

文章编号: 0258-7025(2009)06-1581-04

ZL101 铝合金表面激光熔覆 Fe-Al 金属间化合物涂层

王彦芳¹ 李 刚² 武同霞³

¹中国石油大学(华东)材料科学与工程系, 山东 东营 257061
²辽宁工程技术大学材料科学与工程系, 辽宁 阜新 123000
³山东石大胜华化工股份有限公司, 山东 东营 257061

摘要 以纯 Fe 粉和纯 Al 粉为熔覆材料,在 ZL101 基体表面采用激光熔覆工艺制备了 3 种不同成分的 Fe-Al 化合物涂层。利用光学显微镜、扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)仪和显微硬度计,对熔覆合金层以及熔覆层与铝合金基体的结合界面区的组织结构和显微硬度进行了分析。实验结果表明,激光熔覆涂层主要由 FeAl 与 Fe₃Al 相构成,涂层与基体呈锯齿状结合。3 种涂层(Fe-Al, 2Fe-Al 和 3Fe-Al)均有较高的显微硬度,分别为 744 HV, 603 HV 和 795 HV。

关键词 激光技术; 激光熔覆; Fe-Al 合金涂层; 显微组织; 显微硬度

中图分类号 TG174.44; TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093606.1581

Laser Cladding Fe-Al Intermetallics Coatings on ZL101 Substrate

Wang Yanfang¹ Li Gang² Wu Tongxia³

¹Department of Materials Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying, Shandong 257061, China
²Department of Materials Science and Engineering, Liaoning University of Technology, Fuxin, Liaoning 123000, China
³Shandong Shida Shenghua Chemical Co., Ltd., Dongying, Shandong 257061, China

Abstract Fe-Al Intermetallics coatings are prepared on ZL101 substrate by laser cladding pure Fe and pure Al powders. The microstructure and hardness of the coatings and interface between the coating and substrate are analyzed by using optical microscopy, SEM, X-ray diffraction (XRD), and microhardness testing machines. The results show that the bonding zones between substrate and coatings are sawtooth-like structure. The coating mainly constitute of FeAl and Fe₃Al phases. All the three coatings (Fe-Al, 2Fe-Al and 3Fe-Al) have high microhardness, which achieve 744 HV, 603 HV and 795 HV respectively.

Key words laser technique; laser cladding; Fe-Al alloy coatings; microstructure; microhardness

1 引 言

铝及其合金由于具有比重小、比强度高、热膨胀系数低、易于成形、热导率高、成本低廉等优异性能,广泛应用于各个领域。但其硬度较低、摩擦系数高、耐磨性差等在很大程度上限制了铝合金的应用范围。激光表面强化技术可以在基体金属表面获得致密的强化层,且强化层与基体呈冶金结合,不易开

裂、脱落,还可对铝合金进行修复^[1,2],是提高铝合金表面性能的有效途径之一。在众多的激光表面强化技术中,激光熔凝强化^[3,4]、激光冲击硬化^[5,6]等技术均取得了良好的强化效果,但激光熔覆可在不同金属基体表面获得不同性能的优异涂层而备受关注^[7-10]。

Fe-Al 金属间化合物具有优良的高温强度、抗氧化和硫化腐蚀性能,且资源丰富,成本低廉。目前

收稿日期: 2008-08-27; 收到修改稿日期: 2008-09-26

基金项目: 山东省自然科学基金(Q2008F12)和中国石油大学(华东)博士基金(Y060314)资助课题。

作者简介: 王彦芳(1976—), 博士, 副教授, 主要从事激光表面改性的研究。E-mail: wang@hdpu.edu.cn

已经有在钢基体表面采用激光熔覆技术制备 Fe-Al 金属间化合物涂层的报道,如张来启等^[11]在 45# 钢表面预置单质 Al 粉末,激光合成了 Fe-Al 金属间化合物涂层。程广萍等^[12]在以纯 Fe₃Al 粉、铁基合金粉+铝粉为原料,采用激光熔覆工艺在钢基体表面制备了 Fe-Al 金属间化合物涂层。如能在铝合金表面激光熔覆合成 Fe-Al 金属间化合物涂层,将可有效改善铝合金的表面性能。本文以纯 Fe 粉和纯 Al 粉为熔覆材料,在 ZL101 基体表面制备 Fe-Al 涂层。利用光学显微镜、扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)仪和显微硬度计,对熔覆合金层以及熔覆层与铝合金基体的结合界面区的组织结构和显微硬度进行分析研究。

