

焊后热处理对 2A12 铝合金脉冲 MIG 焊接接头组织和性能的影响

陈宇航¹, 屈 华¹, 付佳玉¹, 刘伟东¹, 霍颜权², 崔庆辉¹

(1. 辽宁工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 锦州 121001;

2. 锦州华新电力电子有限公司, 辽宁 锦州 121001)

摘 要: 利用金相显微镜、扫描电镜 (SEM)、能谱仪 (EDS)、电子背散射衍射技术 (EBSD)、电子万能实验机和电化学工作站等研究了固溶处理、时效处理和固溶+时效处理对 2A12 铝合金脉冲 MIG 焊接接头显微硬度、抗拉强度、断口形貌、耐蚀性能和元素分布的影响。结果表明: 热处理后, 接头晶粒尺寸均有所增大, 焊缝区晶粒形态无变化均为等轴晶, Cu 元素偏析现象基本消除, 强化相 S (Al_2CuMg) 相和 θ (Al_2Cu) 相重新弥散析出, 接头断口中的韧窝变小、密度变大、深度增加、撕裂棱和解理面减少, 接头硬度升高, 抗拉强度与伸长率提高, 耐蚀性升高; 与固溶处理、时效处理的接头相比, 固溶+时效处理后, 接头中的析出相颗粒数量更多, 分布更均匀, 接头整体硬度最大 (焊缝区平均硬度达到 121 HV0.1), 接头抗拉强度和伸长率最大分别为 445.7 MPa 和 9.6%, 分别达到了母材的 98.4% 和 73.8%, 焊缝腐蚀电位和电流阻抗曲线半径最大, 焊缝的耐蚀性最高。

关键词: 2A12 铝合金; 脉冲 MIG 焊; 焊后热处理; 力学性能

中图分类号: TG444

文献标志码: A

文章编号: 1009-6264(2026)02-0236-09

Effect of post-weld heat treatment on microstructure and properties of pulse MIG welded joints of 2A12 aluminum alloy

CHEN Yu-hang¹, QU Hua¹, FU Jia-yu¹, LIU Wei-dong¹, HUO Yan-quan², CUI Qing-hui¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China;

2. Jinzhou Huaxin Power Electronics Co Ltd, Jinzhou 121001, China)

Abstract: Effect of solution treatment, aging treatment, and solution+aging treatment on the microhardness, tensile strength, fracture morphology, corrosion resistance, and element distribution of 2A12 aluminum alloy pulse MIG welded joints was studied using metallographic microscope, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), electron backscatter diffraction (EBSD) technique, electronic universal testing machine, and electrochemical workstation. The results show that after heat treatment, the grain size of the joints increases, while the grain morphology in the weld zone remains unchanged with equiaxed grains. The segregation of Cu element is basically eliminated, and the strengthening phases S (Al_2CuMg) and θ (Al_2Cu) are redispersed and reprecipitated. On the fracture surface of the joints, the dimples become smaller with increased density and depth, while the tear edges and cleavage planes decrease. Consequently, the hardness, the tensile strength and elongation of the joints increase, along with improved corrosion resistance. Compared with the joints treated with solution treatment or aging treatment alone, the solution+aging treated joints exhibit a larger number of precipitated phase particles with more uniform distribution. The overall hardness of the joints achieves the highest value, with the average hardness of the weld zone up to 121 HV0.1. The tensile strength and elongation reach peak values of 445.7 MPa and 9.6%, respectively, which account for 98.4% and 73.8% of those of the base metal, respectively. Moreover, the weld shows the highest corrosion potential and largest radius of current impedance curve, indicating the best corrosion resistance.

Keywords: 2A12 aluminum alloy; pulsed MIG welding; post-weld heat treatment; mechanical property

收稿日期: 2025-03-17 **修订日期:** 2025-05-20

基金项目: 辽宁省教育厅面上项目 (LJKMZ20220958, LJK20621); 辽宁省“兴辽英才计划”教学名师项目 (XLYC221026)

作者简介: 陈宇航 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事铝合金焊接组织与性能研究, E-mail: 13074146135@163.com。

通信作者: 屈 华 (1972—), 女, 教授, 博士, 主要从事金属材料焊接组织与性能实验与理论研究, E-mail: lgld1972@sina.com。

引用格式: 陈宇航, 屈华, 付佳玉, 等. 焊后热处理对 2A12 铝合金脉冲 MIG 焊接接头组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2026, 47(2): 236-244.

CHEN Yu-hang, QU Hua, FU Jia-yu, et al. Effect of post-weld heat treatment on microstructure and properties of pulse MIG welded joints of 2A12 aluminum alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2026, 47(2): 236-244.

随着航空航天、轨道交通等重要行业的迅速发展,2A12 铝合金在其中逐渐成为了不可替代的材料之一^[1-2]。2A12 铝合金属于 Al-Cu-Mg 系合金,是一种可热处理强化的高强度硬铝合金,是用途最为广泛的结构铝合金^[3-5]。在热处理过程中一般认为其主要析出相的析出顺序为 SSS→GP 区→θ″→θ′(Al₂Cu)→θ (Al₂Cu) 和 SSS→GPB 区→GPB-II 区/S″→S′(Al₂CuMg)→S (Al₂CuMg)^[4-7]。铝合金焊接方法虽日益增多,但熔化极惰性气体保护焊(MIG, Metal inertia gas)始终是最普遍以及效率和自动化程度最高的焊接方法^[8-9]。铝合金在焊接时容易产生热裂纹和气孔,接头强度均低于母材,特别是在时效状态下硬铝的焊接,接头强度基本不超过母材强度的 60%^[10-12]。主要是由于焊接热循环作用导致合金元素在高温时蒸发烧损,并在熔池冷却后发生再分布,焊缝中的强化相数量减少,强化作用降低。热影响区(HAZ)中的固溶强化和时效强化效果减弱甚至消失,导致接头严重软化^[13-15]。

