

添加 Sn-5% Zr 粉末对激光焊接钢/铝显微组织和性能影响

周惦武 刘元利 李宁宁 徐少华 刘金水

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082

摘要 对 1.4 mm 厚的 DP590 双相钢和 1.2 mm 厚的 6016 铝合金平板试件进行添加 Sn-5%Zr(质量分数,下同)粉末的激光搭接焊试验,利用卧式金相显微镜、扫描电镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)、背散射电子衍射技术(EBSD)和微机控制的电子万能试验机等研究了添加 Sn-5%Zr 粉末对焊缝微观形貌、焊接区域金相组织、断口形貌、主要物相、相的分布及含量、晶粒大小与接头力学性能的影响,采用基于密度泛函理论的第一性原理方法,计算了添加 Sn-5%Zr 粉末后新形成物相 FeSn、Fe₃Sn 和 Fe₃Al、FeAl、Fe₂Al₅ 等 Fe-Al 金属间化合物的模量。结果表明,添加 Sn-5%Zr 粉末钢/铝接头平均剪切强度为 37.90 MPa,与未添加粉末相比,剪切强度提高,新形成 ZrAl₃ 化合物细化了钢/铝界面 Fe-Al 金属间化合物的晶粒尺寸,Sn 抑制 Al 向焊缝熔池内扩散,减少 Fe-Al 金属间化合物层厚度,新形成物相 FeSn、Fe₃Sn 具有较好的延性,Sn-5%Zr 粉末改变了界面层 Fe-Al 金属间化合物脆性相与延性相的比例,添加粉末增加焊缝熔宽,提高焊合率,因而添加 Sn-5%Zr 粉末改善了焊接接头的力学性能。

关键词 光学制造; 激光技术; 钢/铝异种金属; 金属间化合物; 添加粉末

中图分类号 TG 457

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0503004

Effect of Sn-5% Zr Powder Addition on Microstructure and Mechanical Property of Steel/Al Laser Welding

Zhou Dianwu Liu Yuanli Li Ningning Xu Shaohua Liu Jinshui

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University,
Changsha, Hunan 410082, China

Abstract The laser welding test with Sn-5%Zr (mass fraction) powder addition is carried out on the DP590 dual phase steel with thickness of 1.4 mm and the 6016 aluminum alloy with thickness of 1.2 mm. By using optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), electron backscatter diffraction (EBSD) and tensile test, the effect of Sn-5%Zr powder addition on the microstructure, fracture morphology, main phase, content and distribution of phase, grain size and mechanical properties of joints are studied. Elastic moduli are calculated by using first-principle method based on density functional theory for FeSn, Fe₃Sn, Fe₃Al, FeAl and Fe₂Al₅ compounds. The results indicate that the average shear strength of the welding sample with Sn-5%Zr powder reaches 37.90 MPa. Compared with that without Sn-5%Zr powder addition, the average shear strength of welded joint increases. Because of the formation of ZrAl₃ compounds, it promotes the refined grain size of Fe-Al intermetallic compound in aluminum/steel interface, Al spreads to the molten pool is inhibited by Sn, the thickness of Fe-Al intermetallic compound layer is reduced, FeSn and Fe₃Sn intermetallic compounds have better ductility, the proportion to brittleness and ductility phases of the interface layer Fe-Al intermetallic compounds are changed, the weld width and bonding rate effectively increased, which can improve the mechanical properties of weld joint with Sn-5%Zr powder addition.

收稿日期: 2014-10-29; 收到修改稿日期: 2014-12-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划重点项目(2012AA111802)、湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室自主课题项目(71075003)

作者简介: 周惦武(1971—),男,博士,教授,主要从事材料科学与工程等方面的研究。E-mail: ZDWe_mail@126.com

Key words optical fabrication; laser technique; steel/Al alloy dissimilar metal; intermetallic compounds; powder addition

CCIS codes 140.3510; 140.3390; 160.3900

1 引言

钢/铝结构件在现代交通运输工具中具有广泛的应用前景,易生成脆性 Fe-Al 金属间化合物是钢/铝优质高效焊接亟待解决的技术难题^[1-2]。为抑制 Fe-Al 金属间化合物的脆性影响,对激光焊钢/铝而言,熔钎焊受到国内外学者的关注,但存在液态铝对固态钢的润湿性差,施焊时需使用钎剂或镀锌层来改善液态铝的润湿铺展性,以及钎焊缝与钢侧界面难实现冶金结合等问题^[3-4],深熔焊过程热效率高,可增强钢/铝的冶金相容性,但 Fe、Al 反应易生成 FeAl、FeAl₂、Fe₂Al₅、FeAl₃ 等硬而脆的 Fe-Al 金属间化合物,从而恶化钢/铝接头力学性能。如熔焊钢/铝过程中添加粉末,改变钢/铝界面主要物相组成、脆性相与延性相的比例及晶粒大小,有望获得钢/铝优质焊接接头,添加粉末激光焊成为激光焊接技术的一个新的发展方向^[5]。添加 Cr、Zr、B、Sr 及稀土元素,可提高 Fe-Al 化合物性能^[6-9],加入 Cu、Mn 元素,可改善 Fe-Al 化合物性质^[10]; Akdeniz 等^[11]发现,添加 Cr 元素,能减少 Al 向钢侧扩散,阻止 Fe₂Al₅ 相产生。

本课题组前期在车用镀锌钢/铝合金激光搭接焊中以粉状形式单独添加 Zr 元素,发现钢/铝焊缝区晶粒细小,形成新的 ZrFe_{3.3}Al_{1.3} 韧性相,能抑制脆性 Fe-Al 金属间化合物生成^[12];而以粉状形式单独添加 Sn 元素,发现减少钢/铝焊缝界面脆性 Fe-Al 金属间化合物层的厚度,新形成 FeSn 金属间化合物具有较好延性,高温下结构稳定,抑制或减少脆性 Fe-Al 金属间化合物生成^[13]。

