

## 激光与光电子学进展

## Ti 合金化对 Al-Mg-Si 合金激光-CMT 复合焊接头组织性能的影响

周鹏飞<sup>1,2</sup>, 陆从相<sup>1</sup>, 贲能军<sup>1</sup>, 张孝足<sup>2</sup>, 陈夏明<sup>2\*</sup><sup>1</sup>盐城工业职业技术学院汽车与交通学院, 江苏 盐城 224005;<sup>2</sup>苏州大学沙钢钢铁学院, 江苏 苏州 215021

**摘要** 针对车用 Al-Mg-Si 合金激光-冷金属过渡(CMT)复合焊缝性能短板的问题,从 Ti 合金化的角度细化焊缝晶粒尺寸提高焊缝力学性能。研究表明, Ti 合金化后,液相中析出了  $Ti(Al_{1-x}Si_x)_3$  相,为  $\alpha$ -Al 的形核提供了优质的异质形核点。且随着 Ti 箔厚度的增加( $40\ \mu\text{m}\rightarrow 80\ \mu\text{m}$ ),焊缝中  $Ti(Al_{1-x}Si_x)_3$  相体积分数明显增加( $1.7\%\rightarrow 4.2\%$ ),显著提高了  $\alpha$ -Al 形核率,有效细化了焊缝晶粒。因此, Ti 箔厚度为  $80\ \mu\text{m}$  时,焊缝平均晶粒尺寸由直接焊接条件下的  $148\ \mu\text{m}$  降低至  $21\ \mu\text{m}$ ,焊缝硬度和抗拉强度分别提高了  $7.0\%$  和  $8.2\%$ ,分别达到  $61\ \text{HV}$  和  $225\ \text{MPa}$ 。

**关键词** 激光技术; Ti; Al-Mg-Si 合金; 激光-冷金属过渡复合焊接; 组织性能

中图分类号 TG457.14

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222654

## Effect of Ti Alloying on Microstructure and Properties of Al-Mg-Si Alloy Laser-CMT Hybrid Welded Joints

Zhou Pengfei<sup>1,2</sup>, Lu Congxiang<sup>1</sup>, Ben Nengjun<sup>1</sup>, Zhang Xiaozu<sup>2</sup>, Chen Xiaming<sup>2\*</sup><sup>1</sup>School of Automotive and Transportation, Yancheng Polytechnic College, Yancheng 224005, Jiangsu, China;<sup>2</sup>School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou 215021, Jiangsu, China

**Abstract** Aiming at the problem of short performance of automotive Al-Mg-Si alloy laser cold metal transition (CMT) composite weld, the weld grain size was refined to improve the mechanical properties of the weld from the perspective of Ti alloying. After Ti micro-alloying, the  $Ti(Al_{1-x}Si_x)_3$  precipitates gradually appeared and acted as heterogeneous nucleation particles, which enhanced the nucleation rate. Moreover, the volume fraction of  $Ti(Al_{1-x}Si_x)_3$  increased ( $1.7\% - 4.2\%$ ) with the addition of thicker Ti foils ( $40\ \mu\text{m} - 80\ \mu\text{m}$ ), which significantly improved the  $\alpha$ -Al nucleation rate and effectively refined the weld grain. Consequently, the addition of  $80\ \mu\text{m}$  Ti foils resulted in an average grain size of only  $21\ \mu\text{m}$ . The grain refinement via Ti micro-alloying substantially improved the microhardness and tensile strength. Following the addition of  $80\ \mu\text{m}$  Ti foils, the microhardness and tensile strength reached  $61\ \text{HV}$  and  $225\ \text{MPa}$ , respectively, which were  $7.0\%$  and  $8.2\%$  higher than the values obtained without the addition of Ti foils, respectively.

**Key words** laser technique; Ti; Al-Mg-Si alloy; laser-cold metal transfer hybrid welding; microstructure and properties

## 1 引言

铝及铝合金因具有比强度高、耐腐蚀性好、质量轻等优点,在航空航天、车辆、建筑等领域应用广泛。其中, Al-Mg-Si 合金由于具有良好的塑性、锻造性和耐腐蚀性,已被广泛用于汽车制造领域<sup>[1]</sup>。然而由于 Al-Mg-Si 合金是一种依靠纳米强化相  $\beta''$  的析出强化获得优

异的强韧性的可热处理低合金化合金<sup>[2-3]</sup>,因此其在以 MIG、TIG 和激光焊等为主的熔化焊技术进行焊接时,焊缝因重熔再结晶,纳米强化相  $\beta''$  回熔致使焊缝仅析出粗大的平衡相  $\beta$ - $Mg_2Si$ <sup>[4-5]</sup>,焊缝发生明显软化,尤其对于高强车用 Al-Mg-Si 合金,严重的焊缝软化成为焊接接头的短板<sup>[6-7]</sup>。因此,如何避免焊缝软化是实现高强车用 Al-Mg-Si 合金焊接接头强韧化的关键。

收稿日期: 2022-09-28; 修回日期: 2022-10-19; 录用日期: 2022-11-08; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 国家外国专家项目(G2022014146L)、江苏省高校基础科学(自然科学)研究面上项目(22KJD430011)、江苏省产学研合作项目(BY2022482, 2021HX-67)、2019年江苏高校“青蓝工程”、2019校级自然科学基金项目(ygy2019-04)

