

钢/铝异种金属添加粉末的激光焊接

张丽娟, 周惦武, 刘金水, 徐少华, 乔小杰, 李 升

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘 要: 采用光纤激光器对 1.4 mm 厚 DC51D+ZF 镀锌钢和 1.2 mm 厚 6016 铝合金平板试件进行添加 Mn、Zr 粉末的激光搭接焊试验, 利用金相显微镜、显微硬度仪、扫描电镜、X 射线衍射仪、微机控制电子万能试验机等研究焊接接头各区域的金相组织、显微硬度、断口形貌、主要物相与接头的力学性能。结果表明: 在钢/铝激光焊中添加 Mn、Zr 粉末, 焊接接头平均抗剪强度与没有添加粉末相比, 有所提高, 其中添加 Zr 粉末的提高效果明显; Mn、Zr 粉末的添加改变了钢/铝界面的元素分布、物相组成及微观组织形态, 添加 Mn 能提高熔池金属的流动性, 利于钢/铝界面结合, 而添加 Zr, 焊缝区晶粒细小, 形成新的 $\text{ZrFe}_{3.3}\text{Al}_{1.3}$ 韧性相, 抑制 Fe-Al 脆性金属间化合物生成。因此, 添加 Mn、Zr 均改善了钢/铝焊接接头的力学性能。

关键词: 激光焊接; 异种金属; 金属间化合物; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG113.26

文献标志码: A

Laser welding of steel/aluminum dissimilar metal with powder addition

ZHANG Li-juan, ZHOU Dian-wu, LIU Jin-shui, XU Shao-hua, QIAO Xiao-jie, LI Sheng

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

Abstract: The fiber laser welding test with Mn and Zr powder addition was carried out on the DC51D+ ZF galvanized steel with thickness of 1.4 mm and the 6016 aluminum alloy with thickness of 1.2 mm. By using optical microscopy, electron microscopic hardness, scanning electron microscopy, X-ray diffraction and the tensile test, the microstructure, hardness, mechanical properties of joints, fracture morphology and the main phase of the welded joint region were studied. The results indicate that when Mn, Zr powders are added in steel/aluminum, the average shear strength of the welding sample is improved compared with that without power addition, and Zr is considered as the best power based on improved mechanical properties of joints. The element distribution, phase composition and microstructure of the steel/aluminum interface are changed due to Mn and Zr powders addition. When Mn powder is added in steel/aluminum, the fluidity of the molten pool metal is improved, which promotes the combination of the steel/aluminum interface, when Zr powder is added in steel/aluminum, fine grain is seen, and a new ductile intermetallic compound $\text{ZrFe}_{3.3}\text{Al}_{1.3}$ inhibits the generation of intermetallic compounds of Fe-Al, which can improve the mechanical properties of weld metal with Mn and Zr powder addition.

Key words: laser welding; dissimilar metal; intermetallic compound; microstructure; mechanical properties

汽车轻量化成为 21 世纪汽车技术的前沿和热点, 大量轻质材料在车身上的使用对于整车的轻量化起着举足轻重的作用。对汽车车身多材料结构而言, 要求

两种不同类型的材料(如钢/铝、铸铁/铝、铝/镁等)进行连接, 对钢/铝异种金属而言, 两者之间的固溶度很低, 物理、化学性能差异较明显, 极易反应生成 Fe-Al 脆

性金属间化合物,从而严重影响焊接接头的力学性能^[1-2]。采用摩擦焊、超声波焊、扩散焊和冷压焊等压焊方法对钢/铝进行焊接,可获得良好焊接接头,但 these 方法共同的缺点是焊件形状受到限制^[3-4]。与常规熔焊相比,激光焊用激光束作焊接热源,具有能量密度高、热输入量小、热量集中、热源易控制、焊缝深宽比大、热影响区窄、焊接变形小以及高效高自动化等诸多优点^[5],是钢/铝理想的焊接方法,减少焊接区 Fe-Al 金属间化合物的脆性影响成为激光焊研究的重点和难点^[6-9]。钢/铝异种金属焊接易生成 Fe-Al 脆性金属间化合物,在激光焊接中添加粉末,通过改变钢/铝界面元素分布、物相组成及微观组织形态,可获得优质钢/铝焊接接头,添加粉末激光焊成为激光焊接技术的一个新的发展方向^[10]。由于 Mn 与 Fe 有亲和性,又与 Al 有一定的互溶性,利于钢/铝界面结合,而 Zr 细化晶粒,与 Al 和 Fe 形成韧性相,抑制 Fe-Al 脆性金属间化合物生成^[11],为此,本文作者选用 Mn、Zr 作为添加粉末,采用光纤激光器对 1.4 mm 厚的 DC51D+ZF 镀锌钢和 1.2 mm 厚的 6016 铝合金平板试件进行激光搭接焊试验,利用卧式金相显微镜、维氏显微硬度仪、扫描电镜、X 射线衍射仪、微机控制电子万能试验机等研究焊接接头各区域的金相组织、显微硬度、断口形貌、主要物相与接头力学性能,以期 为异种金属激光焊接提供一种新的研究思路,为钢/铝异种金属结构激光焊接的推广应用提供重要理论和试验基础。

