

# 钢/镁异种金属搭接添加Sn箔激光熔焊接头的 微观组织分析

谭 哲<sup>1,2</sup> 刘金水<sup>1</sup> 周惦武<sup>1\*</sup> 卢源志<sup>1,2</sup> 贾 晓<sup>1</sup> 胡林西<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>湖南大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410082

**摘要** 采用光纤激光器作为焊接热源的激光熔焊工艺对双相钢DP600和变形镁合金AZ31进行添加Sn箔的搭接焊研究。通过调整焊接参数获得最佳焊接成形,采用卧式金相显微镜、带有能谱仪(EDS)和电子背散射衍射(EBSD)探头的扫描电镜(SEM)和X射线衍射仪(XRD)等观察焊接接头的微观组织、相分布、晶粒大小、元素分布和相结构组成。结果表明,添加Sn箔激光熔焊是一种适用于Fe和Mg异种材料连接的有效方法,通过过渡区域形成新相可实现Mg/Fe有效连接。实验还发现,钢上、镁下搭接激光熔焊上层双相钢的热影响区未出现明显的软化组织,焊接熔池和钢/镁接头过渡区域未见大规模氧化物和气孔缺陷,钢侧过渡区域生成FeSn、Fe<sub>13</sub>Sn、Fe<sub>3</sub>Sn等Fe-Sn相,镁侧过渡区域生成柱状枝晶的Mg<sub>2</sub>Sn相,这些新相的存在可实现钢/镁异种金属的“双向”冶金结合。

**关键词** 激光技术; Fe/Mg异种材料; 激光熔焊; Sn箔; 微观组织

中图分类号 TG 457

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1206003

## Microstructure analysis on Laser Welding Joint of Steel/Magnesium Dissimilar Metal with the Addition of Sn Foil

Tan Zhe<sup>1,2</sup> Liu Jinshui<sup>1</sup> Zhou Dianwu<sup>1</sup> Lu Yuanzhi<sup>1,2</sup> Jia Xiao<sup>1</sup> Hu Linxi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

<sup>2</sup>College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

**Abstract** Laser welding of DP600 dual-phase steel to AZ31 deformation magnesium alloys is carried out in steel-on-magnesium overlap configuration by using fiber laser as heat welding source with the addition of Sn foil. The best welding has been achieved based on the optimization of welding parameters, and microstructure, phase distribution, grain size, elements distribution and phase compositions of the welding joint are studied by using the horizontal microscope, scanning electron microscope (SEM) with energy dispersive spectrometer (EDS) and electron backscatter diffraction (EBSD) probe and X-ray diffraction (XRD). The results show that joining iron to magnesium can be realized due to the formation of new phases in welding transition region, and it is suitable for laser welding steel to magnesium alloys with the addition of Sn foil. In addition, the experimental results suggest that there are no softening organization in heat affected zone of the upper dual-phase steel, some defects, such as oxides, pores, etc can be avoided in the transition region of steel/magnesium. Besides, FeSn, Fe<sub>13</sub>Sn and Fe<sub>3</sub>Sn phases are formed in the transition zone of steel side, while columnar Mg<sub>2</sub>Sn phase is seen in the transition region of magnesium side, which is benefit for jointing steel/Mg dissimilar metals by the metal lurgical reaction among the iron, Sn and magnesium.

**Key words** laser technique; steel/Mg dissimilar materials; laser welding; Sn foil; microstructure

**OCIS codes** 140.3510; 140.3390; 000.2658; 160.3900

收稿日期: 2015-05-15; 收到修改稿日期: 2015-07-02

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: 谭 哲(1990—),女,硕士研究生,主要从事钢、镁异种金属激光焊接方面的研究。E-mail: tanzhe0703@163.com

