

文章编号: 0258-7025(2004)06-0765-04

铝合金 Nd:YAG 脉冲激光 SiC 复合化 涂层组织特征

李华玲¹, 王茂才¹, 赵吉宾², 刘伟军²

(¹ 中国科学院金属研究所金属腐蚀与防护国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)
² 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要 鉴于铝合金的广泛应用价值及其因质软而在应用方面受到的限制,应用激光材料表面复合化方法对铝合金材料表面进行强化处理,具体为利用 Nd:YAG 脉冲激光采用纳米级和微米级 SiC 粉对铝合金表面进行复合化处理。通过对实验结果观察和分析表明,纳米级 SiC 粉形成激光铝合金表面复合化涂层比微米级 SiC 粉所形成复合化涂层组织均匀、致密、缺陷少、涂层与基材间结合状态好并显著提高了铝合金表面的显微硬度。分析原因在于微米级 SiC 粉在激光熔池内发生沉降,而纳米级 SiC 粉可在激光熔池内形成较均匀分布,这是重力作用受粉颗粒大小影响显著的结果。从而可以看出, SiC 颗粒形状、大小及其在涂层中的分布状态直接影响涂层组织特征、涂层与基材间的结合状态;把形状规则、颗粒细小、在涂层中能够形成均匀分布的 SiC 粉作为涂层复合物有利于形成组织特征均匀、缺陷少、与基材结合状态好的复合涂层。

关键词 激光技术;铝合金;复合化处理;SiC 粉

中图分类号 TG 174.445;TG 178 **文献标识码** A

Microstructure Character of Aluminium Alloy Coating with Nd:YAG Pulsed Laser SiC Composition

LI Hua-ling¹, WANG Mao-cai¹, ZHAO Ji-bin², LIU Wei-jun²

(¹ Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China)
² Shenyang Institute of Automation, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China)

Abstract Aluminium alloy is used widely in our society, but it is not good enough for many applications because it is soft. In order to harden the surface of the aluminium alloy, the surface is compounded by laser in this experiment. Here, two kinds of SiC power, the diameters of which are nanometer-grade and micron-grade respectively, are compounded to the surface with Nd:YAG pulsed laser separately. The experiment results show that: the coating compounded with the nanometer-grade diameter powder has more homogeneous and more compact microstructure, less defects and better bonding with the base material than that with the micron-grade diameter powder. The mechanism for the results is that: the gravitation rule is affected markedly by the size of the power. In the laser melting pool, the micron-grade diameter powder sinks, while the nanometer-grade diameter powder can distribute homogeneously. A conclusion can be drawn: the microstructure of the coating and the bonding between the coating and the base material are affected directly by the shape, the size and the distribution of the SiC power in the laser melting pool. In the coating, more regular, smaller and distributed more homogeneously the SiC power is, more homogeneous microstructure, less defect and better bonding with the base material the composite coating will be.

Key words laser technique; aluminium alloy; composited processing; SiC powder

收稿日期:2002-11-14;收到修改稿日期:2003-05-23

作者简介:李华玲(1976—),女,河北省唐山市人,中国科学院金属研究所博士生,现主要从事纳米陶瓷方面的研究。

E-mail: hlli@imr.ac.cn

1 引 言

铝在地壳内含量仅次于氧和硅,资源很丰富,且铝及其合金具有比强度高、导热和导电性好、反光性强、无磁性、耐蚀性及成型性好等优点,因此得到广泛应用。但它同时也存在质软的问题,使其在很多应用领域受到限制。人们采用热处理或非热处理等方法来增强铝及其合金的强度^[1],从而进一步扩大了其应用范围。但整体增强铝合金往往又使铝合金的脆性增强,因此人们开始关注铝合金表面强化问题。激光具有高能量密度,可以作为铝合金表面强化处理的热源。激光铝合金表面强化的方法现在有激光快速熔凝处理、表面复合化、表面熔覆等^[2,3]。考虑到铝合金表面复合化更有利于形成高强度涂层和涂层与基材间的冶金结合,故本实验对激光铝合金表面复合化方法进行了研究。SiC 具有高强度和高熔点,适宜作为铝合金表面复合物,而纳米级 SiC 粉又具有高比表面积、高表面活性等特点,且受重力作用很小甚至可以忽略不计而不会在激光熔池内发生沉积,因此纳米级 SiC 粉形成复合涂层必然与微米级 SiC 粉形成复合涂层有所不同,本文对这两种涂层的组织特征等进行了分析和比较。