1 实验

实验采用光束质量高的光纤激光器作为焊接热

源,激光器主要技术参数见表 1。执行机构为 ABB 机器人。实验材料为 DC51D+ZF 镀锌钢和 6016 铝合金,其化学成分见表 2,板料尺寸分别为 1.4 mm×100 mm×30 mm 和 1.2 mm×100 mm×30 mm。焊前用丙酮清洗试样以去除表面油污,用砂纸打磨以去除铝合金表面的氧化层。考虑到铝合金反射率高,将镀锌钢板置于铝合金上侧进行搭接焊试验。添加 Mn、Zr 粉末时,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,待其干燥后,将其与镀锌钢板组合成钢板在上侧、铝板在下侧的搭接接头,添加的纯 Mn 或 Zr 粉末量均约为 0.2 g,涂抹尺寸为 0.02 mm×40 mm×30 mm,激光束垂直入射到上侧钢板表面,采用氩气(Ar)对焊缝正面和背面同时进行保护。进行添加 Mn、Zr 粉末激光焊接试验以获得最佳焊缝表面成形性为目标,确定如表 3 所列的优化焊接工艺参数,添加粉末激光焊的示意图如图 1 所示。为对比分析添加 Mn、Zr 对焊接接头组织与性能的影响,文中所述未添加粉末的焊接工艺条件均与添加 Mn、Zr 粉末相同。焊后,用线切割将试样切割成标准剪切试样,如图 2 所示。将线切割后所得焊缝横截面进行打磨、抛光制成 6 mm×8 mm 的金相试样,用质量分数为 4% 的 HNO₃ 溶液腐蚀试件,利用卧式金相显微镜观察钢/铝焊缝/母材的金相组织;利用维氏显微硬度仪测量焊缝/母材横截面上的硬度分布情况;采用 FEI Quanta200 电子扫描电镜自带能谱 EDS 检测分析焊缝元素混合区的宽度;采用西门子 D500 X 射线能谱仪分析焊缝区的主要物相;利用微机控制电子万能试验机测试焊接试件的剪切强度;采用电子扫描电镜观察焊接试件的断口形貌,分析试件的断裂机制。

表 1 激光器主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of laser

Laser power/kW	Laser mode	Divergence angle, α /rad	Focal length, f /mm	Focal spot, d /mm	Wavelength, λ /nm
≤ 4.0 (Continuous)	TEM00	< 0.15	200	0.4	1 070

表 2 DC51D+ZF 镀锌钢和 6016 铝合金的化学成分

Table 2 Chemical compositions of DC51D+ZF Zn-coated steel and 6016 Al alloy

Material	Mass fraction/%								
	C	Si	Cu	Mn	Mg	S	P	Fe	Al
DC51D+ZF	≤ 0.10			0.035		0.5	0.035	Bal.	
6016		1-1.3	0.2	0.2	0.3-0.5			0.5	Bal.

表 3 优化的激光焊接工艺参数

Table 3 Optimized process parameters of laser welding			
Laser power/W	Welding speed/(mm·s ⁻¹)	Defocus distance/mm	Local protection gas flux/(L·min ⁻¹)
1 800	50	+2	20

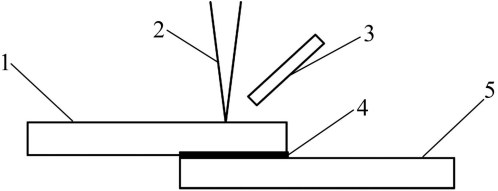


图 1 钢/铝激光焊接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of steel/aluminum laser welding: 1—Steel; 2—Beam laser; 3—Frontage protection gas (Ar); 4—Power; 5—Aluminum

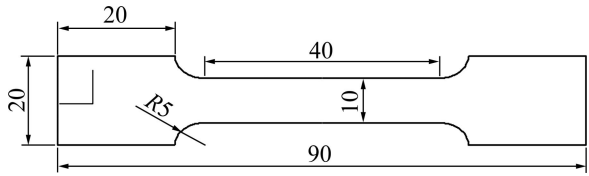


图 2 剪切试样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shear test sample (Unit: mm)

2 结果与分析

2.1 焊接试样的微观组织

图 3 所示为优化焊接工艺参数(如表 3 所列)条件下未添加粉末激光焊钢/铝熔池整体形貌与焊接接头不同区域的微观组织。由图 3 可见, 焊接熔池上宽下窄, 有深熔焊的“匙孔”指状特征(如图 3(a)所示), 母