为探索钢/铝异种金属一种新的连接方法,在前期工作的基础上,采用光纤激光器对 1.4 mm 厚的 DP590 双相钢和 1.2 mm 厚的 6016 铝合金平板试件进行了添加由主体元素 Sn 和辅助元素 Zr 组成的 Sn-5%Zr 粉末的激光搭接焊试验,研究了添加 Sn-5%Zr 粉末对焊缝微观形貌、焊接区域金相组织、断口形貌、主要物相、相的分布及含量、晶粒大小与接头力学性能影响,采用基于密度泛函理论的第一性原理方法,计算了添加粉末后新形成物相 FeSn、Fe₃Sn 和 Fe₃Al、FeAl、Fe₂Al₅ 等 Fe-Al 金属间化合物的模量,探讨了添加 Sn-5%Zr 粉末影响焊接接头力学性能的作用机制。

2 试验与计算方法

试验用光纤激光器的型号为 YLS-4000-CL,激光器输出功率 ≤ 4 KW,波长为 1.07 μm ,激光模式 TEM₀₀,焦距镜长为 200 mm;光斑直径为 0.4 mm;光束发散角 $\alpha < 0.15$ rad。焊接材料为 DP590 双相钢、6016 铝合金,双相钢的成分(质量分数,%,下同)为:C 0.15, Si 0.60, Mn 2.50, S 0.015, P 0.04, Fe 余量,6016 铝合金的成分为:Si 1~1.5, Cu 0.2, Mn 0.2, Mg 0.25~0.6, Fe 0.5, Al 余量。DP590 双相钢平板的尺寸为 1.4 mm \times 100 mm \times 30 mm,6016 铝合金平板尺寸为 1.2 mm \times 100 mm \times 30 mm。用砂纸打磨、丙酮清洗去除材料表面氧化膜与油污,激光束垂直入射钢板表面,铝板位于钢板下方。添加 Sn-5%Zr 粉末(注:粉末的比例为质量配比)时,用丙酮调和并均匀地涂敷到经表面清理后的 6016 铝合金试板上,粉末粒度 < 0.05 mm, Sn 粉化学成分:Pb ≤ 0.03 , Fe ≤ 0.005 , As ≤ 0.0002 , Zn ≤ 0.005 , Sb ≤ 0.01 , Bi ≤ 0.005 , Sn ≥ 99.0 ; Zr 粉化学成分:Fe ≤ 0.3 , Chloride(Cl) ≤ 0.008 , Zr 余量。粉末总含量约为 0.1 g,涂抹尺寸为 0.01 mm \times 30 mm \times 30 mm。为获得优质焊接接头,结合考虑高输入热量易引起钢/铝界面接头易生成脆性 Fe-Al 化合物及钢侧组织易出现粗化等问题,确定有无添加粉末优化焊接工艺参数为:激光功率为 1500 W,焊接速度为 30 mm/s,离焦量+2.0 mm,Ar 气保护气流量为 15 L/min。焊后线切割取样,经砂纸粗磨细磨,机械抛光,4%硝酸乙醇溶液腐蚀制备金相试样,利用型号为 XJG-05 的卧式金相显微镜观察焊缝的金相组织;依据国家标准(GB/T2651-2008)制取剪切试样尺寸,用微机控制的电子万能试验机测试焊接试件的剪切强度;采用配有能谱仪(EDS)和电子背散射衍射(EBSD)探头的 FEI Quanta200 扫描电镜(SEM)观察断口形貌,分析界面主要物相的分布及含量和晶粒大小。

计算添加 Sn-5%Zr 粉末新形成物相 FeSn、Fe₃Sn 和 Fe₃Al、FeAl、Fe₂Al₅ 等 Fe-Al 金属间化合物的模量时,结构参数如表 1 所示。计算模量采用基于密度泛函理论的 Castep 程序软件包^[14-15],其总能量包括动能、静电能和交换关联能三部分。交换关联能采用广义梯度近似(GGA)中的 Perdew-Burke-Ernzerhof 形式^[16],计算在

最小化的快速傅里叶变换(FFT)网格上进行,采用对正则条件进行弛豫的超软赝势^[17]作为平面波基集。采用自洽迭代(SCF)方法进行计算,采用结合BFGS共轭梯度方法的Pulay密度混合方案^[16]处理电子弛豫。几何优化时体系总能量的收敛值为 5.0×10^{-6} eV/atom,每个原子上的力低于0.1 eV/nm,公差偏移小于 5.0×10^{-5} nm,应力偏差小于0.02 GPa。进行单点能计算时,动能截断点为330.0 eV,FFT网格为 $12 \times 12 \times 12$ 。计算弹性常数时,交换关联函数采用GGA近似的PW91形式,采用Smearing energy进行能量快速收敛。