导师简介: 刘金水(1962—),男,博士,教授,主要从事汽车轻量化材料计算与设计理论等方面的研究。E-mail: jsliu@hnu.cn

\*通信联系人。E-mail: ZDWe\_mail@126.com

## 1 引言

镁及镁合金是迄今为止工程应用中最轻的金属结构材料之一<sup>[1-2]</sup>,具有高的比强度和比刚度,尺寸稳定性好,机械加工性能好,易回收利用,成为汽车减轻自重以提高其节能性和环保性的首选材料<sup>[3]</sup>。镁及其合金在汽车上的广泛应用必将涉及与其他金属的连接问题,其中之一就是镁与钢的连接。对于钢和镁异种金属而言,两种材料的物理性能差异大、Mg在Fe中不固溶,且无金属间化合物,Mg、O之间的相互作用,导致钢、镁界面易生成难熔的高熔点氧化物 $MgO^{[4]}$ ,致使钢镁之间的连接变得十分困难。为探索钢镁之间的连接方法,Liu等<sup>[5-8]</sup>研究了镁上、钢下搭接固体脉冲激光与电弧复合热源的焊接技术,由于焊接时能量利用率低,对钢、镁熔化金属的搅拌作用有限<sup>[9]</sup>,镁与下层钢板未实现有效连接。随着激光器光束质量的改善和输出功率的提高,激光熔焊技术在激光加工和焊接领域的份额逐渐增加。激光熔焊具有较高的能量密度、焊接速度快、过程稳定、焊接变形小等优点<sup>[10-11]</sup>,所形成的焊接接头的热影响区窄,能有效提高接头的强度<sup>[12]</sup>,让钢/镁之间的连接成为可能。

以车用双相钢DP600和变形镁合金AZ31为研究对象,提出钢上、镁下搭接,层间添加Sn箔的光纤激光熔焊工艺,对钢/镁异种金属的焊接性进行探索性研究,从焊接接头的微观组织和元素分布状况分析其连接机理,结果发现上层双相钢的热影响区未出现明显软化组织,焊接熔池和钢/镁接头过渡区域未见大规模的氧化物和气孔缺陷,Sn箔的添加,实现了钢镁异种金属之间的“双向”冶金结合。研究结果为解决Fe和Mg的连接技术奠定理论基础,同时为钢/镁结构件激光焊接的推广应用提供实验依据。

## 2 实验材料和方法

实验采用车用DP600双相钢板和热轧退火状态的AZ31镁合金板,双相钢和镁合金的板材尺寸分别为 $1.4\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 和 $1.8\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 。双相钢的化学成分(质量分数,%)为C0.079,Si1.0,Mn1.52,S0.0049,P0.015,Al0.023,Fe余量,AZ31镁合金的化学成分为Al3.12,Zn0.95,Mn0.15,Si0.10,Mg余量。采用钢板在上、镁板在下的不等厚板材搭接。钢、铝层间添加纯度大于99.0%的Sn箔,尺寸为 $0.18\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 。添加Sn箔的DP600与AZ31搭接激光焊的结构示意如图1所示。焊前用80#的砂纸打磨钢板和镁板,去除氧化膜,然后用丙酮去除表面的油污和金属屑;Sn箔采用1000#的细砂纸打磨至平整光亮,并清洗干净。采用专用焊接夹具将焊接材料夹紧,以减少板材之间的间隙。

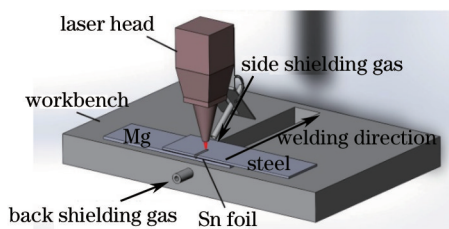


图1 添加Sn箔的钢/镁搭接激光焊接的示意图

Fig.1 Principle map of adding Sn foil steel/magnesium laser lap welding

焊接实验采用YLS-4000-CL型光纤激光器作为焊接热源,最大输出功率为4000 W,激光波长为1070 nm,连续输出的激光模式为 $TEM_{00}$ ;焦点光斑直径为0.4 mm,光束发散角 $\alpha < 0.15\text{ rad}$ ,焦距镜长为200 mm。采用15 L/min的Ar气作为保护气体,通过调整焊接参数获得最佳焊接成形,优化焊接参数为激光头沿着焊接方向偏转 $10^\circ$ ,激光功率1400 W,焊接速度30 mm/s,离焦量+2 mm。焊后,利用线切割机将试样切割成标准检测试样,打磨抛光后,用质量分数为5%的硝酸乙醇溶液腐蚀钢侧,采用苦味酸溶液腐蚀镁侧。通过XJG-05卧式金相显微镜观察钢/锡/镁焊缝接头的金相组织;采用带有能谱仪(EDS)和电子背散射衍射(EBSD)探头的Quanta-200场发射扫描电镜(SEM)观察钢/锡/镁接头组织的微观形貌和分析微区的元素成分,利用不同物相的背散射电子衍射花样的不同来分析焊接接头中物相的分布和含量以及晶粒大小;采用D500X射线衍射仪(XRD)分析焊缝区的主要物相。