Safarballi 等^[16]对 7075 和 2024 铝合金搅拌摩擦焊接接头进行固溶处理和时效处理,发现焊后热处理有效地改善了接头的力学性能和均匀性。Homssam

等^[17]对 AA6082 铝合金 MIG 焊接接头进行了 T6 热处理,结果表明焊后热处理可以显著细化和均匀接头组织,硬度和抗拉强度达提升了 69% 和 85%。Aval 等^[18]对 A390-10 mass%SiC 和 AA2024 铝合金异种焊接接头进行了焊后热处理,发现接头硬度、抗拉强度和耐蚀性分别提升了 15.9%、7.8% 和 28.9%。Li 等^[19]发现 2024 铝合金搅拌摩擦焊接接头热处理后,母材(BM)、热机械影响区(TMAZ)、热影响区、焊核区(DRZ)的抗腐蚀性能顺序为 BM>TMAZ>HAZ>DRZ。

本文使用 ER5356 焊丝,采用脉冲 MIG 焊对 3 mm 厚 2A12-T4 铝合金进行焊接实验,在得到最优力学性能接头的基础上对接头进行固溶(ST)、时效(AA)、固溶+时效(STA)3 种热处理,并对其微观组织与力学性能进行研究。

1 实验材料与方法

实验用母材为 3 mm 厚的 2A12 铝合金,供货状态为 T4(自然时效态),焊丝为直径 1.2 mm 的 ER5356 焊丝,表面光亮,焊前不酸洗。母材与焊丝的化学成分如表 1 所示。

表 1 母材和焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of base metal and welding wire (mass fraction, %)									
Experimental materials	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Ni	Al
2A12-T4	0.24	0.31	4.51	0.64	1.52	0.11	0.03	0.02	Bal.
ER5356	0.11	0.03	0.12	0.02	5.1	0.07	0.06	0.02	Bal.

焊机使用 MIG YD-400GE 交直流焊机。不开坡口,采用无缝对接方式焊接,焊前使用钢丝刷去除表面的氧化层和杂质使表面光亮,并用丙酮清洗表面保证待焊部位干净整洁。保护气为 99.99% 高纯氩气,气体流量为 25 L/min,焊缝背部采用铜板散热。焊接电流 135 A、电压 21 V、焊接速度 650 mm/min、送丝速度 5.5 m/min。焊后焊缝表面光滑,无裂纹、气孔咬边等缺陷。焊接后的试样在电阻炉和烘箱中进行不同热处理,所采用的热处理工艺参数如表 2 所示。

表 2 热处理工艺参数

Table 2 Heat treatment process parameters			
Heat treatment method	Heat treatment temperature/℃	Holding time/h	Cooling method
Solution treatment	495	1	Water cooling
Aging treatment	180	12	Air cooling
Solution+aging treatment	495+180	1+12	Water and air cooling

将接头减薄至 1 mm,使用 NETZSCH DSC 404 F3 仪器,以 5 ℃/min 的恒定速率从 50 ℃加热至 600 ℃

进行差热分析(DSC)。通过线切割机将接头切割成尺寸为 20 mm×10 mm×3 mm 的金相试样,然后用 600~5000 目砂纸依次研磨,研磨结束后进行粗抛和精抛两次抛光。研磨后的试样使用 Keller's 试剂腐蚀 30 s,使用 Axio Vert. A1 倒置金相显微镜观察接头显微组织。使用 Sigma500 型扫描电镜(SEM)并结合能谱仪(EDS)和背散射电子衍射(EBSD)观察并分析接头析出相与晶粒取向。硬度测试采用型号为 DHV-1000AV 半自动显微硬度计,施加载荷为 100 g,保持时间为 10 s。使用型号为 CMT5305 的微机控制电子万能实验机进行室温拉伸实验,试样厚度为 3 mm,焊缝位于拉伸试样中部,拉伸速率为 2 mm/min,拉伸试样的尺寸如图 1 所示,每组试样进行 3 次拉伸实验测试,以确保结果的准确性。使用 IviumStat. Xri 电化学工作站对焊缝表面进行腐蚀测试,腐蚀介质选用 3.5%(质量分数)NaCl 溶液,检测面积 1 cm²,根据电化学站建立三电极体系的电解池,

参比电极为饱和汞电极,对电极为铂电极,极化曲线检测参数:电位范围为 $-1.5 \sim 0.5$ V、扫描速率为 10 mV/s ,阻抗检测参数:由 10 mV 的正弦波作为激励信号、范围 $10 \text{ mHz} \sim 10 \text{ kHz}$ 。

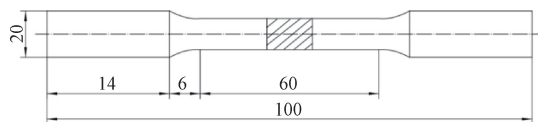


图1 拉伸试样的尺寸示意图

Fig. 1 Dimensional diagram of the tensile sample

2 实验结果与分析

2.1 DSC 测试

图2为2A12-T4铝合金接头的DSC测试结果。从图2中可以看出在 501.8°C 时出现了比较明显的吸热峰直到 515.8°C 为止。 θ 相和S相的熔点相对来说比较接近,所以一般认为这个吸热峰是 θ 相和S相的溶解峰^[20-22]。本文采用了低于起始温度大约 5°C 的 495°C 作为固溶温度。在相应温度下接头中的第二相会基本溶入基体中。