表1 Fe₃Al, FeAl, Fe₂Al₅, FeSn和Fe₃Sn的结构参数

Table 1 Structure parameters of Fe₃Al, FeAl, Fe₂Al₅, FeSn and Fe₃Sn

Phase	Structure type	Atom number in cell	Group (No.)	Lattice constant	Atom site
Fe ₃ Al	DO ₃	16	Fm-3m(225)	$a=b=c=5.791$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	+4Al(I):(0,0,0)+4Fe(I):(0.5,0.5,0.5)+ 8Fe(II):(0.25,0.25,0.25)
FeAl	B2	2	Pm-3m(221)	$a=b=c=2.908$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	+1Al(I):(0,0,0)+1Fe(I):(0.5,0.5,0.5)
Fe ₂ Al ₅	C	14.8	Cmcm(63)	$a=7.675, b=6.403, c=4.203$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	+4Al(I):(0,0,0), occ.=0.7+8Al(II):(0.18, 0.65,0.25)+4Fe(I):(0,0.332,0.25)
FeSn	B35	6	P6/mmm(191)	$a=b=5.307, c=4.445$ $\alpha=\beta=90^\circ, \gamma=120^\circ$	+3Fe(I):(0.5,0,0)+1Sn(I):(0,0,0) +2Sn(II):(0.333,0.667,0.5)
Fe ₃ Sn	L1 ₂	4	Pm-3m(221)	$a=b=c=3.873$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	+3Fe(I):(0,0.5,0.5)+1Sn(I):(0,0,0)

3 结果与分析

3.1 显微组织

图1为优化焊接参数条件下添加Sn-5%Zr粉末前后钢/铝焊缝的微观形貌。可看出,激光搭接焊过程中,激光首先对钢板加热,并将上面钢板熔化,而后和下面铝板作用形成熔池连接。在相同焊接参数条件下,焊接熔池形貌发生明显改变。与激光直接焊接相比,添加Sn-5%Zr粉末后,粉末层良好的流动性有助于降低熔池内液态金属的剧烈震荡,熔池内部搅拌能力降低,这在一定程度上可以减少钢、铝之间的相互反应。Sn-5%Zr粉末熔化后向两侧铺展,增加了激光能量沿熔宽方向的传递,钢/铝板材界面处的熔宽增加,使得钢、铝液态金属凝固后横向结合面积增加,这将有助于接头在承受剪切载荷时有更大的剪切强度,同时,由于Sn-5%Zr粉末的作用,钢/铝异种金属的结合性改善,有利于提高接头焊合率。

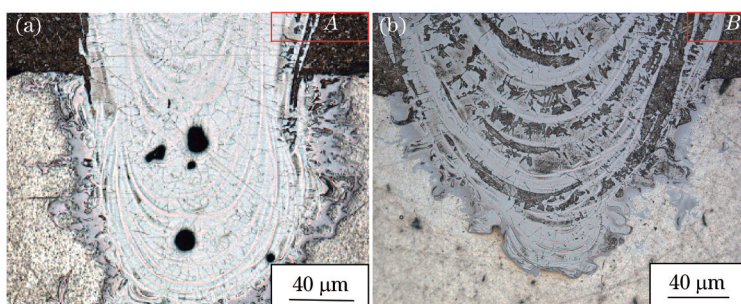


图1 钢/铝接头熔池分布。(a) 无粉末添加; (b) 添加Sn-5%Zr粉末

Fig.1 Distribution of steel/Al joints in welding puddle. (a) Without powder addition; (b) with Sn-5%Zr powder addition

对图1红色方框A、B区域进行微区扫描,图2进一步给出了添加Sn-5%Zr粉末前后焊缝到钢母材的EBSD花样质量分布,可以看到,添加Sn-5%Zr粉末后,焊缝区与热影响区(HAZ)的晶粒尺寸变小,热影响区宽度由180 μm下降到135 μm左右,明显变窄。图3为添加Sn-5%Zr粉末前后钢/铝合金界面的金相组织。未添加粉末时,焊缝区组织沿铝的基体垂直于钢/铝界面层生长,靠近界面层组织为柱状晶,柱状晶长度方向尺寸为80~100 μm,而靠近焊缝中心处组织逐渐发展为等轴晶[图3(a)]。添加Sn-5%Zr粉末后,界面层处柱状晶晶粒尺寸减小至40 μm左右[图3(b)]。

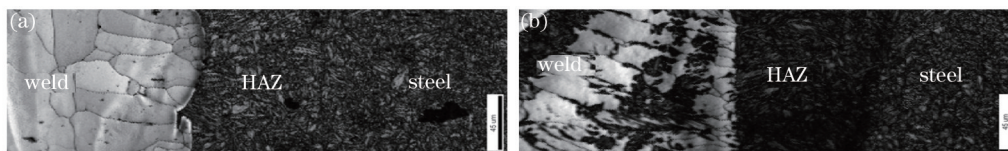


图2 焊缝到母材EBSD花样质量分布。(a) 无粉末添加; (b) 添加Sn-5%Zr粉末

Fig.2 EBSD image quality map of weld to steel base metal. (a) Without powder addition; (b) with Sn-5%Zr powder addition

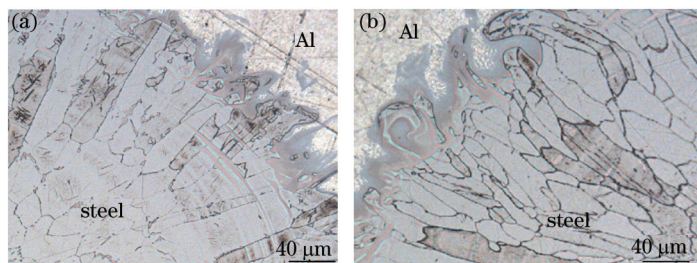


图3 钢/铝界面附近焊缝区显微组织。(a) 无粉末添加; (b) 添加Sn-5%Zr粉末

Fig.3 Microstructure of steel/Al interfacial region in the welds. (a) Without powder addition; (b) with Sn-5%Zr powder addition