### 3 结果及讨论

#### 3.1 焊缝横截面的微观组织分析

图2(a)是优化焊接参数条件下添加Sn箔激光熔焊钢/镁焊接接头的SEM。发现焊缝中央出现从熔池底部边缘向焊缝顶部蔓延的带状组织,对其局部放大,如图2(b)。发现这种带状物质具有金属光泽,为金属Sn上浮所致(见表1中F区的EDS分析)。另焊接熔池和钢/镁接头过渡区域未见大规模的氧化物和气孔,表明Sn箔的添加一定程度抑制了Mg与O之间的相互作用,而未见气孔缺陷:一方面是实验采用变形镁合金的气孔率比压铸镁合金小<sup>[13]</sup>,焊前镁板和钢板表面氧化膜清理彻底,采用高纯度Ar气侧吹较好保护熔池,有效减少外界空气的卷入;另一方面,同步检测焊缝表面等离子体光谱时,发现上层双相钢Fe、Mn和下层镁合金Mg、Zn等元素的特征谱线,由于焊接过程中低熔点Mg、Zn元素蒸发形成蒸汽,从图2(b)所示“带状Sn通道”及图2(a)右下角所示钢/镁两板之间的间隙“逃逸”,因此焊缝气孔缺陷得到有效控制。

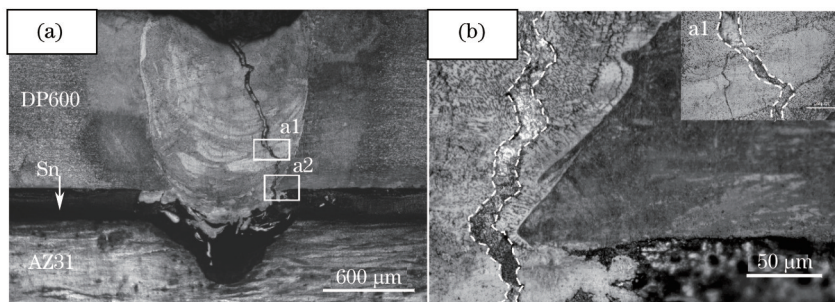


图2 DP600与AZ31焊接接头的金相组织。(a)接头微观形貌;(b) a1和a2区的放大图

Fig.2 Microstructures of DP600 and AZ31. (a) Welding joint; (b) magnifications of a1 and a2 regions

#### 3.2 EBSD分析

采用EBSD对钢镁搭接焊接头母材、热影响区和焊缝(见图3)3个区域的相分布及各相平均晶粒尺寸进行分析。在热影响区和焊缝的EBSD取向图[见图4(b)和(c)]中可明显看到以黑色虚线作为分界线的不同晶粒尺寸的两个区域。对EBSD物相鉴定技术的结果进行比较分析,结果如图5所示。EBSD母材检测区域为65 μm×65 μm,步长为0.2 μm,热影响区区域为100 μm×200 μm,步长为0.5 μm,焊缝区域为300 μm×900 μm,步长为3 μm。研究发现,DP600母材[见图4(a)]中马氏体占41.8%(质量分数),铁素体占57.6%以及0.6%的残余奥氏体,平均晶粒尺寸为3.84 μm。靠近焊缝的热影响区(CGHAZ),即图4(b)中黑色虚线以上的区域,马氏