通信作者: \*1962923837@qq.com

合金化作为调控铝合金组织性能的主要措施之一,现已被众多研究者应用于调控铝合金熔焊焊缝组织性能。研究表明,通过 Sc<sup>[8]</sup>、Zr<sup>[9]</sup>、Er<sup>[10]</sup> 及 Nb<sup>[11-12]</sup> 合金化可形成 Al<sub>3</sub>M 金属间化合物,有效细化了焊缝晶粒,明显提升了焊缝的力学性能。此外,Adisa 等<sup>[13]</sup> 采用铝合金熔炼中常见的 Al-5Ti-B 丝作为填充焊丝对 Al-Zn-Mg-Cu 合金进行了激光焊接,研究表明,Al-5Ti-B 丝的加入使得焊缝晶粒尺寸降低至 2 μm,有效提升了焊缝力学性能,焊接接头的抗拉强度和屈服强度分别达到基材的 88% 和 97%。由此可见,采用 Ti-B 复合合金化亦可有效细化焊缝晶粒,且相比 Sc、Zr、Er 和 Nb 等元素,Ti 元素具有明显的低成本优势。但 B 元素作为轻质元素,其不可避免地在焊缝中存在偏析,且仅通过 Ti 合金化亦可达到细化晶粒的作用<sup>[14-15]</sup>。因此,有必要进一步研究 Ti 元素含量对于铝合金焊缝组织性能的影响,为开发适用于高强车用 Al-Mg-Si 合金的低成本、高性能焊丝微合金元素优化设计提供理论基础。

本文选用低热输入的激光,采用冷金属过渡(CMT)焊接技术<sup>[16]</sup>,以高强车用 Al-Mg-Si 合金为研究对象,通过预置不同厚度的 Ti 箔改变焊缝中 Ti 元素的含量,研究 Ti 元素含量对 Al-Mg-Si 合金激光-CMT 复合焊缝组织及力学性能的影响,旨在为高强车用 Al-Mg-Si 合金的低成本高效优质焊接提供新的技术方向。

## 2 材料与方 法

焊接试验采用 3 mm 厚的 Al-Mg-Si 合金板材,试验板材尺寸为 150 mm×100 mm×3 mm。焊接试验前,采用化学方法去除待焊区域表面氧化膜,并清洗晾干。为获得性能优良的焊缝,采用直径为 1.2 mm 的 Al-Si12 焊丝作为填充焊丝<sup>[17]</sup>。

激光-CMT 复合焊接系统包括一台 CWX-3000 光纤激光器和一台 Fromius CMT TPS 500i 型焊机。图 1 是焊接示意图。由图可见,CMT 焊枪和激光头以约为 50° 的夹角固定,采用电弧引导的方式,光丝间距为 2.0 mm。Ti 箔预置于两板之间,Ti 箔厚度分别为 25、40、80 μm。为抑制焊接过程中因匙孔闭合而形成的匙孔型气孔,采用摆动激光代替传统线性激光进行焊

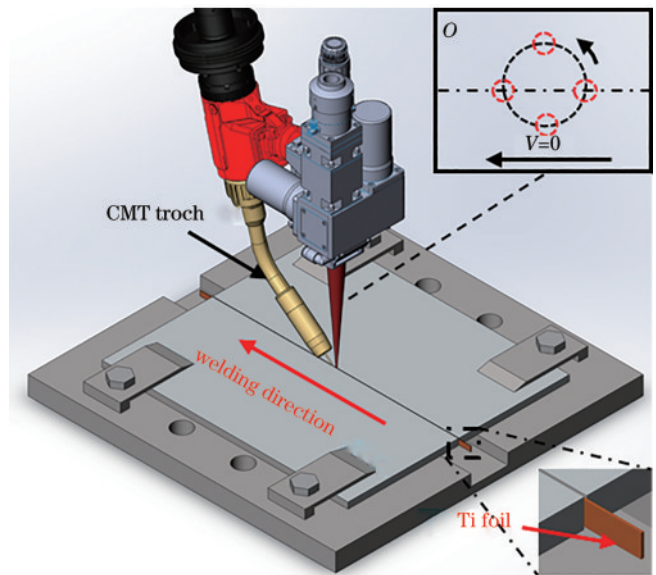


图 1 激光-CMT 复合焊接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser-CMT hybrid welding

接<sup>[18-19]</sup>。摆动轨迹为圆形,摆动直径为 1.0 mm,摆动频率为 150 Hz,具体的焊接参数如表 1 所示。

采用 Keller 试剂(体积分数 1.0% HF + 1.5% HCl + 2.5% HNO<sub>3</sub> + 95% H<sub>2</sub>O)对精抛后的焊接接头样品进行化学腐蚀,利用 Olympus 公司生产的 GX53 金相显微镜、Phenom X1 台式扫描电镜(SEM)和牛津 EDS X-Max20 能谱仪(EDS)对焊缝显微组织和析出相进行分析,并利用直读光谱仪 Spectro Max06 对焊缝的化学组成进行测量。

采用 Wilson VH1102 全自动维氏硬度计按 GB/T 4340.1—2009 测量焊接接头横截面的显微硬度分布,测试位置为板厚的 1/2 处,测试点间距为 0.15 mm,载荷压力为 1.96 N,加载时间为 10.0 s。为消除焊缝余高对接头力学性能的影响,采用去除焊缝上下表面余高的方法对焊接接头的力学性能进行测试。拉伸试验按 GB/T 2651—2010《金属室温拉伸试验方法》在长春机械科学研究所的 DNS-300 万能试验机上完成,拉伸速度为 3.0 mm/min。拉伸试验完成后,对拉伸断口超声清洗冷风吹干后在扫描电镜上完成断口微观形貌分析。

表 1 焊接参数

Table 1 Welding parameter

Power /W	Feeding velocity /(m·min <sup>-1</sup> )	Welding speed /(m·min <sup>-1</sup> )	Defocusing amount /mm	Shielding gas
3000	1.7	1.0	0	Ar (25 L·min <sup>-1</sup> )

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 焊缝显微组织

图 2 是不同 Ti 箔厚度下焊缝晶粒形态及晶粒尺寸统计结果。由图可见,添加 Ti 箔后焊缝中心等轴晶显著细化,且随着 Ti 箔厚度的增加,焊缝中心等轴晶尺寸显著减小。统计数据表明,Ti 箔厚度为 80 μm 时,

焊缝中心等轴晶平均尺寸约为 21 μm,仅是直接焊接样品的 14%,如图 2(e)所示。由此可见,添加 Ti 箔可有效细化焊缝中心等轴晶,且 Ti 箔厚度与焊缝中心等轴晶的平均晶粒尺寸呈负相关的关系。