3.2 力学性能与断口形貌

图4为添加Sn-5%Zr粉末前后钢/铝剪切试样的断裂位置,可以看到,未添加粉末,试样从钢/铝界面处剥离[图4(a)],而添加粉末,试样均断裂在上层钢板焊缝区与母材金属的相邻处[图4(b)]。未添加Sn-5%Zr粉末试样的平均剪切强度为28.70 Mpa,添加Sn-5%Zr粉末试样的平均剪切强度为37.90 MPa,与未添加粉末相比,剪切强度提高。

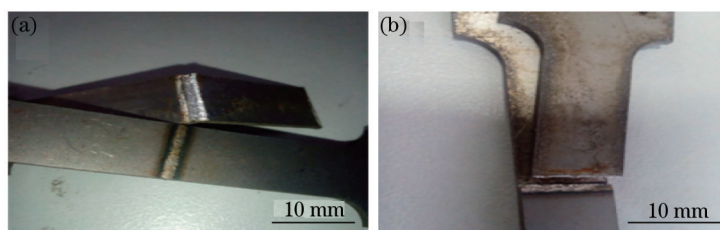


图4 钢/铝剪切断裂位置。(a) 无粉末添加; (b) 添加Sn-5%Zr粉末

Fig.4 Fracture positions of steel/Al after tensile test. (a) Without powder addition; (b) with Sn-5%Zr powder addition

图5为添加Sn-5%Zr粉末前后剪切试样断口的微观形貌。未添加粉末,断口发现有少量裂纹,对断口局部区域[如图5(a)中的I、II、III]进行EDS分析,如表2,发现I、III区域中Fe、Al元素的原子比接近1:3,II区域中Fe、Al元素的原子比接近1:2,推测未添加粉末试样断口生成了 $FeAl_3$ 及 $FeAl_2$ 金属间化合物,此外试样微观形貌为河流状花样[图5(a)],表明呈脆性断裂特征,塑性变形不明显;添加Sn-5%Zr粉末,断口微观形貌呈蜂窝

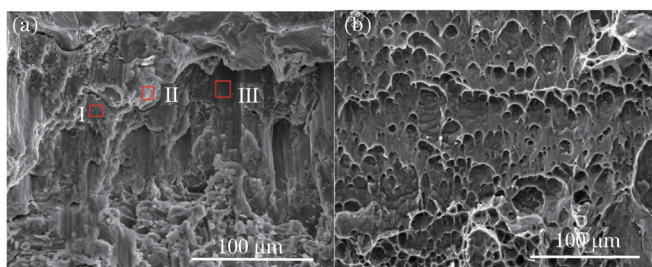


图5 钢/铝剪切试样的断口微观形貌。(a) 无粉末添加; (b) 添加Sn-5%Zr粉末

Fig.5 SEM fractographies of steel/Al after tensile test. (a) Without powder addition; (b) with Sn-5%Zr powder addition

表2 钢/铝剪切试样断口EDS分析

Table 2 Chemical compositions of steel/Al alloy joint by EDS analysis

Element	I	II	III
Fe	25.6	34.9	22.4
Al	72.8	63.3	76.4

状,断裂面有大量细小的韧窝,部分大的韧窝呈杯锥状[图 5(b)],为典型的混合断裂,说明添加粉末的接头在剪切过程中出现了明显的塑性变形,接头塑性明显提高。

3.3 界面层的相结构

图 6 为添加 Sn-5%Zr 粉末前后钢/铝界面背散射电子像及 Al 元素的分布。图 6(a)及图 6(c)反映了钢/铝界面层的形态分布,对比图 6(b)和图 6(d),可以看出,添加粉末后,通过钢/铝界面层扩散到钢侧熔池的 Al 含量明显减少。

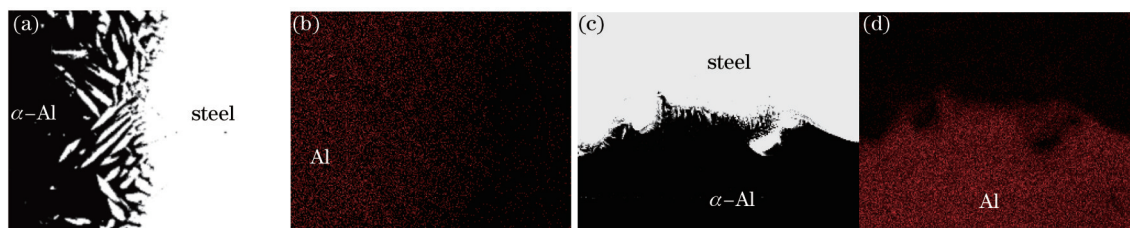


图 6 钢/铝界面背散射电子像及 Al 元素的分布。(a) 无粉末添加钢/铝界面背散射电子像;(b) 无粉末添加钢/铝界面 Al 的分布;(c) 添加 Sn-5%Zr 粉末钢/铝界面背散射电子像;(d) 添加 Sn-5%Zr 粉末钢/铝界面 Al 的分布

Fig.6 Backscattered electron images and distribution of Al element for steel/Al interface. (a) Backscattered electron images for steel/Al interface without powder addition; (b) distribution of Al element without powder addition; (c) backscattered electron images for steel/Al interface with Sn-5%Zr powder addition; (d) distribution of Al element with Sn-5%Zr powder addition

