文章编号：1005-0523(2025)01-0113-07

# 焊接填料中Ti对$SiC_p$/6061Al激光填粉焊接头的影响

赵明娟[1,3]，王高昱[1,3]，赵龙志[1,2,3]，李宇欣[1]，于泓冰[3]，张钦文[3]，穆晨鹏[3]

（1. 华东交通大学载运工具先进材料与激光增材制造南昌市重点实验室，江西 南昌 330013；2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室，江西 南昌 330013；3. 华东交通大学材料科学与工程学院，江西 南昌 330013）

**摘要：**铝基复合材料是一类优良的结构材料，但该材料焊接性较差，提高铝基复合材料焊接接头性能具有重要意义。在$SiC_p$/6061Al复合材料激光填粉焊接过程中，向CoCrNi增强AlSi12填料中添加Ti，研究Ti对焊接接头的影响。结果表明：Ti均匀分布在焊缝中，并在CoCrNi相周围形成$TiNi_3$相，CoCrNi相由粗大的树枝状转变成细小的三角形状，形成了固溶强化、弥散强化和细晶强化。焊接接头熔合区界面清晰，界面没有反应物生成，形成了良好的物理冶金结合界面。焊接填料中添加Ti后，焊缝硬度提高了30%，焊接接头的拉伸强度和延伸率同时上升。$SiC_p$/6061Al激光填粉焊接时，CoCrNi增强AlSi12的混合填料中添加Ti元素，可以有效改善焊接接头质量，提高力学性能。

**关键词：**$SiC_p$/6061Al；激光填粉焊接；Ti元素添加；焊接接头组织；力学性能

**中图分类号：**TG456.7; U465　　**文献标志码：**A

**本文引用格式：**赵明娟，王高昱，赵龙志，等. 焊接填料中Ti对$SiC_p$/6061Al激光填粉焊接头的影响[J]. 华东交通大学学报，2025，42(1)：113-119.

# Effect of Ti in the Welding Filler on Laser Powder-Filled Welded Joints of $SiC_p$/6061Al

Zhao Mingjuan[1,3], Wang Gaoyu[1,3], Zhao Longzhi[1,2,3], Li Yuxin[1], Yu Hongbing[3], Zhang Qinwen[3], Mu Chenpeng[3]

(1. Nanchang Key Laboratory of Advanced Materials and Laser Additive Manufacturing for Transport Vehicles, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013, China; 2. State Key Laboratory of Rail Transit Infrastructure Performance Monitoring and Guarantee, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. School of Materials Science and Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013, China)

**Abstract:** Aluminum matrix composites are a type of excellent structural material, however, their poor weldability necessitates significant improvements in joint properties. Ti was introduced into a CoCrNi-reinforced AlSi12 filler during laser powder-filled welding of $SiC_p$/6061Al composites to investigate its influence on the welded joints. The results show that the Ti is evenly distributed in the weld, and $TiNi_3$ phase is formed around the CoCrNi phase, Additionally, the CoCrNi phase changes from the coarse dendritic shape to the fine triangular shape, contributing to solid solution strengthening, dispersion strengthening, and fine grain strengthening. The interface of the fusion zone of the welded joint was clear, with no reaction products generated at the interface,

**收稿日期：**2024-05-14

**基金项目：**国家自然科学基金项目（51965022）

forming a good physical metallurgical interface. After adding Ti to the welding filler, the weld hardness increased by 30%, and the tensile strength and extension of the welded joint increased at the same time. When performing $SiC_p$/6061Al laser filler welding, adding Ti to CoCrNi reinforced AlSi12 mixed filler can effectively improve the quality of welded joints and improve mechanical properties.

**Key words:** $SiC_p$/6061Al; laser welding with powder filling; Ti addition; welding joint organization; mechanical property

**Citation format:** ZHAO M J, WANG G Y, ZHAO L Z, et al. Effect of Ti in the welding filler on laser powder-filled welded joints of $SiC_p$/6061Al[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(1): 113−119.