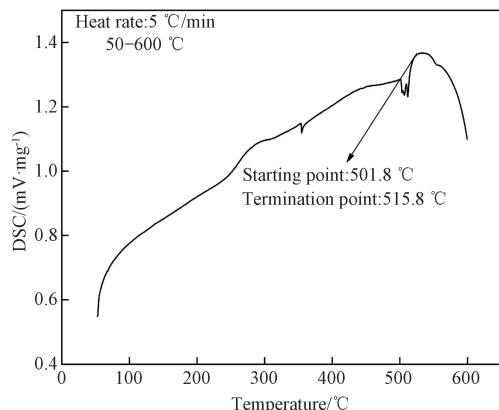


图2 2A12-T4铝合金接头的DSC曲线

Fig. 2 DSC curve of the 2A12-T4 aluminum alloy welded joint

2.2 显微组织

图3为2A12-T4铝合金接头热处理前、后的显微组织。图3(a)和3(b)为未热处理接头的显微组织,可看出热影响区和焊缝区清晰可辨,热影响区受到焊接热循环的影响导致晶粒粗化大小不一,组织呈现明显的不均匀性。焊缝区显微组织形貌和热影响区有着明显差别,由于焊接时该区域被高温熔池所包围导致热量不能及时散出,组织呈现为典型的铸态树枝晶,呈现连续的网状分布特征,并且由于热量从熔池向母材传导,晶粒也随着热量传导方向生长,具有一

定的方向性。图3(c)与3(d)为固溶处理后焊缝区和热影响区的显微组织,从图3(c)可以看出第二相粒子大部分融入到了 α -Al基体中形成过饱和固溶体,热影响区的晶粒尺寸相比于未热处理的变化不大。图3(e)与3(f)为单独时效处理后焊缝区和热影响区显微组织,特征与未热处理的没有明显差别。图3(g)与3(h)为固溶+时效处理后焊缝区和热影响区的显微组织,可以看出第二相经过时效处理后大量的从 α -Al基体中析出且均匀分布,晶粒尺寸大小与固溶处理后的相比无明显变化。

图4为母材的晶粒取向图,母材明显地因轧制而呈纤维状组织,晶粒呈现出一定的方向性。图5为不同热处理条件下接头的反极图(IPF)。可以看出焊缝中心基本为等轴晶,不同的温度梯度和冷却速度(G/R)决定了焊缝中显微组织的生长形态。由于焊缝中心温度梯度较小,且此区域温度较高,因而进一步形成充分发育的等轴晶。热影响区的晶粒失去了轧制生长的方向性,晶粒细小,存在回复再结晶行为^[23-24]。表3给出了焊接、固溶、时效和固溶+时效状态下的焊缝区和热影响区的平均晶粒尺寸。与焊态相比,热处理后焊缝区和热影响区的平均晶粒尺寸均有所增加。

表3 不同状态下焊缝区和热影响区的平均晶粒尺寸(μm)

Table 3 Average grain size of weld zone and heat affected zone in different states (μm)

Heat treatment	Weld zone	Heat affect zone
Weld	41.82	12.37
ST	42.51	14.55
AT	42.01	12.59
STA	42.88	14.73

图6为不同热处理条件下焊缝区的元素面扫描分析。从图6可以看出析出相主要含有Al、Cu、Mg元素,可能存在 θ 和S等析出相。未热处理的接头焊缝区元素分布不均匀,Cu元素在晶界处偏聚,而Mg元素整体分布比较均匀。经固溶处理后明显看出Cu元素的偏聚现象消失,说明固溶处理后绝大部分Cu元素溶入到了 α -Al基体中。单独时效处理的焊缝区元素分布与未经过热处理的区别不大。经固溶+时效处理,因焊缝区Cu和Mg元素分布均匀,析出相呈短棒状和球状。

图7为不同热处理条件下接头焊缝区的EDS分析,这是在面扫描基础上的局部放大区域进行成分分析,结果如表4所示。从表4可以看出Mg含量仅为焊丝的一半,这是由于在焊接过程Mg元素被严重

