

引用格式:康豪,张杨,张宁,等.焊接电流及焊后热处理对 7075 铝合金 TIG 焊接接头微观组织和力学性能的影响[J].热加工工艺,2026,55(8):204-209+215. KANG Hao, ZHANG Yang, ZHANG Ning, et al. Effect of Welding Current and Post-welding Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of 7075 Aluminum Alloy TIG Welded Joint [J]. Hot Working Technology, 2026, 55 (8): 204-209+215.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20232937

焊接电流及焊后热处理对 7075 铝合金 TIG 焊接接头微观组织和力学性能的影响

康豪,张杨,张宁,马克亮

(江苏理工学院 材料工程学院,江苏 常州 213001)

摘要:7XXX 系 Al-Zn-Mg-Cu 合金是一类广泛使用的高强铝合金材料,其焊接是工程应用中的关键问题。钨极氩弧焊(TIG)是铝合金电弧焊的主要方法,其中焊接电流是影响接头质量的重要因素。采用 TIG 焊接技术,以 ER5356 焊丝为填充材料,对 7075 铝合金板材进行对焊。研究不同焊接电流和焊后热处理对其焊接接头微观组织和力学性能的影响。结果表明,TIG 焊接接头热影响区和焊核区之间的过渡区较窄,没有形成明显的界面或夹杂富集;焊核区呈现出由 α -Al 等轴枝晶和晶间第二相组成的典型铸态凝固组织;随着焊接电流增大,焊核区的 α -Al 晶粒逐渐增大,Zn、Mg、Cu 元素含量均呈现先升后降的趋势。经过 $480\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+120\text{ }^{\circ}\text{C}\times 24\text{ h}$ 的焊后热处理,焊核区铸态凝固组织中的大部分粗大第二相消失,合金元素均匀分布, α -Al 晶粒没有明显粗化;热处理前后,接头的抗拉强度和断后伸长率均随焊接电流增大而先升高后降低,沉淀强化效应使热处理后这一趋势更加明显。

关键词:7075 铝合金;钨极氩弧焊(TIG);焊接电流;焊后热处理

中图分类号: TG457.14;TG156

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2026)08-0204-06

Effect of Welding Current and Post-welding Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of 7075 Aluminum Alloy TIG Welded Joint

KANG Hao, ZHANG Yang, ZHANG Ning, MA Keliang

(School of Materials Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: 7XXX Al-Zn-Mg-Cu alloys are a type of widely applied high strength aluminum alloys, and their welding is a critical challenge in engineering applications. Tungsten inert gas (TIG) welding is the main method of aluminum alloy arc welding, in which the welding current is an important factor affecting the quality of the joint. In this paper, butt welding tests were carried out on 7075 aluminum alloy plates by TIG welding with ER5356 welding wire as the filling material, and the microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy TIG welded joint welded at different welding current were studied, and the effects of different welding currents and post-welding heat treatment on the microstructure and mechanical properties of the welded joints were investigated. The results show that the transition zone between the heat-affected zone and the nugget zone of TIG welded joint is narrow, with no obvious interface or inclusion enrichment was formed. The nugget zone show a typical as-cast solidified structure, which consists of α -Al equiaxed dendrites and intercrystalline second phases. With the increase of welding current, the size of α -Al grains increase gradually, and the contents of Zn, Mg and Cu elements all increase first and then decrease. After the post-welding heat treatment at $480\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+120\text{ }^{\circ}\text{C}\times 24\text{ h}$, most of the coarse second phases disappear, the main alloying elements distribute uniformly, and the α -Al grains do not coarsen significantly. Before and after post-welding heat treatment, the tensile strength and elongation after fracture of 7075-T651 aluminum plate

TIG welded joint both increase first and then decrease with the increase of welding current, and this trend becomes more obvious after heat treatment due to precipitation strengthening.

Key words: 7075 aluminum alloy; tungsten inert gas (TIG) welding; welding current; post-welding heat treatment

以 7075 铝合金为代表的 Al-Zn-Mg-Cu 合金,是 20 世纪 40 年代伴随航空航天领域轻量化需求而

收稿日期:2023-12-11 修回日期:2025-08-19

基金项目:中国博士后科学基金面上资助项目(2019M650096);江苏省高等学校基础科学(自然科学)重大项目(21KJA430009);常州市科技支撑计划(社会发展)项目(CE20235041);江苏理工学院研究生实践创新计划项目(XSJCX23_75)

作者简介:康豪,男,硕士研究生,主要研究方向:铝合金电弧焊;

E-mail:hao1106308210@163.com

通讯作者:张杨,男,博士,主要研究方向:铝、镁合金;