$SiC_p$/Al复合材料是一类优良的结构材料，具有高比强度、高比刚度、优异的耐磨性和高温稳定性等特性，广泛应用于航空航天、汽车、造船、电子等领域[1-2]。但是$SiC_p$/Al复合材料中SiC增强体与基体之间的物理性能差异较大，且熔化焊接时SiC容易与基体发生反应，生成$Al_4C_3$脆性相，降低了复合材料的可焊性，限制了复合材料的应用。因此研究$SiC_p$/Al复合材料的焊接具有重要意义[3-4]。

近期研究发现，激光填粉焊接充分应用激光的高能量密度，可以降低焊接热输入，降低焊接母材中SiC增强体与Al基体的反应程度，可以最大限度减少焊接接头中的脆性相[5-7]；同时，该方法中的焊接填料粉末可设计性强，可以根据需要灵活改变粉末填料的成分，消除焊接熔池中脆性相的形成条件，进一步消除焊接接头中的脆性相，实现$SiC_p$/Al复合材料的高强焊接[8]。

目前，铝基复合材料激光填粉焊接的研究主要集中在焊接填料的成分优化和焊接界面的控制等方面。通过在焊接母材之间添加纯钛片、镍箔等容易与碳反应的活泼元素，减少碳与铝的反应，具有显著的效果，但是焊接接头受箔材本身强度的影响，焊接接头强度很难大幅度提高[9-11]。有必要对焊接填料进行合理设计，以提高复合材料焊接接头强度。

近年来，科学家研究发现，多主元高熵合金具有良好的高熵效应，可以有效抑制传统合金中化合物的生成[12]。因此，激光填粉焊接中对填料粉末进行多主元设计，有望抑制焊接中的金属间化合物脆性相的生成，同时提升焊接接头强度[13]。因此，本文在前期研究基础上[14]，充分利用AlSi12共晶合金液态良好的流动性，提出以10%CoCrNi增强体AlSi12混合粉末为主要填料，同时添加Ti元素，实现填料的多主元设计，研究填料中Ti元素添加对焊接接头的影响。

## 1 材料与方法

试验焊接填料主要为CoCrNi和AlSi12混合粉末，其中CoCrNi质量分数为10%，粉末粒径在−140目到+320目之间，并在此基础上向填料内添加Ti，Ti原子与CoCrNi的原子比为0.25，纯Ti粉末和CoCrNi粉末通过球磨混合，转速300 r/min，时间为3 h。最终将$CoCrNiTi_{0.25}$和AlSi12通过V形自动混料机混合而成，混料速率为100 r/min，混合时间为2 h。焊接母材$SiC_p$/6061Al复合材料板材，其中$SiC_p$增强体体积分数为17%，母材尺寸为50 mm×20 mm×2 mm，铝基复合材料基体化学成分如表1所示，板材焊接坡口角度为30°。焊前处理包括母材表面及坡口的砂纸打磨、丙酮擦拭、酒精溶液超声清洗。采用长沙天辰激光有限公司生产的激光焊接机器人进行焊接，焊接参数选择功率为1 400 W，焊接速度为3 mm/min，送粉速率为15 g/min，离焦距离30 mm。为了减少母材和焊接填料的氧化，在焊接中采用氩气对激光头部位、送粉过程及固定基板底部等进行全方位保护。

**表1 母材基体化学成分（质量分数/%）**

**Tab.1 Chemical composition of matrix in base materials (mass fraction/%)**

| Si | Mg | Cu | Cr | Mn | Zn | C | Fe | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.3~0.7 | 0.8~1.3 | 0.2~0.4 | 0.07~0.35 | 0.25 | 0.25 | 0.15 | 0.7 | 余量 |

采用线切割沿垂直焊接方向切取8 mm×10 mm×2 mm的金相试样，经研磨、抛光后在蔡司金相显微镜下观察其微观组织，使用维氏硬度计测试焊接接头硬度，载荷为200 g，保压时间为10 s。焊接接头的微观形貌通过日立SU8010型场发射扫描电子显微镜观察分析，拉伸试验在68TM-50型万能力学试验机上进行，拉伸速度为1 mm/min。使用岛津XRD-6100衍射仪器进行XRD物相分析，扫描角度范围为20°~80°，扫描速度为1°/min。