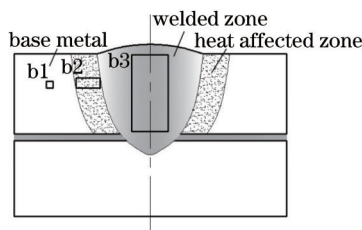


图3 焊接接头横截面3个EBSD测试区域(b1~b3)的示意图

Fig.3 Locations of three EBSD test areas (b1~b3) in cross section of joint

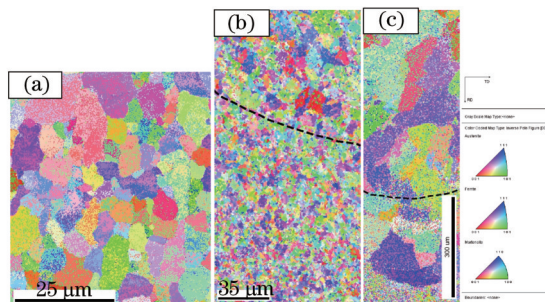


图4 钢/Sn/镁搭接接头微区的EBSD图。(a)~(c) 图3中b1~b3标识区域

Fig.4 EBSD maps of micro zone in steel/Sn/Mg joint. (a)~(c) From the b1~ b3 regions in Fig.3

体的含量减少,铁素体的含量增加,平均晶粒比母材细小[见图4(b)和图5(b)]。热影响区整体晶粒细化可能是经过轧制处理后的双相钢,内部储存了大量的畸变能,在激光焊接热循环作用下,发生形变再结晶,使晶粒得以细化,而靠近焊缝的热影响区的晶粒,由于受热,继续长大,从而热影响区出现晶粒尺寸不同的两个区域。焊缝区晶粒平均尺寸较大,平均马氏体含量(质量分数)占40.1%,铁素体占57.5%,奥氏体占2.40%,与母材各相对应含量基本相当;由于焊缝中下部的冷却速度大于焊缝的顶部,焊缝中下部[见图4(c)黑色虚线以下]马氏体含量高于焊缝顶部,但晶粒尺寸比焊缝顶部小,整个焊缝区马氏体的晶粒尺寸相对而言比较均匀。由上看来,添加Sn箔激光熔焊钢/镁,上层双相钢焊接接头主要为铁素体和马氏体,并未出现明显的软化组织。

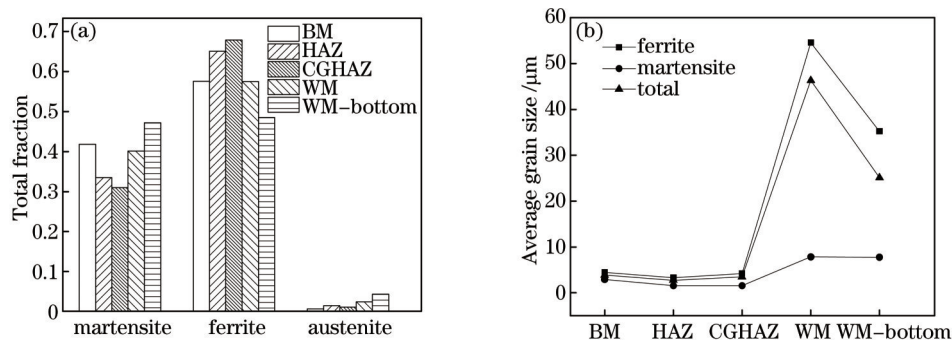


图5 钢镁焊接接头中不同区域(a)各相的体积分数; (b)平均晶粒尺寸

Fig.5 (a) Volume fractions of each phases; (b) average grain sizes of different regions of steel/ Mg joint

### 3.3 焊缝区域元素的分布

图6是整个钢镁搭接接头过渡区域的整体形貌以及过渡区域元素的分布情况。从图6(b)和(d)可看出, Sn箔的加入使其与铁有了良好的熔合,而在此区域并未发现Mg元素[见图6(c)],可见熔池内部区域,Mg并未与Sn发生相互作用。进一步分析发现,靠近镁侧熔池端部,出现“Mg上浮、Sn下沉”现象,形成一个两种元素同时存在均匀分布的过渡区域,说明该区域Mg与Sn发生了作用;另在Fe富集区的底部存在均匀分布的Sn,这是由于激光搅拌作用促进了熔池底部的金属由下而上发生循环流动<sup>[9]</sup>,从而利于接头界面Fe与Sn之间作用,还利于Sn与熔池金属的相互熔合;此外,靠近钢侧熔池没有发现Mg,考虑钢的熔点比Mg的沸点高,以及Sn箔的存在对Mg的扩散起一定隔断作用,因而导致钢侧熔池未出现Mg。由以上分析可见,激光熔焊钢/镁中添加Sn箔,熔池区Sn与钢结合,熔池端部、侧部Sn与镁结合,从而实现了钢与镁的间接连接。