2 实验方法

2.1 实验材料

实验所用铝合金为 LY12,含铜质量百分数为 4.9%,含锰为 0.8%。将铝合金原材料切成 10 mm × 10 mm × 5 mm 的试样。采用以下两种粉末分别

对铝合金表面进行复合化:平均粒径为 110 nm,形状为近球形的 SiC 粉末(记为 1[#]粉)和平均粒径约为 30 μm,形状为不规则多边形的 SiC 粉末(记为 2[#]粉),形成复合化涂层分别记为 1[#]和 2[#]。

2.2 激光铝合金表面 SiC 复合化工艺

在经 400[#]砂纸打磨过的试样表面上直接铺一层厚度大约为 0.4 mm 的 SiC 粉末。采用的激光设备为 Nd:YAG 脉冲激光器,其输出功率为 400 W,激光波长 1.06 μm,频率 4 Hz,脉宽 5 ms,焦距 150 mm,过焦 10 mm,光斑直径 1.2~1.3 mm,激光扫描速度为 1.5 mm/s,搭接量为 0.6 mm。

2.3 实验分析方法

利用 PHILIPS XL30 扫描电镜,日本理学 D-max2500pc X 射线衍射(XRD)仪,Camebax-micro 电子探针(EPMA)及 HX-1 型显微硬度计进行涂层表面形貌、断面组织、组成相、成分及显微硬度观察和测试。

3 实验结果及分析

3.1 涂层扫描电镜观察

图 1(a),(b)分别为 1[#],2[#]涂层表面扫描电镜(SEM)照片。由图可见许多大小不等的孔洞存在于涂层表面,但 2[#]涂层上的孔洞小得多且形状规则(近圆形),同时 1[#]涂层比 2[#]涂层反映出的表面形貌也更均匀和规则。可见,采用纳米级 SiC 粉和采用微米级 SiC 粉进行激光表面复合化,在涂层形貌的形成和涂层缺陷的形状上有着明显的差异。

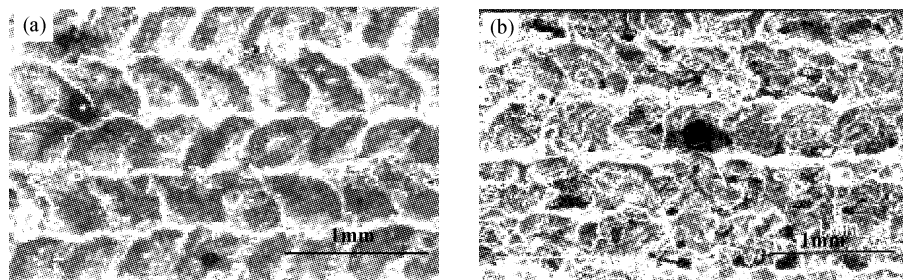


图 1 涂层表面扫描电镜形貌

Fig. 1 Micromorphologies of coating surface by SEM

(a) 1[#] coating; (b) 2[#] coating

图 2(a),(b)和(c)分别为 1[#]与 2[#]涂层断面扫描电镜照片。观察图 2(a)与图 2(c)可见,1[#]涂层与基材间具有良好的冶金结合,无分层、开裂现象;而 2[#]涂层与基材结合处出现明显分层、开裂现象。比

较图 2(b)和图 2(c)可见,2[#]涂层内存在较多的疏松缺陷,这是激光处理后涂层冷却过程中收缩不均及空气排出不利而形成的。2[#]涂层中 SiC 块体主要积聚于涂层中、底部且保持原多边形形状,说明