图 3 为不同 Ti 箔厚度下焊缝金相组织。由图可见;当 Ti 箔厚度为 25 μm 时,焊缝组织与未添加 Ti 箔条件下相同,均只存在呈短棒状或长条状黑色析出

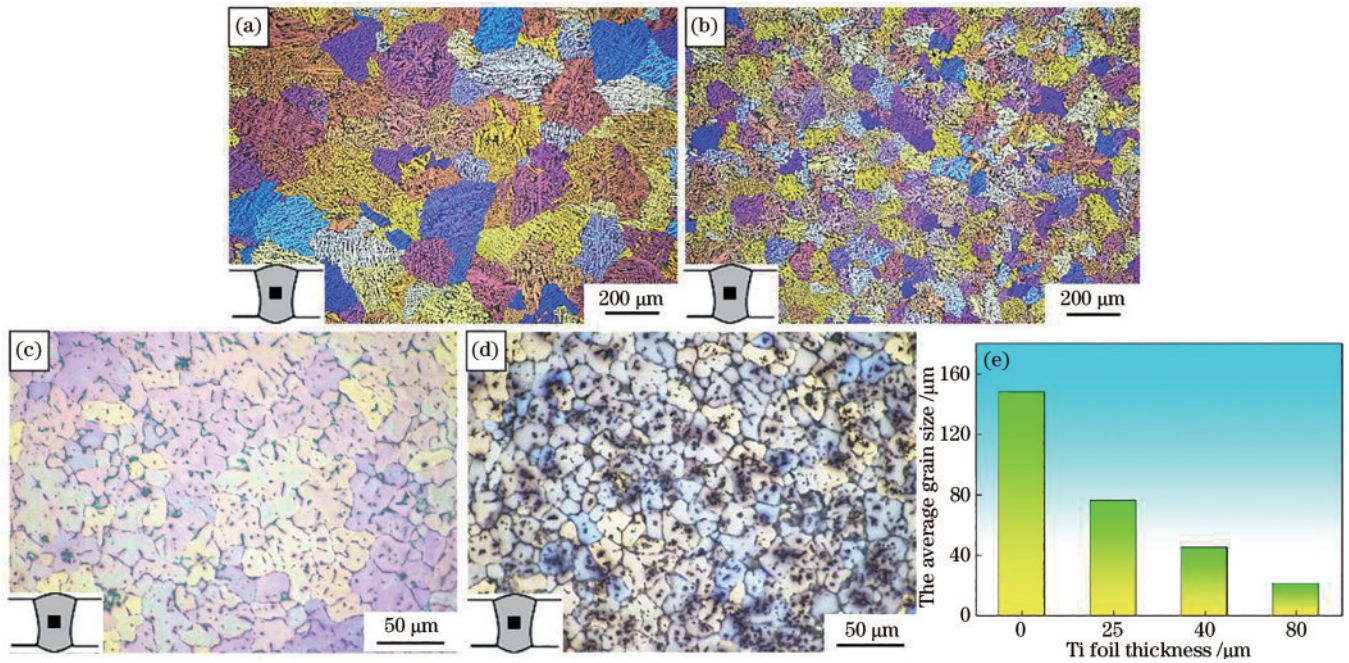


图2 不同Ti箔厚度下焊缝晶粒形态及晶粒尺寸统计结果。(a) 0 μm; (b) 25 μm; (c) 40 μm; (d) 80 μm; (e) 焊缝中心晶粒尺寸统计结果

Fig. 2 Grain morphologies of the welds with different thicknesses of Ti foil and statistical results of grain size. (a) 0 μm; (b) 25 μm; (c) 40 μm; (d) 80 μm; (e) statistical results of weld center grain size

