西信息材料重点实验室项目(1210908-214-Z)、桂林电子科技大学-桂林电科院研究生联合培养基地专项经费(20121225-10-Z)

作者简介: 张光耀(1989—),男,硕士研究生,主要从事材料表面改性方面的研究。E-mail: zhangguangyao001@126.com

导师简介: 高原(1954—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事材料表面改性和薄膜合成技术等方面的研究。

E-mail: gaoyuanguilin@126.com

* **通信联系人.** E-mail: clw0919@163.com

refine the grain size; The cladding layer mainly composed of NiAl-Cr eutectic structure, rare earth elements segregate at the grain boundary and form some stable rare earth compound such as Al_3La .

Key words materials; laser cladding; rare earth; La_2O_3 ; nickel

OCIS codes 160.3900; 240.6700; 310.1515; 160.5690

1 引 言

铝及铝合金是有色金属中应用最广泛的材料之一,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。在日常生产和生活以及航空、汽车、高铁、发动机活塞、光学仪器、导弹镶嵌结构等领域取得了广泛应用。但铝合金的硬度低,易产生塑性变形,且耐磨性、耐腐蚀性等表面性能较差,这些阻碍了它在机械制造、高铁、船舶、汽车等关键零部件领域的进一步发展应用^[1-3]。铝合金表面激光熔覆 Ni 基合金可以大幅度改善铝合金由于硬度低等造成的表面性能差的应用缺陷。Ni 基合金具有较高的硬度、耐磨性、良好的机械性能,采用激光熔覆技术在钢铁等材料表面熔覆 Ni 基合金已获得了广泛的应用,改善了材料的表面性能^[4-6]。在铝合金表面激光熔覆 Ni 基合金也取得了一定进展,可被应用于汽车、高铁、食品加工机械等行业中常用的齿轮、涡轮、轴套、滑块、发动机缸体和气阀圈等零部件的表面强化加工中,既能满足产品设计要求的轻量化,同时保持了铝合金强韧性和激光熔覆表面的高硬度、高耐磨性^[7]。但由于 Ni 基、Al 基合金物理和化学性能的差异,在铝合金表面熔覆 Ni 基合金常不可避免地出现大量组织缺陷^[8]。

稀土元素的化学活性强,原子半径大,具有特殊的 4f 轨道电子,电负性低。目前,一些研究者采用稀土元素进行合金化熔覆涂层的研究证明,稀土元素在金属表面的改性中的作用是多方面的,并且效果十分显著,但在稀土元素对铝合金的合金化和熔覆涂层影响方面的研究较少^[9]。本文采用激光熔覆技术在 6063Al 表面获得添加有不同含量 La_2O_3 的 Ni60 熔覆层,并通过金相显微镜、X 射线衍射仪(XRD)、扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)等设备的测试分析,探讨稀土氧化物 La_2O_3 的作用效果和机制,研究不同含量的 La_2O_3 对铝合金表面激光熔覆 Ni 基熔覆层组织结构的影响。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

熔覆基体材料为 6063Al,尺寸 50 mm × 60 mm × 12 mm,其化学成分为(质量分数,下同):

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。熔覆材料为 Ni60 合金与稀土 La_2O_3 粉末的混合物, La_2O_3 纯度大于等于 99.99%,粉末粒度约为 20~60 μm , Ni60 粉末的粒度为 35~100 μm ,化学成分为: C 0.7~1, Si 3.0~3.5, Fe 小于 5, B 3.5~4.5, Cr 15~20, Ni 余量。 La_2O_3 的质量分数分别选取 0%、2%、4%、5%、6%、7%、10%,共 7 种。

2.2 熔覆试样制备

首先采用机械和化学混合方法来消除铝合金表面的氧化膜,具体工艺路线:铝合金表面细砂纸打磨-化学试剂(体积分数为 8%的盐酸)浸泡-清水清洗-丙酮清洗-烘干。

将 7 种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 1 mm,试验优化出的激光工艺参数为:功率为 4000 W,光斑直径 6 mm,扫描速度 600 mm/min,搭接率为 30%。