## 2　结果与讨论

### 2.1　组织形貌

图1为焊接接头宏观形貌。从图中可以看出，焊接接头可以分成焊缝区、熔合界面区、母材微熔半固态区、热影响区。与传统的焊接相比，本研究焊接接头热影响区为母材基体铝合金微熔热影响区，这主要和激光填粉焊接的工艺特性有关。实验采用离焦法焊接，利用激光能量的高斯分布特点，使激光能量主要集中在焊接填料和坡口表面，同时使少部分能量作用于母材，从而使焊接过程中填料完全熔化，母材的基体铝合金微熔，但SiC增强体保持固态。母材的基体铝合金微熔，有效保障了焊缝填料和基体融为一体，实现了良好的熔合区界面结合。同时母材中SiC增强体完整性的保持，有效阻碍了SiC与铝合金的化学反应，避免了脆性相的产生，可以提升焊接接头质量。焊接头填料添加Ti时，焊接接头基本没有气孔等焊接缺陷，焊接熔合区界面清晰光滑，焊接接头质量较好。

图2为焊缝的微观组织，从图中可以看出添加Ti以后，焊缝组织中粗大的CoCrNi枝晶逐渐变成细小的三角形颗粒。这是由于焊接填料中Ti的存

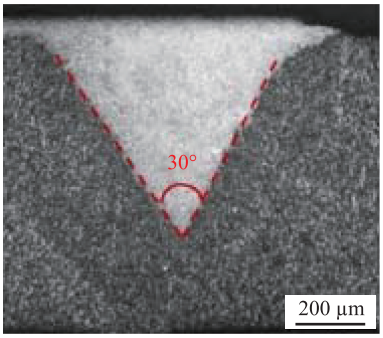


**图1　焊接填料添加Ti元素时焊接接头宏观形貌**
**Fig. 1　Macroscopic morphology of the welded joint when the filler was added with Ti**

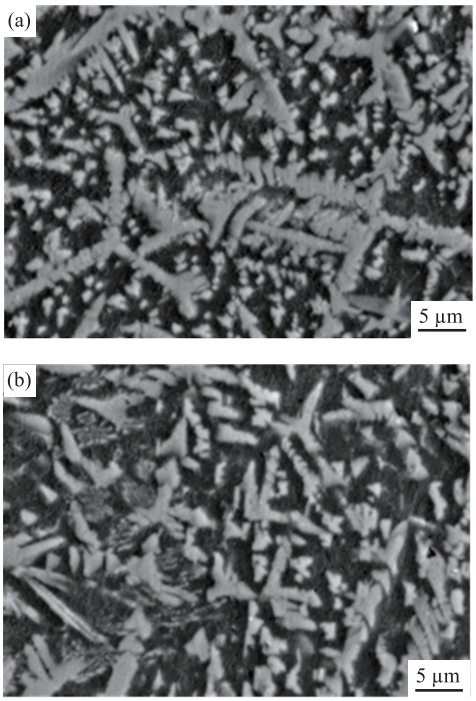


**图2　焊缝组织(a)不添加Ti;(b)添加Ti**
**Fig. 2　Weld microstructure (a) without Ti; (b) Ti**

在改变了凝固条件，Ti与焊接填料中的Ni元素之间具有较小的混合焓，且绝对值较大，因此Ti原子与Ni原子之间具有较大的结合力，从而导致Ti与Ni原子容易形成Ti-Ni富聚相$TiNi_3$(图3)。根据焊缝面扫描可知(图4)，焊缝中Ti分布均匀，CoCrNi聚集形成三角形状颗粒，同时Ti-Ni相分布在CoCrNi相周围，增加了CoCrNi相周围的温度均匀性，降低了该相周围的温度梯度，从而降低了形成树枝晶的概率。另外，Ti-Ni相属于金属间化合物有序相，先于CoCrNi相形成，在液相中优先形成固态颗粒，这