E-mail:zhangyang@jst.edu.cn

产生的高强铝合金材料,由于其优异的强度、韧性及耐腐蚀等性能,应用领域和范围不断拓展。随着零部件向大型化、复杂化方向发展,材料连接已成为金属材料工程应用中经常面临的问题,7XXX 系铝合金也面临这一难题^[1-3]。7XXX 系铝合金固有的熔化凝固特性导致其具有很强的热裂敏感性,以至于在早期研究中被认为是“不可焊”合金。20 世纪 90 年代,随着搅拌摩擦焊技术逐渐成熟,7XXX 系铝合金的焊接难题在一定程度上得到解决,但搅拌摩擦焊技术仍然存在设备成本高、夹具适应性差、残留匙孔等问题。而熔化焊技术具有设备成本低、场地和工件适用性强等优势,吸引研究者不断在 7XXX 系铝合金熔化焊技术上进行新的尝试^[4-5]。

钨极氩弧焊(tungsten inert gas, TIG)具有一系列优点,是铝合金电弧焊的主要方法之一,其成形质量和接头性能受工艺参数影响较大,其中焊接电流是影响接头质量的关键参数,电流过大或过小都会导致焊接接头质量下降^[6-7]。此外,7XXX 系铝合金在电弧焊过程中经历复杂的热循环过程,易引起焊缝组织成分不均匀、母材原有的热处理状态被破坏,这也是导致焊接接头力学性能下降的重要原因。因此,采用合理的焊后热处理,以提高焊接接头的力学性能。

目前,7XXX 系铝合金焊丝的研发与应用尚未成熟,综合考虑材料匹配性、焊接接头强度提升、应力降低和变形控制、抗腐蚀性能以及操作工艺性等多方面因素,一般选用 5XXX 系铝合金焊丝作为 7XXX 系铝合金电弧焊的填充材料。本文采用 TIG 焊技术,以 ER5356 焊丝为填充材料,对 7075 铝合金板材进行对焊。研究了不同焊接电流和焊后热处理对 7075 铝合金 TIG 焊接接头的微观组织和力学性能的影响,为 7075 铝合金 TIG 焊技术开发提供理论基础。

1 试验材料与方法

试验所用母材为 7075-T651 铝板,规格为 150 mm×75 mm×5 mm;焊丝选用 ϕ 1.2 mm 的 ER5356 焊丝;保护气体为纯度 99.99% 的氩气。7075-T651 铝板及焊丝的主要化学成分如表 1 所示。采用伊萨 TIG 4300i AC/DC 型逆变式交直流氩弧焊机,利用焊接小车进行单面单道自动焊接,主要工艺参数如表 2 所示。焊接电流范围选择 125~135 A,是综合考虑板材厚度、导电性、焊接速度、热输入控制、热裂纹风险及焊接材料特性等因素后的优化选择。此电流范围能够在保证焊接质量的前提下,最大程度地降低焊接过

表 1 7075-T651 铝板及焊丝的主要化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Main chemical composition of 7075-T651 aluminum plates welding wire (wt%)

材料	Zn	Mg	Cu	Ti	Mn	Fe	Cr	Si	Al
7075-T651 铝板	5.6	2.55	1.4	0.02	0.06	0.2	0.2	0.08	余量
ER5356 焊丝	0.01	4.92	0.1	0.1	0.15	0.16	0.1	0.25	余量

表 2 TIG 焊主要工艺参数
Tab.2 Main process parameters of TIG welding

焊接电流 I/A	送丝速度 v /(cm·min ⁻¹)	焊接速度 v /(mm·s ⁻¹)	弧长 L /mm	频率 f /Hz	保护气体
125	250	5	3.2	120	Ar
130					
135					

程中可能出现的缺陷,确保焊接接头的稳定性和可靠性。焊后热处理工艺为 480℃×1h+120℃×24h。图 1 为不同焊接电流下 7075-T651 铝板 TIG 焊后接头的形貌。从图可以看出,焊接接头成型质量较好,没有明显缺陷,也没有热裂现象产生。



图 1 不同焊接电流下 7075-T651 铝板 TIG 焊后接头的宏观形貌

Fig.1 Macromorphologies of TIG welded joints of 7075-T651 aluminum plates with at different welding currents

采用标准金相制备方法制备 7075-T651 铝板 TIG 焊接接头金相试样。采用 Zeiss Primotech 型金相显微镜对样品进行金相组织观察。采用 Zeiss Sigma 500 VP 扫描电镜(SEM)及配套的能谱仪(EDS)和电子背散射衍射仪(EBSD)进行微观组织、微区化学成分和晶粒形貌分析。采用 FEITecna F20 型透射电镜(TEM)观察析出相形貌。根据 GB/T2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》的规定要求,拉伸试样垂直焊缝切割,拉伸试验在 WANCEMT-5205 电子万能试验机上进行,每组测试 3 个试样并取平均值。