2.3 检测设备

用 ZEISS AXIO 型金相显微镜分析熔覆层的截面形貌;用 Bruker-axs-D8 型 X 射线衍射仪检测熔覆层表层的相结构;采用日本 JEOL/JSM-5610LV 扫描电镜对熔覆层组织进行观察分析,并用能谱仪对熔覆层及晶体组织元素含量进行检测。

3 试验结果与分析

3.1 熔覆层截面形貌

图 1 是 7 种添加有不同含量 La_2O_3 的熔覆层截面形貌,其中白色明亮的区域是 Ni 基熔覆层,平均厚度在 800~1 000 μm 。从图中可以看出,在相同激光工艺参数下,含有不同稀土 La_2O_3 含量的熔覆层呈现不同的截面形貌。图 1(a)为未添加稀土的 Ni60 熔覆层,熔覆层内出现明显的气孔和裂纹,气孔和开裂是激光熔覆中常见的缺陷,会严重影响熔覆层与基体的冶金结合强度以及熔覆层的机械性能。在激光熔覆的快速凝固作用下,不均匀或偏析的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,即导致 Ni 基熔覆层的解理断裂^[10]。熔覆层中的气孔主要是

由 Ni60 复合粉末、Al 基体间隙中残存的气体、 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^[11]。这些物质在熔覆层内部受热膨胀并不断聚集形成气泡上浮,但因在激光快速凝固前来不及逸出而被固封于熔覆层内部及界面中。图 1 中基体内的均有不同程度的气孔,这是由于激光加热时,6063Al 基体熔点较低(约 $600\text{ }^\circ\text{C}$),Ni 基熔覆层材料熔点约 $1050\text{ }^\circ\text{C} \sim 1150\text{ }^\circ\text{C}$,导致熔覆过程中熔覆层底部的铝合金受热熔化,并有气泡产生。熔覆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,但熔覆层表层的快速凝固会使其底部气体无法逸出,底层的快速凝固又使气体更易固封于熔覆层和 6063Al 基体中。气孔可以导致熔覆层结构疏松,降低性能,甚至引发熔覆层脱落,同时气孔也是引起应力集中的

重要因素,提高了熔覆层开裂的几率。

含有 2% La_2O_3 的 Ni60 熔覆层[图 1(b)]与基体之间出现剥离,结合不良。由于基体 Al 合金和 Ni 基熔覆材料的物理特性(如强韧性、脆性、热膨胀系数等)相差较大,形变量差别很大,造成开裂分离^[12];4% La_2O_3 + Ni60 熔覆层与基体界面附近有少量的气孔,无裂纹[图 1(c)],组织形貌明显优于未添加稀土的 Ni60 熔覆层和 2% La_2O_3 + Ni60 的熔覆层,6% La_2O_3 + Ni60 的熔覆层[图 1(e)],7% La_2O_3 + Ni60 熔覆层[图 1(f)],10% La_2O_3 + Ni60 熔覆层[图 1(g)]的主要缺陷是气孔,在熔覆层和 6063Al 基体的界面处以及熔覆层组织中均出现了较大气孔。相比较而言,5% La_2O_3 + Ni60 熔覆层[图 1(d)]厚度较均匀,无明显的气孔和裂纹,具有较好的组织形貌。