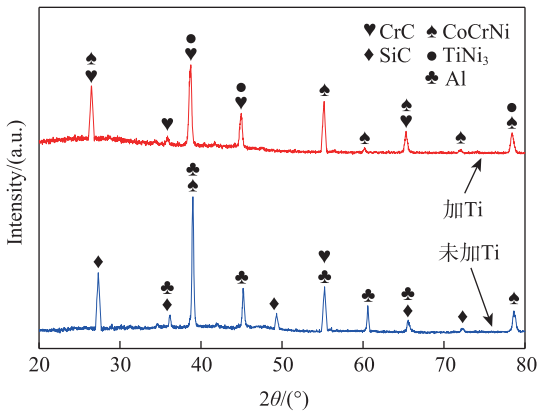


**图3　焊缝中心X射线衍射图**
**Fig. 3　X-ray diffraction pattern of welding seam center**

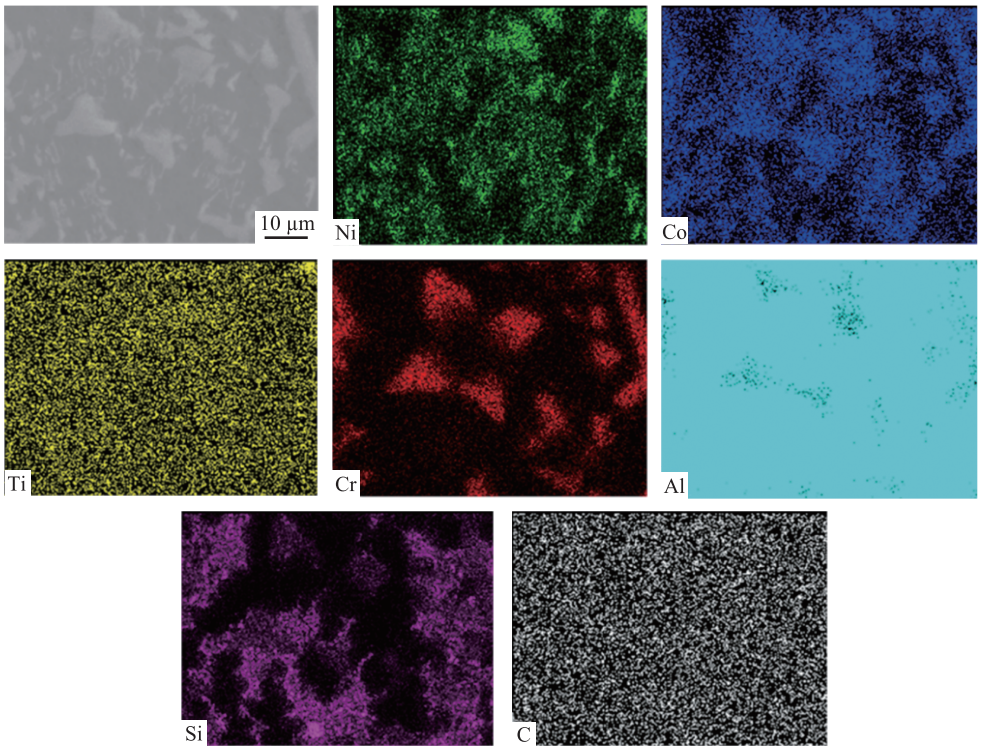


**图4 焊缝填料添加Ti元素的焊缝面扫描**

**Fig. 4 Weld surface scanning with Ti added to the weld filler**

些固态相在主要分布在CoCrNi相附近，减少了原子扩散通道，阻碍了CoCrNi相长大，形成钉扎效应，所以焊缝中添加Ti以后，CoCrNi相有利于形成尺寸稍小的三角形颗粒，有利于获得高性能焊接接头。