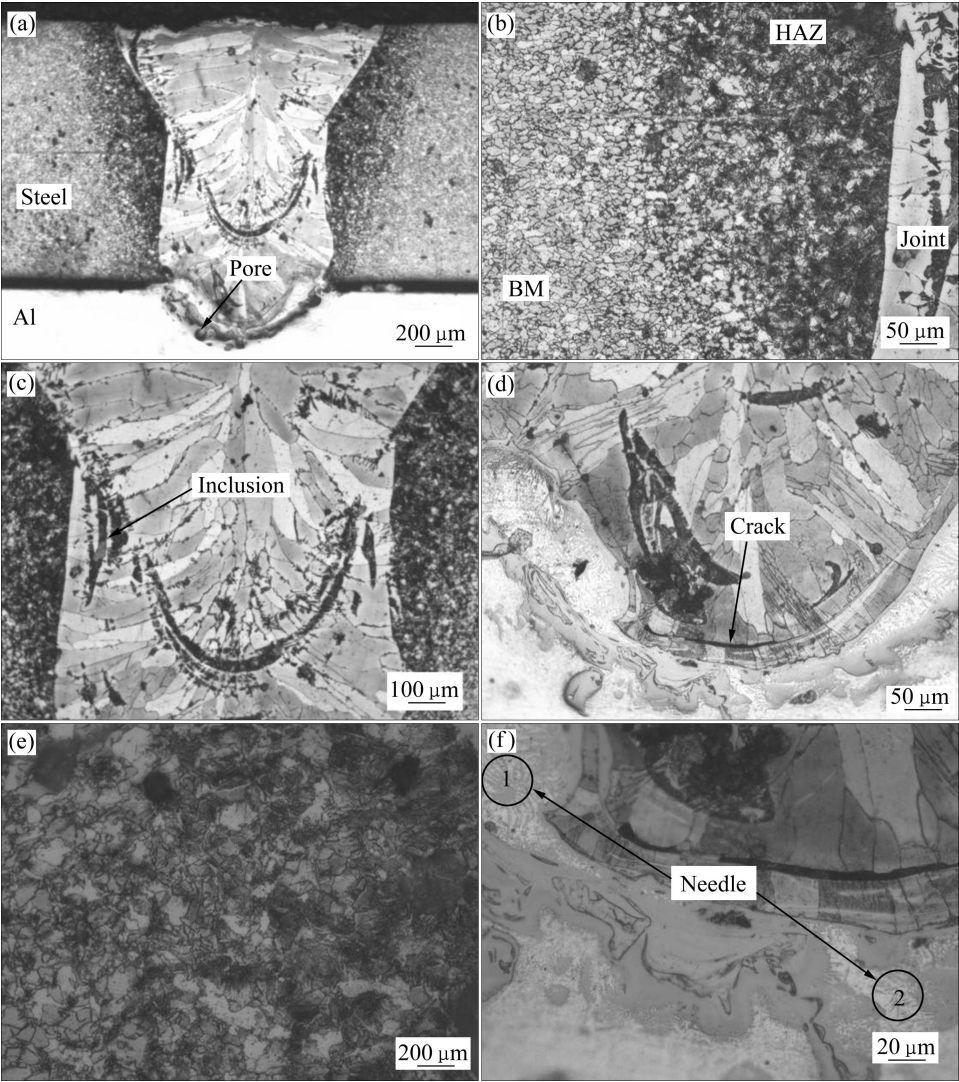


图 3 钢/铝焊接试样的微观组织

Fig. 3 Microstructures of steel/aluminum welding sample: (a) Full extent welded seam; (b) Joint; (c), (d) Local welded seam; (e) Normalized welding zone; (f) Interfacial layer

材、焊缝热影响区、熔池存在较多夹杂物、裂纹、气孔等缺陷,焊缝中心区域晶粒细小、均匀,两侧组织具有各向同性,以焊缝中心线为对称轴,从中心向熔池边界处沿水平方向进行树枝状生长,晶粒大小由中心到边界处逐渐增大(如图 3(b)~(e)所示)。图 3(f)所显示从上到下依次为镀锌钢基体、钢/铝界面层、铝合金基体,发现钢/铝界面层分两层,靠近钢基体处,厚度为 5~10 μm ,靠近铝基体处,厚度为 15~25 μm ,进一步分析发现,钢/铝界面层存在许多针状物质^[1],部分针状物质在界面层上断裂,游离而自由形核,形成新的枝针状物质,对针状物质进行能谱分析,发现其主要组成为 Fe、Al 元素以 1:1 或 1:3(摩尔比)比例形成的 Fe-Al 脆性金属间化合物(分别见图 3(f)中的 1 或 2 处)。

图 4 所示为相同焊接工艺条件下添加 Zr 粉末激光焊钢/铝熔池整体形貌与焊接接头不同区域微观组织。从图 4(a)发现,焊缝熔池形貌良好,余高适宜,无明显气孔、裂纹等缺陷。图 4(b)为熔池底部微观组织形貌,对比未添加粉末的情况发现,组织晶粒细小、均匀,钢/铝界面层无 Fe、Al 元素组成的 Fe-Al 脆性金属间化合物的针状物质。图 4(c)为靠近焊缝热影响区钢/铝界面的部分组织,发现呈羽毛状,并垂直熔合线生长,晶粒细小。从图 4(d)来看,相对未添加粉末的

焊缝区域(如图 3(e)所示),添加 Zr 后,焊缝热影响区域小。

图 5 所示为相同焊接工艺条件下添加 Mn 粉末激光焊钢/铝熔池整体形貌与焊接接头不同区域微观组织。由图 5(a)可看出,焊缝熔池形貌良好,与未添加粉末相比(如图 3(a)所示),焊缝区气孔等缺陷明显减少。图 5(b)为焊缝熔池底部的微观组织形貌,发现添加 Mn,与添加 Zr 相比,晶粒粗化,但与未添加粉末相比,晶粒细小。图 5(c)为焊缝热影响区组织形貌,发现存在黑色组织相对较少,而白色组织较多。图 5(d)所显示从上到下为镀锌钢基体、钢/铝界面层、铝合金基体,发现钢/铝界面层中存在少量由 Fe、Al 元素组成的 Fe-Al 脆性金属间化合物的针状物质。

2.2 焊接试样的力学性能与断口形貌

图 6 所示为添加粉末前后钢/铝焊接接头的平均剪切强度。由图 6 可见,未添加粉末,平均剪切强度为 34.53 MPa;添加 Mn,平均剪切强度为 38.35 MPa,提高不明显;而添加 Zr,平均剪切强度为 43.88 MPa,焊接接头的平均剪切强度提高明显。