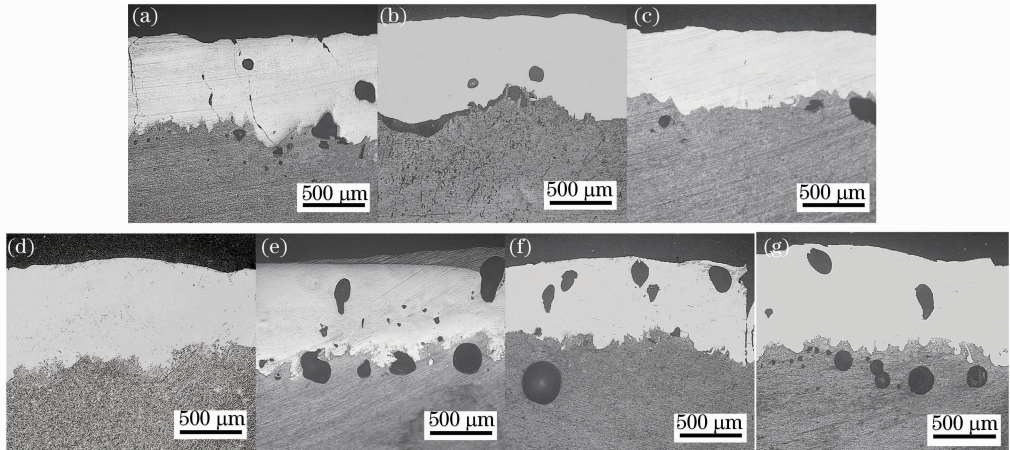


图 1 不同 La_2O_3 含量的熔覆层截面形貌。(a) 0%; (b) 2%; (c) 4%; (d) 5%; (e) 6%; (f) 7%; (g) 10%

Fig. 1 Cladding layer section-morphology of different La_2O_3 contents. (a) 0%; (b) 2%; (c) 4%; (d) 5%; (e) 6%; (f) 7%; (g) 10%

由图 1 可知,当激光熔覆合金中稀土 La_2O_3 含量高于 5% 时熔覆层易出现气孔,低于 2% 时易出现熔覆层开裂、与基体结合不良等缺陷,加入 5% 的稀土氧化物 La_2O_3 可有效地减少熔覆层中的裂纹、孔洞。这是因为,一方面, La_2O_3 具有改善熔覆层熔池对流性的作用,可以促进气体排出。部分研究发现稀土氧化物对激光辐照能量吸收率有较大的影响,这导致了激光熔覆层吸收率因稀土含量的变化而改变,适量的稀土通过提高激光吸收率改善熔池,提高熔池流动性并改善其组织结构^[13]。但是, La_2O_3 加入量较低时不能有效提高熔池对流,使气体不能充分逸出;当 La_2O_3 加入量超过一定值又会导致夹杂物总量增多,同时使熔池流动性降低,熔覆层中 B、

Si 等造渣元素产生的化合物难以排出,使渣留在熔覆层中,不利于熔覆层组织均匀性和气体的排出^[14]。另一方面,稀土元素的化学活性很强,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,适当的稀土氧化物(如 5% La_2O_3)抑制了这些杂质元素引起的组织疏松、气孔的出现,减小了熔覆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。

3.2 熔覆层的相结构分析

图 2 是不同 La_2O_3 含量的熔覆层表面 XRD 衍射图谱,不同 La_2O_3 含量的熔覆层的主要相结构均为 $\beta\text{-NiAl}(\text{Cr})$ 和少量的 Al_3Ni 、 AlNi_3 、Al 等,由于 $\beta\text{-NiAl}$ 与体心结构的 Cr 具有较小的晶格失配度,

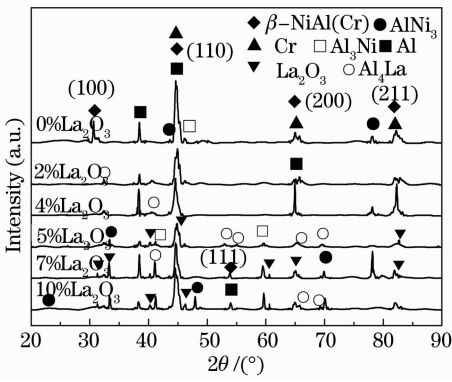


图2 熔覆层的 XRD 图

Fig.2 XRD diagram of cladding layers

其衍射峰几乎重合。加入稀土后，XRD 图中出现了微量的稀土化合物 La_2O_3 、 Al_4La ，当 La_2O_3 含量较高时， La_2O_3 的峰更加明显。说明 La_2O_3 添加较多时会有部分 La_2O_3 不参与化学反应，将以稳定的夹杂物的形式存在于熔覆层中。另外，可以看出添加稀土以后 NiAl 相的(100)有序峰几乎消失，晶粒取向偏向于(110)、(200)和(211)，而(110)有序峰出现不同程度的偏移，说明 NiAl 相的固溶度得到提高，峰的强度也有降低，这可能与其晶粒的细化有关。