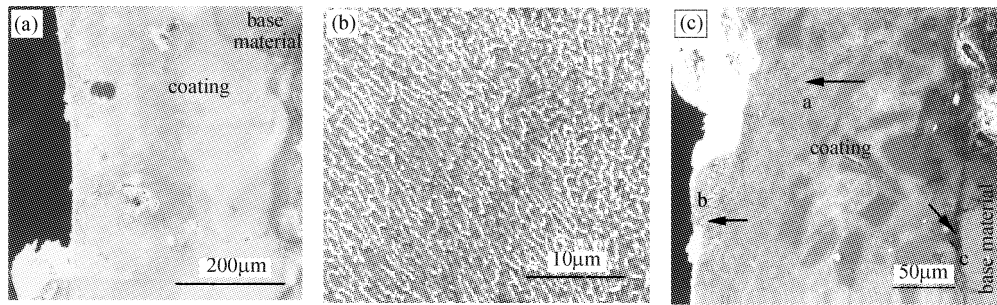


图 2 涂层断面扫描电镜观察(试样经混合酸腐蚀)

(a), (b) 1# 涂层; (c) 2# 涂层(箭头 a, b 所指为疏松; 箭头 c 所指为开裂处)

Fig. 2 Section microstructure of coating by SEM

(a), (b) 1# coating; (c) 2# coating (arrows a, b: loosens; arrow c: craze)

SiC 颗粒在激光处理时没有发生明显溶解, 且因其密度较高(为 $3.21 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) 和粒径较大, 使其在重力作用下在激光熔池内发生沉降, 并在随后的熔池快速冷却过程中停留在涂层的中、底部; 而 1# 涂层组织比 2# 涂层组织致密、细小, 涂层内晶粒尺寸只有大约几微米, 并在晶界上析出白色组织, 经电子探针及能谱分析表明其为富 Cu 相。因为 SiC 颗粒极其细小, 在激光作用下溶合于铝合金表面的复合层中, 因此在图 2(b) 中观察不到 SiC 的存在。

3.2 涂层 X 射线衍射分析

图 3 为基材及 1#、2# 涂层 X 射线衍射图谱, 从图中分析可见, 1# 与 2# 涂层具有同样的组成相: Al, SiC 及由部分 SiC 氧化形成的 SiO; 而基材组成相为 Al, 这说明铝合金表面确实产生了以 Al 为基材的复合化涂层。

3.3 涂层电子探针分析

对 1#、2# 涂层与基材界面附近 $100 \mu\text{m}$ 范围内进行电子探针 Al 元素线扫描, 扫描方向垂直于涂层表面, 扫描曲线如图 4 所示。该图显示 Al 含量在涂层与基材界面处出现下降趋势, 这是由 SiC 及其氧化物的存在引起的。

曲线对比显示: 1# 涂层内 Al 含量基本保持平稳, 说明 SiC 粉在该涂层内为较均匀、弥散分布; 而 2# 涂层内 Al 含量值波动明显, 由图 2(c) 可知这是 2# SiC 粉积聚于涂层中、底部引起。引起两种涂层内 SiC 粉存在形式差异的原因在于: 当 SiC 颗粒分别为纳米级和微米级时其重力作用有很大差异, 当颗粒细小到一定程度时其受到的重力作用可以变得很小甚至可以忽略不计^[4]。SiC 具有高熔点(为 2700°C) 和高密度, 并且 2# 粉因粒径较大而所受重力作用明显, 这就造成 2# 粉在基本无熔化状态下在

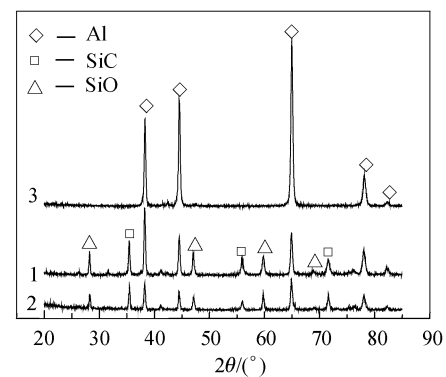


图 3 涂层及基材 X 射线衍射图谱

1: 1# 涂层; 2: 2# 涂层; 3: 基材

Fig. 3 XRD patterns of coating and base material

1: 1# coating; 2: 2# coating; 3: base material

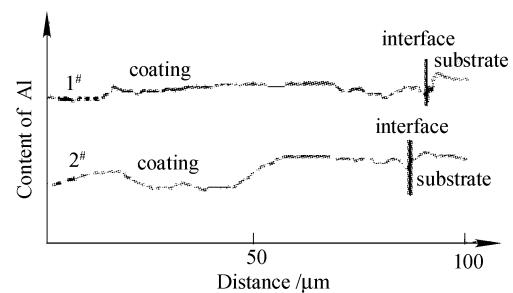


图 4 1# 和 2# 涂层电子探针 Al 元素线扫描

Fig. 4 EPMA measurement about Al in 1# and 2# coatings

激光熔池内发生沉降; 而当 SiC 粉为纳米级时, 重力成为次要作用力; 但纳米级颗粒因其具有很大的比表面积和高的表面活性而易相互间发生团聚, 又在一定程度上使重力作用有所加强, 以上各因素综合作用就造成了 1# 粉在 1# 涂层内的较均匀分布。