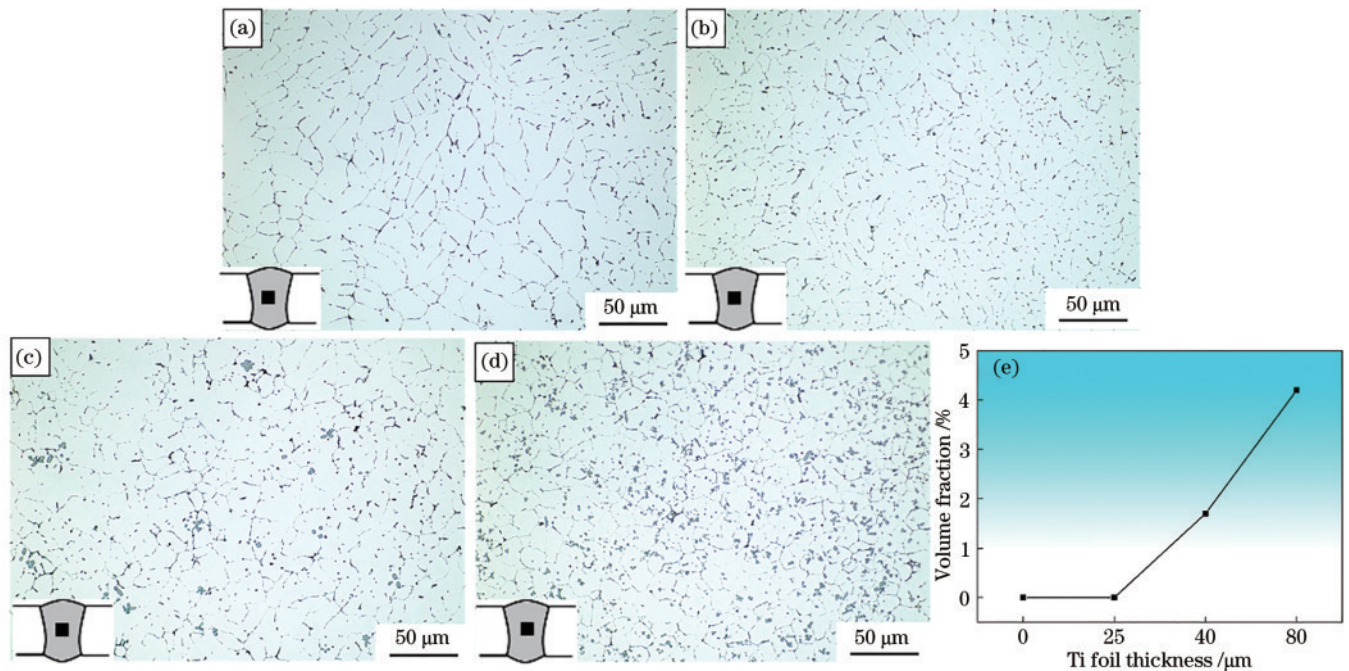


图3 不同Ti箔厚度下焊缝金相组织。(a) 0 μm; (b) 25 μm; (c) 40 μm; (d) 80 μm; (e) 灰色析出相体积分数

Fig. 3 Metallographic images of the welds with different thicknesses of Ti foil. (a) 0 μm; (b) 25 μm; (c) 40 μm; (d) 80 μm; (e) volume fraction of gray-irregular precipitates

相;而当Ti箔厚度增加至40 μm时,焊缝内存在少量不规则灰色析出相;当Ti箔厚度增加至80 μm时,灰色析出相体积分数由1.7%增加至4.2%,如图3(e)所示。由此可见,Ti箔的添加对焊缝组织产生了明显影响,焊缝中析出了不规则灰色析出相,且随着Ti箔厚度的增加,灰色析出相体积分数明显增加。

为明确Ti合金化后焊缝中新增灰色析出相的种类,对比分析了未添加Ti箔及Ti箔厚度为80 μm时的焊缝显微组织,结果如图4所示。由图可见,Ti合金化后,焊缝中除细长条的白色析出相外,还存在不规则的亮白色析出相,即金相组织中的新增灰色析出相。经EDS分析可知,不规则亮白色析出相存在明显的Ti、

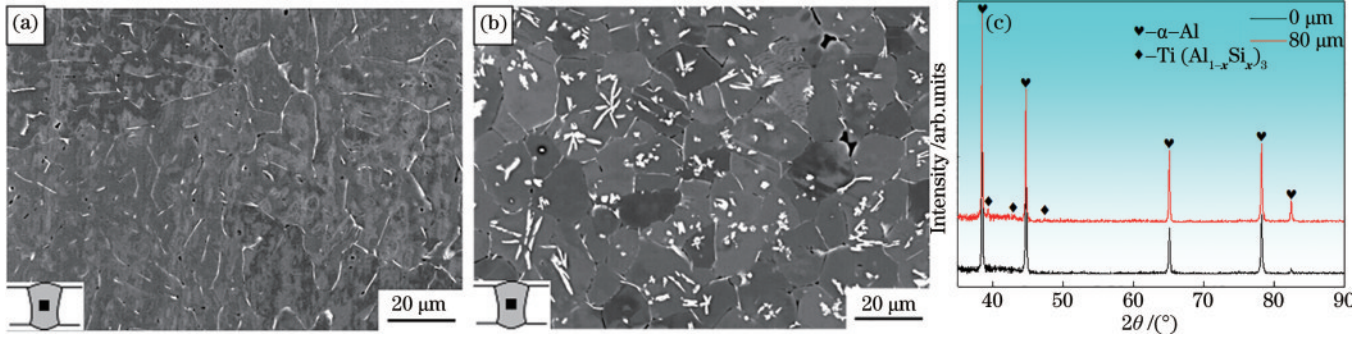


图 4 不同 Ti 箔厚度下焊缝显微组织。(a) 0  $\mu\text{m}$ ; (b) 80  $\mu\text{m}$ ; (c) 焊缝 XRD 分析结果

Fig. 4 Microstructure of the weld seam with different thicknesses of Ti foil. (a) 0  $\mu\text{m}$ ; (b) 80  $\mu\text{m}$ ; (c) weld XRD analysis results

Si 元素富集, 为富 Ti、Si 相。结合图 4(c) 的焊缝 XRD 分析结果可知, 该富 Ti、Si 相为  $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$  相, 这与 Gao 等<sup>[20]</sup> 在 Al-Si-Ti 铸造合金中发现的 Ti-Al-Si 析出相种类相一致。由此可见, Ti 合金化后焊缝中析出的不规则亮白色析出相为  $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$  相。

为进一步明晰 Ti 合金化后焊缝中存在大量  $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$  相与晶粒尺寸降低之间的本质联系, 本文采用 Thermo-Calc 热力学计算软件研究了 Ti 元素含量对熔池凝固行为的影响。鉴于 Ti 元素在  $\alpha\text{-Al}$  中的极限固溶度约为 0.2%<sup>[21]</sup>, 若在保证焊缝中的析出 Ti-Al 相, 则焊缝中的 Ti 质量分数需高于 0.2%, 故而焊缝中的 Ti 元素初始质量分数定为 0.3%。同时通过对焊缝稀释率的计算获得了未添加 Ti 箔条件下焊缝中的 Si、Mg 和 Fe 元素的质量分数分别为 2.25%、0.63% 和 0.11% (不考虑元素烧损), 熔池非平衡凝固计算结果如图 7 所示。由图可见,  $\text{TiAl}_3$  相在液相凝固前析出, 且在液相凝固过程中,  $\alpha\text{-Al}$  首先通过包晶反应  $\text{L} + \text{TiAl}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}$  析出。由此可见,  $\text{TiAl}_3$  相可充当  $\alpha\text{-Al}$  的异质形核点, 相比于均质形核将显著提高  $\alpha\text{-Al}$  的形核率。已有研究指出,  $\alpha\text{-Al}$  为 FCC 结构,  $\text{TiAl}_3$  为 D022 结构, 其中, D022 结构由两层 Al 晶格构成, 四角为 Al 原子, 中心为 Ti 原子<sup>[22-23]</sup>。由于  $\text{TiAl}_3$  和  $\alpha\text{-Al}$  具有相似的晶体结构, 二者之间具有较低的晶格错配度, 且在 Yamada 等<sup>[24]</sup> 的研究中指出  $\text{TiAl}_3$  与  $\alpha\text{-Al}$  的晶格错配度仅为 2.2%~4.8%。此外, 在 Peng 等<sup>[25]</sup> 的研究中指出, 液相中的 Si 原子易扩散到  $\text{TiAl}_3$  相表面, 生成了  $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$  相。结合图 4 和表 2 的研究结果可知, 由于采用富 Si 焊丝, 实际熔池凝固过程中, 液相中析出的是  $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$  相, 因此室温组织中存在  $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$  相。对比而言,  $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$  相与  $\alpha\text{-Al}$  之间的界面自