2 试验结果及讨论

2.1 焊接电流对 TIG 焊接接头微观组织的影响

图 2 是焊接电流为 125A 时 7075-T651 铝板 TIG 焊接接头不同区域的 SEM 形貌。在焊接过程

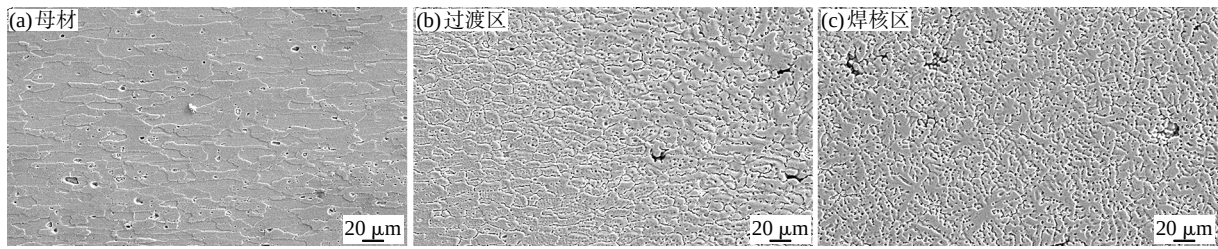


图2 焊接电流为 125 A 时 TIG 焊接接头不同区域的 SEM 形貌

Fig.2 SEM morphologies of different zones of TIG welded joints welded at welding current of 125 A

中,因电弧热循环使焊丝和母材发生熔化,焊缝熔池金属迅速凝固形成焊接接头。但其凝固冷却过程是在不稳定非平衡的状态下进行,通常还会受温度、材料、表面质量以及其他不可控因素影响而形成少量缺陷孔洞。从图 2(a)可看出,母材主要由典型的轧制拉长晶粒组成,在晶界上分布少数未溶解的第二相颗粒,这与 7075-T651 铝板的热处理状态相吻合。从图 2(b)可看出,过渡区左侧的热影响区晶粒形态发生变化,表明在焊接热输入作用下热影响区发生了一定程度的再结晶,而过渡区右侧则为焊核区,热影响区和焊核区之间的过渡区域宽度较窄,也未形成明显的界面或夹杂富集,表明焊接接头的焊接质量较好。从图 2(c)可看出,焊核区呈现出典型的铸态晶粒组织特征,由 α -Al 等轴枝晶和晶间第二相组成。

为了更好地分析焊接电流对焊缝不同区域晶粒形貌的影响,采用 EBSD 分别获得了不同电流下 7075-T651 铝板 TIG 焊接接头过渡区和焊核区的反极图,如图 3 所示。从图中可以清晰地观察从热影响区到焊核区的组织演变。反极图左侧的热影响区发生不同程度的再结晶,晶粒不再呈现规则的轧制拉长晶粒;同时可以明显看出,随着电流增大,热影响区的再结晶和晶粒长大越明显。反极图右侧的等轴晶是由焊接熔池中的液相重新凝固结晶形成的,由于实验中较好地控制了 TIG 焊过程的热输入,这一区域的 α -Al 晶粒大量形核,在长大过程中相互抑制,阻止了不利于焊缝力学性能的粗大树枝晶的形成。同样的,随着电流增大,等轴枝晶的尺寸也逐渐增大。图 4 为不同焊接电流下焊接接头焊核区的 EBSD 反极图和晶粒尺寸分布。从图 4 可以清楚地看出焊接电流对焊缝晶粒尺寸的影响。焊核区由等轴晶构成,随着焊接电流从 125 A 增大至 135 A,焊核区的 α -Al 晶粒平均直径从 31.2 μm 增大至 43.7 μm 。

图 5 是焊接电流为 125A 的 7075-T651 铝板 TIG 焊接接头焊核区中心的 EDS 面扫描结果。从能谱分析结果看出,除了固溶于 α -Al 基体的元素外,

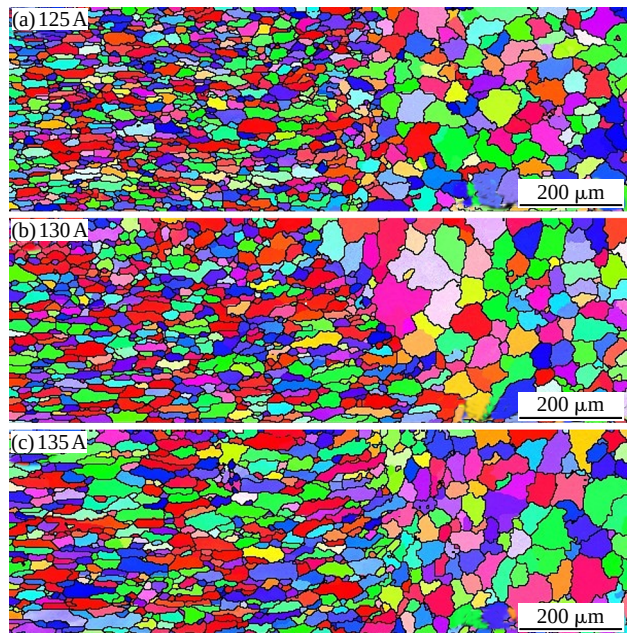


图3 不同焊接电流下 TIG 焊接接头过渡区的 EBSD 反极图
Fig.3 EBSD inverse pole figures of transition zone of TIG welded joints welded at different welding current