图 7 所示为钢/铝激光焊剪切断裂试样断口微观形貌。由图 7 可见,未添加粉末,微观形貌表现为河流

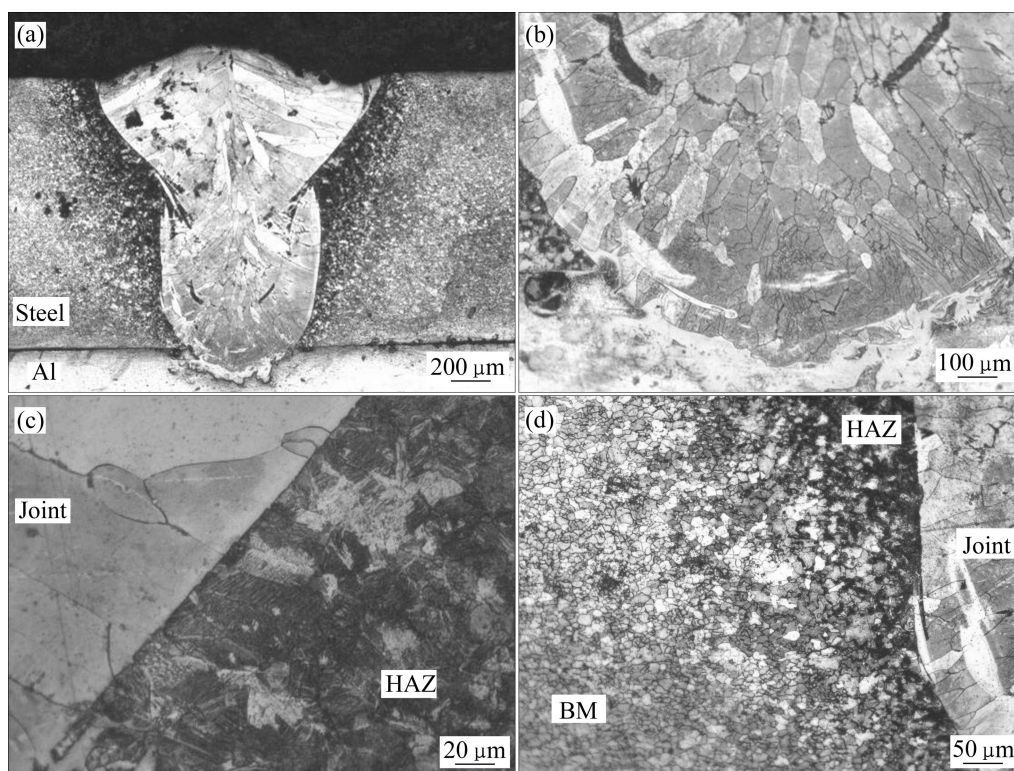


图 4 添加 Zr 钢/铝焊接试样微观组织

Fig. 4 Microstructures of steel/aluminum welding sample with Zr power addition: (a) Full extent welded seam; (b) Local welded seam; (c), (d) Joint

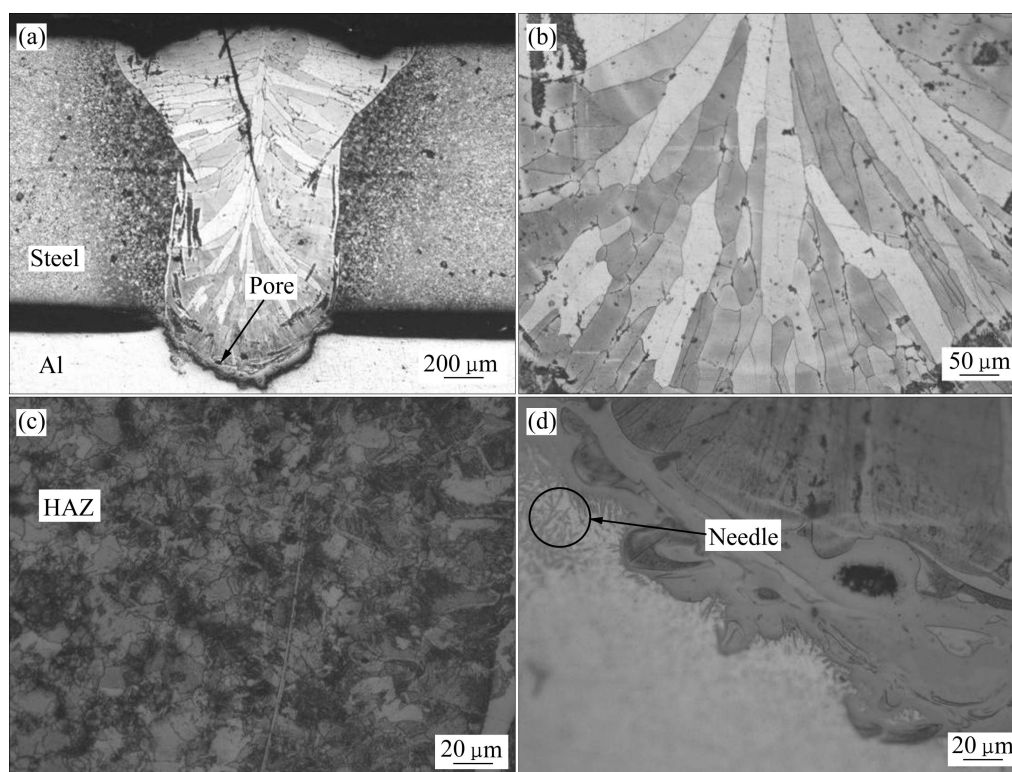


图 5 添加 Mn 钢/铝焊接试样微观组织

Fig. 5 Microstructures of steel/aluminum welding sample with Mn powder addition: (a) Full extent welded seam; (b) Local welded seam; (c) Normalized welding zone; (d) Interfacial layer

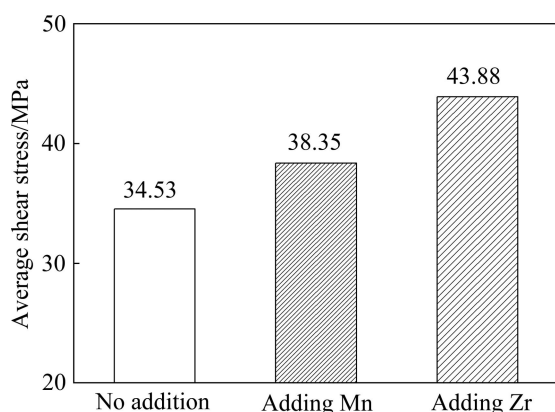


图 6 添加粉末前后焊接接头的平均剪切强度

Fig. 6 Average shear strength of welding sample with or without powder addition

状花样(见图 7(a)和(b)), 钢/铝试样呈现典型脆性断裂特征。添加 Mn、Zr 粉末, 微观形貌含有微量韧窝和一定数量夹杂物(见图 7(c)~(f)), 钢/铝试样表现为混合性断裂特征。