图 7(a)为未添加 Sn-5%Zr 粉末钢/铝界面层的 SEM 像。可以看到,钢/铝界面层根部组织呈粗大的针状,延伸方向参差不齐。将界面层划分 A、B、C 三个区域,并进行能谱分析,结果如表 3 所示。发现 A 区域 Fe、Al 元素的原子比接近 1:2, B 区域 Fe、Al 元素的原子比接近 2:5, C 区域 Fe、Al 元素的原子比接近 1:3,从 Fe-Al 相图推测来看, A 区域生成了 FeAl₂ 金属间化合物, B 区域生成了 Fe₂Al₃ 金属间化合物, C 区域生成了 FeAl₃ 金属间化合物。可见未添加 Sn-5%Zr 粉末,整个界面层主要为富 Al 的 Fe-Al 金属间化合物,其厚度大约为 15 μm,该结果与剪切试样断口的分析结果相一致。图 7(b)为添加 Sn-5%Zr 粉末后钢/铝界面层的 SEM 像。可以看出,熔池与铝侧基体之间有颜色衬度不同的界面层组织,对界面层进行放大观察[图 7(c)],发现界面层附着在熔池边缘,根部组织呈细条状,并向铝侧生长,界面层较薄,厚度约为 2 μm。对图 7(c)中的 D、E、F,图 7(d)中的白点 G、H 区域进行能谱分析,结果也一并列入表 3。发现 D 区域主要成分为 Fe,含有少量 Al、Sn, E 区域中 Fe、Al 含量之比大约为 1:1,推测生成了 FeAl 金属间化合物, F 区域主要成分为 Al,含有少量 Fe、Sn,与 D、E、F 区域相比,白点区域[图 7(d)]G、H 中 Sn 的含量明显增多, Fe 和 Sn 含量之和与 Al 含量之比大约为 1:1,推测 Sn 占据 Fe-Al 金属间化合物中部分 Fe 的位置,或与 Fe 生成了 Fe-Sn 相。

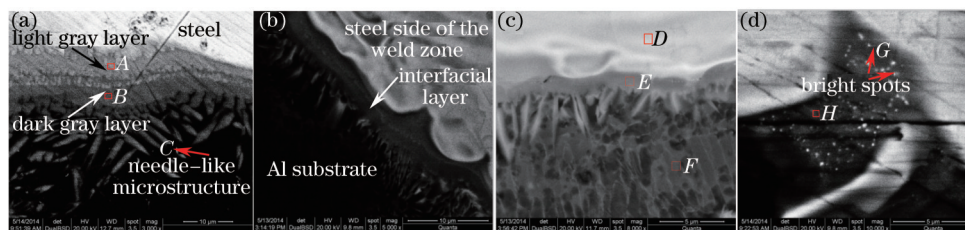


图 7 钢/铝界面层的 SEM 像。(a) 无粉末添加钢/铝界面;(b) 添加 Sn-5%Zr 粉末钢/铝界面;(c) 图 7(b)局部放大;(d) 添加 Sn-5%Zr 粉末钢/铝界面白色颗粒

Fig.7 SEM images of steel/Al interface layer. (a) Steel/Al alloy interface without powder addition; (b) steel/Al alloy interface with Sn-5%Zr powder addition; (c) enlarged view of Fig.7(b); (d) bright spots of steel/Al alloy interface with Sn-5%Zr powder addition

表 3 钢/铝合金焊接接头的 EDS 分析(原子数分数,%)

Table 3 Chemical compositions of steel/Al alloy weld joint by EDS analysis (atomic fraction, %)

Element	A	B	C	D	E	F	G	H
Fe	36.8	28.0	19.9	89.7	41.1	9.9	44.7	46.7
Al	60.5	69.7	78.7	4.9	55.6	87.9	47.2	48.7
Sn	-	-	-	0.2	0.6	0.4	4.3	1.4

为进一步确定金属间化合物相结构类型,对添加 Sn-5%Zr 粉末钢/铝焊接试样进行 X 射线衍射(XRD)分析,结果如图 8 所示。焊缝界面除形成 Fe₃Al、FeAl、FeAl₂ 等 Fe-Al 金属间化合物外,还形成了 ZrAl₃ 以及 FeSn、Fe₃Sn 等 Fe-Sn 化合物。上述钢/铝界面层能谱分析结果显示:未添加 Sn-5%Zr 粉末,钢/铝界面层生成了 FeAl₂、Fe₂Al₅、FeAl₃ 等 Fe-Al 金属间化合物,而添加 Sn-5%Zr 粉末,钢/铝界面层除生成 FeAl 化合物外,还形成 Fe-Sn 化合物,XRD 与能谱分析结果基本一致。

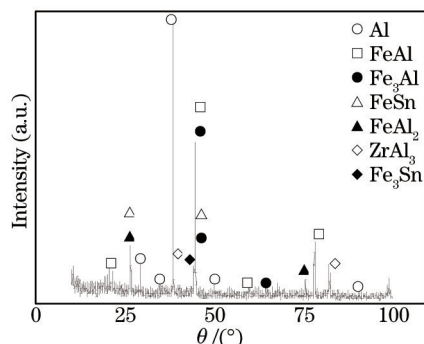


图 8 添加 Sn-5%Zr 粉末钢/铝焊接接头的 XRD 谱

Fig.8 XRD spectrum of steel/Al weld joint with Sn-5%Zr powder addition

3.4 相结构的力学性质

XRD 与能谱分析结果发现,添加 Sn-5%Zr 粉末激光焊钢/铝焊接试样生成了 Fe₃Al、FeAl、FeAl₂、Fe₂Al₅、FeAl₃ 等 Fe-Al 金属间化合物以及 FeSn、Fe₃Sn 等 Fe-Sn 化合物,为探讨添加粉末新形成物相是影响焊接接头力学性能的重要原因,从 Fe-Al 金属间化合物中选取 FeAl,富 Fe 的 Fe₃Al 以及富 Al 的 Fe₂Al₅、FeSn、Fe₃Sn 等化合物,计算这些相的模量,比较 FeAl、Fe₃Al、Fe₂Al₅、FeSn 以及 Fe₃Sn 的延、脆性。