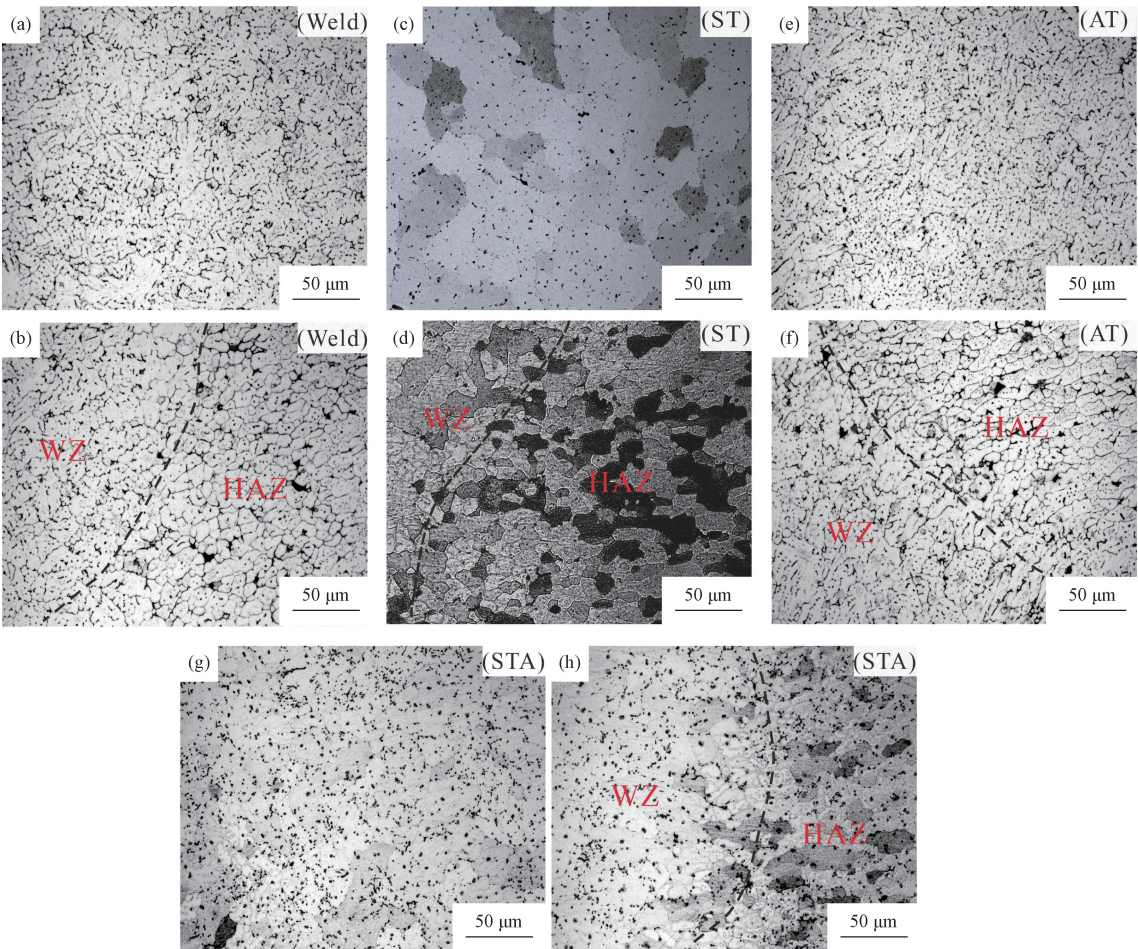


图 3 2A12-T4 铝合金接头热处理前、后的显微组织
(a,b) 未热处理(Weld); (c,d) 固溶处理(ST); (e,f) 时效处理(AT); (g,h) 固溶+时效处理(STA)
Fig. 3 Microstructure of the 2A12-T4 aluminum alloy welded joints before and after heat treatment
(a, b) without heat treatment (Weld); (c, d) solution treatment (ST); (e, f) aging treatment (AT);
(g, h) solution+aging treatment (STA)

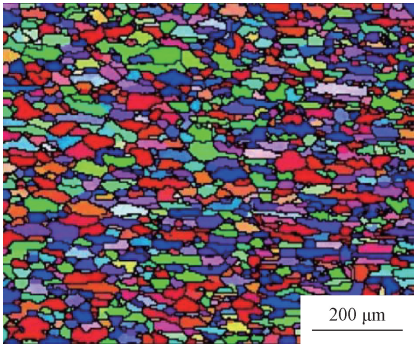


图 4 母材的晶粒形貌
Fig. 4 Grain morphology of the base metal

蒸发烧损。从 A、C、D 可以看出其 Cu/Mg 比均大于 2.7,说明 S 相首先析出,S 相析出后 Mg 元素几乎全部消耗,再开始析出 θ 相^[25],B 点经固溶处理后无

表 4 图 7 中各点的元素含量(质量分数,%)
Table 4 The element content of each point marked in Fig. 7 (mass fraction, %)

Point	Al	Cu	Mg
A	84.39	13.07	2.54
B	96.35	1.28	2.37
C	87.54	8.76	3.70
D	79.74	17.35	2.91

明显的析出相。
2.3 显微硬度
图 8 为不同热处理条件下接头的显微硬度。从图 8 可以看出接头的硬度变化趋势基本相同,即随着距焊缝中心距离的增大硬度不断升高,接头硬度整体分布呈现为“V”形,最低硬度部分位于焊缝处,热影响区次之。焊态下的接头的平均显微硬度最低,其焊缝区的平均硬度仅有 80.9 HV0.1。经固溶处理

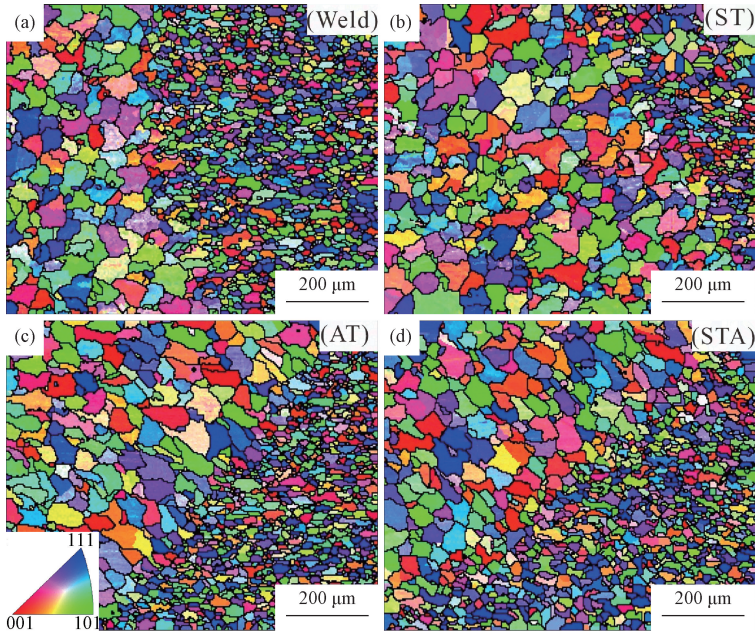


图 5 不同热处理条件下接头的反极图 (a) 未热处理(Weld); (b) 固溶处理(ST); (c) 时效处理(AT); (d) 固溶+时效处理(STA)

Fig. 5 IPFs of the welded joints under different heat treatment conditions (a) without heat treatment(Weld); (b) solution treatment(ST); (c) aging treatment(AT); (d) solution+aging treatment(STA)

