

引文格式: 刘伟清, 陈楠, 刘俊, 等. 纳米改性 7075 铝合金激光-MIG 复合焊组织及力学性能[J]. 焊接学报, 2025, 46(10): 113 – 123. LIU Weiqing, CHEN Nan, LIU Jun, *et al.* Microstructure and mechanical properties of nano-treated 7075 aluminum alloy joint fabricated by laser-MIG hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2025, 46(10): 113 – 123.



纳米改性 7075 铝合金激光-MIG 复合焊 组织及力学性能

刘伟清¹, 陈楠^{1,2}, 刘俊^{1,3}, 田瑞^{1,3}, 蔡得涛¹, 罗子艺¹, 池元清²

(1. 广东省科学院中乌焊接研究所, 广东省材料连接与先进制造重点实验室, 广州, 510650; 2. 广东工业大学, 机电工程学院, 广州, 510006; 3. 重庆科技大学, 冶金与动力工程学院, 重庆, 401331)

摘要: 热裂和接头软化是制约 7075 铝合金实现高性能熔焊连接的关键因素, 文中使用低热输入的激光-熔化极惰性气体保护焊 (melt inert gas welding, MIG) 复合焊方法对 7075 铝合金进行对接焊接, 在焊缝中引入纳米颗粒, 获得了无热裂接头. 焊缝组织由平均尺寸为 $12.1 \mu\text{m} \pm 5.9 \mu\text{m}$ 的细小等轴枝晶组成, 仅在熔合线附近存在一层宽度为 $20 \mu\text{m}$ 的柱状晶, 表明纳米颗粒的加入促进了焊缝中柱状晶向等轴晶的转变, 并显著细化晶粒尺寸. 此外, 纳米颗粒细化了焊缝中的共晶相, 细化的晶粒和共晶相共同促进了无裂纹焊缝的形成. 焊接头抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 $404 \text{ MPa} \pm 2.8 \text{ MPa}$, $360.5 \text{ MPa} \pm 0.7 \text{ MPa}$ 和 $1.5\% \pm 0.14\%$. 对接头进行焊后热处理, 进一步提高力学性能. 经过固溶处理和时效处理后, 接头抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别达到 $529.5 \text{ MPa} \pm 20.5 \text{ MPa}$, $462.5 \text{ MPa} \pm 3.5 \text{ MPa}$ 和 $5.1\% \pm 2.5\%$.

创新点: (1) 通过纳米改性实现 7075 铝合金无裂纹激光-MIG 复合焊接, 焊缝由细小等轴晶组成.
(2) 经热处理后焊接接头强度和韧性显著提高, 接头力学性能与搅拌摩擦焊接头相当.

关键词: 7075 铝合金; 纳米颗粒; 激光-熔化极惰性气体保护焊复合焊; 等轴晶; 焊后热处理

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20240726001

Microstructure and mechanical properties of nano-treated 7075 aluminum alloy joint fabricated by laser-MIG hybrid welding

LIU Weiqing¹, CHEN Nan^{1,2}, LIU Jun^{1,3}, TIAN Rui^{1,3}, CAI Detao¹, LUO Ziyi¹, CHI Yuanqing²

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Material Joining and Advanced Manufacturing, China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou, 510650, China; 2. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510006, China; 3. School of Metallurgy and Power Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing, 401331, China)

Abstract: Hot cracking and joint softening are the two main factors restricting the achievement of high-performance fusion welding joints of 7075 aluminum alloy. This paper utilized low heat input laser-melt inert gas welding (MIG) hybrid welding to butt weld 7075 aluminum alloy. The crack-free joint was obtained with the assistance of nano-treating. The weld microstructure was composed of fine equiaxed grains with an average size of $12.1 \mu\text{m} \pm 5.9 \mu\text{m}$, and there was a $20 \mu\text{m}$ columnar grain near the fusion line, indicating that the addition of nanoparticles promoted the transition from columnar grains to equiaxed grains and refined grain size. Additionally, the eutectic phase was also refined by nanoparticles. The fine equiaxed grains and the refined eutectic phase

收稿日期: 2024-07-26; 录用日期: 2024-10-25

基金项目: 广州市基础与应用基础研究资助项目 (2023A04J2016); 广东省科学院发展专项资金项目 (2020GDASYL-20200301001, 2021GDASYL-20210103085); 佛山市高校教师特色创新研究项目 (2021XJZZ18)

contributed simultaneously to the formation of the crack-free weld. The tensile strength, yield strength, and percentage elongation after fracture of the as-welded joint were $404 \text{ MPa} \pm 2.8 \text{ MPa}$, $360.5 \text{ MPa} \pm 0.7 \text{ MPa}$, and $1.5\% \pm 0.14\%$ respectively. Post-weld heat treatment further enhanced the mechanical properties. The tensile strength, yield strength, and percentage elongation after fracture after solution treatment and aging treatment were improved to $529.5 \text{ MPa} \pm 20.5 \text{ MPa}$, $462.5 \text{ MPa} \pm 3.5 \text{ MPa}$, and $5.1\% \pm 2.5\%$.

Highlights: (1) Crack-free laser-MIG hybrid welding of 7075 aluminum alloy is realized with the assistance of nano-treating, and the weld is composed of fine equiaxed dendrites.

(2) Strength and toughness of the as-welded joint is significantly improved by post-weld heat treatment. Mechanical performance of the heat treated joint is comparable to that of the joint fabricated by friction stir welding.

Key words: 7075 aluminum alloy; nanoparticle; laser-melt inert gas welding hybrid welding; equiaxed grain; post-weld heat treatment

0 序言

7075 铝合金具有密度小、比强度高优点,在航空航天、汽车交通等领域具有广泛的应用,但 7075 铝合金中合金元素含量高,凝固区间宽度大,热裂倾向性高,导致熔化焊接过程中极易产生热裂^[1-3]. 焊缝晶粒细化是减小铝合金熔焊热裂的有效途径. 晶粒细化可通过向熔池中加入晶粒细化剂来实现,如 Zr 单质、纳米颗粒和 Ti-B 晶粒细化剂等^[4-7]. TiC 与 Al 具有相同的晶体结构和较小的晶格错配度,同时 TiC 与 Al 熔体润湿性良好,因此 TiC 对铝合金具有优异的晶粒细化潜力^[8]. 因此,在 7075 铝合金焊缝中引入 TiC 纳米颗粒,能够显著细化焊缝组织,实现无热裂焊接.

激光-MIG 复合焊技术结合了激光和电弧两种热源,克服了激光焊接和电弧焊接的部分缺点,具有热输入低、焊接变形小、焊接熔深大和焊接效率高优点,广泛应用于铝合金焊接^[9-10]. 然而,目前纳米颗粒对铝合金复合焊过程中显微组织和力学性能的影响缺乏深入研究. 除热裂之外,接头软化是限制 7075 铝合金高性能熔焊的关键因素. 7075 铝合金为典型的热处理强化型铝合金,强化作用主要来自于时效过程中析出的纳米强化相. 然而,将发生溶解或粗化,导致析出相的强化作用减弱甚至消失,降低焊缝和热影响区的力学性能^[2,11],从而弱化了接头强度. 焊后热处理被认为是提高软化区性能的最有效方法之一,主要通过热处理过程重新析出与基体共格的强化相,发挥强化作用^[12-13].

文中采用激光-MIG 复合焊方法对 7075 高强铝合金进行焊接,使用含有纳米 TiC 颗粒的焊丝,在焊缝中引入纳米颗粒,抑制热裂纹的产生. 对焊

接头显微组织进行多尺度的详细研究,探究纳米颗粒对铝合金激光-MIG 复合接头显微组织的影响规律和机理. 采用焊后热处理改善接头的力学性能. 对不同状态下接头的显微组织进行详细研究,并对不同状态接头进行拉伸性测试,揭示工艺、组织和性能的内在联系,为 7075 铝合金的激光-MIG 复合焊提供理论与试验参考,进一步扩展 7075 高强铝合金的应用范围.