3.3 熔覆层元素分布

图3是未加稀土 Ni60 熔覆层和 5% La_2O_3 + Ni60 熔覆层的 SEM 形貌，分别在熔覆层内从表层至底层不同深度处进行 EDS 面扫描(图中点1#、2#、3#、4#处)，得出表1的熔覆层不同位置的主要元素含量。为了与熔覆前均匀分布的预涂粉末进行对比，元素含量也以质量百分比计算。

表1中未加稀土 Ni60 熔覆层从表层至底部主要元素 Ni、Al、Cr 的变化幅度很大，元素分布不均匀，尤其在较深处的2#、3#、4#检测点，Al 的质量分数达到甚至超过了 Ni 元素的质量分数，说明激光加热时有大量基体元素 Al 熔化进入熔覆层中，导致熔池稀释率提高，这必然影响熔覆层质量。5% La_2O_3 + Ni60 熔覆层的主要元素含量随深度的增加无大幅波动，但有明显的过渡趋势，Ni、Cr、La 等熔覆元素随深度的增加有微弱降低，Al 作为基体元素则有一定提高，但其比重没有超过 Ni 元素，熔覆层稀释率较未加稀土的 Ni60 熔覆层明显降低。另外，在 5% La_2O_3 + Ni60 熔覆层的不同深度处均检测到稀土元素 La，并且熔覆层顶部的含量高于底部。由以上分析可知，添加 5% La_2O_3 的 Ni60 熔覆层比不添加稀土的熔覆层元素分布均匀，稀释率更低。

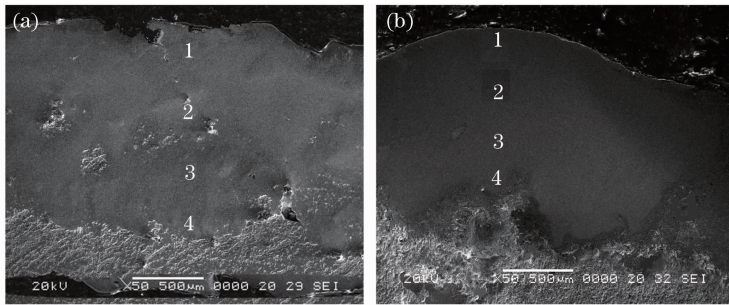


图3 熔覆层 SEM 形貌。(a) 0% La_2O_3 + Ni60 熔覆层；(b) 5% La_2O_3 + Ni60 熔覆层

Fig.3 SEM morphology of cladding layer. (a) 0% La_2O_3 + Ni60 cladding layer; (b) 5% La_2O_3 + Ni60 cladding layer

表1 熔覆层的主要元素含量

Table 1 Main elements content of cladding layer

Detection position	Element						
	Al	Si	Cr	Fe	Ni	La	
No rare earth Ni60 cladding layer	1#	12.61	2.07	47.22	3.48	34.62	0
	2#	33.86	2.15	3.15	3.54	57.3	0
	3#	38.54	1.83	16.62	3.44	39.57	0
	4#	43.64	1.35	17.83	3.26	33.93	0
5% La_2O_3 + Ni60 cladding layer	1#	19.04	2.5	10.13	4.52	62.89	0.92
	2#	18.75	3.07	10.31	4.45	61.88	1.55
	3#	18.79	2.92	6.65	5.06	65.54	1.04
	4#	22.68	2.26	11.4	3.84	59.16	0.66