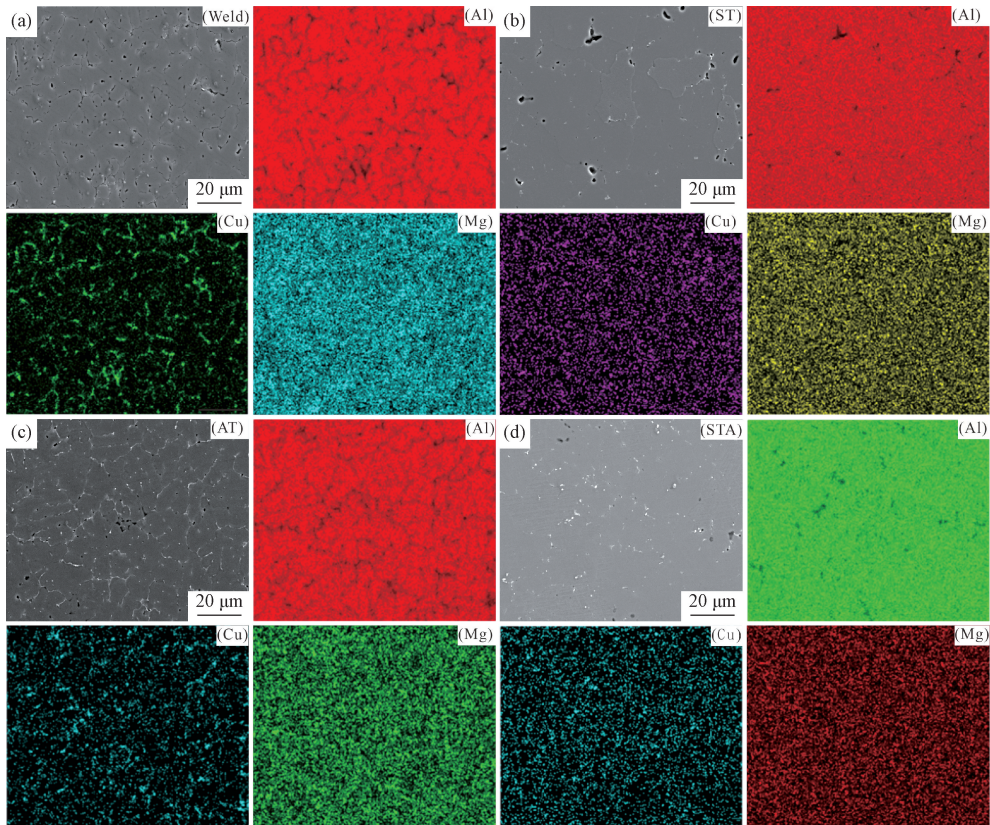


图 6 不同热处理条件下接头焊缝区的 SEM 形貌和相应的元素面扫描分析

(a) 未热处理(Weld); (b) 固溶处理(ST); (c) 时效处理(AT); (d) 固溶+时效处理(STA)

Fig. 6 SEM morphology and corresponding elemental mapping scanning analysis of weld zone of the welded joints under different heat treatment conditions (a) without heat treatment (Weld); (b) solution treatment(ST); (c) aging treatment (AT); (d) solution + aging treatment (STA)

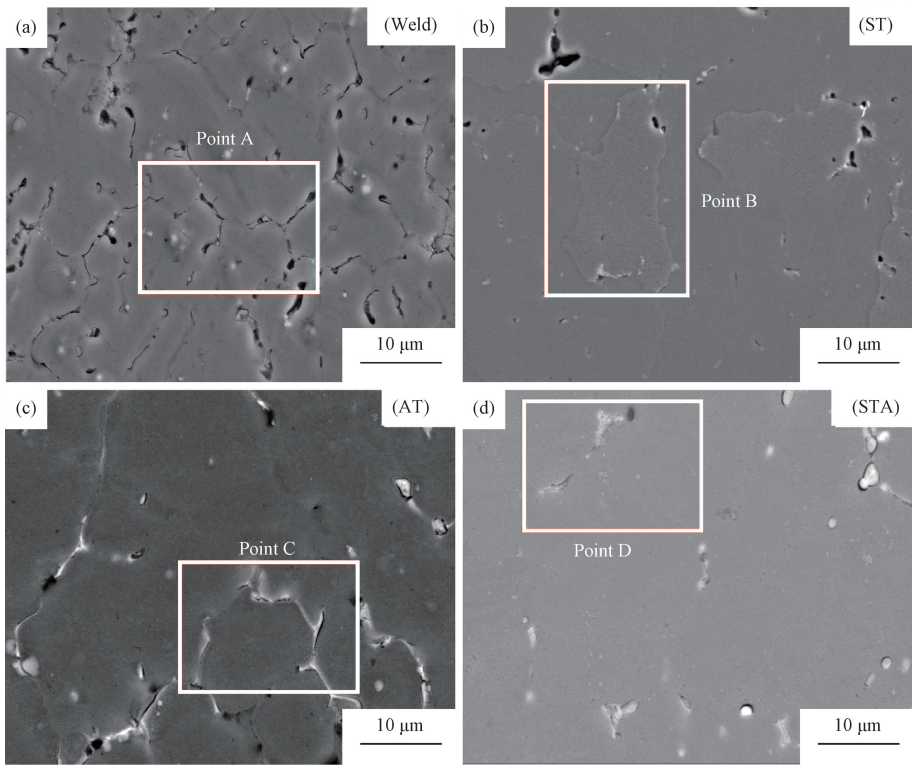


图 7 不同热处理条件下接头焊缝区的 EDS 分析

(a) 未热处理(Weld); (b) 固溶处理(ST); (c) 时效处理(AT); (d) 固溶+时效处理(STA)

Fig. 7 EDS analysis of weld zone of the welded joints under different heat treatment conditions