主要强化元素 Zn、Mg、Cu 的分布规律基本一致,均集中分布于枝晶晶界处,与第二相集中分布位置相吻合,这些第二相包括 θ (Al_2Cu) 相、S (Al_2CuMg) 相和 T (Al_6CuMg_4) 相等。Fe 元素是 7075 铝合金中的有害杂质元素,主要形成高熔点的脆性 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 相,Fe 元素的面扫描结果表明,焊核区有少量该相形成。表 3 为不同电流下 TIG 焊接接头焊核区的主要合金元素含量。从表 3 可见,不同电流下焊核区 Zn 元素含量均低于母材,且随着焊接电流增大,Zn 元素含量呈现先上升后降低的趋势。这是由于 ER5356 焊丝中 Zn 元素的含量远远低于母材,因此,焊核区 Zn 元素主要来自于母材熔化后进入熔池,当焊接电流升高、热输入增大时,母材熔化进入熔池的量增多,引起焊核区 Zn 元素含量上升。同时,由于 Zn 元素的熔点和沸点较低,当进一步增大电流时,Zn 元素烧损严重,导致焊核区 Zn 含量降低。当焊接电流为 125 A 和 130 A 时,焊核区 Mg 元素含量均高于母

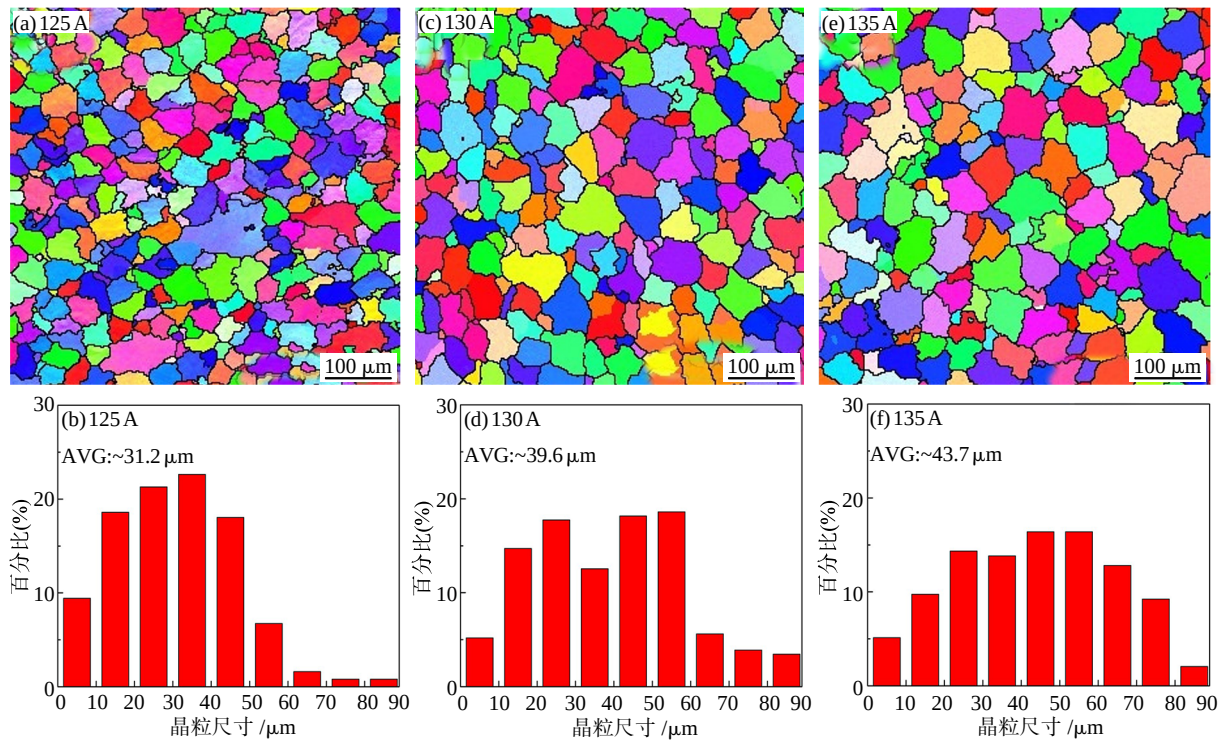


图 4 不同焊接电流下 TIG 焊接接头焊核区的 EBSD 反极图和晶粒尺寸分布
Fig.4 EBSD inverse pole figures and distribution of grain size of nugget zone of TIG welded joints with different welding current