SiC 颗粒大小、形状及其在涂层中的分布形式直接影响到涂层内的应力分布状态: 1# SiC 颗粒小、

形状规则且在涂层中分布均匀,因此它的存在引起的涂层内微观应力很小,涂层内应力分布也较均匀,有利于形成涂层与基材间良好的界面结合,并且形成涂层缺陷较少、组织较均匀;2# SiC 颗粒较大,外形不规则并在激光熔池内发生沉降,使得所形成涂层内应力分布不均,并最终导致了涂层与基材间出现分层、开裂现象,同时形成涂层组织不均匀、致密,存在较多缺陷。

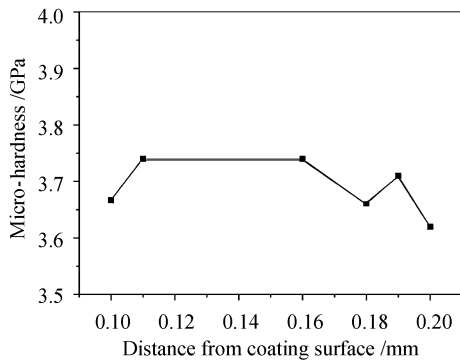


图 5 1# 涂层内不同部位显微硬度的测试结果

Fig. 5 Micro-hardness values in different 1# coating locations

3.4 涂层显微硬度分析

对 1# 涂层内不同部位进行显微硬度测试,测试结果如图 5 所示,而铝合金原材料显微硬度为 1.24 GPa,可见 1# 涂层的形成明显提高了铝合金表面显微硬度;而 2# 涂层内除 SiC 块体表现出高显微硬度外,在非 SiC 块体区显示的显微硬度与铝合金基材的显微硬度相近(约 1.2 GPa)。

4 结 论

1) 纳米级 SiC 粉形成激光铝合金表面复合化涂层比微米级 SiC 粉所形成复合化涂层组织均匀、缺陷少、涂层与基材间结合状态好并且明显提高了铝合金表面显微硬度。

2) 微米级 SiC 粉在激光熔池内发生沉降,而纳米级 SiC 粉可在激光熔池内形成较均匀分布。原因是 SiC 粉颗粒的大小对重力作用的大小影响显著。

3) SiC 颗粒形状、大小及其在涂层中的分布状态直接影响涂层组织特征、涂层与基材间的结合状态。把形状规则、颗粒细小、在涂层中能够形成均匀分布的 SiC 粉作为涂层复合物有利于形成组织特征均匀、缺陷少、与基材结合状态好的复合涂层。

参 考 文 献

- Liu Lian, Ye Hanfang, Liu Zhigang. Metal Processing Technique [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1985. 187~194
刘 炼,叶寒芳,刘志刚 编著. 金属工艺学[M]. 成都:四川科学技术出版社,1985. 187~194
- Zhao Wenzhen, Wang Hangong. The advances of laser surface modification of aluminium alloy in the world [J]. *Surface Engineering*, 1996, **30**(1):43~47
赵文珍,王汉功. 国外铝合金激光表面物质研究进展[J]. 表面工程, 1996, **30**(1):43~47
- Zhang Song, Zhang Chunhua, Man Haichung *et al.*. Cavitation erosion performance of laser surface cladding MMC of Si₃N₄ on AA6061 aluminium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2): 185~188
张 松,张春华,文效忠 等. AA6061 Al 合金表面 Si₃N₄ 激光熔覆层的空泡腐蚀性能[J]. 中国激光, 2003, **30**(2):185~188
- Lu Shouci. Powder Machine Technology [M]. Beijing: Chinese Light Industry Press, 1999
卢寿慈 主编. 粉体加工技术[M]. 北京:中国轻工业出版社, 1999