表 4 为计算的 FeAl、Fe₃Al、Fe₂Al₅、FeSn 和 Fe₃Sn 的弹性常数,发现 FeAl 弹性常数的计算值与 Simmons 等^[18] 的实验值以及文献[19]的理论计算结果比较接近,表明所用计算模型与计算方法合理,在此基础上,采用如下公式^[20]:

$$B = \frac{C_{11} + 2C_{22}}{3}, \quad (1)$$

$$G = \frac{C_{11} - C_{12} + 3C_{44}}{5}, \quad (2)$$

计算了 FeAl、Fe₃Al、Fe₂Al₅、FeSn 和 Fe₃Sn 等化合物的体模量 B , 剪切模量 G 以及剪切模量与体模量的比值 G/B 值,结果如表 5 所示。通常 G/B 可预测材料的脆性与延性等本征力学性质^[21-22], 即当 $G/B < 0.5$ 时,材料表现为延性,否则呈脆性。从表 5 所示结果来看, Fe₂Al₅、FeAl 的 G/B 值分别为 0.798、0.681, 大于 0.5, 表明 Fe₂Al₅、FeAl 金属间化合物为脆性相; Fe₃Al、FeSn、Fe₃Sn 的 G/B 值分别为 0.494、0.361、0.364, 小于 0.5, 表明 Fe₃Al、FeSn、Fe₃Sn 金属间化合物为延性相。

表 4 FeAl、Fe₃Al、Fe₂Al₅、FeSn 和 Fe₃Sn 弹性常数的计算值和实验结果

Table 4 Calculated and experimental elastic constants ($C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{33}, C_{44}, C_{66}$) of FeAl, Fe₃Al, Fe₂Al₅, FeSn and Fe₃Sn

Phase	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{33}	C_{44}	C_{66}
FeAl	218.374	104.367			123.666	
	208.260 ^[18]	121.752 ^[18]	-	-	126.558 ^[18]	-
	178.783 ^[19]	131.845 ^[19]			106.213 ^[19]	
Fe ₃ Al	165.561	119.425	-	-	95.566	-
Fe ₂ Al ₅	233.206	46.922	93.879	529.448	82.883	79.629
FeSn	187.823	114.608	56.601	185.272	59.129	-
Fe ₃ Sn	151.521	88.342	-	-	45.369	-

表5 FeAl, Fe₃Al, Fe₂Al₅, FeSn 和 Fe₃Sn 的模量 (*B* 为体模量, *G* 为剪切模量)
Table 5 Moduli of FeAl, Fe₃Al, Fe₂Al₅, FeSn and Fe₃Sn (*B*-bulk modulus; *G*-shear modulus)

Phase	<i>B</i> /GPa	<i>G</i> /GPa	<i>G</i> / <i>B</i>
FeAl	142.369	97.001	0.681
Fe ₃ Al	134.804	66.567	0.494
Fe ₂ Al ₅	109.017	86.987	0.798
FeSn	139.013	50.121	0.361
Fe ₃ Sn	109.402	39.857	0.364

3.5 相结构的体积分数与平均晶粒尺寸

为探讨添加 Sn-5%Zr 粉末影响焊接接头力学性能的作用机制,对钢/铝界面微区 Fe-Al 金属间化合物的体积分数及其平均晶粒尺寸进行了 EBSD 分析。通过 EBSD 菊池衍射花样可进行微区晶体学分析,对晶粒尺寸进行统计分析和物相鉴定。EBSD 扫描区域为 11 μm×14 μm[图 9(a)], 12 μm×10 μm[图 9(b)], 步长为 0.005 μm, 图 9 为添加 Sn-5%Zr 粉末前后钢/铝界面微区的 EBSD 组分图。可以看出,未添加 Sn-5%Zr 粉末,钢/铝界面 Fe-Al 金属间化合物含量最多的为 FeAl₂, 其次为 Fe₃Al、FeAl、FeAl₃, 含量最少的为 Fe₂Al₅; 添加 Sn-5%Zr 粉末后,钢/铝界面 Fe-Al 化合物的体积分数有所变化,含量最多的为 Fe₃Al, 其次为 FeAl、FeAl₂、Fe₂Al₅, 含量最少的为 FeAl₃。将添加 Sn-5%Zr 粉末前后 Fe₃Al、FeAl、FeAl₂、Fe₂Al₅、FeAl₃ 等 Fe-Al 金属间化合物的体积分数进行比较,如图 10 所示。发现添加 Sn-5%Zr 粉末后,富 Fe 的延性相 Fe₃Al 的体积分数增加,而富 Al 的脆性相 FeAl₂、Fe₂Al₅、FeAl₃ 的体积分数减少。

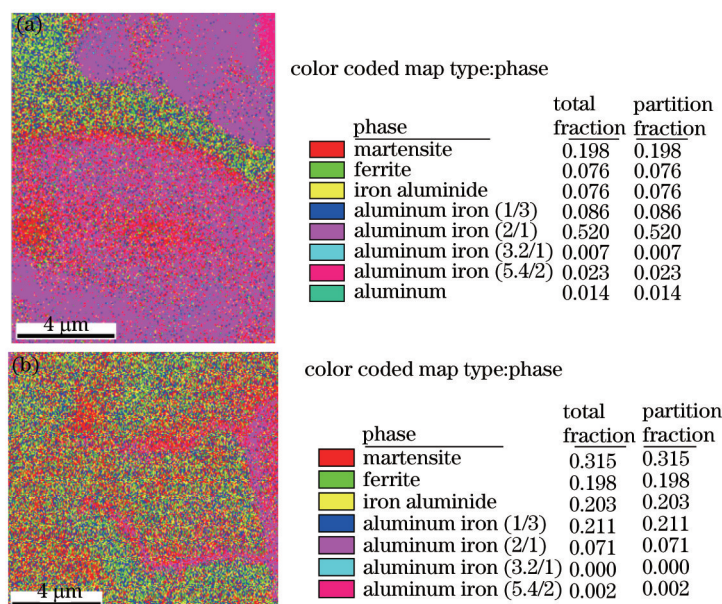


图9 钢/铝界面微区 EBSD 相的组分图。(a) 无粉末添加; (b) 添加 Sn-5%Zr 粉末

Fig.9 EBSD maps of phase in steel/Al interface. (a) Without powder addition; (b) with Sn-5%Zr powder addition