1 试验方法

母材为 7075-T6 铝合金板材,尺寸为 $120 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$. 添加体积分数为 1.0% 的 TiC 纳米颗粒的 Al-Zn-Mg-Cu 新型纳米改性铝合金焊丝直径为 1.2 mm,化学成分如表 1 所示. 为确保焊接质量,焊接之前对母材表面进行机械打磨处理,并用酒精对母材表面进行清洗,避免表面氧化膜和油污对焊接过程和接头质量的影响.

表 1 焊丝化学成分(质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of welding wire

Zn	Mg	Ti	Cu	Al
8.6	3.2	1.8	1.8	余量

激光-MIG 复合焊系统包括激光器、MIG 焊机和 6 轴机器人. 激光器最大输出功率为 10 kW,光纤芯径为 $400 \mu\text{m}$,激光光斑直径为 0.6 mm. MIG 焊机电弧输出采用一元化控制,送丝速度控制焊接电流和电弧电压. 铝合金对激光有较强的反射作用,为了减少焊接过程中对激光的反射,调整激光与待焊工件的夹角为 75° ,如图 1 所示. 焊接过程中激光功率为 4 kW,焊接速度为 0.1 m/s,送丝速度为 9 m/min,离焦量为 -2 mm ,光丝间距为 3 mm.

焊接过程中使用保护气进行保护, 正面保护气流量为 25 L/min, 背面保护气流量为 20 L/min. 为了进一步提高接头的力学性能, 对接头进行焊后固溶和时效热处理. 固溶处理温度为 470 °C, 时间为 1 h. 随后进行时效处理, 温度为 120 °C, 时间为 24 h.

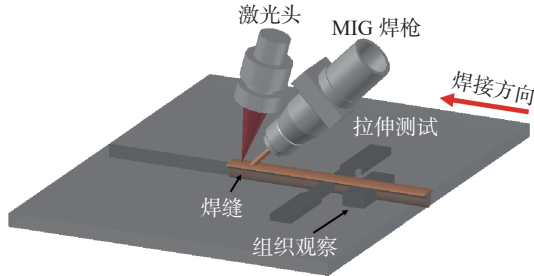


图 1 焊接过程和取样位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of welding process and sampling location

观察焊态和热处理态接头显微组织, 取样位置如图 1 所示. 观察面为垂直于焊接方向的截面, 观察位置为接头厚度 1/2 处. 使用 ZEISS Imager. M2m 光学显微镜 (optical microscope, OM) 观察接头不同区域的晶粒形貌和尺寸, 观察表面经过抛光后使用凯勒试剂进行腐蚀. 使用 Zeiss sigma 500 扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观察焊缝中相的种类和分布, 并使用能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 对相的元素组成进行测试. 使用 NordlysMax2 电子背散射衍射 (electron backscattering diffraction, EBSD) 系统进一步对接头不同区域的晶粒尺寸和织构进行表征, EBSD 数据采集过程中步长设置为 1 μm , 采集数据使用商业软件 AZ Crystal 进行分析. 使用 GHS100K 万能拉伸试验机对不同状态接头进行室温拉伸性能测试, 拉伸试样尺寸依据美国材料与试验协会标准 ASTM E8 《金属材料拉伸试验方法》进行制备, 试样尺寸, 如图 2 所示. 拉伸速率为 1 mm/min. 拉伸后使用 SEM 观察拉伸断口, 分析断裂机制.

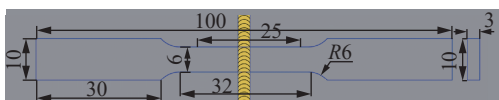


图 2 拉伸试样尺寸示意图 (mm)

Fig. 2 Schematic diagram of tensile test specimen

2 试验结果与分析

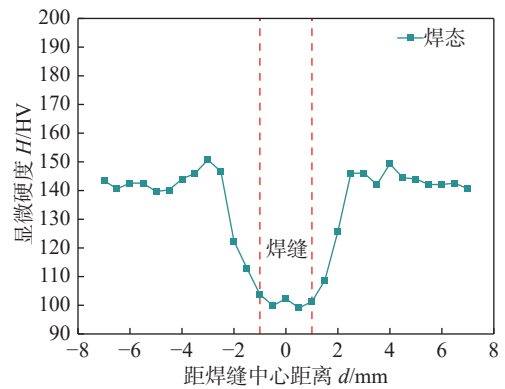
2.1 7075 铝合金激光-MIG 复合焊接头显微组织

图 3(a) 为所获得的 7075 铝合金激光-MIG 复

合焊接头, 焊缝的正面和背面均未观察到明显的裂纹, 表明通过在焊缝中引入 TiC 纳米颗粒实现了 7075 高强铝合金无热裂复合焊. 图 3(b) 为焊态接头的硬度曲线, 焊缝的宽度约为 2 mm, 硬度最小. 硬度沿焊缝中心呈对称分布, 焊缝两侧的热影响区硬度显著小于母材, 且随着离焊缝的距离增大, 热影响区硬度逐渐增大.



(a) 宏观形貌



(b) 硬度曲线

图 3 7075-T6 铝合金激光-MIG 复合焊接头

Fig. 3 Microhardness curve of 7075-T6 aluminum alloy laser-MIG composite welded joint. (a) macroscopic morphology; (b) microhardness curve

图 4 为焊态接头金相组织, 焊缝分为上部电弧主要影响区和下部激光主要影响区, 如图 4(a) 所示. 焊缝中形成了一些气孔, 并且焊缝上部和近表面的气孔数量明显多于焊缝下部和根部区域. 气孔轮廓为规则的球形, 表明其为熔池凝固过程中形成的氢气孔. 氢气孔是铝合金熔化焊接不可避免的缺陷, 主要是由于氢气在液态与固态铝中的溶解度差别较大^[14]. 结合文献 [15] 分析认为, 熔池开始凝固时, 在铝熔体中溶解的氢原子迅速聚集为小孔并快速上浮和长大, 但由于熔池凝固速度极大, 气孔从焊缝底部逐渐上浮的过程中, 部分气孔未能及时逸出而留在焊缝上部和近表面, 导致焊缝上部的气孔数量多于焊缝下部. 同时, 由于文中焊接速度较大, 熔池持续时间短, 气体并未获得足够的时间合并为尺寸较大的气孔, 因此图 4 焊缝中的气孔尺寸多小于 40 μm . 图 4(b) 和图 4(c) 为熔合线附近焊缝和热