2.3 焊接接头的 EDS 分析

图 8~10 所示分别为未添加粉末、添加 Zr 和 Mn

焊缝区铝侧界面附近的元素线扫描结果。由图 8 可看出, 未添加粉末, 位于图中铝侧焊缝上层的 I 线、中层的 II 线与下层的 III 线, Fe、Al 混合宽度相差不大; 上层 I 线、中层 II 线混合宽度大约为 50 μm (见图 8(b)和(c)), 下层 III 线 Fe、Al 混合宽度大约为 75 μm (见图 8(d))。由图 9 可看出, 添加 Zr, Fe、Al 元素混合宽度略有增加, 上层 I 线、中层 II 线 Fe、Al 混合宽度为 75 μm (见图 9(b)和(c)), 下层 III 线混合宽度为 150 μm , 并存在明显平台, 推测下层 III 线 Fe、Al 与 Zr 可能形成了新的金属间化合物。由图 10 可看出, 添加 Mn, 上层 I 线 Fe、Al 几乎没有混合, 而 Mn、Al 混合宽度为 80 μm , 显示 Mn 与 Al 有一定的互溶性, 中层 II 线、下层 III 线, Fe、Al、Mn 三者混合宽度大约为 100 μm , 大于未添加粉末 75 μm 的混合宽度, 表明添加 Mn 能提高熔池金属的流动性, 利于钢/铝界面结合。

2.4 显微硬度

图 11 所示为焊接接头维氏显微硬度的测试结果。图中从左至右依次为铝母材区、熔合区、焊缝区和钢母材区。发现未添加粉末、添加 Mn、Zr 粉末, 靠近

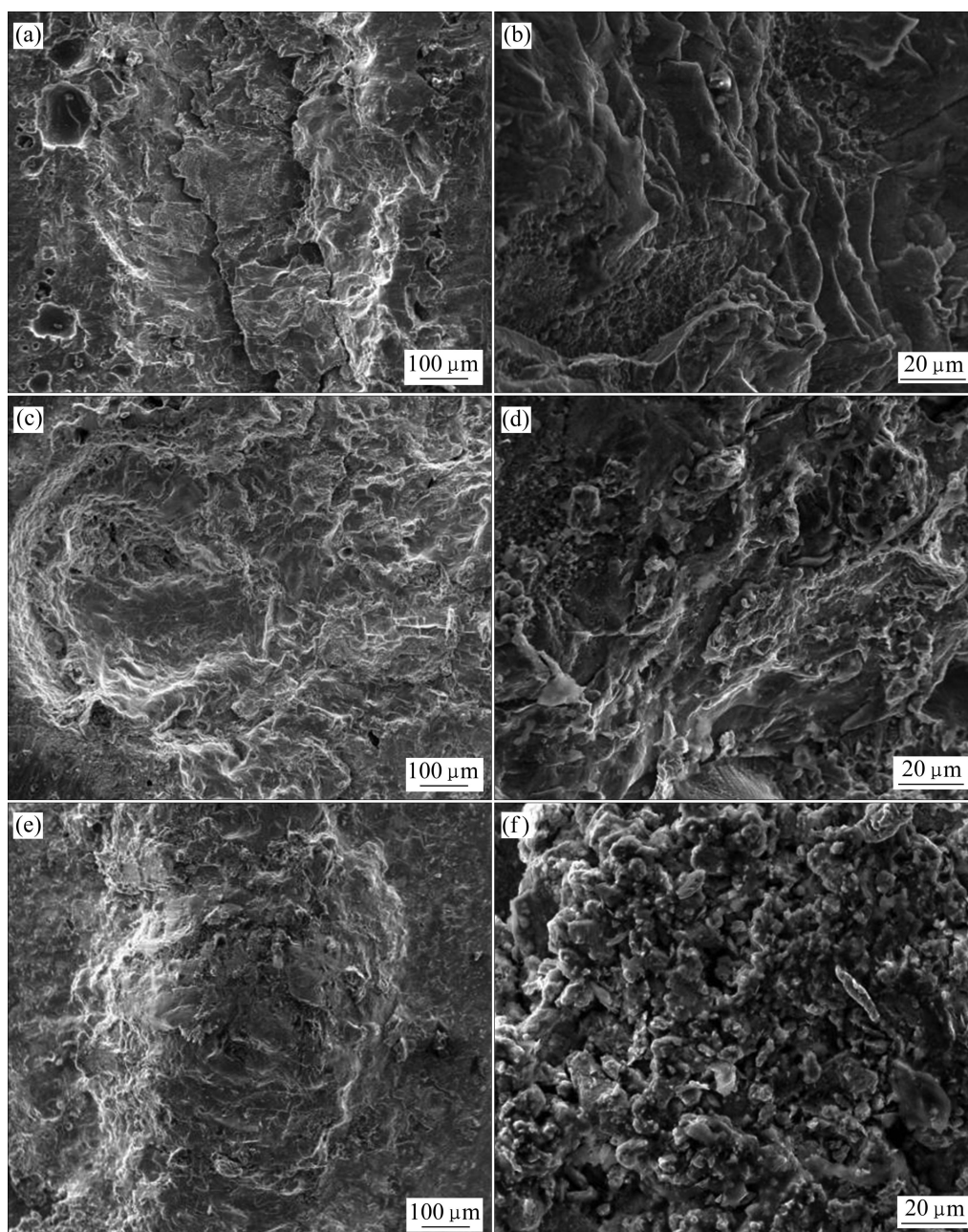


图 7 添加粉末前后剪切试样的断口形貌

Fig. 7 Fracture morphologies of shear samples without and with power addition: (a), (b) Without power addition; (c), (d) With Mn power addition; (e), (f) With Zr power addition