3.4 熔覆层的表面微观结构分析

图 4 是未加稀土 Ni60 熔覆层和 5% La_2O_3 + Ni60 熔覆层的表面 SEM 形貌, 熔覆层组织呈铸态的胞晶、柱状晶和枝晶组织, 为典型的共晶组织。对比图 4(a)、(b) 可知, 5% La_2O_3 + Ni60 熔覆层比未加稀土 Ni60 熔覆层孔隙率大幅降低, 晶粒度变大且细化明显, 晶粒分布较弥散。这是因为, 稀土元素是表面活性元素, 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。另外, 稀土元素在金属凝固前可与 H、S 等杂质化合形成粒子作为非自发结晶核心阻止晶粒长大。

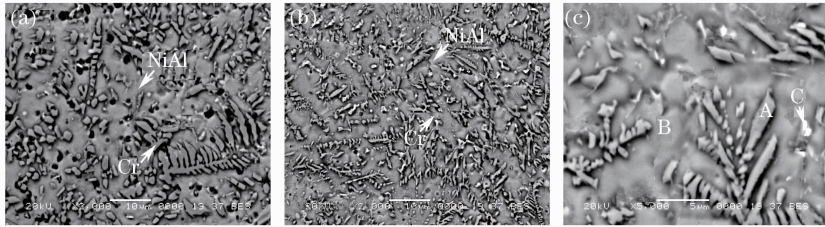


图 4 熔覆层 SEM 形貌。(a) Ni60 熔覆层; (b) 5% La_2O_3 + Ni60 熔覆层; (c) 5% La_2O_3 + Ni60 熔覆层 A、B、C 三种典型组织

Fig. 4 SEM of the cladding layer. (a) Ni60 cladding layer; (b) 5% La_2O_3 + Ni60 cladding layer; (c) A、B、C typical tissue of 5% La_2O_3 + Ni60 cladding layer

结合图 2 的 XRD 图谱, 表 1、表 2 的 EDS 检测结果, 可以看出, 5% La_2O_3 + Ni60 熔覆层主要成分为 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 Cr 相。枝晶 A 为体心结构的 Cr 相, 由于 NiAl 和 Cr 具有典型的立方-立方取向关系, 当 Cr 含量较大时发生共晶反应, 有大量的 α -Cr 沉淀相析出, 形成 NiAl-Cr 共晶合金组织。NiAl 与 α -Cr 具有较小的晶格失配度, 其共晶组织还具有较宽的成分范围, 所以在图 4 的凝固组织中作为第二相析出形成树枝晶 A。表 2 中 α -Cr 相中含有大量的 Ni、Al 元素, 从 NiAl-Cr 相图中可以看出, α -Cr 相区是一个倒三角形, α -Cr 本身还可以溶解大量的

表 2 5% La_2O_3 + Ni60 熔覆层不同组织元素含量(原子数分数, %)

Table 2 Elements content of 5% La_2O_3 + Ni60 cladding layer of different structures (atom fraction, %)

Structure	Element						
	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	La
A	12.7	1.02	70.51	0.21	2.34	13.23	0
B	45.61	3.13	1.51	0.05	1.98	47.64	0.07
C	64.62	5.48	3.04	0.02	2.66	8.16	16.02

图 4(c) 中在 NiAl 相的晶界处出现了白色的富稀土 C 相, 从中检测出了含量较高的稀土 La, 说明稀土元素偏聚在晶界位置并形成了稳定的稀土化合物。根据原子百分比可判断出 C 相主要成分为

将图 4(b) 中的晶体组织放大 5000 倍得图 4(c) 中的 5% La_2O_3 + Ni60 熔覆层 A、B、C 三种典型组织, 三种组织对应的 EDS 分析结果如表 2 所示, 数量较少的树枝晶 A 相主要含 Ni、Al、Cr、Fe、Si 元素, Ni : Al : Cr : Fe : Si 的原子百分比为 13.23 : 12.7 : 70.51 : 2.34 : 1.02, Cr 元素含量最高, 晶粒内未检测到稀土元素 La。数量较多的胞晶 B 相仍含 Ni、Al、Fe、Si 四种元素, 但 Ni、Al 含量明显较高, Cr 元素百分比含量仅为 1.51。另外, 在晶粒 B 内检测到了微量稀土元素 La, 说明晶粒内固溶有极少量的稀土元素。