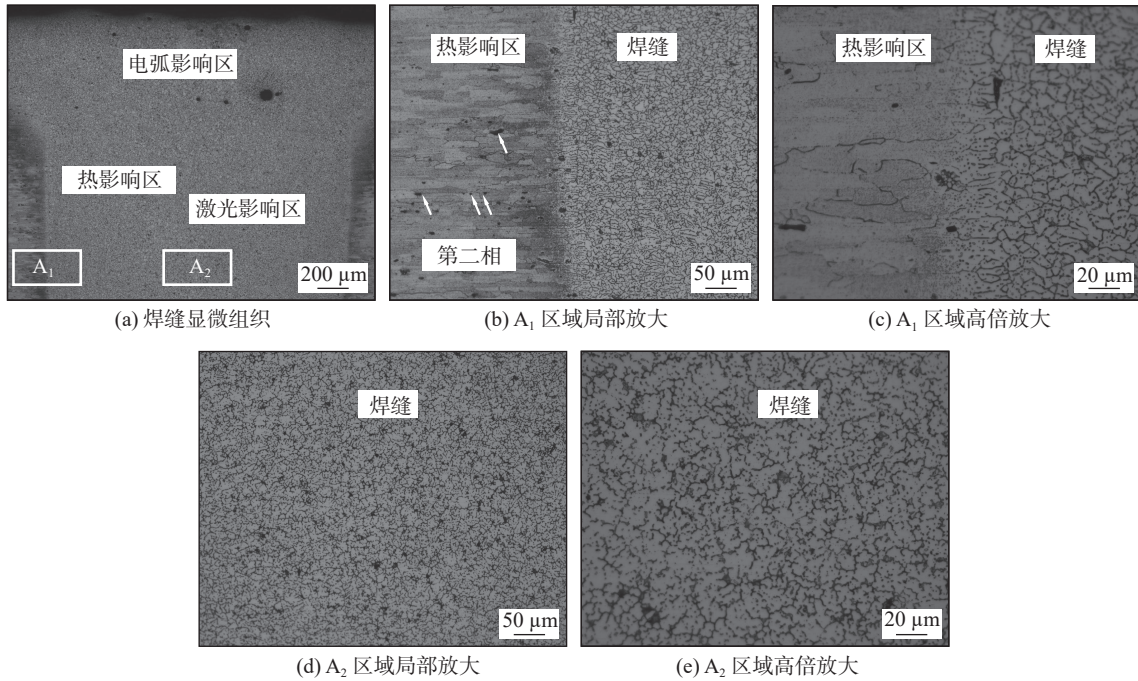


图 4 焊态接头显微组织

Fig. 4 Microstructure morphology of as-welded joint. (a) microstructure morphology of weld metal; (b) local magnified of A₁ region; (c) high magnification microstructure morphology of A₁ region; (d) local magnified of A₂ region; (e) high magnification microstructure morphology of A₂ region

影响区的显微组织, 图 4(d) 和图 4(e) 为焊缝中心显微组织. 图 4(b) 和图 4(c) 中接头热影响区由沿轧制方向 (rolling direction, RD) 拉长的变形晶粒组成, 同时热影响区存在沿 RD 成条带状分布的第二相. 熔合线靠近焊缝一侧存在仅由一层柱状晶组成的柱状晶区, 柱状晶长轴方向尺寸约为 20 μm. 焊缝区由细小的等轴晶组成, 晶粒尺寸为 10~20 μm.

图 5~图 7 为焊态接头不同区域的 EBSD 表征. 与金相观察结果一致, 母材和热影响区由沿

RD 拉长的变形晶粒组成, 母材的平均晶粒尺寸为 14.8 μm ± 9.7 μm, 热影响区平均晶粒尺寸为 13.2 μm ± 7.8 μm, 表明热影响区晶粒尺寸在焊接热循环的影响下并未发生明显长大. 母材和热影响区织构为典型的变形织构, 织构强度最大值分别为 5.23 和 4.82. 焊缝由细小的等轴晶组成, 平均晶粒尺寸为 12.1 μm ± 5.9 μm. 焊缝中织构强度最大值为 1.67, 表明焊缝金属在凝固后并未形成明显的织构.

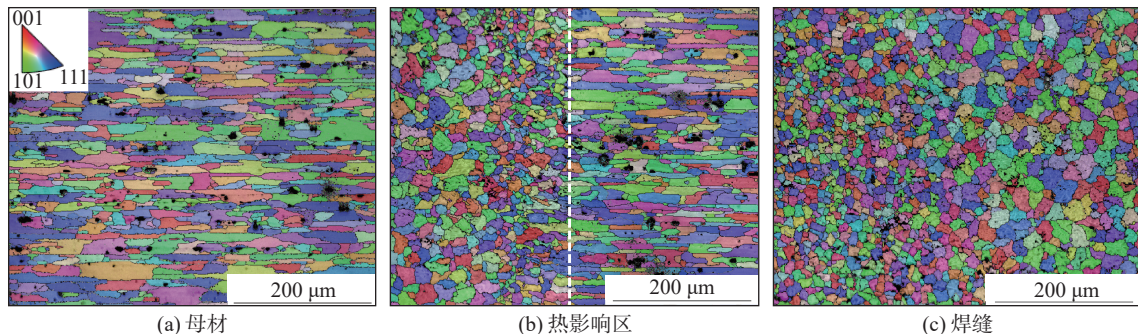


图 5 焊态接头不同区域反极图

Fig. 5 Inverse pole figures of different regions of welded joints. (a) base metal; (b) heat-affected zone; (c) weld metal

图 8 为焊态接头焊缝区域 SEM, 焊缝中存在沿晶界呈半连续状分布的亚微米级和微米级共晶相, 如图 8(a) 所示. 由图 8(b) 的 EDS 分析结果知, 共晶相元素组成为 Al-12.63Zn-22.18Mg-7.36Cu(原

子分数, %), 推测为固溶了 Al 元素和 Cu 元素的 MgZn₂ 相, 即 Mg(Zn, Al, Cu)₂, 常存在于 Al-Zn-Mg-Cu 合金的凝固组织中^[16]. 共晶相周围存在 TiC 纳米颗粒, 并且纳米颗粒分散状态良好, 并未发生团聚, 如