图5为焊缝填料添加Ti元素的焊接接头界面及元素线扫描，从图中可以看出，焊接接头的母材坡口表面材料与焊缝填料均实现了熔化，母材和填料形成了良好的冶金结合，确保焊接接头具有良好的性能。同时，在界面附近没有针状的$Al_4C_3$脆性相生成，进一步提高了焊接接头的力学性能。激光在离焦状态下，激光中心的能量主要作用于焊缝填料，使填料熔化并有效地填充焊缝。由于激光能量符合高斯分布特征，即激光大部分能量集中在激光中心，沿着激光光斑直径的外围能量很低，因此在离焦状态下的激光光斑外围作用下的母材温度较低，该温度高于铝合金的熔化温度，低于铝合金与SiC的反应温度，所以坡口附近的母材中基体铝合金会部分熔化，与焊缝金属形成原子状态下的冶金结合，形成良好的物理界面。而且，界面处不会出现因反应导致的脆性相，保障了焊接接头性能。

从焊接接头界面处的线扫描（图5）可以看出，沿垂直于界面从母材向焊缝中心方向进行元素线扫描，Al，Si和C在母材一侧震荡均较大，Si和C变化趋势相似，Al变化趋势相反，在焊缝一侧Al仍然保持大幅度震荡，Si小幅震荡，Al和Si的变化趋势相同。这主要是因为在母材一侧材料的主要组成为铝合金基体和SiC增强体，电子束通过SiC颗粒时，Si和C为峰值，Al为波谷。相反，电子束通过铝合金时，Al为峰值，Si和C为波谷。在焊缝一侧，焊缝材料主要由AlSi12合金、CoCrNi和少量的Ti-Ni相构成。由于焊缝中的Al和Si均来自铝合金，因此焊缝一侧Al和Si的变化趋势均和铝硅合金保持一致，电子束通过铝合金时，Al和Si均表现为峰值。界面两侧，Co，Cr，Ni的均保持相同的振荡趋势，这主要是因为它们主要形成CoCrNi合金相，同时少量的Ni会与Ti形成Ti-Ni相，因此Ti的峰值会与Ni保持一致。另外，激光填粉焊接时，熔池会产生强烈的对流扩散，因此母材中的少量SiC会被卷入熔池中，导致焊缝中部分区域C浓度增加。同时，焊缝填料中Co，Cr和Ni也会扩散到母材坡口表层，从而使得在界面两侧均有Co，Cr，Ni峰值出