图 11 为添加 Sn-5%Zr 粉末前后钢/铝界面微区 Fe-Al 金属间化合物的平均晶粒尺寸。发现添加 Sn-5%Zr 粉末后,富 Fe 的延性相 Fe₃Al 的平均晶粒尺寸由 145 nm 减小到 121 nm,脆性相 FeAl 的平均晶粒尺寸由 126 nm 减小到 116 nm,富 Al 的脆性相 FeAl₂ 的平均晶粒尺寸由 172 nm 减小到 83 nm。

与未添加粉末相比,添加 Sn-5%Zr 粉末后焊接接头剪切强度提高,除添加粉末中的 Zr 新形成 ZrAl₃ 化合物,细化钢/铝界面 Fe-Al 化合物的晶粒尺寸^[23-24], Sn 抑制 Al 向焊缝熔池内扩散,减少 Fe-Al 金属间化合物层厚度,新形成物相 FeSn、Fe₃Sn 具有较好延性,相比于单独添加 Sn、单独添加 Zr 粉末而言^[12-13],添加 Sn-5%Zr 粉末使钢/铝界面层富 Fe 的延性相 Fe₃Al 的体积分数增加,富 Al 的脆性相 FeAl₂、Fe₂Al₅、FeAl₃ 的体积分数减少外,相对激光直接焊接,由于添加粉末熔化后吸收更多热量并向两侧铺展,有利于增加激光能量沿熔宽方向的传递,形成比直接激光焊接更宽的熔宽[图 1(b)],粉末层熔化后有利于改善钢/铝结合性,提高接头焊合率,

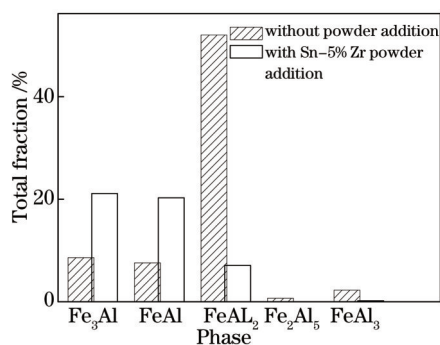


图 10 钢/铝界面微区相的体积分数

Fig.10 Total fraction of phases in steel/Al interface

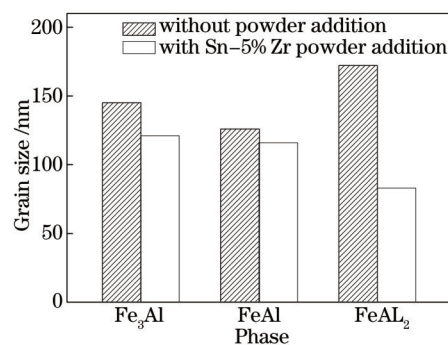


图 11 钢/铝界面区 Fe-Al 系化合物的平均晶粒尺寸

Fig.11 Grain sizes of Fe-Al compounds in steel/Al interfacial layer

因而添加 Sn-5%Zr 粉末改善了焊接接头的剪切性能。

4 结 论

1) 对 DP590 双相钢与 6016 铝合金进行激光搭接焊,在激光功率为 1500 W,焊接速度为 30 mm/s,离焦量为+2.0 mm,Ar 气为保护气体且流量为 15 L/min 的条件下,添加 Sn-5%Zr 粉末焊接试样接头的焊合率增加,焊缝区晶粒细小;

2) 添加 Sn-5%Zr 粉末后,钢/铝合金界面层形成了 FeAl、Fe₃Al、FeAl₂、ZrAl₃、FeSn、Fe₃Sn 化合物,金属间化合物厚度约为 2 μm,明显低于未添加 Sn-5%Zr 粉末焊接试样的金属间化合物层厚度;

3) 添加 Sn-5%Zr 粉末后,钢/铝合金焊接接头的平均剪切强度为 37.90 MPa,与未添加粉末相比,剪切强度提高;由于添加 Sn-5%Zr 粉末中的 Zr 新形成 ZrAl₃ 化合物,细化钢/铝界面 Fe-Al 金属间化合物的晶粒尺寸,Sn 抑制 Al 向焊缝熔池内扩散,减少 Fe-Al 金属间化合物层厚度,新形成物相 FeSn, Fe₃Sn 具有较好延性,Sn-5%Zr 粉末改变了界面层 Fe-Al 金属间化合物脆性相与延性相的比例,添加粉末增加焊缝熔宽,有助于焊合率的提高,因而添加 Sn-5%Zr 粉末改善了焊接接头的力学性能。