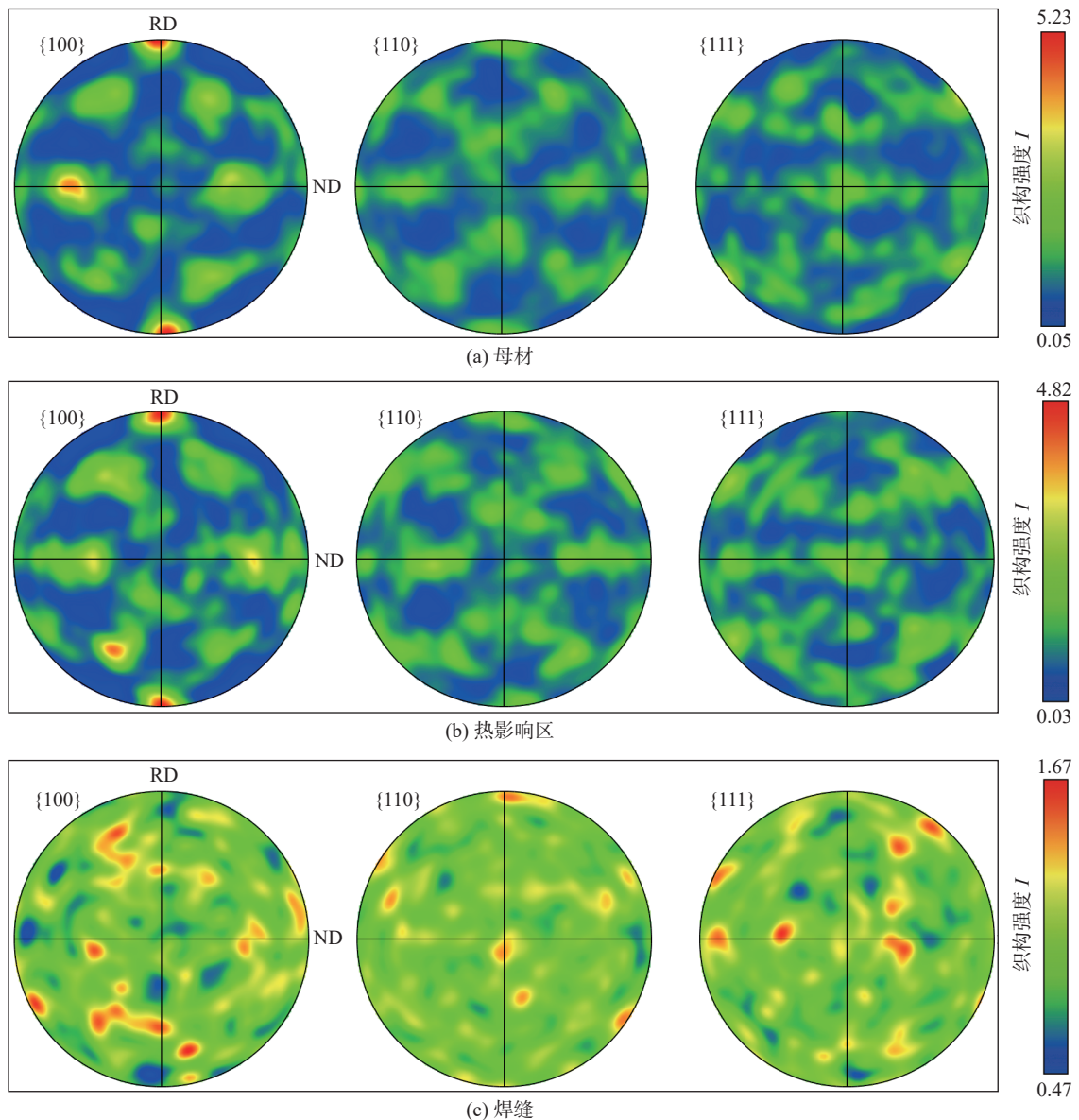


图 6 焊态接头不同区域极图

Fig. 6 Pole figures of different regions of welded joints. (a) base metal; (b) heat-affected zone; (c) weld metal

图 8(c) 所示。

进一步使用 SEM 面扫描分析表征焊缝中的元素组成和分布, 如图 9 所示. 在检测区域中发现, Zn 元素、Mg 元素、Cu 元素和 Ti 元素在晶界发生富集, 其中 Ti 元素来源于添加的 TiC 纳米颗粒. Zn 元素、Mg 元素和 Cu 元素在晶界的富集是由于在晶界上形成的共晶相. 晶界富集的 Ti 元素表明, 大部分的纳米颗粒分布在共晶相周围.

由于 7xxx 铝合金具有高的热裂倾向, 通常使用 ER5356 焊丝进行焊接, 以增加焊缝中 Mg 元素含量, 提高焊缝金属凝固过程中的补缩能力, 防止热裂^[16-17]. 采用 ER5356 焊丝焊接得到的焊缝通常由靠近熔合线的柱状晶区和焊缝中心的等轴枝晶区组成, 柱状晶区的宽度通常大于 100 μm , 同时,

焊缝的枝晶较为粗大, 可达 100 μm 及以上^[16]. 而文中采用含有 TiC 纳米颗粒的焊丝焊接 7075 铝合金, 焊缝中心和靠近熔合线区域均为细小的等轴晶组织, 平均晶粒尺寸仅为 12 μm 左右, 仅在靠近熔合线处存在一层柱状晶, 宽度为 20 μm . 表明纳米颗粒的引入对焊缝组织产生了显著的细化作用, 并促进了柱状晶向等轴晶的转变. 凝固过程中, 纳米颗粒的存在为晶粒提供了异质形核率点, 可以促进焊缝金属的异质形核. 此外, 纳米颗粒会被推移到凝固界面前沿, 减慢晶粒的生长速度. 因此, 纳米颗粒促进了柱状晶向等轴晶转变以及晶粒细化. 晶粒的等轴化和细化有利于抑制凝固热裂^[4,18]. 对于粗大树枝晶, 凝固过程中会在枝晶间形成长的熔体流动通道. 随着凝固过程的进行, 枝晶不断形成, 熔体

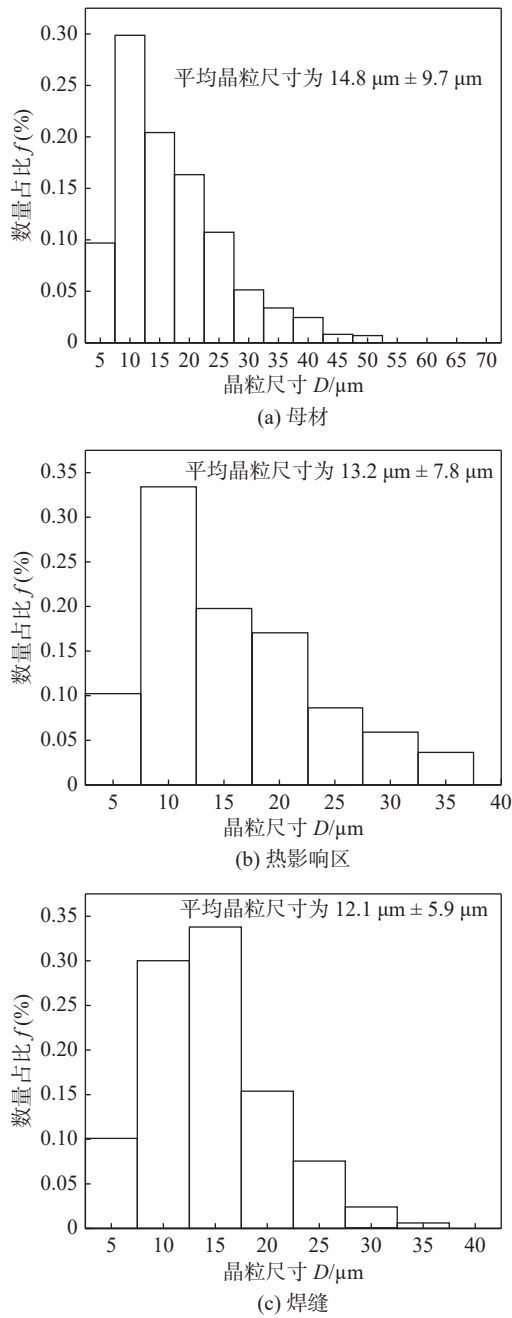


图 7 焊态接头不同区域晶粒尺寸分布

Fig. 7 Grain size distribution of different regions of the as-welded joint. (a) base metal; (b) heat-affected zone; (c) weld metal

的体积分数随之减小, 长的熔体通道易被新形成的枝晶堵塞或隔断, 导致熔体凝固时难以进行补缩, 从而产生热裂^[19-20]. 相反, 对于细小等轴晶, 熔体通道短, 且可从多个方向进行补缩, 从而抑制了热裂纹的形成.

7075 为典型的热处理强化型铝合金, 在熔化焊接过程中, 焊缝和热影响区的析出强化相常发生溶解或者粗化, 导致析出相的强化效果较低, 从而使接头性能明显低于母材强度^[12, 21-22]. 为了进一步提