表 2 80  $\mu\text{m}$  厚 Ti 箔焊缝亮白色析出相 EDS 分析结果

Table 2 EDS analysis results of precipitates in the welds with adding 80  $\mu\text{m}$ -thick Ti foil

Precipitate	Mass fraction / %			
	Si	Mg	Ti	Al
White precipitate	2.41	-	16.98	Bal.
Bright white precipitate	8.68	2.19	-	

由能更低, 使得  $\alpha\text{-Al}$  更易在  $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$  相表面优先形核。因此, 液相中析出的  $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$  相可为  $\alpha\text{-Al}$  提供异质形核点, 通过异质形核降低形核所需的过冷度, 提高形核率, 从而可有效细化晶粒。此外, 随着 Ti 含量的增加,  $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$  相析出温度逐渐升高, 当钛质量分数达到 0.9% 时, 析出温度升高至 891  $^{\circ}\text{C}$ , 如图 5(b) 所示。析出温度的升高有助于在焊接过程中析出更多的  $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$  相, 为  $\alpha\text{-Al}$  的形核提供更多的异质形核点, 进一步细化焊缝晶粒。由此可见, 随着 Ti 箔厚度的增加, 焊缝中  $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$  相含量的增加是导致焊缝晶粒进一步细化的本质原因。

### 3.2 焊接接头力学性能

图 6 为焊缝显微硬度及焊接接头拉伸结果。由图 6(a) 可知, 添加 Ti 箔后, 焊缝平均硬度有所提高, 当 Ti 箔厚度增加至 80  $\mu\text{m}$  时, 焊缝平均硬度增加至 61 HV, 相比于直接焊接样品提高了 7.0%。焊缝平均硬度的提升使得焊缝抗拉强度亦得到了相应的提高, 如图 6(b) 所示。添加 Ti 箔后, 焊缝的抗拉强度得到了明显提高, 且焊缝抗拉强度和 Ti 箔厚度呈正相关关系。当 Ti 箔厚度增加至 80  $\mu\text{m}$  时, 焊接接头抗拉强度达到 225 MPa, 相比于直接焊接样品提高了 8.2%。由此可见, 添加 Ti 箔可有效提高焊缝硬度和抗拉强度, 且焊缝硬度和抗拉强度与 Ti 箔厚度呈正相关。

在铝合金中, 细晶强化可由 Hall-Petch 公式<sup>[26]</sup> 进行计算

$$\sigma_d = K \times d^{-1/2}, \quad (1)$$

式中:  $\sigma_d$  为细晶强化所带来的强度贡献;  $d$  为晶粒尺寸;  $K$  为材料常数, 铝合金取 0.14。铝合金的维氏显微硬度  $H_v$  与屈服强度  $\sigma_y$  之间的关系可通过经验公式<sup>[27]</sup> 进行计算

$$H_v \approx 0.33\sigma_y. \quad (2)$$

因此式(1)可修改为

$$H_{vd} \approx K_H d^{-1/2}, \quad (3)$$

式中:  $H_{vd}$  为细晶强化所带来的硬度贡献;  $K_H$  为比例系数, 约为 50  $\text{HV} \cdot \mu\text{m}^{1/2}$ 。由式(3)可知, 随着晶粒尺寸的减小, 显微硬度逐渐升高。将图 2 中统计的晶粒尺寸代入公式可知, Ti 箔厚度为 80  $\mu\text{m}$  时, 晶粒细化所带来

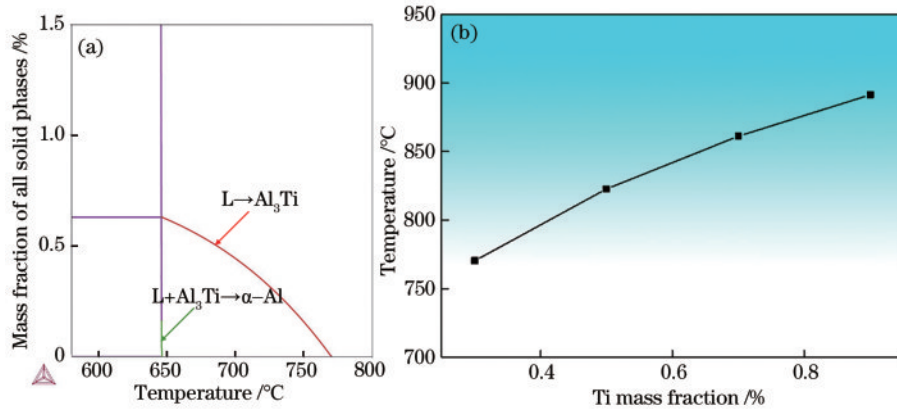


图 5 Ti 元素对焊缝凝固行为的影响。(a) Al-2.25%Si-0.63%Mg-0.11%Fe-0.3%Ti 随温度变化固相析出质量分数;(b) Ti 含量对  $TiAl_3$  析出温度的影响  
Fig. 5 Effect of Ti on weld solidification behavior. (a) Al-2.25%Si-0.63%Mg-0.11%Fe-0.3%Ti solid precipitation mass fraction with temperature change; (b) effect of Ti mass fraction on  $TiAl_3$  precipitation temperature