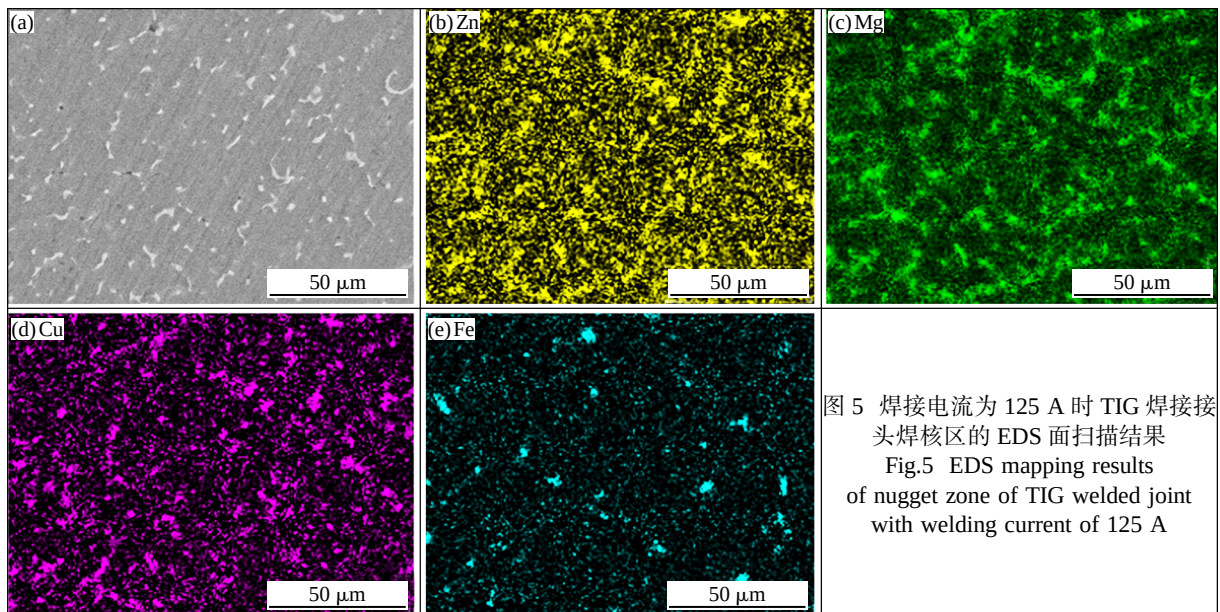


图 5 焊接电流为 125 A 时 TIG 焊接接头焊核区的 EDS 面扫描结果
Fig.5 EDS mapping results of nugget zone of TIG welded joint with welding current of 125 A

表 3 不同电流下 TIG 焊接接头焊核区的主要合金元素含量(质量分数, %)

Tab.3 The contents of main alloying elements in nugget zone of TIG welded joints with different welding current (wt%)

焊接电流 /A	Zn	Mg	Cu
125	3.0	3.3	0.7
130	4.6	3.5	1.1
135	3.4	2.2	0.6

材,这是由于 ER5356 焊丝 Mg 含量较高,焊丝熔化进入熔池引起了焊核区 Mg 含量升高;进一步增大电流至 135 A 时,Mg 元素烧损严重导致其含量降低。ER5356 焊丝中 Cu 含量很低,因此焊核区 Cu 元素主要来自于母材熔化进入熔池。但焊接电流过大时,Cu 元素也发生烧损,导致其含量降低。

2.2 焊后热处理对 TIG 焊接接头微观组织的影响

图 6 是不同电流下 7075-T651 铝板 TIG 焊接

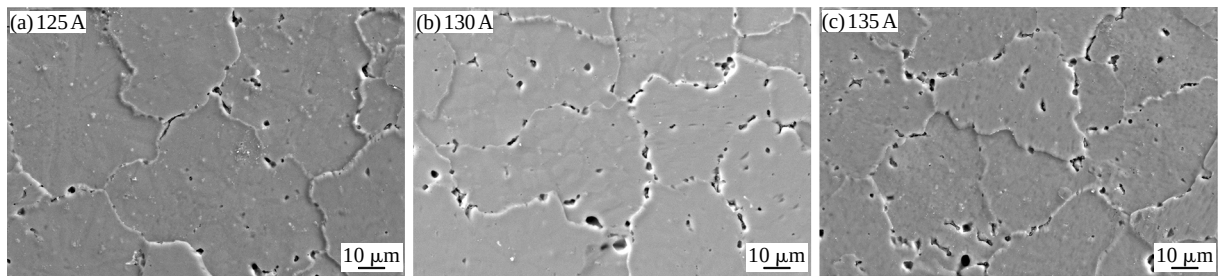


图6 不同电流下 TIG 焊接接头热处理后的焊核区 SEM 形貌
Fig.6 SEM morphologies of nugget zone of TIG welded joints welded at different welding current after post-welding heat treatment

接头热处理后的焊核区 SEM 照片。对比热处理前后组织可以看出,经过 $480^{\circ}\text{C}\times 1\text{h}+120^{\circ}\text{C}\times 24\text{h}$ 的焊后热处理,焊核区铸态凝固组织中的大部分粗大第二相消失,原因是在高温固溶过程中第二相重新溶解进入了合金基体。此外,由于焊核区铸态凝固组织中的 $\alpha\text{-Al}$ 晶粒尺寸分布较为均匀,高温固溶并没有带来明显的晶粒粗大。

图 7 是焊接电流为 125 A 的 7075-T651 铝板 TIG 焊接接头热处理后的焊核区 EDS 面扫描结果。从 EDS 结果可看出,Zn、Mg、Cu 三种元素的偏析程度大幅度降低,整体比较均匀地分布在合金基体中,这是由于铸态凝固组织中的 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相、 $\text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$ 相和 $\text{T}(\text{Al}_6\text{CuMg}_4)$ 相等粗大第二相均在高温固溶过程中发生了溶解。尽管在后续低温时效过程中又析出形成强化相,但这些析出相在合金基体中呈现均匀弥散分布,因此 Zn、Mg、Cu 三种元素分布较为均匀。但富含 Fe 元素的 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 相熔点较高,在高温固溶过程中无法溶解进入基体,因此在 EDS 面扫描结果中仍然能观察到 Fe 元素的富集。