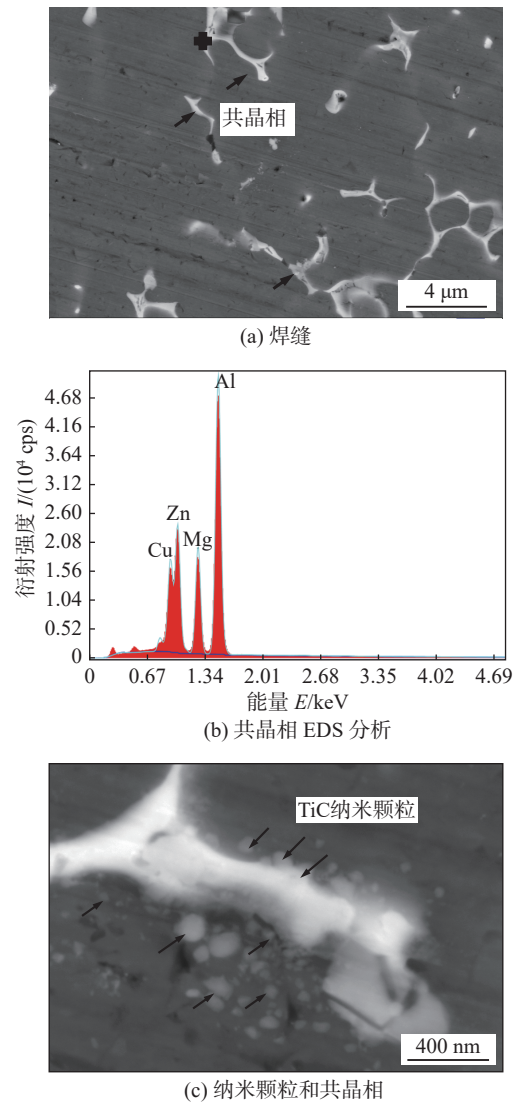


图 8 焊态接头焊缝 SEM 分析

Fig. 8 Weld metal in the as-welded joint SEM analysis. (a) weld metal; (b) eutectic phase EDS analysis; (c) nanoparticles and eutectic phase

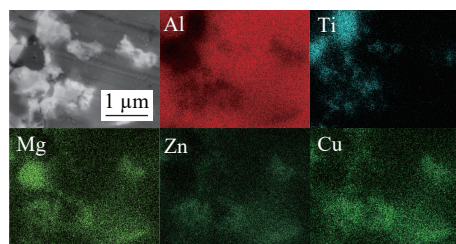


图 9 焊态接头焊缝区域元素分布

Fig. 9 Element distribution of the weld metal in the as-welded joint

高接头强度, 缓解接头在焊接过程中的软化现象, 对焊态接头进行 T6 处理. 图 10 为 T6 处理后焊缝的 SEM 观察结果, 图 10(a) 中热处理后晶界上的共晶相发生溶解, 少量的含 Fe 的第二相保留在晶界上. 同时晶界上形成了少量的亚微米级析出相. 纳米颗粒仍分布在晶界上, 由图 10(b) 中在晶界上富

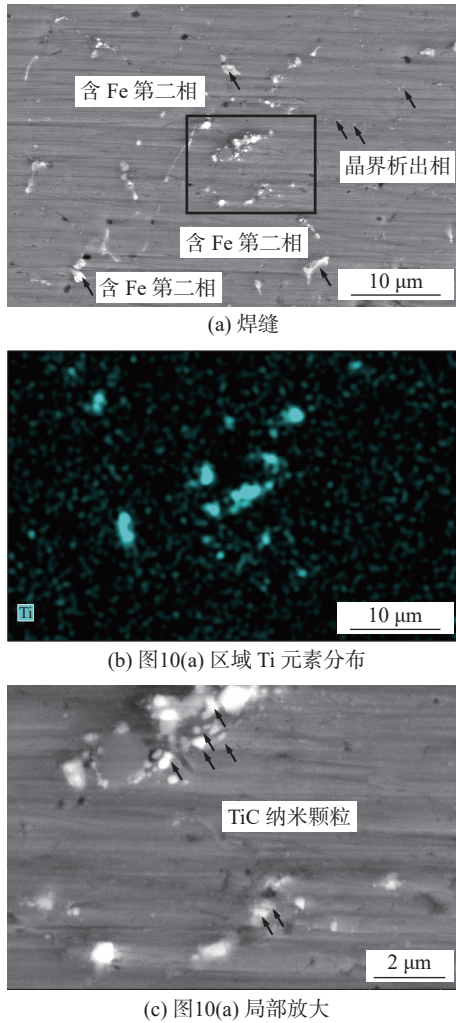


图 10 T6 处理后焊缝 SEM 分析

Fig. 10 Weld metal SEM analysis after T6 treatment. (a) weld metal; (b) Ti element distribution of local region in Fig.10(a); (c) high magnification micro-structure morphology of local region in Fig.10(a)

集的 Ti 元素可以证实. 图 10(c) 中纳米颗粒分散良好, 并未产生团聚.

图 11 ~ 图 13 为 T6 处理后接头不同区域的 EBSD 分析. T6 处理后母材和焊缝中的平均晶粒尺寸分别为 $16.5 \mu\text{m} \pm 9.1 \mu\text{m}$ 、 $13.7 \mu\text{m} \pm 8.0 \mu\text{m}$ 和

$12.6 \mu\text{m} \pm 5.9 \mu\text{m}$. 与焊态相比, 接头各区域晶粒尺寸并未发生明显变化. 如前文所述, 在母材和热影响区中存在与 RD 平行的呈条带状分布的第二相, 第二相在固溶过程中并未发生溶解, 仍保留在 T6 处理后的组织中, 即图 11(a) 和图 11(b) 中黑色的未解析点. 在热处理过程中第二相抑制了晶界的移动, 从而抑制了晶粒的长大. 在焊缝中, 沿晶界分布的纳米颗粒对晶粒的长大有强烈的抑制作用. 同时, 母材和热影响区仍保留有变形结构, 并且织构强度与焊态相比未发生明显变化, 焊缝中的晶粒仍然保持无取向的状态.

2.2 复合焊接头强韧化机理

对焊态和 T6 处理后的接头进行室温拉伸性能测试, 代表性应力—应变曲线和断裂位置, 如图 14 所示. 焊态接头的抗拉强度和屈服强度分别为 $404 \text{ MPa} \pm 2.8 \text{ MPa}$ 和 $360.5 \text{ MPa} \pm 0.7 \text{ MPa}$, 断后伸长率为 $1.5\% \pm 0.14\%$, 焊态接头在焊缝处发生断裂. T6 处理显著提高了接头的力学性能, 抗拉强度和屈服强度分别为 $529.5 \text{ MPa} \pm 20.5 \text{ MPa}$ 和 $462.5 \text{ MPa} \pm 3.5 \text{ MPa}$, 断后伸长率为 $5.1\% \pm 2.5\%$, T6 处理接头拉伸试样在母材处发生断裂. 与焊态相比, T6 处理后接头抗拉强度、屈服强度和断后伸长率均明显提升, 提升幅度分别为 31%、28% 和 2.4 倍. 与文献 [18] 中使用 ER5356 焊丝进行焊接的焊态接头的性能相比, 采用纳米改性 Al-Zn-Mg-Cu 焊丝对 7075 铝合金焊接后, 接头的抗拉强度和屈服强度明显提高, 分别提高 21% (71 MPa) 和 18% (55 MPa), 两者断后伸长率相当, 均为 2% 左右. 接头强度提高的主要原因为加入纳米颗粒后, 焊缝由粗大的柱状晶和等轴枝晶全部转变为细小的等轴晶, 晶粒大幅细化, 细化的晶粒提升了焊缝的强度. 纳米颗粒自身的强化作用, 如

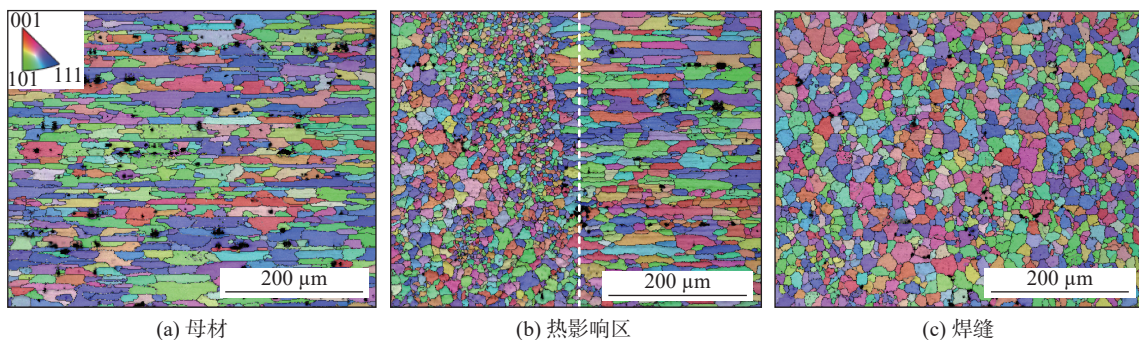


图 11 T6 态接头不同区域反极图

Fig. 11 Inverse pole figures of different regions of T6-treated joint. (a) base metal; (b) heat-affected zone; (c) weld metal