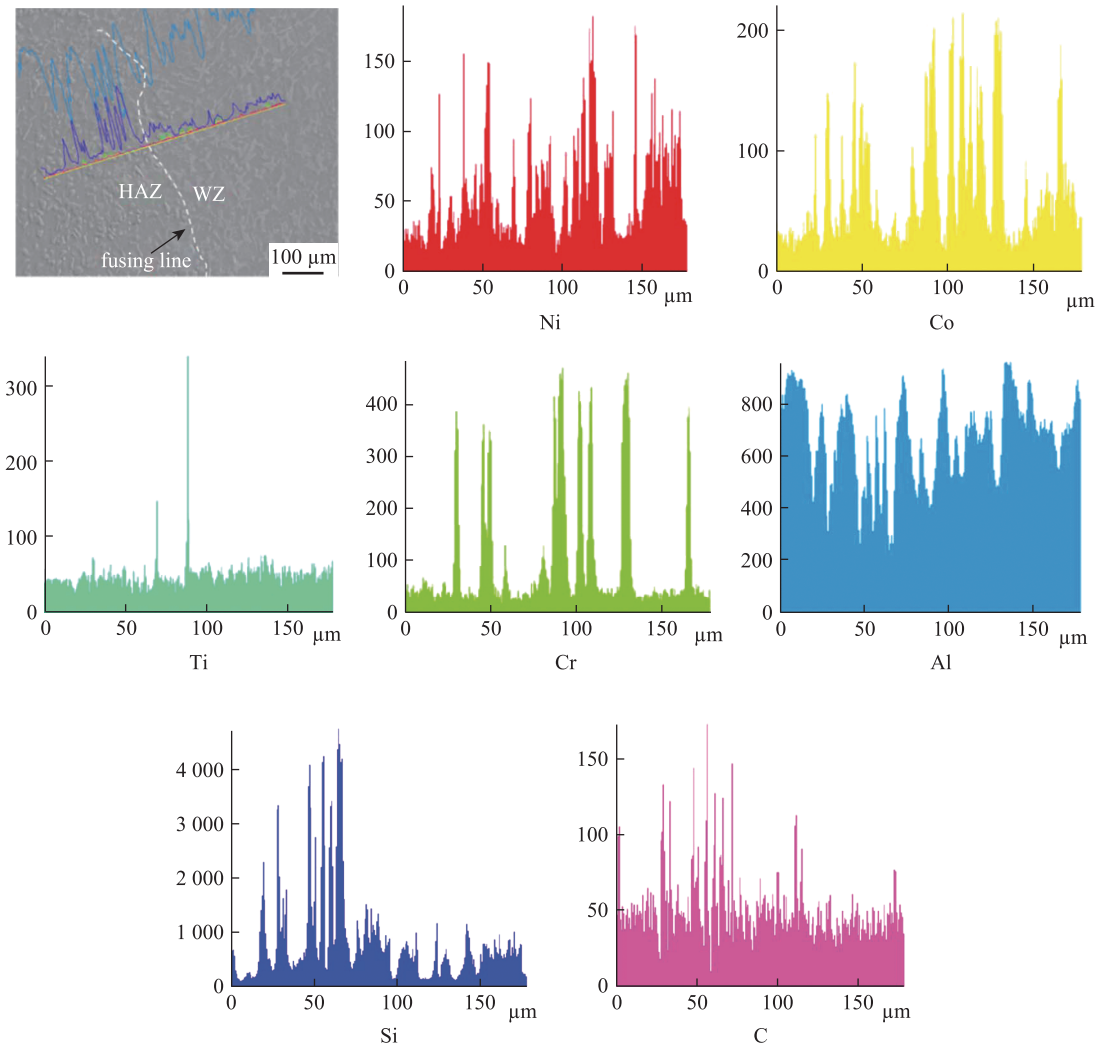


**图5　焊缝填料添加Ti元素的焊接接头界面处线扫描**

**Fig. 5　Line scanning at the interface of welded joint with Ti added to the weld filler**

现。综上所述，熔池的强烈对流和离焦激光能量的再分配，使得焊接接头具有良好的界面结合，同时又避免了脆性相生成，有效保障了焊接接头的力学性能。

## 2.2　焊接接头力学性能

图6为焊接接头显微硬度，从图中可以看出，焊缝填料中添加Ti可以使焊接接头焊缝处硬度大幅度增加，从370 HV增加到485 HV，增幅超过30%；母材热影响区部分的硬度基本没有变化。这主要和焊接接头的微观组织有关，在焊缝中添加Ti后，焊缝中的Ti主要以固溶的形式弥散分布在焊缝中，形成了良好的固溶强化；同时由于Ti与Ni亲和力比较强，一部分Ti与Ni形成了$TiNi_3$相，分布在CoCrNi相附近，形成了良好的弥散强化，因此焊缝中心的硬