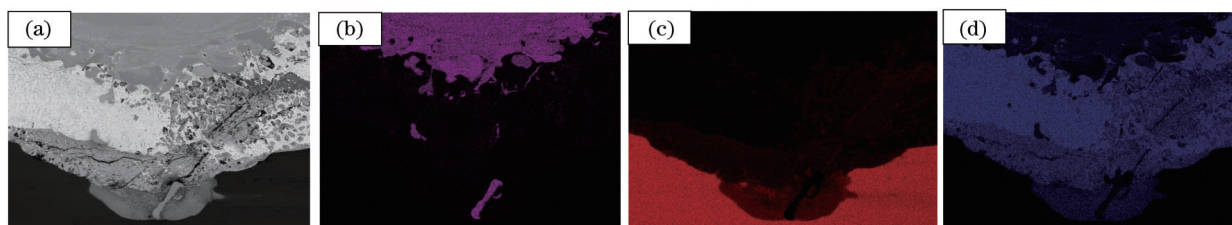


图6 钢/Sn/镁接头过渡区域元素分布。(a) 钢镁过渡区域的整体形貌; (b) Fe; (c) Mg; (d) Sn

Fig.6 Element distributions in magnesium transition region of steel/Sn/Mg joint. (a) SE image; (b) Fe; (c) Mg; (d) Sn

### 3.4 焊接界面的SEM-EDS和XRD分析

图7为焊接接头界面的整体、不同局部区域及熔池中央的SEM。对图7(a)中靠镁侧的1区进行放大观察[见图7(b)],发现该区域含有大量树枝状晶体,对A、B区进行能谱分析,结果如表1所示。从分析结果来看,A区主要成分为Fe,表明该区域残留有钢基体的条状小颗粒;B区为Mg和Sn,二者原子之比接近2:1,从Mg-Sn二元相图推测来看,B区为Mg<sub>2</sub>Sn相;对图7(a)中靠镁侧的2区进行放大观察[见图7(c)],发现存在许多枝晶状的中间层。将其划分为I、II、III3个区域。其中I区域厚度约为5~7 μm,弥散分布有很多细小的白色小颗粒[见图7(e)],其主要成分为Mg;II区域含有大量的柱状枝晶,白色柱状枝晶有向镁一侧生长的趋势,该区域主要含Mg和Sn,二者原子之比接近2:1,显示枝晶结构为Mg<sub>2</sub>Sn<sup>[6]</sup>;III区也主要含Mg、Sn,二者原子个数接近2:1,推测也生成了Mg<sub>2</sub>Sn相;对图7(a)中钢侧熔池底部的3区进行放大观察[见图7(d)],发现其深灰色C区含有Fe及少量Sn,从Fe-Sn二元相图分析,高温下二者之间可形成固溶体,快速冷却时过饱和固溶体发生相

变,生成大量 $\alpha$ -Fe和微量FeSn金属间化合物;而该区域灰白色网状D区域含有Fe和较多含量的Sn,可见熔池快速凝固过程中,灰白色的FeSn相沿 $\alpha$ -Fe晶界析出,由于FeSn和 $Fe_{1.3}Sn$ 原子溶度相似<sup>[14]</sup>,因而包晶转变过程中生成一定数量、具有六方晶体结构的 $Fe_{1.3}Sn$ 亚稳相<sup>[15]</sup>。图7(f)为图3中a1的微观形貌,其中F区主要为Sn和微量Fe,E区所含成分元素与激光熔焊钢/镁时上层双相钢相同,但含少量Sn,表明2.1节所述带状物质可能为下层镁蒸汽“逃逸通道”。

为进一步确定焊接接头的相结构类型,对添加Sn箔激光熔焊钢/镁焊接试样进行了XRD分析,结果如图8所示。发现焊缝界面生成了FeSn、 $Fe_{1.3}Sn$ 、 $Fe_3Sn$ 、 $Mg_2Sn$ 等金属间化合物,与上述钢/锡/镁合金界面层EDS结果基本一致。由上分析可见,激光熔焊钢/镁中添加Sn箔,钢侧过渡区域生成FeSn、 $Fe_{1.3}Sn$ 、 $Fe_3Sn$ 等Fe-Sn相,镁侧过渡区域生成柱状枝晶的 $Mg_2Sn$ 相,这些新相的存在实现了钢/镁异种金属的“双向”冶金结合。