Ni 和 Al^[15]。

胞晶组织 B 是体心立方结构的 β -NiAl 相, 晶粒内固溶有微量的 Cr、Fe 等元素, Cr 在 NiAl 中的室温固溶度只有 1%~2%, 当 Cr 含量低于在 NiAl 中的溶解度时可起固溶强化作用。稀土元素 La 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 β -NiAl 和 Cr 相中作为间隙原子的固溶度几乎为零, 因此稀土元素一般沿晶粒的晶界、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, 从而阻碍晶体的扩散和生长。

Al_4La 。 La_2O_3 是稳定的稀土氧化物, 具有很低的反应自由能, 但由于反应机制、动力学因素等影响, 例如激光加热的高能高温作用, 加之 Ni、Al 体系自蔓延反应过程放出大量热能, 有可能造成 La_2O_3 分解

而释放出一定量的 La, 进而与熔池中的活性金属 Al 发生反应而生成 Al₄La 等稀土化合物^[16-17]。

4 结 论

1) 当合金中稀土 La₂O₃ 含量高于 5% 时熔覆层易出现气孔, 低于 2% 时易出现熔覆层开裂、与基体结合不良等缺陷, 加入 5% 的稀土氧化物 La₂O₃ 可有效地减少熔覆层中的裂纹、孔洞和夹杂物;

2) 不同稀土含量的 Ni60 熔覆层的主要相结构均为 β-NiAl(Cr) 和少量的 Al₃Ni、AlNi₃、Al 等, 添加稀土以后, XRD 图中出现了微量的稀土化合物 La₂O₃、Al₄La, 且 NiAl 相的(100)有序峰几乎消失, 晶粒取向偏向于(110)、(200)和(211), 而(110)有序峰出现不同程度的偏移;

3) 熔覆层 EDS 分析表明: 添加 5% La₂O₃ 的 Ni60 熔覆层比不添加稀土的熔覆层元素分布均匀, 稀释率更低;

4) 添加 5% La₂O₃ 的 Ni60 熔覆层比不添加稀土的熔覆层孔隙率大幅降低, 晶粒度变大且细化作用明显, 熔覆层主要成分为 NiAl-Cr 共晶组织, 稀土元素偏聚在晶界位置并形成了稳定的 Al₄La 等稀土化合物。

参 考 文 献

1 V D Aleksandrov. Modification of the surface of aluminum alloys by laser treatment[J]. Materials Science Heat Treatment, 2002, 44(4): 168-171.

2 Lü Weixin, Sun Ronglu. Current status of studies on laser cladding of aluminium alloys[J]. Heat Treatment of Metals, 2006, 31(5): 24-27.

吕伟鑫, 孙荣禄. 铝合金表面激光熔覆研究现状[J]. 金属热处理, 2006, 31(5): 24-27.

3 Liu Wei, Li Xin, Yu Xiantao, *et al.*. Research on aluminum alloy surface laser alloying process technology[J]. Science and Technology of Overseas Building, 2006, 27(4): 56-58.

刘 卫, 李 新, 余先涛, 等. 铝合金表面激光合金化工艺研究[J]. 国外建材科技, 2006, 27(4): 56-58.

4 Dong Shiyun, Yan Shixing, Xu Binshi, *et al.*. Microstructure and mechanical property of NiCuFeBSi alloy with laser cladding on substrate of gray cast irons[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1203004.

董世运, 闫世兴, 徐滨士, 等. 铸铁件激光熔覆 NiCuFeBSi 合金组织及力学性能[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1203004.

5 W Lingqian, Z Jiansong, Y Youjun, *et al.*. Effect of powders refinement on the tribological behavior of Ni-based composite coatings by laser cladding[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(17): 6697-6704.

6 Li Jianing, Gong Shuili, Wang Xichang, *et al.*. Physical and surface performance of laser clad Ni based coating on a TA15-2 alloy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103008.

李嘉宁, 巩水利, 王西昌, 等. TA15-2 合金表面激光熔覆 Ni 基涂层物理与表面性能[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103008.