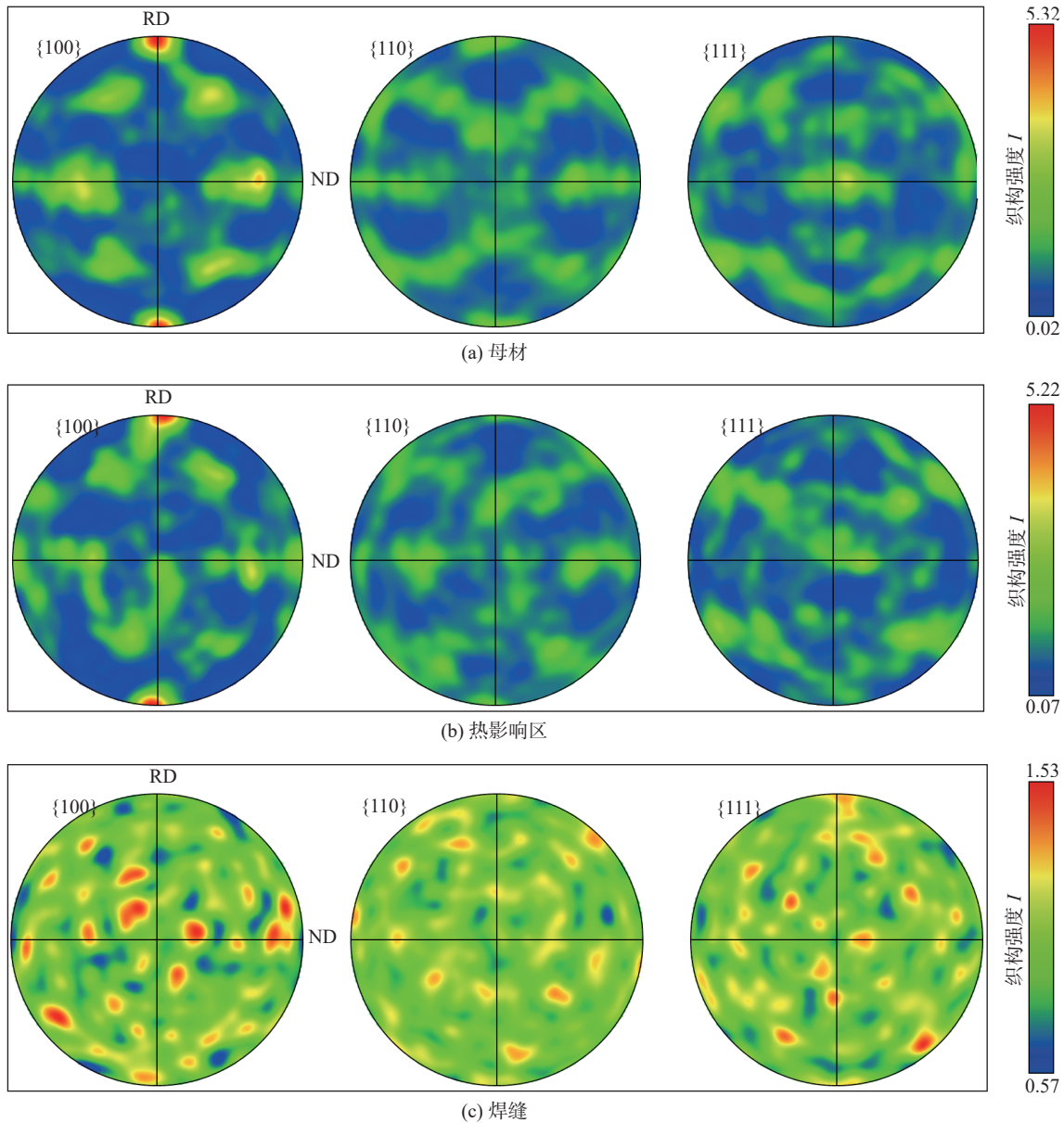


图 12 T6 处理接头不同区域极图

Fig. 12 Pole figures of different regions of T6-treated joint. (a) base metal; (b) heat-affected zone; (c) weld metal

Orowan 强化, 但由于大部分的纳米颗粒位于晶界上, 因此 Orowan 强化作用较弱. 焊态接头的断后伸长率较低, 这主要是焊缝中沿晶界形成了较多数量的亚微米和微米级共晶相, 塑性变形过程中, 位错容易在共晶相周围塞积, 引起应力集中, 从而降低材料的塑性. 搅拌摩擦焊技术被广泛应用于获得高热裂倾向的 7075 铝合金的具有优异性能的焊接接头^[23-24]. 搅拌摩擦焊属于固相焊接技术, 可以避免 7075 铝合金的熔焊热裂. 但搅拌摩擦焊技术的普适性较差, 难以应用于狭小空间焊接, 普适性远不如熔焊. 然而, 文中所获得的焊接接头经过 T6 处理后, 强度与文献 [25] 和文献 [26] 搅拌摩擦焊 T6 处理状态的接头强度相当. 因此, 采用纳米颗粒

辅助激光-MIG 复合焊方法可以获得高性能高强铝合金焊接接头, 可扩展高强铝合金的应用范围.

铝合金中常见的强化机制包括细晶强化、固溶强化、加工硬化和沉淀强化. T6 处理后, 接头的力学性能明显提高. 由文中 EBSD 结果可知, T6 处理之后, 接头各区域的晶粒尺寸都没有明显变化. 而且, 单纯的热处理难以在材料中引入大量位错. 并且, 大部分的合金元素, 在 T6 处理后将以析出相的形式存在于铝合金基体中. 因此, 结合文献 [27] 分析认为, 力学性能在 T6 处理后提高的主要原因为焊缝中形成的高密度细小 η' 相.

文中焊态接头断裂位置为焊缝, 因为母材中的析出相在激光-MIG 复合焊的过程中发生了溶解,

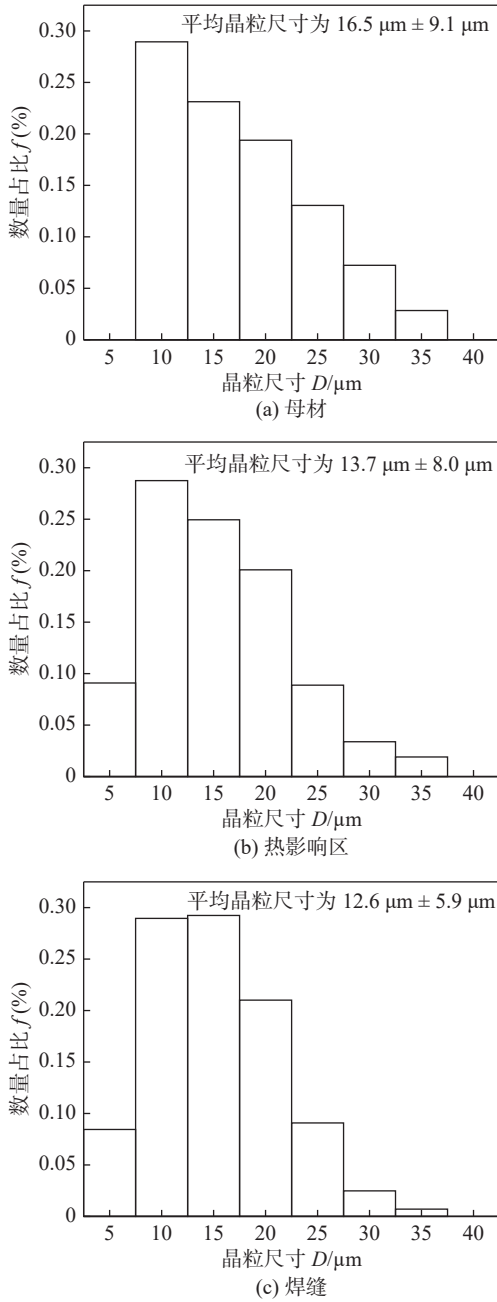


图 13 T6 处理接头晶粒尺寸分布

Fig. 13 Grain size distribution of the T6-treated joint. (a) base metal; (b) heat-affected zone; (c) weld metal