铝母材熔合区，硬度值较母材的均出现大幅度提高，但较未添加粉末，添加 Mn、Zr 粉末，焊缝区硬度值却明显下降，通常金属间化合物脆性越大，硬度越高，表明在焊缝添加粉末后，一定程度上减少或抑制了 Fe-Al 脆性金属间化合物生成^[12-14]。

2.5 焊接接头 XRD 微区衍射分析

图 3(f)和图 5(d)显示未添加粉末、添加 Mn 粉末时，在钢/铝界面层形成了由 Fe-Al 脆性金属间化合物

组成的针状物质，添加 Mn，由于仍存在少量 Fe-Al 脆性金属间化合物，因而焊接接头力学性能改善不明显。为进一步探讨添加 Zr 提高焊接接头性能效果明显的原因，图 12 所示为添加 Zr 钢/铝焊接接头界面 XRD 谱。由图 12 可见，添加 Zr，未形成 Fe-Al 脆性金属间化合物，却形成了新的物相 $\text{ZrFe}_{3.3}\text{Al}_{1.3}$ ，由于 $\text{ZrFe}_{3.3}\text{Al}_{1.3}$ 韧性相抑制 Fe-Al 脆性金属间化合物生成，因此，添加 Zr 能明显提高钢/铝焊接接头的力学性能^[15]。

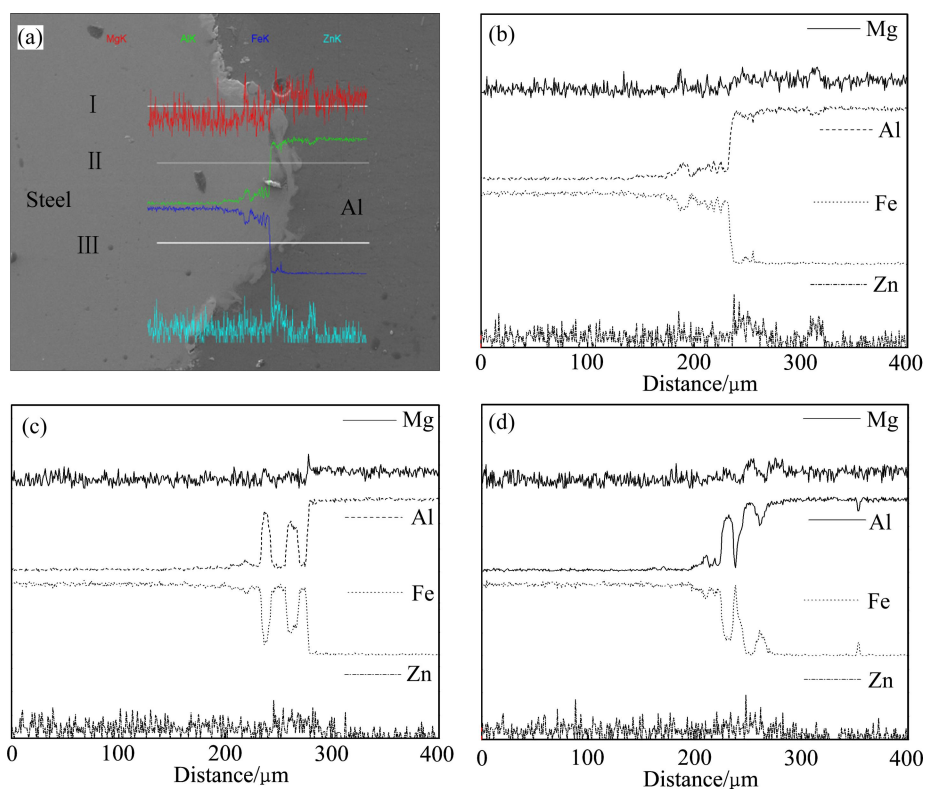


图 8 未添加粉末钢/铝焊接接头不同区域的线扫描 EDS 成分分析

Fig. 8 EDS line scanning of steel/aluminum weld joint in different sections without power addition: (a) Position of line scanning; (b) Line scanning of I; (c) Line scanning of II; (d) Line scanning of III