参 考 文 献

- 1 Ma Mingtu. Advanced Steel for Vehicle[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 56.
马鸣图. 先进汽车用钢[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 56.
- 2 Miller W S, Zhuang L, Bottema J. Recent development in aluminum alloys for the automotive industry[J]. Mater Sci Eng A, 2000, 280(1): 37-49.
- 3 Torkamany M J, Tahamtan S, Sabbaghzadeh J. Dissimilar welding of carbon steel to 5754 aluminum alloy by Nd:YAG pulsed laser [J]. Mater Des, 2010, 31(1): 458-465.
- 4 Murakami T, Nakata K, Tong H. Dissimilar metal joining of aluminum to steel by MIG arc brazing using flux Cored Wire[J]. ISIJ Int, 2003, 43(10): 1596-1602.
- 5 Mathieu A, Pontevicci S, Viala J C. Laser brazing of a steel/aluminium assembly with hot filler wire (88% Al, 12% Si)[J]. Mater Sci Eng A, 2006, 435-436: 19-28.
- 6 Zhang Qiyun, Liu Shuqi. Selection of filler metal for aluminum brazing and it's reaction with base metal[J]. Acta Metall Sin, 1981, 17(3): 300-377.
张启运, 刘淑淇. 高温铝钎料的选择及其与母材的相互作用[J]. 金属学报, 1981, 17(3): 300-377.
- 7 Guo Jianting, Sun Chao, Tan Minghui, et al.. Effect of alloying element on machanical properties of Fe₃Al and FeAl alloys[J]. Acta Metall Sin, 1990, 26(1): 20-25.
郭建亭, 孙 超, 谭明晖, 等. 合金元素对 Fe₃Al 和 FeAl 合金力学性能的影响[J]. 金属学报, 1990, 26(1): 20-25.
- 8 Zhang Qiaoxin. Study on brittleness and possible solutions of intermetallic compounds[J]. Rare Met Mater Eng, 1990, 20(6): 27-31.
章桥新. 论金属间化合物的脆性及其克服途径[J]. 稀有金属材料与工程, 1990, 20(6): 27-31.
- 9 Wang Liguu, Zhang Baofeng, Guan Shaokang, et al.. Effects of RE, B on microstructure and properties of AM60 alloy[J]. Rare Met Mater Eng, 2007, 36(1): 59-62.
王利国, 张保丰, 关绍康, 等. RE, B 对 AM60 合金显微组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(1): 59-62.

- 10 Boag A, Hughes A E, Wilson N C, *et al.*. How complex is the microstructure of AA2024-T3?[J]. *Corros Sci*, 2009, 51(8): 1565–1568.
- 11 Akdeniz M V, Mekhrabov A O. The effect of substitutional impurities on the evolution of Fe–Al diffusion layer[J]. *Acta Mater*, 1998, 46(4): 1185–1192.
- 12 Zhang Lijuan, Zhou Dianwu, Liu Jinshui, *et al.*. Laser welding of steel/aluminum dissimilar metal with powder addition[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(12): 3401–3409.
张丽娟, 周惦武, 刘金水, 等. 钢/铝异种金属添加粉末的激光焊接[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(12): 3401–3409.
- 13 Zhou Dianwu, Peng Yan, Xu Shaohua, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of steel/Al alloy laser welding with Sn powder addition[J]. *Acta Metall Sin*, 2013, 49(8): 959–968.
周惦武, 彭 艳, 徐少华, 等. 添加 Sn 粉激光焊接钢/铝合金异种金属的显微组织与性能[J]. *金属学报*, 2013, 49(8): 959–968.
- 14 Segall M D, Lindan P L D, Probert M J. Effects of p-orbital on-site coulomb repulsion on the electronic properties of Mg_2Sn [J]. *Condens Matter Phys*, 2002, 14: 2717.
- 15 Marlo M, Milman V. Density-functional study of bulk and surface properties of titanium nitride using different exchange correlation functionals[J]. *Phys Rev B*, 2000, 62(4): 2899–2907.
- 16 White J A, Bird D M. Implementation of gradient-corrected exchange-correlation potentials in Car-Parrinello total-energy calculations [J]. *Phys Rev B Condous Matter*, 1994, 50(7): 4954–4957.
- 17 Hammer B, Hasnsen L B, Norkov J K. Improved adsorption energetic within density-fuctional theory using revised Perdew-Burke-Ernzerhof functional[J]. *Phys Rev B*, 1999, 59(11): 7413–7421.
- 18 Simmons G, Wang H. *Single Crystal Elastic Constants and Calculated Aggregate Properties*[M]. Cambridge: MIT Press, 1971: 80.
- 19 Shu X L, Hu W Y, Xiao H N, *et al.*. Vacancies and antisites in B2 FeAl and DO3 Fe_3Al with a modified analytic EAM model[J]. *J Mater Sci Technol*, 2001, 17(6): 601–604.
- 20 Mehl M J, Osburn J E, Papaconstantopoulos D A. Structural properties of ordered high-melting-temperature intermetallic alloys from first-principles total-energy calculations[J]. *Phys Rev B*, 1990, 41(15): 10311–10323.
- 21 Pugh S F. Relations between the elastic moduli and the plastic properties of polycrystalline pure metals[J]. *Philos Mag Series*, 1954, 45(367): 823–843.
- 22 Yu W Y, Wang N, Xiao X B, *et al.*. First-principles investigation of the binary AB2 type Laves phase in Mg–Al–Ca alloy: Electronic structure and elastic properties[J]. *Solid State Sci*, 2009, 11(8): 1400–1407.
- 23 Kashyap K T, Chandrashekar T. Effects and mechanisms of grain refinement in aluminium alloys[J]. *Bull Mater Sci*, 2001, 24(4): 345–353.
- 24 Zhang Ping, Li Qi, Zhao Junjun, *et al.*. Analysis of secondary phases and measurement of volta potential of 7A52 aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(46): 1254–1257.
张 平, 李 奇, 赵军军, 等. 7A52 铝合金中第二相分析及微区电位测试[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(46): 1254–1257.

栏目编辑: 张浩佳