2 实验材料和方法

基体材料采用 ZL101 铝合金,试样尺寸 30 mm×20 mm×10 mm,试样表面用 240# 金相砂纸磨平,并用乙醇和丙酮进行清洗去油。熔覆材料为纯 Fe 粉(99.9%,200 目)和纯 Al 粉(99%,200 目)。实验中选用 3 种不同成分的 Fe、Al 粉末成分分配比,分别为 Fe-Al,2Fe-Al 和 3Fe-Al (原子数分数,%)。将粉末按配比配置好后,经球磨机低速长时间混合。将混合均匀的熔覆粉未经无水乙醇调和后预置在基体表面,预置厚度约 1 mm。将预置好的试样放在 80 ℃烘箱中烘烤 30 min,取出后进行激光熔覆实验。激光熔覆工艺参数为:激光功率 3.5 kW,扫描速度 300 mm/min,光斑尺寸 10 mm×1 mm,采用氩气保护。

利用 Nikon EPIPHOT 300 FDX-35 型光学显微镜和 X'Pert PRO MPD 型 X 射线衍射仪进行显微组织形貌及相结构分析。利用 MH-3 型显微硬度计测试涂层的显微硬度,载荷 500 g,加载时间 10 s。

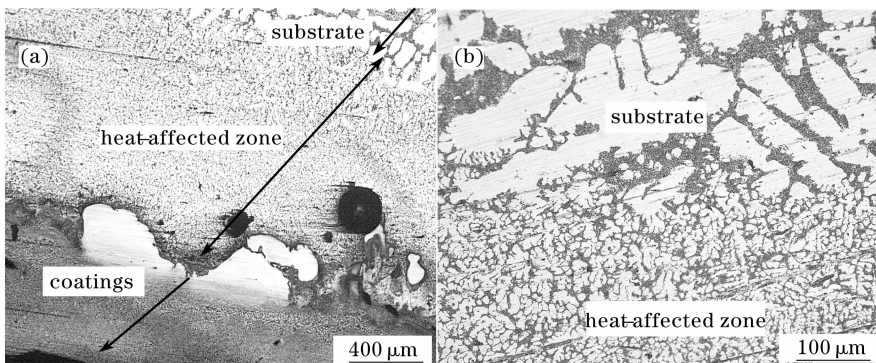


图 2 激光熔覆 Fe-Al 合金涂层宏观组织形貌

Fig. 2 Morphology of laser clad Fe-Al alloy coatings

3 实验结果与分析

3.1 激光熔覆 Fe-Al 合金涂层相组成

图 1 为 3 种不同成分的 Fe-Al 涂层的 XRD 图谱。经分析标定,涂层主要由 FeAl 与 Fe₃Al 金属间化合物相组成。说明利用纯 Fe 粉和纯 Al 粉,通过激光熔覆可以在基体材料表面获得 Fe-Al 金属间化合物涂层。由于采用单道激光熔覆,在做 X 射线衍射时扫描到了基体,所以也出现了 ZL101 基体材料的衍射峰。为方便比较,FeAl(01-1257),Fe₃Al(06-0695)和 ZL101 基体的标准图谱也放在图 1。