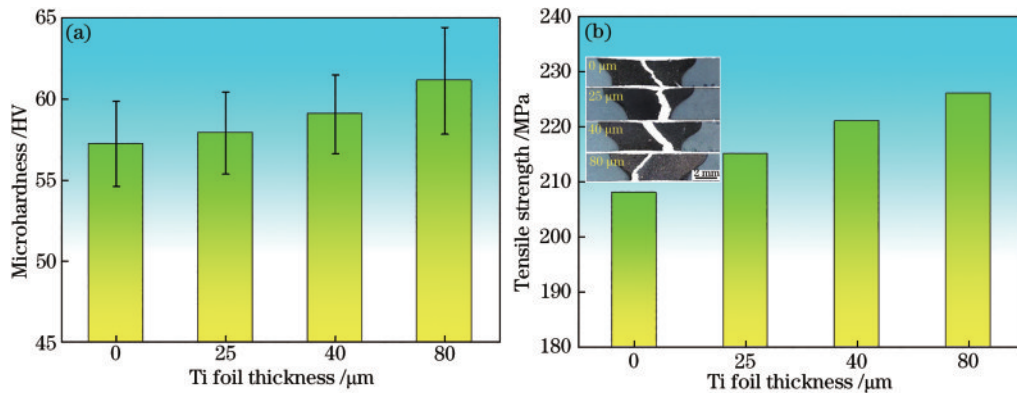


图 6 不同 Ti 箔厚度下焊接接头力学性能。(a) 焊缝平均显微硬度;(b) 焊接接头平均强度

Fig. 6 Mechanical properties of the welded joints with different thicknesses of Ti foil. (a) Average microhardness of the weld seam; (b) average tensile strength of the welded joints

的硬度增量约为 6.8 HV,略高于实际测量结果。由此可以说明,Ti 合金化所带来的晶粒尺寸显著减小是导致焊缝显微硬度明显提高的本质原因。

### 3.3 焊接接头拉伸断裂行为研究

一般而言,粗大析出相的存在会影响材料的力学性能,致使其断裂方式发生变化,为分析 Ti 合金化带来的不规则  $Ti(Al_{1-x}Si_x)_3$  相对焊缝断裂方式的影响,对拉伸断口的微观形貌进行了分析。图 7 所示为拉伸断口的微观形貌,其中右下角所示为 Ti 箔厚度为 80  $\mu m$  时拉伸试样断口内的颗粒的元素分析。由图可见,添加 Ti 箔后焊接接头的断裂方式未发生改变,断口由大量的韧窝组成,且随着 Ti 箔厚度的增加,韧窝尺寸更加细小。但不同的是,Ti 箔厚度为 80  $\mu m$  时,韧窝内存在细小的析出相,经元素分析可知其为富 Ti 相。结合焊缝组织分析可知,该析出相为  $Ti(Al_{1-x}Si_x)_3$  相。为进一步明晰  $Ti(Al_{1-x}Si_x)_3$  相在拉伸断裂过程中的作用,对未添加 Ti 箔和 Ti 箔厚度为 80  $\mu m$  时断口的侧面进行了观察,结果如图 8 所示。由图可见,Ti

$(Al_{1-x}Si_x)_3$  相发生了断裂并形成了微裂纹。这主要是由于  $Ti(Al_{1-x}Si_x)_3$  相作为硬质相<sup>[28]</sup>,在基体受力变形过程中,应力易在此处发生集中,致使其发生断裂。但由图 8(b)可知,虽然其发生断裂,但微裂纹未发生扩展。由此可见,不规则的  $Ti(Al_{1-x}Si_x)_3$  相并未使得焊缝的断裂方式发生改变,焊缝仍发生的是韧性断裂,因此断口内存在大量韧窝,但因晶粒尺寸有所减小,故断口由大量的细小韧窝组成,如图 7(d)所示。

综上所述,通过 Ti 含量的调控提高了焊缝中  $Ti(Al_{1-x}Si_x)_3$  相的析出温度及含量,有效细化了焊缝晶粒尺寸,焊缝硬度得到提高。虽然 Ti 箔厚度为 80  $\mu m$  时,焊缝中析出了大量不规则的  $Ti(Al_{1-x}Si_x)_3$  相,但其对焊缝的断裂方式未产生影响,焊缝断口由细小的韧窝组成,为典型的韧性断裂。且由于焊缝晶粒得到细化,韧窝尺寸随着 Ti 箔厚度的增加而减小,焊缝的力学性能得到提高,焊缝抗拉强度相比于直接焊接样品提高了 8.2%,达到 225 MPa。