2.3 7075 铝合金 TIG 焊接接头的力学性能

图 8 是不同电流下 7075-T651 铝板 TIG 焊接接头热处理前后的室温拉伸性能。观察拉伸断后样品发现,断裂位置均集中在 TIG 焊接接头的焊核区。如图 8(a)所示,未热处理的 7075-T651 铝板 TIG 焊接接头,其抗拉强度和断后伸长率均呈现出随焊接电流增大先升高后降低的趋势,但变化幅度不大。焊接电流为 130 A 时,未热处理焊接接头的抗拉强度和断后伸长率达到最高,分别为 325 MPa 和 3.4%,与母材相比,其接头强度系数达到 57.1%。如图 8(b)所示,热处理后,7075-T651 铝板 TIG 焊接接头的抗拉强度和断后伸长率仍呈现出随焊接电流增大先升高后降低的趋势,且相对于未热处理的样品有明显提升。焊接电流为 130 A 时,热处理后焊接接头的抗拉强度和断后伸长率分别达到 470 MPa 和 4.9%,接头强度系数也提升至 82.7%。

对比不同电流下 7075-T651 铝板 TIG 焊接接头热处理前后的室温拉伸性能数据,可以发现 3 个现象:^① 热处理前,焊接电流对 7075-T651 铝板 TIG

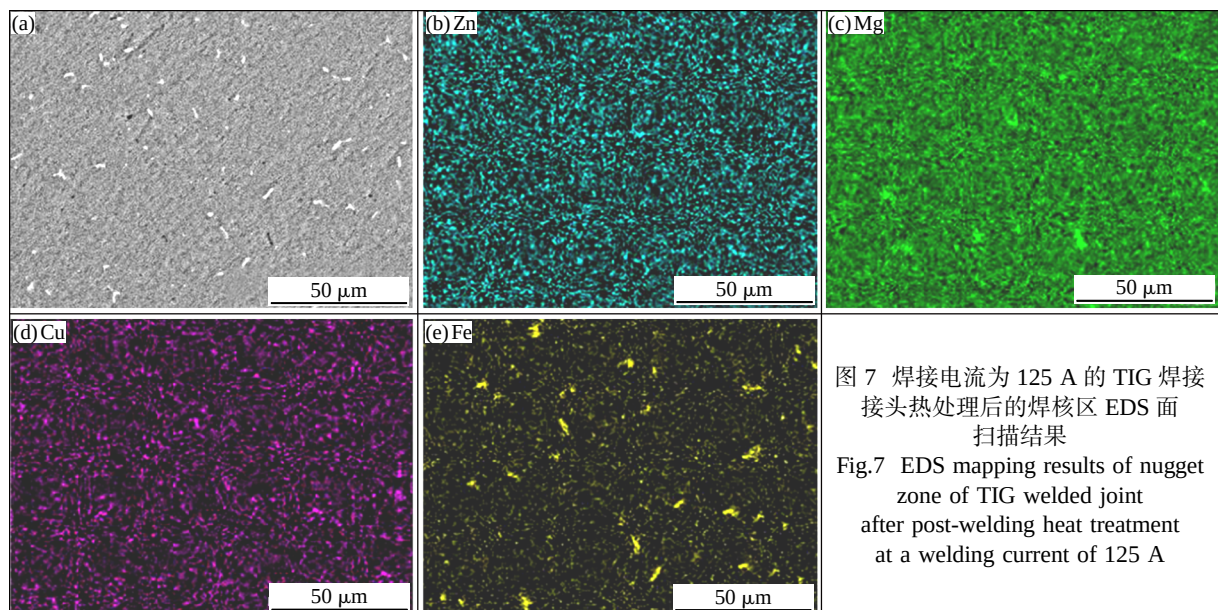


图7 焊接电流为 125 A 的 TIG 焊接接头热处理后的焊核区 EDS 面扫描结果
Fig.7 EDS mapping results of nugget zone of TIG welded joint after post-welding heat treatment at a welding current of 125 A