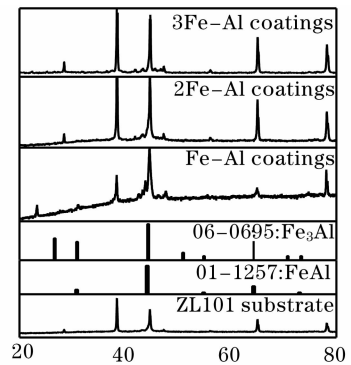


图 1 激光熔覆 Fe-Al 涂层 X 衍射图谱

Fig. 1 X-ray diffraction spectra of laser cladding Fe-Al alloy coatings

3.2 激光熔覆 Fe-Al 合金涂层组织结构

图 2 为激光熔覆 Fe-Al 合金涂层典型的组织形貌。从图中可以看出涂层从表及里依次分为熔覆层、热影响区和基体 3 个部分。熔覆层约为 500 μm,热影响区宽约 700 μm,从图 2(a)可看出,热影响区组织较基体组织明显细化,这是由于激光熔覆过程中较快的加热速度和冷却速度,增大了基体表面成分过冷度,从而使组织细化。基体组织为典型的变质处理的 ZL101 合金组织。涂层中无微观裂纹,熔覆层与基体之间呈锯齿状结合。

激光熔覆的热量通常通过 3 种方式熔化基材表面,透过预涂层辐射到基材的辐射热、高温熔体与基材表面接触向基材的传热和涂层材料形成金属间化合物的反应热。由于激光熔池的温度随离开熔池中央距离的增加而降低,且激光熔池向基材的散热能力随离熔池中央距离的增大而增强,因而由前两种加热方式所导致的基材表面熔覆层呈月牙形^[13,14]。涂层粉末中的 Fe 粉与 Al 粉反应形成金属间化合物,放出大量的热量,且放热反应在界面处沿熔覆层的宽度方向是不均匀的,反应剧烈之处释放的反应热量大,基材表面出现局部熔化凹陷区,因而基材表面形成锯齿形熔化层。基材表面熔化后,Al 合金熔体与粉末熔体之间因化学成分差异而发生相互扩散,在熔池寿命较短的情况下,两种性质完全不同的熔体混合时,通过短程扩散形成富铝区和贫铝区。富铝区的熔体因具有较小的密度,在重力场中受到浮力的作用,浮力是熔体对流的驱动力之一,熔体的粘滞力是对流的阻力,当浮力大于熔体的粘滞力时,就会产生对流。界面富铝区上浮后,粉末熔体直接与未熔的锯齿形铝合金表面相接触,因而界面区与重熔区的界面为明显的锯齿形^[15]。

图 3 为 Fe-Al 合金涂层微观组织形貌。组织为黑白相间的基体上分布着少量黑色针状物,针状物为 Fe_3Al 相,基体为 FeAl 相。从图中可以明显看出,Fe,Al 的原子配比不同,熔覆涂层中 Fe_3Al 相和 FeAl 相的相对含量也有较大差异。Fe-Al 涂层主要由 FeAl 和少量的 Fe_3Al 相组成;2Fe-Al 涂层由含量相近的 FeAl 和 Fe_3Al 相组成;3Fe-Al 涂层主要由 Fe_3Al 和少量的 FeAl 相组成。从图 3(d)可以发现熔覆层的组织从靠近基体位置到涂层表面呈现不同的生长形态。这是因为熔覆层不同区域,温度梯度和冷却速度是不同的。依据凝固理论,温度梯度/凝固速度(G/V)是凝固组织生长形态选择的控制因素(形状控制因子)。晶体生长不稳定性受形状因子 G/V 的控制,熔覆层熔池不同位置凝固条件不同,最终所形成的组织结构也不同。熔池与基体界面处 $V \rightarrow 0$,而 G 最大, $G/V \rightarrow \infty$,凝固组织以低速平面生长,且生长方向沿大致平行于合金熔体的最大散热方向。随着 V 的增大和 G/V 的逐渐减小,形成胞/枝转变区以及枝晶形态的领先相于枝晶间共晶的生长形态。同时由于合金熔体的对流搅动,晶体生长也逐渐失去方向性。