7 Sun Fujuan, Hu Fangyou, Huang Xuren, *et al.*. Effect of

cladding material on LY12CZ aluminum alloy by laser cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(10): 94-96.

孙福娟, 胡芳友, 黄旭仁, 等. 熔覆材料对铝合金激光熔覆性能的影响[J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 94-96.

8 Zhang Chunhua, Zhang Song, Wen Xiaozhong, *et al.*. Microstructure and performance of a laser cladding of Ni-based alloy on 6061 aluminum alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(5): 701-704.

张春华, 张 松, 文劲忠, 等. 6061Al 合金表面激光熔覆 Ni 基合金的组织及性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(5): 701-704.

9 Wang Xinheng, Kuang Jianxin, He Helin, *et al.*. Effect of Cerium dioxide on the structure and wear-resistance of laser cladding Ni-based cermet composite coating [J]. Journal of Materials Protection, 2009, 42(2): 13-15.

汪新衡, 匡建新, 何鹤林, 等. CeO₂ 对镍基金属陶瓷激光熔覆层组织和耐磨蚀性能的影响[J]. 材料保护, 2009, 42(2): 13-15.

10 Cui Zhongqi, Tan Yaochun. Metallurgy and Heat Treatment [M]. Beijing: China Machine Press, 2008. 186-187.

崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008. 186-187.

11 Sun Fujuan. Elimination of gas holes of laser cladding on 2A12 aluminum alloys [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(5): 93-96.

孙福娟. 消除 2A12 激光熔覆气孔缺陷工艺[J]. 焊接学报, 2009, 30(5): 93-96.

12 Wu Xinwei, Zeng Xiaoyan, Zhu Beidi, *et al.*. Cracking tendency of laser cladding Ni-based WC composite coatings[J]. Chinese J Lasers, 1997, 24(6): 570-576.

吴新伟, 曾晓雁, 朱蓓蒂, 等. 镍基碳化钨金属陶瓷激光熔覆层开裂性的研究[J]. 中国激光, 1997, 24(6): 570-576.

13 Liu Wenjin, Zeng Daben, Huang Huisong. Influence of rare-earth metal oxide coating on the structure and properties of laser strengthened area of cast iron[J]. Chinese J Lasers, 1992, 19(8): 613-617.

刘文今, 曾大本, 黄惠松. 稀土金属氧化物涂层对铸铁激光强化区组织和性能的影响[J]. 中国激光, 1992, 19(8): 613-617.

14 Zhao Gaomin, Wang Kunlin, Li Chuangang. Effect of La₂O₃ on microstructure of laser cladding ferrite-based alloy coatings[J]. Heat Treatment of Metals, 2004, 29(4): 9-13.

赵高敏, 王昆林, 李传刚. La₂O₃ 对激光熔覆 Fe 基金属熔覆层显微组织的影响[J]. 金属热处理, 2004, 29(4): 9-13.

15 Guo Jianting, Ren Weili, Zhou Jian. Progress in research on alloying effects in NiAl intermetallic alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(6): 667-672.

郭建亭, 任维丽, 周 健. NiAl 合金化研究进展[J]. 金属学报, 2002, 38(6): 667-672.

16 Liu Hongxi, Tang Shujun, Cai Chuanxiong, *et al.*. Microstructure and property of laser in situ preparation of Ni-based alloy composite coating on die steel surface[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0603002.

刘洪喜, 唐淑君, 蔡川雄, 等. 模具钢表面激光原位制备 Ni 基金属复合涂层的微结构与性能[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603002.

17 Wang Fen, Ai Taotao, Fan Zhikang, *et al.*. Effect of La₂O₃, Ce₂O₃ doped on micro-structures and properties of in-situ Al₂O₃ (p) TiAl composites[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2007, 31(2): 179-182.

王 芬, 艾桃桃, 范志康, 等. La₂O₃, Ce₂O₃ 掺杂对原位合成 Al₂O₃(p)TiAl 复合材料显微组织与性能的影响[J]. 稀有金属, 2007, 31(2): 179-182.