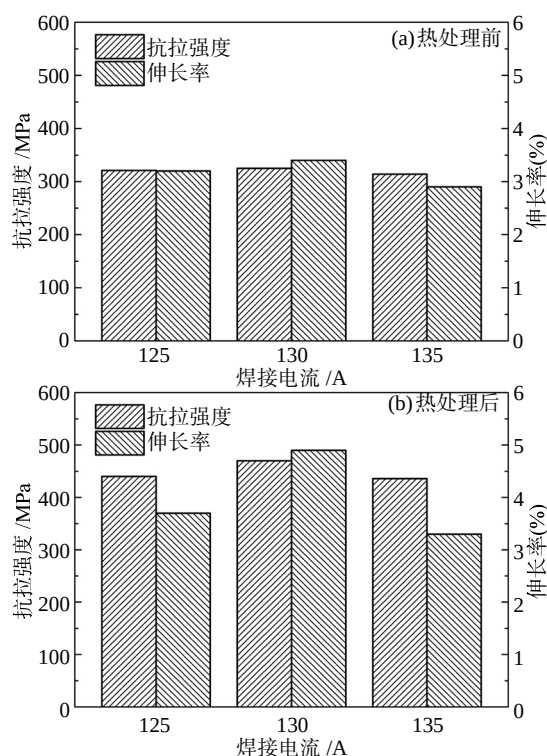


图8 不同电流下 TIG 焊接接头的室温拉伸性能
Fig.8 Room temperature tensile properties of TIG welded joints with different welding current

焊接接头室温拉伸性能的影响较小;③ 焊后热处理显著提高了 7075-T651 铝板 TIG 焊接接头的室温拉伸性能;④ 热处理后,焊接电流对 7075-T651 铝板 TIG 焊接接头室温拉伸性能的影响较明显。接下来针对这 3 个现象进行分析:首先,焊接接头的力学性能表现取决于焊接接头的薄弱环节,本文中的室温拉伸性能测试发现,热处理前后样品断裂位置均集中在 TIG 焊接接头的焊核区,也就是说,焊核区的微观组织决定了 7075-T651 铝板 TIG 焊接接头的最终性能。其次,热处理前,焊核区具有铝合金铸态凝固组织特征,随着焊接电流增大,平均晶粒尺寸增大,主要合金元素含量也发生变化,细晶强化、固溶强化和第二相强化等强化机制共同发挥作用,但在不同焊接电流样品中的作用程度不同,导致各样品的抗拉强度较为接近。再次,热处理后,不同电流下 7075-T651 铝板 TIG 焊接接头的室温拉伸性能均有较大幅度提高,这是因为熔化焊过程中焊丝与母材同时熔化,改变了焊缝金属的成分,使焊核区成分接近 7075 铝合金,经过热处理后,产生了明显的沉淀强化效应。最后,热处理后,焊接电流为 130 A 的 7075-T651 铝板 TIG 焊接接头的室温拉伸性能明显优于其他两组焊接电流得到的样品,这是因为焊接

电流为 130 A 时,焊核区的合金元素含量最高,而沉淀强化效应的强弱与合金元素含量密切相关,热处理后沉淀强化在各强化机制中占主导地位,使得焊接电流为 130 A 的样品表现出了最高的抗拉强度。

图 9 为焊接电流为 130 A 时 7075-T651 铝板 TIG 焊接接头焊核区热处理后的 TEM 分析。可看出,热处理后接头焊核区中观察到大量弥散分布的析出相,由于析出时间的先后,析出相在尺寸和形貌上存在一定差异,从形貌上看,包括较大灰色球状区域为饱和固溶的 GP 区、呈灰黑相间的短棒形状的亚稳定沉淀相 η' 及黑色短棒形状的稳定相 η 。其中沉淀相 η' 是其主要强化相,该沉淀相的形核使基体的综合强度更高,GP 区以及亚稳定沉淀相 η' 的形成,使其形变均匀化,从而减少应力集中,这些析出相在变形过程中起到了很好的阻碍位错滑移作用,为达到较高的接头强度系数做出了重要贡献^[8-10]。

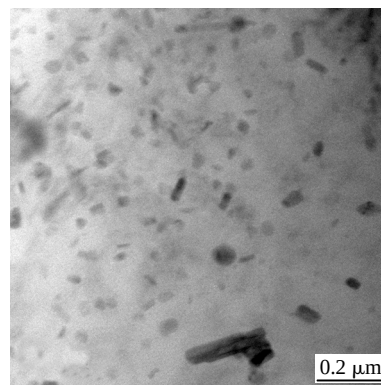


图9 焊接电流为 130 A 的 TIG 焊接接头焊核区热处理后的 TEM 分析

Fig.9 TEM analysis of nugget zone of TIG welded joint after post-welding heat treatment with welding current of 130 A

3 结论

以 ER5356 焊丝为填充材料,研究了焊接电流及焊后热处理对 7075-T651 铝板 TIG 焊接接头微观组织和力学性能的影响,主要结论如下:

(1) TIG 焊接接头焊接质量良好,热影响区和焊核区之间的过渡区域宽度较窄,没有形成明显的界面或夹杂富集。焊核区呈现出典型的铸态凝固组织特征,由 α -Al 等轴枝晶和晶间第二相组成。

(2) 随着焊接电流增大,焊核区的 α -Al 晶粒逐渐增大,焊核区 Zn、Mg、Cu 元素含量均呈现先上升后降低的趋势。

(3) 经过 $480\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+120\text{ }^{\circ}\text{C}\times 24\text{ h}$ 的焊后热处理,焊核区铸态凝固组织中的大部分(下转第 215 页)