(a) without heat treatment (Weld); (b) solution treatment(ST); (c) aging treatment (AT); (d) solution+aging treatment (STA)

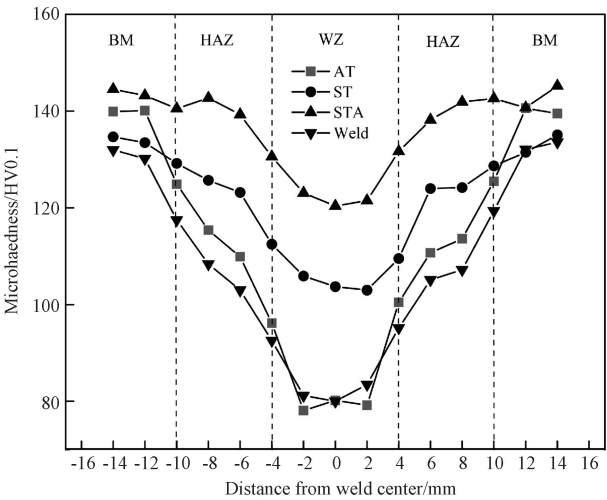


图 8 不同热处理条件下接头的显微硬度

Fig. 8 Microhardness of the welded joints under different heat treatment conditions

后的接头的硬度有一定的提升,其因为大部分第二相粒子充分融入到了 α -Al 基体中达到了很好的固溶效果,并且在焊缝中的晶界和晶内析出了一些细小且均匀分布的第二相引发了晶格畸变,阻碍了位错运动,

从而增加了焊缝和热影响区的硬度。经时效处理的焊缝区的硬度变化不大,仅有热影响区的软化情况得到改善。经固溶+时效处理的接头硬度有着明显的提升,焊缝区整体的平均硬度达到了 121.2 HV0.1,其因为在固溶+时效处理后融入 α -Al 基体的溶质原子重新析出,形成了大量细小且弥散的 θ 相和 S 相并均匀地分布在晶内和晶界,位错运动的阻碍大大增加,从而提高了接头的整体硬度。

2.4 拉伸性能与断口形貌

图 9 为不同热处理条件下接头的抗拉强度与伸长率。由图 9 可知经过固溶、时效、固溶+时效处理后接头的抗拉强度和伸长率都有所上升。未经过热处理的接头的抗拉强度仅有 292.7 MPa,为母材的 62.4%,平均伸长率为 2.2%。其主要原因是因为熔合区存在很多粗大的析出相,导致该位置的塑性变低,并且热影响区受到了焊接热循环的作用,导致其晶粒异常长大,从而降低了总体的力学性能。经固溶处理后接头的固溶体过饱和度增加,从而产生了弹性畸变。焊缝中析出较少细小的第二相,这些第二相与基体一般为半共格或者共格关系,两者共同作用导致

了接头拉伸性能的上升。抗拉强度和伸长率达到了 371.2 MPa 和 4.3% 较未经过热处理的接头分别提升了 26.8% 和 95.4%。单独经过时效处理的接头的抗拉强度和伸长率分别为 300.4 MPa 和 2.8% 对比未热处理的接头仅提升了 2.6% 和 27.3%, 性能提升并不明显。经过固溶+热处理后的接头的平均抗拉强度和平均伸长率达到了 445.7 MPa 和 9.6%, 分别达到了母材的 98.4% 和 73.8%。

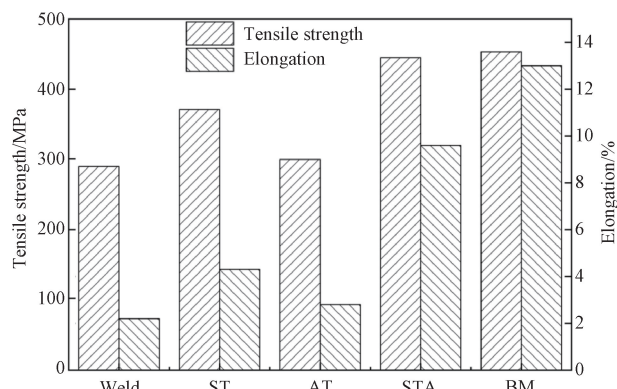


图9 不同热处理条件下接头的拉伸性能

Fig. 9 Tensile properties of the welded joints under different heat treatment conditions

图10为不同热处理条件下接头拉伸断口的SEM形貌。从图10中可以看出所有断口主要由韧窝、撕裂棱和小空洞组成。图10(a)和10(b)为未经过热处理的试样断口。其韧窝细小且浅,接头断口表面分布着一些光亮的撕裂棱,在撕裂棱周围分布有小的解理面,细长状的小空洞是由于第二相粒子脱落造成,断裂方式为准解理断裂。这是由于焊接过程中的高温导致第二相粒子溶解第二相强化基本消失,导致接头的韧性和塑性都较差。从图10(c)和10(d)可以看出经过固溶处理后焊缝内部应力得到消除,韧窝密度变高,深度明显增加,撕裂棱和解理面变少。主要原因是经过固溶处理后,枝晶状的第二相几乎全部溶入到了基体中形成了过饱和固溶体,并且析出了少量的细小且弥散的第二相颗粒,起到固溶强化作用。图10(e)和10(f)为经单独时效处理后的接头断口。其韧窝密度有所增加深度有所加深但还是存在撕裂棱和解理面,存在少量低熔点相溶解和晶粒球化,性能没有明显提升。图10(g)和10(h)为经固溶+时效强化处理后的接头断口,发现经过固溶+时效处理后可以发现经过时效后的第二相粒子大量且均匀析出,析出相颗粒细小,分布均匀且弥散,韧窝更加密集