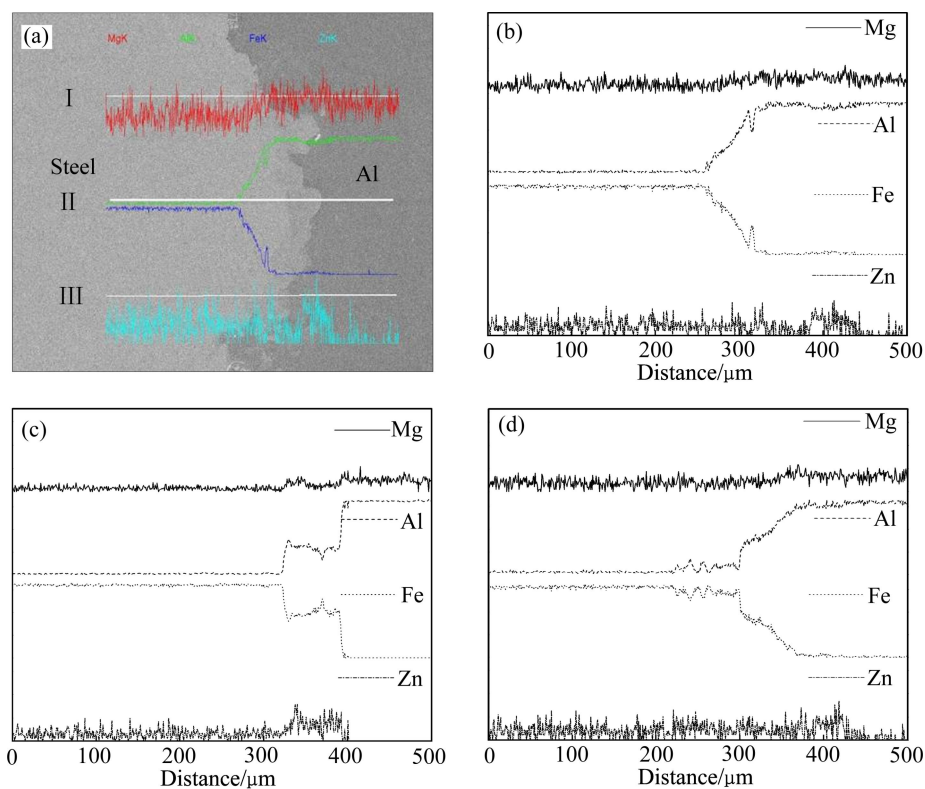


图 9 添加 Zr 钢/铝焊接接头不同区域的线扫描 EDS 成分分析

Fig. 9 EDS line scanning of steel/aluminum weld joint in different sections with Zr power addition: (a) Position of line scanning; (b) Line scanning of I; (c) Line scanning of II; (d) Line scanning of III

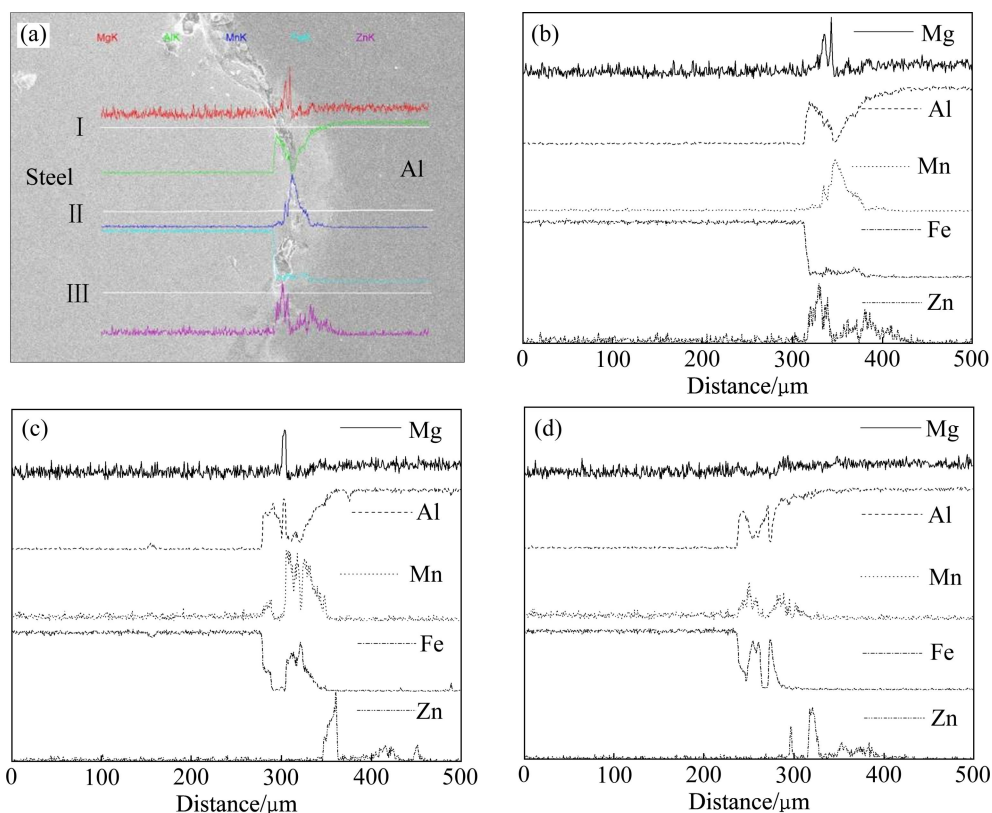


图 10 添加 Mn 钢/铝焊接接头不同区域的线扫描 EDS 成分分析

Fig. 10 EDS line scanning of steel/aluminum weld joint in different sections with Mn power addition: (a) Position of line scanning; (b) Line scanning of I; (c) Line scanning of II; (d) Line scanning of III

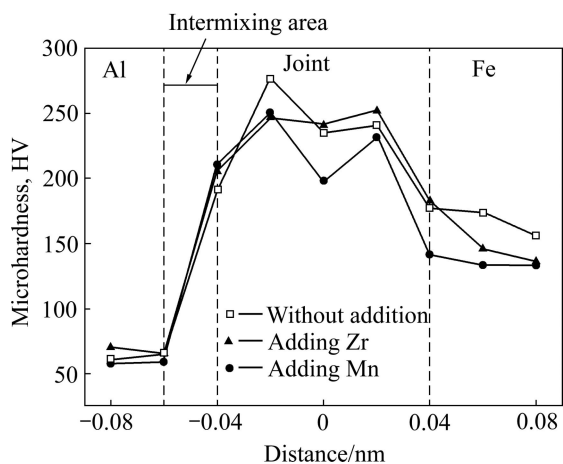


图 11 添加粉末前后焊接接头的显微硬度

Fig. 11 Microhardness of weld joint with or without power addition

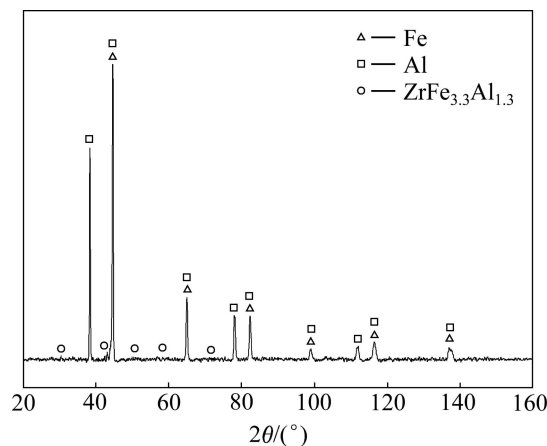


图 12 添加 Zr 钢/铝焊接接头界面的 XRD 谱

Fig. 12 XRD pattern of steel/aluminum weld joint interface with Zr power addition