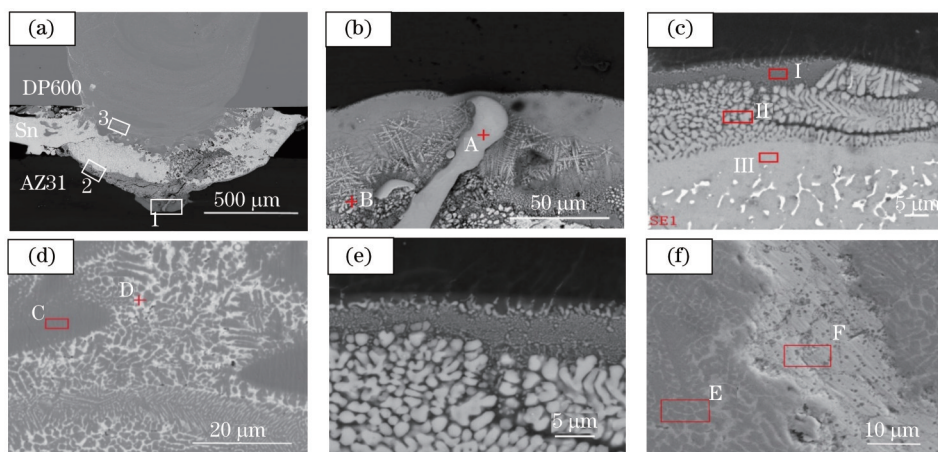


图7 钢/Sn/镁接头不同位置的SEM。(a)横截面;(b)~(d)图7(a)中1~3区的放大;(e)图7(c)中的I区放大;(f)图2(a)中a1的放大  
Fig.7 SEM images of microstructures of Sn-added joint. (a) Cross-section; (b)~(d) amplified SEMs of region 1~3 in Fig.7 (a); (e) amplified SEM of region I in transition region in Fig.7 (c); (f) amplified SEM of region a1 in Fig.2 (a)

表1 钢/Sn/镁合金搭接接头不同区域的EDS分析(原子分数,%)

Table 1 Chemical compositions of steel/Sn/Mg alloy joint by EDS analysis(atomic fraction, %)

Element	A	B	C	D	E	F	I	II	III
Mg	-	79.10	-	-	-	-	90.53	72.00	67.36
Fe	93.81	-	96.27	63.40	02.17	81.24	-	01.53	01.33
Sn	03.99	20.90	03.73	36.60	50.93	16.14	09.47	26.47	31.31
Mn	02.20	-	-	-	0.81	01.54	-	-	-
Si	-	-	-	-	-	01.08	-	-	-
O	-	-	-	-	46.07	-	-	-	-

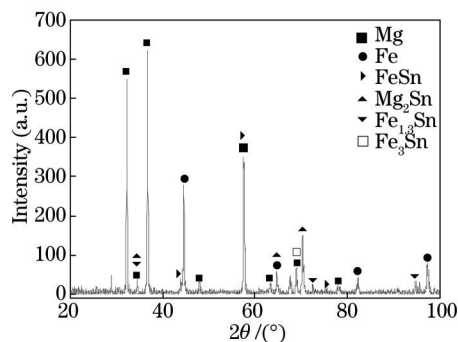


图8 添加Sn箔DP600/AZ31接头的XRD结果

Fig.8 XRD spectrum of DP600/AZ31 weld joint with the addition of Sn

## 4 结 论

1) 采用添加Sn箔光纤激光熔焊工艺能实现钢/镁异种金属有效连接,焊接接头表面成形性良好,双相钢

未出现明显的软化组织,焊接接头未出现大规模的氧化物和气孔缺陷;

2) 通过钢/锡/镁焊接接头微观组织分析发现,Fe、Mg过渡区域存在分布均匀的 $\text{FeSn}$ 、 $\text{Fe}_{1.3}\text{Sn}$ 、 $\text{Fe}_3\text{Sn}$ 和树枝状的 $\text{Mg}_2\text{Sn}$ 等新相;