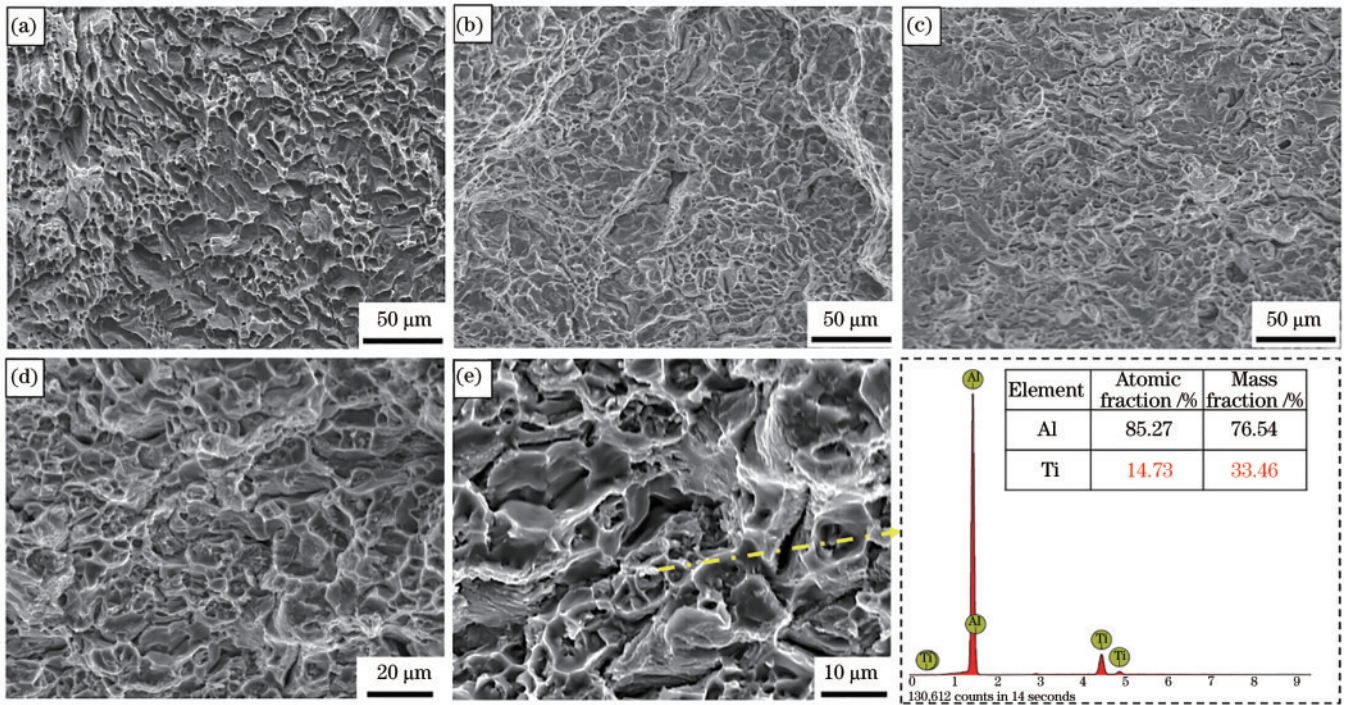


图 7 不同 Ti 箔厚度下焊接接头拉伸断口微观形貌。(a) 0  $\mu\text{m}$ ; (b) 25  $\mu\text{m}$ ; (c) 40  $\mu\text{m}$ ; (d)(e) 80  $\mu\text{m}$

Fig. 7 Fracture morphology of the welded joints with different thicknesses of Ti foil. (a) 0  $\mu\text{m}$ ; (b) 25  $\mu\text{m}$ ; (c) 40  $\mu\text{m}$ ; (d)(e) 80  $\mu\text{m}$

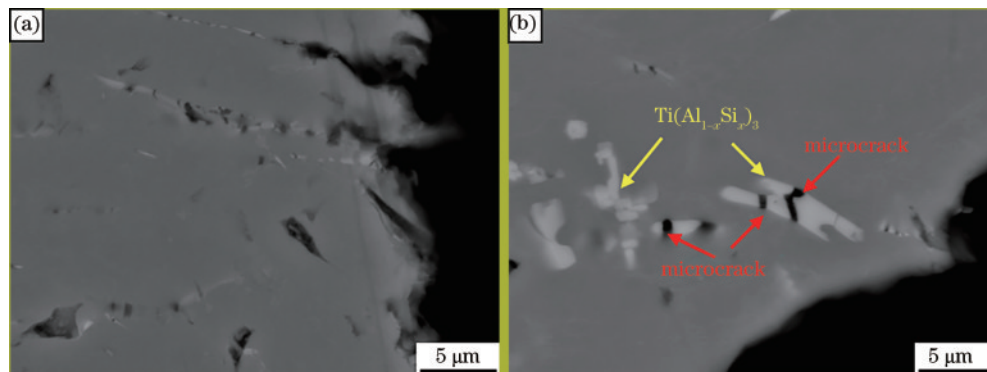


图 8 不同 Ti 箔厚度下拉伸试样断口侧面微观形貌。(a) 0  $\mu\text{m}$ ; (b) 80  $\mu\text{m}$

Fig. 8 Micro morphology of the fracture surface with different thicknesses of Ti foil. (a) 0  $\mu\text{m}$ ; (b) 80  $\mu\text{m}$

## 4 结 论

本文以车用 Al-Mg-Si 合金激光-CMT 复合焊接接头为研究对象,研究分析了 Ti 合金化对焊缝组织及力学性能的影响,主要结论如下:

1) Ti 箔厚度增加至 40  $\mu\text{m}$  时,焊缝中有  $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$  相析出,且随着 Ti 箔厚度的增加(40  $\mu\text{m}$ →80  $\mu\text{m}$ ),焊缝中  $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$  相含量显著增加(1.7%→4.2%)。

2) 经 Ti 合金化后, $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$  相析出为  $\alpha$ -Al 的形核提供了优异的异质形核点,有效细化了晶粒尺寸,致使焊缝晶粒尺寸与 Ti 箔厚度呈负相关关系。Ti 箔厚度增加至 80  $\mu\text{m}$  时,焊缝平均晶粒尺寸由直接焊接样品的 148  $\mu\text{m}$  降低至 21  $\mu\text{m}$ 。

3) 晶粒细化使得焊缝硬度和抗拉强度得到了明显提高,Ti 合金化后焊缝平均硬度和抗拉强度相比于

直接焊接样品分别提高了 7.0% (61 HV) 和 8.2% (225 MPa)。

## 参 考 文 献

- [1] Fahimpour V, Sadmezhaad S K, Karimzadeh F. Corrosion behavior of aluminum 6061 alloy joined by friction stir welding and gas tungsten arc welding methods [J]. Materials & Design, 2012, 39: 329-333.
- [2] Weng Y Y, Ding L P, Xu Y Q, et al. Effect of In addition on the precipitation behavior and mechanical property for Al-Mg-Si alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 895: 162685.
- [3] 李福泉, 冯时, 李明伟, 等. 6082 铝合金激光填丝焊热影响区的软化现象[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1102007. Li F Q, Feng S, Li M W, et al. Softening phenomenon of heat-affected zone in laser welding of 6082 Al alloys with filler wire[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45