导致焊缝中析出相的强化作用减弱甚至消失. 虽然焊缝中引入的纳米颗粒及其引起的晶粒细化可以产生一定的强化作用, 但是强化作用仍弱于析出相溶解引起的强度下降. T6 处理接头的断裂位置为母材, 主要因为经过 T6 处理后, 析出相经历了重新溶解和再析出的过程, 接头各区域析出相的强化作用又可以重新发挥. 但焊缝中的晶粒尺寸略小于热影响区和母材, 同时纳米颗粒本身也能发挥一定的强化作用, 因此导致焊缝的总体强度高于热影响区和母材. 此外, 在母材中存在沿 RD 排布的条带状

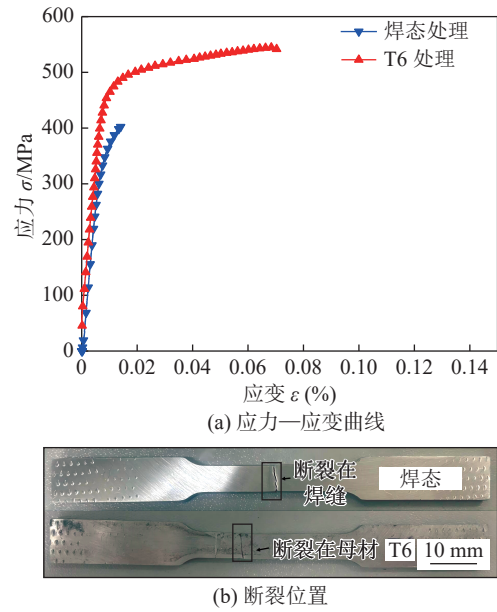


图 14 不同状态试样室温拉伸性能

Fig. 14 Different states samples tensile properties at room temperature. (a) stress-strain curves; (b) fracture locations

第二相, 在塑性变形过程中, 位错容易在此位置塞积并发生断裂.

焊态接头的拉伸断口 SEM 结果, 如图 15 所示. 图 15(a) 和图 15(b) 中焊态试样的断口中存在微小的等轴状韧窝, 直径约为 $2 \sim 3 \mu\text{m}$, 但韧窝数量较少. 同时在断口表面存在共晶相, 如图 15(b) 所示. 虽然在焊态接头中存在尺寸较小的等轴韧窝, 但是断口中的共晶相的存在表明, 焊态接头的断裂模式为沿晶脆性断裂, 主要是在晶界上呈半连续分布的共晶相导致的. 焊缝中的气孔也在一定程度上降低了接头的断后伸长率. 在 T6 处理接头中, 断口存在大量的尺寸较小的等轴韧窝, 表明 T6 处理接头的断裂模式为韧性断裂. 同时, 在断口表面存在尺寸为 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 的第二相, EDS 结果表明, 第二相为 AlFeMn 相. 拉伸过程中, 在 AlFeMn 第二相附近应力集中, 导致微裂纹萌生, 并最终断裂.

通常使用 ER5356 等 5xxx 铝合金焊丝焊接 7075 高强铝合金, 但由于焊丝中合金元素含量远低于母材, 焊缝处硬度即使在经过焊后热处理, 依然远低于母材, 从而成为接头薄弱区域^[28]. 在纳米颗粒的辅助下, 与母材同成分或更高成分的 7xxx 铝合金焊丝可成功实现 7075 铝合金的激光-MIG 复合焊. 因此焊缝在经过热处理后可具有比母材更加优异的强度, 接头在焊态和热处理状态都具有优异的强度, 可改善 7075 铝合金接头的软化现象.

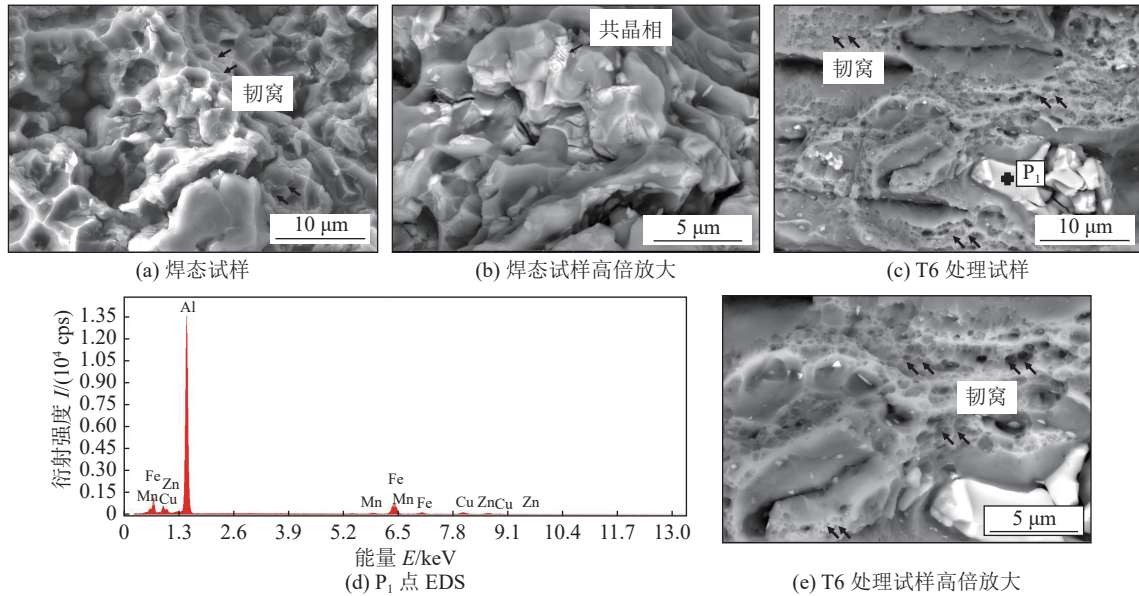


图 15 不同状态室温拉伸试样断口显微形貌

Fig. 15 Tensile samples fractures microstructure morphology in different states at room temperature. (a) as-welded samples; (b) as-welded tensile fracture at high magnification; (c) T6-treated samples; (d) EDS results of P₁; (e) T6-treated tensile fracture at high magnification

3 结论

(1) TiC 纳米颗粒的加入促进了 7075 铝合金激光-MIG 复合焊头中柱状晶向等轴晶的转变, 细化了焊缝中的晶粒和第二相, 实现了 7075 铝合金无热裂激光-MIG 复合焊。

(2) 焊态接头抗拉强度和屈服强度分别为 $404 \text{ MPa} \pm 2.8 \text{ MPa}$ 和 $360.5 \text{ MPa} \pm 0.7 \text{ MPa}$, 断后伸长率为 $1.5\% \pm 0.14\%$ 。焊缝硬度最低, 为接头性能薄弱区域。

(3) T6 处理显著提高了焊态接头的力学性能, T6 处理后接头强度为 $529.5 \text{ MPa} \pm 20.5 \text{ MPa}$ 和 $462.5 \text{ MPa} \pm 3.5 \text{ MPa}$, 断后伸长率为 $5.1\% \pm 2.5\%$, 主要强化机制为析出强化。

参考文献

[1] 刘洪旭, 刘峰, 赵琳, 等. 7xxx 系铝合金焊接技术研究进展 [J]. 热加工工艺, 2024, 53(7): 1-6.
LIU Hongxu, LIU Feng, ZHAO Lin, *et al.* Research progress on welding technology of 7xxx series aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2024, 53(7): 1-6.