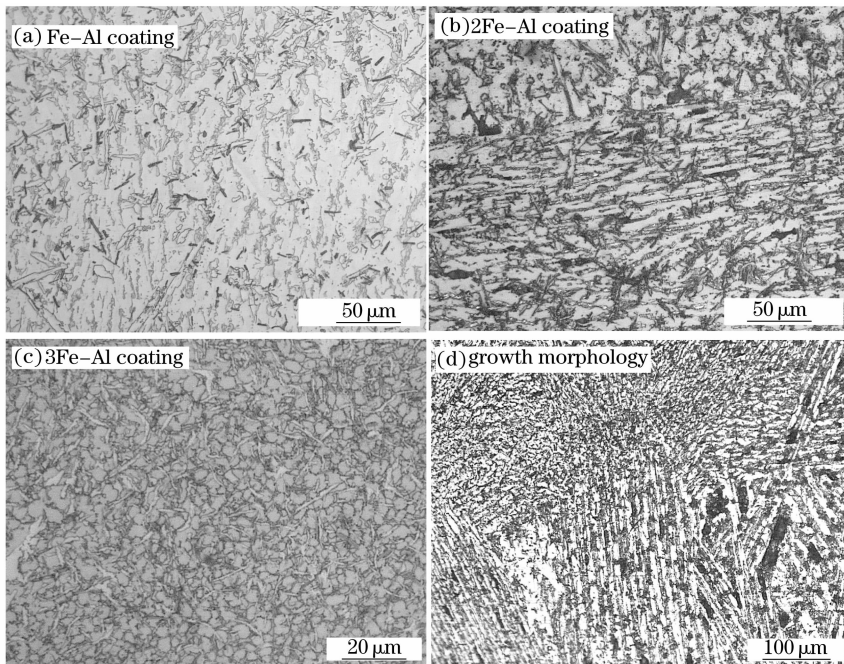


图 3 激光熔覆 Fe-Al 合金涂层微观组织形貌

Fig. 3 Microstructure of laser cladding Fe-Al alloy coatings

3.3 激光熔覆 Fe-Al 合金涂层显微硬度分析

图 4 为 ZL101 合金表面激光熔覆 Fe-Al 合金涂层的显微硬度分布曲线。从图中可以看出,3 种涂层均有较高的显微硬度,分别为 744 HV,

603 HV 和 795 HV,比基体均高出约 7~8 倍。3 种涂层均是由 FeAl 和 Fe_3Al 金属间化合物相组成,但硬度出现较大差异可能是由于各个涂层的相组成含量不同造成的。

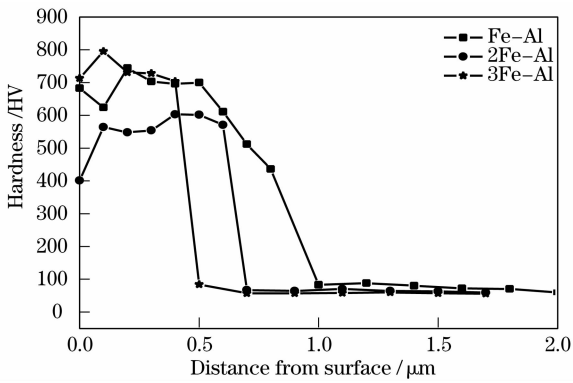


图 4 激光熔覆 Fe-Al 合金涂层的硬度分布曲线

Fig. 4 Hardness distribution curves of laser cladding Fe-Al alloy coatings

4 结 论

以纯 Fe 粉和纯 Al 粉为熔覆材料,采用激光熔覆工艺在 ZL101 表面制备了 Fe-Al 金属间化合物涂层,涂层较致密,与基体之间冶金结合。涂层主要由 FeAl 和 Fe_3Al 相构成。不同成分涂层所含 FeAl 与 Fe_3Al 相的比例不同。三种成分涂层的显微硬度分别为 744 HV, 603 HV 和 795 HV, 比基体均高出约 7~8 倍。