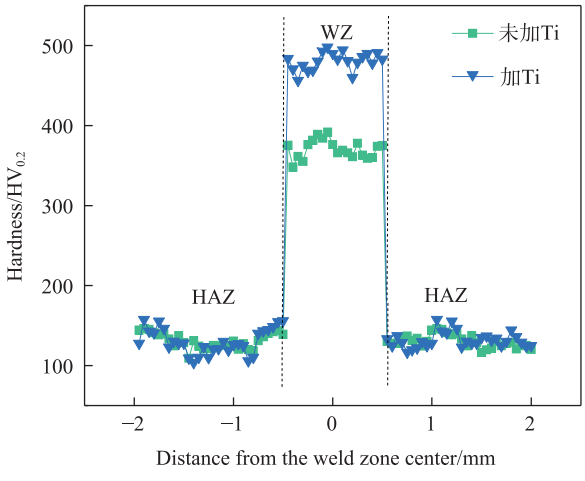


**图6　焊接接头显微硬度**

**Fig. 6　Microhardness of welded joints**

度显著增加。焊接接头母材热影响区部分焊接过程中处于固态，焊缝成分对该区域的成分和组织影响较小，因此热影响区组织没有变化，硬度基本保持不变。

图7为焊接接头的拉伸性能，从图中可以看出，焊缝中添加Ti后，焊接接头的拉伸强度和延伸率均上升。焊接接头的力学性能主要决定于焊接接头的组织形貌，在铝基复合材料的焊接接头中，焊缝成分的变化对母材热影响区的作用较小，热影响区的组织几乎保持不变，因此焊缝填料成分变化时，热影响区对焊接接头拉伸性能的作用可以忽略不计。另外，在焊接填料成分不同时，焊接接头的熔合区界面均没有发生明显的界面反应，且焊接过程中坡口表层母材发生了局部熔化，熔合区界面为典型的物理冶金结合，焊接熔池的对流扩散对界面影响不大。因此，铝基复合材料焊接接头力学性能主要取决于焊接接头中焊缝的组织。焊接填料中添加Ti后，焊缝组织中存在Ti原子的固溶强化、$TiNi_3$金属间化合物的弥散强化和CoCrNi相的细晶强化，其中固溶强化和弥散强化都会使焊接接头强度上升、延伸率下降，只有细晶强化可以同时提高强度和延伸率，因此焊接接头中细晶强化起主要作用，焊接接头的拉伸强度和延伸率同时上升。

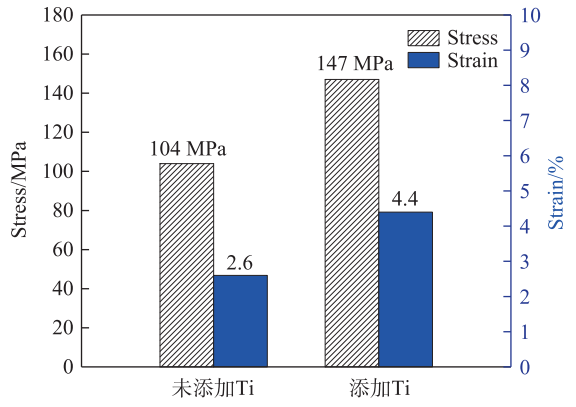


**图7 焊接接头的拉伸性能**

**Fig. 7 Tensile performance of welded joints**

## 3 结论

在$SiC_p$/6061Al复合材料的激光填粉焊接时，在焊缝填料CoCrNi10%/AlSi12中添加Ti，获得良好的焊接接头，主要结论如下。

1）Ti均匀分布在焊缝中，并在CoCrNi相周围形成$TiNi_3$相，CoCrNi相由粗大的树枝状转变成细小的三角形状，形成了固溶强化、弥散强化和细晶强化。

2）焊接接头熔合区界面清晰，界面没有反应物生成，形成了良好的物理冶金结合界面。

3）焊接填料中添加Ti后，焊缝硬度提高了30%，焊接接头的拉伸强度和延伸率同时上升，强化机制主要为细晶强化。

**参考文献：**

[1] SENTHIL S, RAGURAMAN M, THAMARAI MANALAN D. Manufacturing processes & recent applications of aluminum metal matrix composite materials: A review [J]. Materials Today: Proceedings. 2021, 45: 5934-5938.

[2] MOKTAR M S, GHANDVAR H, BAKAR T A. Development and Characterization of Aluminum Hybrid Metal Matrix Composites Used in Automotive Applications[M]. Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials. 2020, 54-63.