- [4] Yuan S Q, Gan B, Qian L, et al. Gradient nanotwinned CrCoNi medium-entropy alloy with strength-ductility synergy [J]. Scripta Materialia, 2021(203):114117.
- [5] Melnick A B, Soolshenko V K. Thermodynamic design of high-entropy refractory alloys [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 694(89):223-227.
- [6] Bernd G, Anton H, Kelil V S T, et al. Exceptional damage-tolerance of a medium-entropy alloy CrCoNi at cryogenic temperatures[J]. Nature Communications, 2016, 17(5):10-60.
- [7] Zhao Y L, Yang T, Tong Y, et al. Heterogeneous precipitation behavior and stacking fault-mediated deformation in a CoNi-based medium-entropy alloy [J]. Acta Materialia, 2017, 138(13):77-78.
- [8] Tsai M H. Physical properties of high entropy alloys [J]. Entropy, 2013(15):5338-5345.
- [9] 吕昭平, 雷智锋, 黄海龙, 等. 高熵合金的变形行为及强韧化 [J]. 金属学报, 2018, 54(4):1553-1556.
- [10] Gludovatz B, Hohenwarter A, Catoor D, et al. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications [J]. Science, 2014, 345(15):1153-1154.
- [11] Granberg F, Nordlund K, Ullah M W, et al. Mechanism of radiation damage reduction in equiatomic multicomponent single phase alloys[J]. Phys Rev Lett, 2016, 116(9):1355-1361.
- [12] Slone C E, Miao J, George E P, et al. Achieving ultra-high strength and ductility in equiatomic CrCoNi with partially recrystallized microstructures[J]. Acta Materialia, 2019, 165:496-507.
- [13] Wu Z, Bei H, Otto H, et al. Recovery, recrystallization, grain growth and phase stability of a family of FCC-structured multi-component equiatomic solid solution alloys[J]. Intermetallics, 2014, 46(6):131-140.
- [14] Tsai M H, Yeh J W. High-entropy alloys; a critical review [J]. Materials Research Letters, 2014, 2(3):107-123.
- [15] Ding L, Hilhorst A, Idrissi H, et al. Potential TRIP/TWIP coupled effects in equiatomic CrCoNi medium-entropy alloy [J]. Acta Materialia, 2022, (234):118049.
- [16] 陈今良, 冯中学, 易健宏. CrCoNi 中熵合金变形中位错与孪晶协调变形机制[J]. 材料导报, 2022, 36(14):20090129.
- [17] 周玉, 武高辉. 材料分析测试技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.
- [18] Sathiaraj G D, Skrotzki W, Pukenas A, et al. Effect of annealing on the microstructure and texture of cold rolled CrCoNi medium-entropy alloy[J]. Intermetallics, 2018(101):87-98. [1]

(上接第 209 页)粗大第二相消失, Zn、Mg、Cu 等主要合金元素均匀分布, α -Al 晶粒没有明显粗化。

(4) 对比 7075-T651 铝板 TIG 焊接接头热处理前后的抗拉强度和断后伸长率, 均随焊接电流增大先升高后降低, 且热处理后趋势更加明显。焊接电流为 130 A 时, 热处理后焊接接头的抗拉强度和断后伸长率分别达到 470 MPa 和 4.9%, 接头强度系数达到 82.7%。

参考文献:

- [1] Temmar M, Hadji M, Sahraoui T. Effect of post-weld aging treatment on mechanical properties of tungsten inert gas welded low thickness 7075 aluminium alloy joints[J]. Materials & Design, 2011, 32(6):3532-3536.
- [2] 王培吉, 陈康华, 姜慧丽, 等. 7003 铝合金 TIG 焊接接头的组织与性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2016, 21:832-839.
- [3] Zhang L, Li X, Nie Z, et al. Comparison of microstructure and mechanical properties of TIG and laser welding joints of a new Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Materials & Design, 2016, 92:880-887.
- [4] Yang D, Li X, He D, et al. Study on microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Mn-Er alloy joints welded by TIG and laser beam[J]. Materials & Design, 2012, 40:117-123.
- [5] 郭新宇, 王娟, 孙宝壮, 等. 电流波形对 7A04 铝合金脉冲 TIG 焊接接头组织及强度的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 21:30-34.
- [6] 刘长军, 张威, 张琨, 等. 热输入对 7075 铝合金双脉冲 MIG 焊接接头显微组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(5):60-62.
- [7] Bekir E. Gas tungsten arc welding of 7075 aluminum alloy: microstructure properties, impact strength, and weld defects [J]. Materials Research Express, 2018, 5(6):066540.
- [8] Dwivedi U, Tiwari S, Mishra A, et al. Comparative study of weld characteristics of friction stir welded joints on aluminium 7075 with autogenous TIG [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 22:2532-2538.
- [9] Alatorre N, Ambriz R R, Amrouche A, et al. Fatigue crack growth in Al-Zn-Mg (7075-T651) welds obtained by modified indirect and gas metal arc welding techniques [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 248:207-217.
- [10] Murali N, Chi Y, Li X. Natural aging of dissimilar high-strength AA2024/AA7075 joints arc welded with nano-treated filler [J]. Materials Letters, 2022, 322:132479. [2]