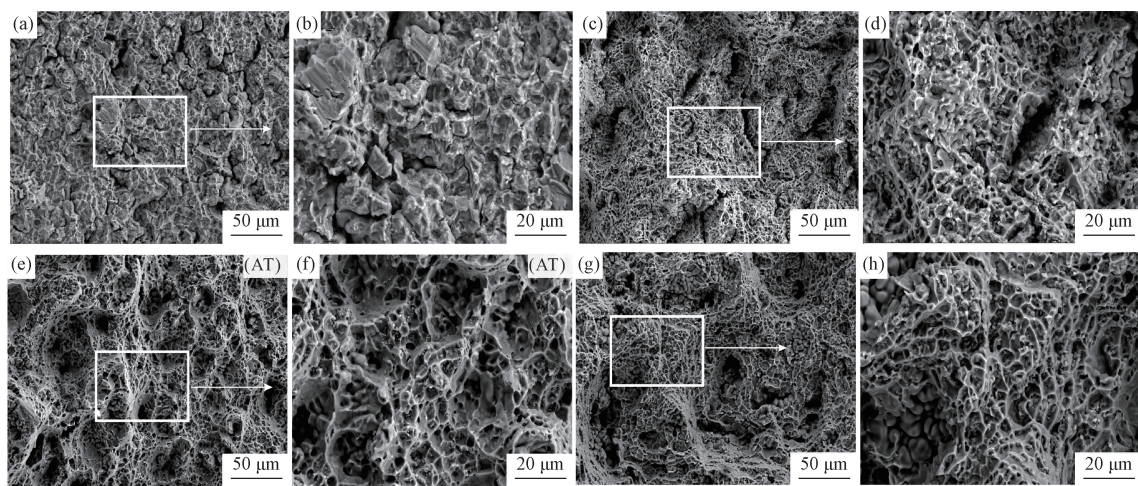


图10 不同热处理条件下接头拉伸断口的SEM形貌

(a,b) 未热处理(Weld); (c,d) 固溶处理(ST); (e,f) 时效处理(AT); (g,h) 固溶+时效处理(STA)

Fig. 10 SEM images of tensile fracture surface of the welded joints under different heat treatment conditions

(a, b) without heat treatment (Weld); (c, d) solution treatment (ST); (e, f) aging treatment (AT); (g, h) solution+aging treatment (STA)

深度更深,存在少量的撕裂棱和解理面,断裂方式为典型的脆韧混合断裂模式。

2.5 电化学腐蚀

图11为通过电化学工作站得到的焊缝中心的极化曲线。其中腐蚀电位(E_{corr})越大,腐蚀倾向越小,

腐蚀电流(I_{corr})越大表示腐蚀速率越高^[26]。不同热处理条件下焊缝的极化特征基本相似。由图11可知经焊后热处理的腐蚀电位明显增大,表示其腐蚀倾向变小,腐蚀电流明显减小,说明了腐蚀速率大幅降低。未经热处理的焊缝耐蚀性最差是因为焊缝中析出相

细小且呈连续枝晶状分布,形成了一条条的腐蚀通道从而导致了其腐蚀敏感度大。图 12 为不同热处理条件下焊缝的阻抗图谱。可以明显看出经过热处理后电流阻抗曲线半径远远大于热处理前。这表明焊后热处理使得焊缝的耐蚀性显著提高。焊缝经固溶+时效处理重新析出均匀、细小的 θ 相和 Cu、Mg 合金元素偏析倾向减小,减弱了元素富集区和焊区的原电池效应是明显提高了其耐蚀性的主要原因。

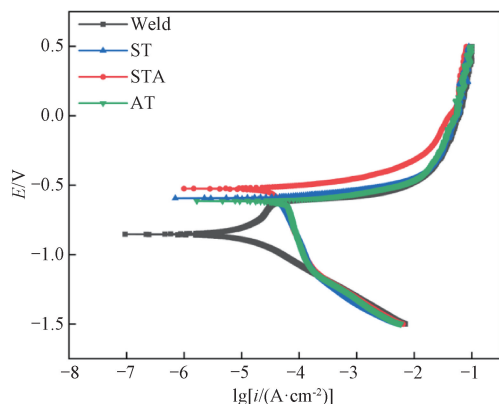


图 11 不同热处理条件下焊缝中心的极化曲线

Fig. 11 Polarization curves of the center of the weld under different heat treatment conditions

3 结论

1) 焊后热处理导致焊缝的晶粒尺寸增大,焊缝中心以等轴晶为主,热影响区轧制方向性消失,元素

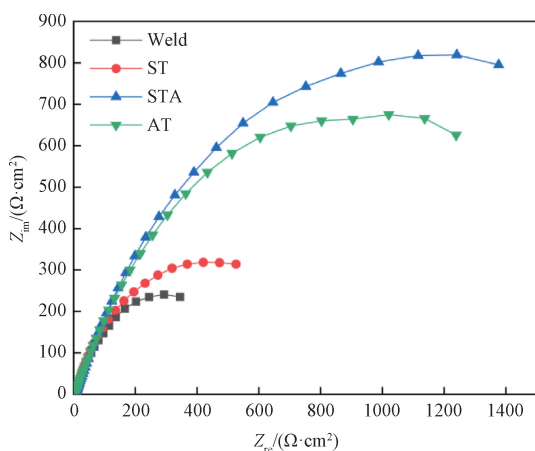


图 12 不同热处理条件下焊缝中心的电流阻抗曲线

Fig. 12 Current impedance curves of the center of the weld under different heat treatment conditions

偏析现象基本消除,接头硬度升高,硬度分布呈“V”形,接头的抗拉强度与伸长率提高,接头韧窝变小,密度变大,深度增加,撕裂棱和解理面减少,焊缝的腐蚀电位和电流阻抗增大,耐蚀性提高;