[2] 王龙权, 尹天天, 张岩, 等. 7xxx 高强铝合金熔化焊研究进展 [J]. 焊接, 2023(8): 44-54.
WANG Longquan, YIN Tian, ZHANG Yan, *et al.* Research pro-

gress of fusion welding of 7xxx high-strength aluminum alloy melting[J]. Welding & Joining, 2023(8): 44-54.

[3] MA G Y, YUE K J, LIU D H, *et al.* Cracking susceptibility control of 7075 aluminum alloy in pulsed laser welding with filler strip[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 152: 108119.

[4] NOROUZIAN M, ELAHI M A, PLAPPER P. A review: suppression of the solidification cracks in the laser welding process by controlling the grain structure and chemical compositions[J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2023, 7: 100139.

[5] TANG Z, VOLLERTSEN F. Influence of grain refinement on hot cracking in laser welding of aluminum[J]. Welding in the World, 2014, 58: 355-366.

[6] JANAKIRAM G D, MITRA T K, SHANKAR V, *et al.* Microstructural refinement through inoculation of type 7020 Al-Zn-Mg alloy welds and its effect on hot cracking and tensile properties[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142(1): 174-181.

[7] 占小红, 李悦, 赵艳秋, 等. 纳米颗粒对 2195 铝锂合金激光焊微观组织的影响 [J]. 中国激光, 2023, 50(12): 1-9.
ZHAN Xiaohong, LI Yue, ZHAO Yanqiu, *et al.* Influence of nanoparticles on laser weld microstructure of 2195 Al-Li alloy[J]. Chinese Journal of lasers, 2023, 50(12): 1-9.

[8] ZHAO K, GAO T, *et al.* Enhanced grain refinement and mechanical properties of a high-strength Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy induced by TiC nano-particles[J]. Materials Science & Engineering A, 2021, 806: 140852.

[9] 罗震, 苏杰, 王小华, 等. 激光-电弧复合焊接铝合金的研究进展分析 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2024, 52(3): 57-74.

- LUO Zhen, SU Jie, WANG Xiaohua, *et al.* Research progress analysis of laser-arc hybrid welding of aluminum alloys[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2024, 52(3): 57 – 74.
- [10] 王晓南, 陈夏明, 环鹏程, 等. 新能源汽车用铝合金激光-电弧复合焊接研究进展 [J]. 中国激光, 2024, 51(4): 23 – 40.
- WANG Xiaonan, CHEN Xiaming, HUAN Pengcheng, *et al.* Review of laser-arc hybrid welding process of aluminum alloys for new energy vehicles[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(4): 23 – 40.
- [11] WANG Z J, ZHANG Z D, LANG Q, *et al.* Microstructure evolution and deformation behavior of TIG welded 7075-T6 aluminum alloy followed by partial hot rolling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 94: 524 – 538.
- [12] SUCKOW T, VOLKERS S, OCAL E B, *et al.* Effect of shortened post weld heat treatment on the laser welded AA7075 alloy[J]. Metals, 2022, 12(3): 393.
- [13] CHEN J W, SONG G, ZHANG X S, *et al.* Review of techniques for improvement of softening behavior of age-hardening aluminum alloy welded joints[J]. Materials, 2021, 14(19): 5804.
- [14] ZHAN X H, ZHAO Y Q, LIU Z M, *et al.* Microstructure and porosity characteristics of 5A06 aluminum alloy joints using laser-MIG hybrid welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35: 437 – 445.
- [15] 胡雅楠, 吴圣川, 张思齐, 等. 基于三维 X 射线成像的激光复合焊接 7020 铝合金的组织与力学特性演变 [J]. 中国激光, 2016, 43(1): 78 – 86.
- HU Yanan, WU Shengchuan, ZHANG Siqi, *et al.* Three-dimensional X-ray micro-tomography based microstructure and mechanical performance of hybrid laser welded AA7020[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 78 – 86.
- [16] LIU J T, ZHANG Y A, LI X W, *et al.* Phases and microstructures of high Zn-containing Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Rare Metals, 2016, 35(5): 380 – 384.
- [17] WU S C, HU Y N, SONG X P, *et al.* On the microstructural and mechanical characterization of hybrid laser-welded Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(4): 1540 – 1550.
- [18] MARTIN J H, YAHATA B D, HUNDLEY J M, *et al.* 3D printing of high-strength aluminium alloys[J]. Nature, 2017, 549(7672): 365 – 369.
- [19] CONIGLIO N, CROSS C E. Initiation and growth mechanisms for weld solidification cracking[J]. International Materials Reviews, 2013, 58(7): 375 – 397.
- [20] RAPPAZ M, DREZET J M, GREMAUD M. A new hot-tearing criterion[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30: 449 – 455.
- [21] YE Z, ZHU H Y, WANG S F, *et al.* Fabricate high-strength 7075 aluminum alloy joint through double pulse MIG welding process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 125: 512 – 522.
- [22] ZHANG K, CHEN J Q, MA P Z, *et al.* Effect of welding thermal cycle on microstructural evolution of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 717: 85 – 94.
- [23] DIMOPOULOS A, VAIRIS A, VIDAKIS N, *et al.* On the friction stir welding of Al 7075 thin sheets[J]. Metals, 2021, 11(1): 57.
- [24] MEHRI A, ABDOLLAH-ZADEH A, ENTESARI S, *et al.* The effects of friction stir welding on microstructure and formability of 7075-T6 sheet[J]. Results in Engineering, 2023, 18: 101041.
- [25] SIVARAJ P, SEEMAN M, SEETHARAMAN R, *et al.* Fracture toughness properties and characteristics of friction stir welded high strength aluminum alloy by post weld heat treatment (PWHT)[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 43(2): 2150 – 2155.
- [26] 晏小龙, 朱海, 李砚峰, 等. 固溶时效处理对不同状态 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头组织和力学性能的影响 [J]. 林业机械与木工设备, 2024, 52(5): 28 – 32.
- YAN Xiaolong, ZHU Hai, LI Yanfeng, *et al.* Influence of solutionizing and aging treatment on the microstructure and mechanical properties of AA7075 friction stir welded joints in different conditions[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2024, 52(5): 28 – 32.
- [27] ZHOU Y, WU X D, TANG S B, *et al.* Investigation on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys with various Zn/Mg ratios[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 85: 106 – 117.
- [28] 王晨阳, 刘骁, 李小平, 等. ER5356 焊丝用于 7075 铝合金 MIG 焊接头热处理性能 [J]. 材料工程, 2024, 52(3): 149 – 157.
- WANG Chenyang, LIU Xiao, LI Xiaoping, *et al.* Heat treatment performance of ER5356 welding wire for MIG welding joint of 7075 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(3): 149 – 157.

作者简介: 刘伟清, 博士, 硕士研究生导师; 主要研究方向轻金属焊接及增材制造; Email: weiqingliuhit@163.com.
罗子艺 (通信作者), 硕士, 正高级工程师; Email: luozy@gwi.gd.cn.

(编辑: 汤明日)