3) 采用添加Sn箔激光熔焊钢镁异种金属,钢侧和镁侧Sn分别与Fe、Mg相互作用形成新相,从而实现钢/镁异种金属的“双向”冶金结合。

### 参 考 文 献

- 1 Raymond F D. Renaissance in magnesium[J]. *Advanced Materials and Processes*, 1998, 154(3): 31-35.
- 2 Tan Caiwang, Gong Xiangtao, Li Liqun, *et al.*. Laser welding-brazing characteristics of dissimilar metals Mg/Ti with Al interlayers[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0103002.  
檀财旺, 巩向涛, 李俐群, 等. 镁/钛异种金属预置Al夹层光纤激光熔钎焊接特性[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0103002.
- 3 Fan Zijie, Gui Liangjin, Su Ruiyi. Research and development of automotive lightweight technology[J]. *J Automotive Safety and Energy*, 2014, 5(1): 1-16.  
范子杰, 桂良进, 苏瑞意. 汽车轻量化技术的研究与进展[J]. *汽车安全与节能学报*, 2014, 5(1): 1-16.
- 4 Wahba M, Katayama S. Laser welding of AZ31B magnesium alloy to Zn-coated steel[J]. *Materials & Design*, 2012, 35: 701-706.
- 5 Liu Liming. The interface behavior and weld ability study between magnesium alloys to heterogeneous materials[J]. *Welding&Joining*, 2009, (7): 42-48.  
刘黎明. 镁合金与异质材料焊接接头界面行为及研究焊接性[J]. *焊接*, 2009, (7): 42-48.
- 6 Liu L, Qi X, Wu Z. Microstructural characteristics of lap joint between magnesium alloy and mild steel with and without the addition of Sn element[J]. *Materials Letters*, 2010, 64(1): 89-92.
- 7 Liu L, Qi X. Effects of copper addition on microstructure and strength of the hybrid laser-TIG welded joints between magnesium alloy and mild steel[J]. *Journal of Materials Science*, 2009, 44(21): 5725-5731.
- 8 Zhao Xu, Song Gang, Liu Liming. Microstructure of dissimilar metal joint with magnesium alloys and steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(12): 53-56.  
赵旭, 宋刚, 刘黎明. 镁和钢异种金属熔焊接头微观组织分析[J]. *焊接学报*, 2006, 27(12): 53-56.
- 9 Niu R F, Lin B H, Wang Y N, *et al.*. Evaporation loss of Mg element in pulsed laser welding of 5A05 aluminum alloy and distribution of micro-hardness of welding joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(3): 81-84.
- 10 Yu Gang, Zhao Shusen, Zhang Yongjie, *et al.*. Research on key issues of laser welding of dissimilar metal[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(2): 261-268.  
虞钢, 赵树森, 张永杰, 等. 异种金属激光焊接关键问题研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(2): 261-268.
- 11 Zhang Yi, Tan Lipeng, Zhang Chenglei. Research on gap margin in laser butt welding of high-strength automobile steel with hot wire filler [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0703003.  
张屹, 谭力鹏, 张成磊. 车用高强度钢激光填充热丝对接焊间隙裕度研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0703003.
- 12 Ding Wenbing, Tong Yangang, Deng Dean, *et al.*. Microstructure and mechanical prosperities of laser welded AZ91D wrought magnesium alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0203003.  
丁文兵, 童彦刚, 邓德安, 等. AZ91D变形镁合金激光焊接头的微观组织与机械性能[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0203003.
- 13 Shan Jiguo, Zhang Jing, Zheng Shiqing, *et al.*. Experimental study on pores in laser welding of magnesium alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(S3): 234-239.  
单际国, 张婧, 郑世卿, 等. 镁合金激光焊接气孔问题的实验研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(S3): 234-239.
- 14 Xu J F, Wei B B. Liquid phase flow and microstructure formation during rapid solidification[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(6): 1909-1915.
- 15 Yamamoto H M. Effect measurement of intermetallic compounds in iron-tin system:  $\text{Fe}_3\text{Sn}_3$  and  $\text{FeSn}$ [J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1966, 21(6): 1058-1062.

栏目编辑: 张浩佳