- (11): 1102007.
- [4] Zhang W K, He H, Xu C C, et al. Precipitates dissolution, phase transformation, and re-precipitation-induced hardness variation in 6082-T6 alloy during MIG welding and subsequent baking[J]. JOM, 2019, 71(8): 2711-2720.
- [5] Fan C, Yang S L, Zhu M Q, et al. Microstructure and fatigue properties of 6061 aluminum alloy laser-MIG hybrid welding joint[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021: 1933942.
- [6] Faye A, Balcaen Y, Lacroix L, et al. Effects of welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the AA6061 aluminium alloy joined by a Yb: YAG laser beam[J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2021, 3: 100047.
- [7] Gündođdu İş E, Yılmaz M. Effects of Ar-He shielding gas mixture on mechanical and metallurgical properties of weld metal in laser welding of 6061 T6 aluminium alloy [J]. Journal of Laser Applications, 2021, 33(4): 042011.
- [8] Li S C, Xu W, Xiao G, et al. Effects of Sc on laser hot-wire welding performance of 7075 aluminum alloy[J]. Materials Research Express, 2020, 7(10): 106506.
- [9] Croteau J R, Griffiths S, Rossell M D, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Zr alloys processed by selective laser melting[J]. Acta Materialia, 2018, 153: 35-44.
- [10] Guzmán I, Granda E, Acevedo J, et al. Comparative in mechanical behavior of 6061 aluminum alloy welded by pulsed GMAW with different filler metals and heat treatments[J]. Materials, 2019, 12(24): 4157.
- [11] Wu S K, Wang C, Li Z X, et al. Effect of Nb micro-alloying on microstructure and properties of A7204-T4 aluminum alloy joints with fiber laser-VPTIG hybrid welding[J]. Welding in the World, 2020, 64(9): 1459-1469.
- [12] 栗忠秀, 温鹏, 张松, 等. 铌微合金化对光纤激光-CMT 复合焊接 A7204P-T4 铝合金接头组织和力学性能的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0902001.  
Li Z X, Wen P, Zhang S, et al. Effects of Nb micro-alloying on microstructure and mechanical properties of A7204P-T4 aluminum alloy joint by fiber laser-CMT hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0902001.
- [13] Adisa S B, Loginova I, Khalil A I, et al. Effect of laser welding process parameters and filler metals on the weldability and the mechanical properties of AA7020 aluminium alloy[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2018, 2(2): 33.
- [14] Jaradeh M, Carlberg T. Effect of titanium additions on the microstructure of DC-cast aluminium alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 413/414: 277-282.
- [15] Pourkia N, Emyam M, Farhangi H, et al. The effect of Ti and Zr elements and cooling rate on the microstructure and tensile properties of a new developed super high-strength aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(20): 5318-5325.
- [16] 韩晓辉, 李帅贞, 毛镇东, 等. 高速列车用 6106-T6 铝合金型材激光-电弧复合焊接工艺及接头性能[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1202004.  
Han X H, Li S Z, Mao Z D, et al. Laser-arc hybrid welding process and joint performances of 6106-T6 aluminum alloy profiles for high speed trains[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1202004.
- [17] 陈夏明, 王晓南, 董其鹏, 等. 焊丝 Si 含量对铝合金激光-CMT 复合焊接头组织性能的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(22): 2202003.  
Chen X M, Wang X N, Dong Q P, et al. Effect of filling material with different Si content on microstructure and properties of laser-CMT aluminum alloy joints[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 2202003.
- [18] 温鹏, 栗忠秀, 张松, 等. 摆动光纤激光-CMT 复合焊接 6A01-T5 铝合金型材接头的气孔特征及组织性能研究[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0802003.  
Wen P, Li Z X, Zhang S, et al. Investigation on porosity, microstructures and performances of 6A01-T5 aluminum alloy joint by oscillating fiber laser-CMT hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0802003.
- [19] 蔡创, 谢佳, 刘致杰, 等. 铝合金摆动激光-MIG 复合焊接特性及气孔控制[J]. 中国激光, 2021, 48(18): 1802002.  
Cai C, Xie J, Liu Z J, et al. Welding characteristics and porosity control of weaving laser-MIG hybrid welding of aluminum alloys[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 1802002.
- [20] Gao T, Li P T, Li Y G, et al. Influence of Si and Ti contents on the microstructure, microhardness and performance of TiAlSi intermetallics in Al-Si-Ti alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(31): 8013-8017.
- [21] Chen X G, Fortier M. TiAlSi intermetallic formation and its impact on the casting processing in Al-Si alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(13): 1780-1786.
- [22] Zhou S G, Peng B, Cao Y, et al. First-principles investigations on stability, elastic properties and electronic structures of L12-TiAl<sub>3</sub> and D022-TiAl<sub>3</sub> under pressure [J]. Physica B: Condensed Matter, 2019, 571: 118-129.
- [23] Hu H, Wu X Z, Wang R, et al. Structural stability, mechanical properties and stacking fault energies of TiAl<sub>3</sub> alloyed with Zn, Cu, Ag: First-principles study[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 666: 185-196.
- [24] Yamada W, Honda K, Tanaka K, et al. Solidification structure of coating layer in hot-dip Zn-11% Al-3% Mg-0.2% Si-coated steel sheet and phase diagram of the system [J]. Nippon Steel Technical Report, 2013(102): 37-43.
- [25] Peng W J, Du Q, Wu G X, et al. The role of Ti and Si in the nucleation of  $\alpha$ -Al during hot dip coating of steel with Al-43.4 wt.% Zn-1.6 wt.% Si alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 299: 56-64.
- [26] Hansen N. Hall-Petch relation and boundary strengthening [J]. Scripta Materialia, 2004, 51(8): 801-806.
- [27] Zhang P, Li S X, Zhang Z F. General relationship between strength and hardness[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 529: 62-73.
- [28] Dursun Ö, Tansel T, Hatice E, et al. Synthesis, characterization and dry sliding wear behavior of *in-situ* formed TiAl<sub>3</sub> precipitate reinforced A356 alloy produced by mechanical alloying method[J]. Materials Research, 2015, 18(4): 813-820.