3 结论

1) 镀锌钢与 6016 铝合金激光搭接焊, 在激光功率为 1 800 W、焊接速度为 50 mm/s、离焦量为+2.0

mm、Ar 为保护气体且流量为 20 L/min 的条件下, 未添加粉末, 钢/铝界面层形成了一定厚度的 Fe-Al 脆性金属间化合物, 添加 Mn, Fe-Al 脆性金属间化合物减少; 而添加 Zr, 未发现 Fe-Al 脆性金属间化合物生成。

2) 钢/铝激光焊中添加 Mn、Zr 粉末, 焊接接头的

平均抗剪强度与没有添加的相比有所提高,其中添加Zr的提高效果较明显。

3) 添加Mn粉末能提高熔池金属的流动性,利于钢/铝界面结合;添加Zr粉末,焊缝区晶粒细小,形成新的 $\text{ZrFe}_{3.3}\text{Al}_{1.3}$ 韧性相,抑制Fe-Al脆性金属间化合物生成。因此,添加Mn、Zr均改善钢/铝焊接接头的力学性能。

REFERENCES

- [1] BORRISUTTHEKUL R, MIYASHITAY, MUTOH Y. Dissimilar material laser welding between magnesium alloy AZ31B and aluminum alloy A5052-O[J]. *Science Technology of Advanced Materials*, 2005, 6(6): 199–204.
- [2] BRETZ G, LAZARZ K, HILL D J. Adhesive bonding and corrosion protection of a die cast magnesium automotive door[J]. *Magnesium Technology*, 2004, 5: 113–119.
- [3] 傅莉, 毛信孚, 史学芳. LF6 防锈铝与 HR-2 抗氢不锈钢摩擦焊接[J]. *焊接学报*, 2003, 24(1): 9–14.
FU Li, MAO Xin-fu, SHI Xue-fang. Friction welding of LF6 anti-rust aluminum and HR-2 hydrogen resistant stainless steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, 24(1): 9–14.
- [4] TSUJINO J, HIDAI K, HASEGAWA, KANAI R, MATSUURA H, MATSUSHIMA K, UEOKA T. Ultrasonic butt welding of aluminum, aluminum alloy and stainless steel plate specimens[J]. *Ultrasonics*, 2002, 40(1/8): 371–374.
- [5] XU P. Microstructure characterization of Ti-6Al-4V titanium laser weld and its deformation[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(9): 2118–2123.
- [6] QI X, SONG G. Interfacial structure of the joints between magnesium alloy and mild steel with nickel as interlayer by hybrid laser-TIG welding[J]. *Materials Design*, 2010, 31: 605–609.
- [7] 周惦武, 吴平, 彭利, 张屹, 陈根余. 镀Zn钢-6016铝合金异种金属的激光熔钎焊及数值模拟[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(6): 1738–1746.
ZHOU Dian-wu, WU Ping, PENG Li, ZHANG Yi, CHEN Gen-yu. Laser welding-brazing and numerical simulation of zinc-coated steel and 6016 aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(6): 1738–1746.
- [8] 王涛, 周惦武, 彭艳, 张屹, 陈根余. 钢/铝异种金属预置Si粉的光纤激光焊接[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0303009.
WANG Tao, ZHOU Dian-wu, PENG Yan, ZHANG Yi, CHEN Gen-yu. Steel-to-aluminum fiber laser butt welding with Si powder pre-filling[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(3): 0303009.
- [9] 彭利, 周惦武, 徐少华, 彭平, 刘金水. 镀Zn钢-6016铝合金激光焊接组织性能与第一原理计算[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(1): 230–238.
PENG Li, ZHOU Dian-wu, XU Shao-hua, PENG Ping, LIU Jin-shui. Laser lap welding structural properties and first-principle computation of zinc-coated steel and 6016 aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(1): 230–238.
- [10] MATHIEU A, SHAHADI R, DESCHAMPS A. Dissimilar material joining using laser(aluminum to steel using zinc-based filler wire)[J]. *Optics and Laser Technology*, 2007, 39(3): 652–661.
- [11] 宋建岭, 林三宝, 杨春利, 马广超. 合金元素改善铝/钢异种金属接头性能的研究[J]. *航空制造技术*, 2008, 46(12): 26–30.
SONG Jian-ling, LIN San-bao, YANG Chun-li, MA Guang-chao. Research on alloy agent for improving welded joint properties of aluminum to steel dissimilar material[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008, 46(12): 26–30.
- [12] 李亚江, 王娟, 刘鹏. 异种难焊材料的焊接及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 11–61.
LI Ya-jiang, WANG Juan, LIU Peng. Welding of dissimilar welding material and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 11–61.
- [13] REINHART P, 张冬云. 激光制造工艺[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 4–30.
REINHART P, ZHANG Dong-yun. Laser manufacturing technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 4–30.
- [14] 张国顺. 现代激光制造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 107–132.
ZHANG Guo-shun. Modern laser manufacturing technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 107–132.
- [15] LIU L, WANG H. The effect of the adhesive on the microcracks in the laser welded bonding Mg to Al joint[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2009, 507: 22–28.

(编辑 李艳红)