[3] 牛济泰, 程东锋, 高增, 等. SiC颗粒增强铝基复合材料的连接现状[J]. 焊接学报. 2019, 40(3): 155-160.
NIU J T, CHENG D F, GAO Z, et al. Reviews on welding method of SiC particle reinforced aluminum matrix composites[J]. Transactions of the China Welding Institution. 2019, 40(3): 155-160.

[4] 朱超, 马琳, 周长壮, 等. SiC颗粒增强铝基复合材料焊接研究现状[J]. 热加工工艺. 2021, 50(7): 1-6.
ZHU C, MA L, ZHOU C Z, et al. Research status of welding of SiC particle-reinforced aluminum matrix composites[J]. Hot Working Technology. 2021, 50(7): 1-6.

[5] 刘彦强, 马自力, 魏少华, 等. 硅颗粒增强铝基复合材料的制备与激光焊接行为[J]. 稀有金属. 2019, 43(12): 1251-1259.
LIU Y Q, MA Z L, WEI S H, et al. Fabrication and laser-beam welding behavior of silicon particle reinforced al matrix composites[J]. Chinese Journal of Rare Metals. 2019, 43(12): 1251-1259.

[6] 张恒泉. $Si_p$/6063铝基复合材料激光熔化沉积连接特性与组织性能调控[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
ZHANG H Q. Research on joining characteristics and property control of $Si_p$/6063 amc with laser melting deposited method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[7] KHODABAKHSHI F, GERLICH A P. On the stability,

microstructure, and mechanical property of powder metallurgy Al-SiC nanocomposites during similar and dissimilar laser welding[J]. Materials Science and Engineering: A. 2019, 759: 688-702.

[8] TAO W, LI L Q, WANG Y S, et al. Study on welding process and microstructure of laser welding high volume fraction $SiC_p$/2024Al matrix composite with Ti-6Al-4V filler[J]. Materials Science, Engineering, 2012, 39(1): 104-108.

[9] 曹雪龙, 王刚, 邢昌, 等. 铜/镍箔中间层对铝/钢激光焊接接头组织与力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2020, 40(2): 70-78.
CAO X L, WANG G, XING C, et al. Effect of Cu/Ni foil interlayer on microstructure and mechanical properties of laser welded aluminum/steel joints[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(2): 70-78.

[10] 张建, 罗国强, 沈强, 等. 添加Ni箔中间层的Mg-Al扩散焊接接头界面结构和力学性能[J]. 材料工程, 2015, 43(1): 13-17.
ZHANG J, LUO G Q, SHEN Q, et al. Interfacial structure and mechanical properties of Mg-Al diffusion bonded joint with Ni foil interlayer[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(1): 13-17.

[11] WANG F, WANG S T, CHEN B H, et al. Effect of Ti addition on the microstructure and mechanical properties of Al-SiC composite joints welded by friction stir welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(7): 1175-1181.

[12] 余倩, 陈雨洁, 方研. 高熵合金中的元素分布规律及其作用[J]. 金属学报, 2021, 57(4): 393-402.
YU Q, CHEN Y J, FANG Y. Heterogeneity in chemical distribution and its impact in high-entropy alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(4): 393-402.

[13] 周正, 丁云龙, 孙岩, 等. 镁/铝异种金属焊接技术的研究进展[J]. 焊接, 2024(12): 33-46.
ZHOU Z, DING Y L, SUN Y, et al. Research progress on welding technology of Mg/Al dissimilar metal[J]. Welding & Joining, 2024(12): 33-46.

[14] 赵明娟, 程梓威, 赵龙志, 等. Ti5Si3含量对$SiC_p$/2009Al激光填粉焊接头组织性能的影响[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(6): 79-85.
ZHAO M J, CHENG Z W, ZHAO L Z, et al. Effect of Ti 5Si 3 content in filler powder on the microstructure and properties of $SiC_p$/2009Al laser filler welding joint[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(6): 79-85.

**通信作者**：赵明娟(1976—)，女，教授，研究方向为金属基复合材料。E-mail：zhaomingjuan100@163.com。

（责任编辑：李根）