参 考 文 献

- Guo Yongli, Liang Gongying, Liu Lu. Laser cladding reparation of aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 303~306
郭永利, 梁工英, 李 路. 铝合金的激光熔覆修复[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 303~306
- Sun Fujuan, Hu Fangyou, Huang Xuren *et al.*. Fatigue performance of laser cladding on LY12CZ[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1073~1077
孙福娟, 胡芳友, 黄旭仁 等. LY12CZ 激光熔覆的疲劳性能[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1073~1077
- Chen Jufang, Zhang Yongkang, Xu Renjun. Microstructure and corrosion resistant property of laser surface melting layer of AM50 magnesium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 307~310
陈菊芳, 张永康, 许仁军. AM50 镁合金表面激光熔凝层的组织与耐蚀性能[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 307~310
- Gao Yali, Wang Cunshan, Liu Hongbin *et al.*. Microstructure and properties of AZ91HP magnesium alloy treated by high power laser melting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 1019~1024

- 高亚丽, 王存山, 刘红宾 等. 高功率激光熔凝 AZ91HP 镁合金组织和性能[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 1019~1024
- Zhang Yongkang, Chen Jufang, Xu Renjun. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1068~1072
张永康, 陈菊芳, 许仁军. AM50 镁合金激光冲击强化实验研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1068~1072
- Cao Ziwen, Zou Shikun, Liu Fangjun *et al.*. Laser shock processing on 1Cr11Ni2W2MoV martensite steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 316~320
曹子文, 邹世坤, 刘方军 等. 激光冲击处理 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 316~320
- Huang Kaijin, Lin Xin, Li Chaowu *et al.*. Microstructure and wear behavior of laser cladding Zr-based composite coatings on AA7075 aluminum alloy [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(6): 398~400
黄开金, 林 鑫, 李朝武 等. AA7075 铝合金表面激光熔覆 Zr 基复合涂层的组织与磨损行为[J]. *应用激光*, 2006, **26**(6): 398~400
- Wang Weifu, Sun Fengjiu, Wang Maocai. Study of Cu-base coating on aluminum alloy by laser cladding [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(3): 240~243
王维夫, 孙凤久, 王茂才. 铝合金表面激光熔覆铜基金属涂层研究[J]. *激光技术*, 2008, **32**(3): 240~243
- Zhang Chunhua, Zhang Song, Wen Xiaozhong *et al.*. Microstructure and performance of a laser cladding of Ni-based alloy on 6061 aluminium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2005, **34**(5): 701~704
张春华, 张 松, 文效忠 等. 6061Al 合金表面激光熔覆 Ni 基金属的组织及性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, **34**(5): 701~704
- S. Tomida, K. Nakata. Fe-Al composite layers on aluminum alloy formed by laser surface alloying with iron powder [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, **174-175**: 559~563
- Zhang Laiqi, Chen Guangnan, Lin Junpin *et al.*. Laser synthesizing FeAl intermetallic compound coating [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2006, **31**(8): 1~3
张来启, 陈光南, 林均品 等. 激光合成 FeAl 金属间化合物涂层[J]. *金属热处理*, 2006, **31**(8): 1~3
- Cheng Guangping, He Yizhu. Preparation of deposited coating of Fe-Al inter metallic compound by laser cladding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(6): 37~40
程广萍, 何宜柱. 激光熔覆制备 Fe-Al 金属间化合物覆层[J]. *焊接学报*, 2006, **27**(6): 37~40
- J. Mazumder. Overview of melt dynamics in laser processing [J]. *Opt. Eng.*, 1991, **30**(8): 1208~1219
- K. Komvopoulos. Effect of process parameters on the microstructure geometry and microhardness of laser-clad coating materials [J]. *Material Science Forum*, 1994, **163**(6): 417~421
- Hu Mulin, Pan Lin, Xie Changsheng *et al.*. Characteristics of transition region in laser cladding iron-based coatings on ZL108 alloy [J]. *Materials Protection*, 2006, **38**(5): 51~53
胡木林, 潘 林, 谢长生 等. 铝合金表面激光熔覆铁基金属涂层过渡区的特征[J]. *材料保护*, 2006, **38**(5): 51~53