2) 与固溶处理、时效处理的接头相比,固溶+时效处理后,焊缝中析出相颗粒更细小弥散,分布更均匀,韧窝更加密集,深度更深,撕裂棱和解理面更少,焊缝区的硬度(121.2 HV0.1)升高最明显,焊接头平均抗拉强度(445.7 MPa)和平均伸长率(9.6%)最大,焊缝的腐蚀电位和电流阻抗曲线半径最大,焊缝的耐蚀性最高。

参考文献

- [1] Sun Y. The use of aluminum alloys in structures; Review and outlook[J]. Structures, 2023, 57; 105290.
- [2] Ahmed M M Z, El-Sayed S, et al. Friction stir welding of aluminum in the aerospace industry: The current progress and state-of-the-art review[J]. Materials, 2023, 16; 2971.
- [3] Li W, Yang K, Yin S, et al. Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying; A review[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2018, 34(3); 440–457.
- [4] Zhang J Y, Gao Y H, Yang C, et al. Microalloying Al alloys with Sc; A review[J]. Rare Metals, 2020, 39(6); 1–15.
- [5] Nadammal N, Kailas S V, Suwas S. A bottom-up approach for optimization of friction stir processing parameters; A study on aluminium 2024-T3 alloy[J]. Materials and Design, 2015, 65; 127–138.
- [6] Feng T, Zhan L, Ma B, et al. Strengthening behavior and microstructure of 2195 Al-Cu-Li alloy under cycling loading[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1005; 176082.
- [7] Bahl S, Xiong L, Allard L F, et al. Aging behavior and strengthening mechanisms of coarsening resistant metastable θ' precipitates in an Al-Cu alloy[J]. Materials and Design, 2021, 198; 109378.
- [8] Chung T F, Yang Y L, Huang B M, et al. Transmission electron microscopy investigation of separated nucleation and in situ nucleation in AA7050 aluminum alloy[J]. Acta Materialia, 2018, 149; 377–387.
- [9] Selvi S, Vishvakshnan A, Rajasekar E. Cold metal transfer (CMT) technology an overview[J]. Defence Technology, 2018, 14(1); 28–44.

- [10] Kashaev N, Ventzke V, Çam G. Prospects of laser beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications[J]. *Journal Manuf Process*, 2018, 36: 571–600.
- [11] Bi J, Chi J, Song H, et al. Enhancing tensile properties of MIG welded AA6061 joints: Effect of pulse mode and post-weld heat treatment[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 39: 109156.
- [12] Huan P C, Wang X N, Zhang J, et al. Effect of wire composition on microstructure and properties of 6063 aluminium alloy hybrid synchronous pulse CMT welded joints[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2020, 790: 139713.
- [13] Iva N, Jaromir M, Jan N, et al. Influence of preheating temperature on changes in properties in the HAZ during multipass MIG welding of alloy AW 6061 and possibilities of their restoration[J]. *Metals*, 2021, 11(12): 1902.
- [14] Rajendran C, Kumar M V, Sonar T, et al. Investigating the effect of PWHT on microstructural features and fatigue crack growth behavior of friction stir welded AA2024-T6 aluminum alloy joints[J]. *Forces in Mechanics*, 2022, 8: 100–107.
- [15] Verma R P, Pandey K N, Andr'as K, et al. Difficulties and redressal in joining of aluminium alloys by GMA and GTA welding: a review[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 23: 2576–2586.
- [16] Safarali B, Shamanian M, Eslami A. Effect of post-weld heat treatment on joint properties of dissimilar friction stir welded 2024-T4 and 7075-T6 aluminum alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28(7): 1287–1297.
- [17] Hossam H E, Elshafey A G, Mohamed I A H, et al. Effect of post-weld heat-treatment and solid-state thermomechanical treatment on the properties of the AA6082 MIG welded joints[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 4380–4380.
- [18] Aval H J, Galvão I. Microstructure and corrosion behavior of A390-10 wt% SiC composite-AA2024-T6 aluminum alloy dissimilar joint: Effect of post-weld heat treatment[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2024: 321: 129468.
- [19] Li P, Jiang Y, Wang S, et al. Effect of post-weld heat treatment on inhomogeneity of mechanical properties and corrosion behavior of rotary friction welded 2024 aluminum alloy joint[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 75: 1012–1022.
- [20] Han L, Sui Y, Wang Q, et al. Effects of Nd on microstructure and mechanical properties of cast Al-Si-Cu-Ni-Mg piston alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695: 1566–1572.
- [21] Zamani M, Toschi S, Morri A, et al. Optimisation of heat treatment of AlCu-(Mg-Ag) cast alloys[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 139(6): 3427–3440.
- [22] Wang G, Bian X, Wang W, et al. Influence of Cu and minor elements on solution treatment of Al-Si-Cu-Mg cast alloys[J]. *Materials Letters*, 2003, 57(24/25): 4083–4087.
- [23] Examilioti T N, Kashaev N, Enz J, et al. On the influence of laser beam welding parameters for autogenous AA2198 welded joints[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 110(7): 2079–2092.
- [24] Ning J, Zhang L J, Bai Q L, et al. Comparison of the microstructure and mechanical performance of 2A97 Al-Li alloy joints between autogenous and non-autogenous laser welding[J]. *Materials and Design*, 2017, 120: 144–156.
- [25] Zuikois I S, Gazizov M R, Kaibyshev R O. Effect of thermomechanical treatment on the microstructure, phase composition, and mechanical properties of Al-Cu-Mn-Mg-Zralloy[J]. *Physics of Metals and Metallography*, 2016, 117(9): 906–919.
- [26] Zhang C H, Huang G J, Liu Q. Research on local corrosion behavior of thermo-mechanically affected zone in dissimilar AA2024/7075 friction stir welds[J]. *Intermetallics*, 2021, 130(1): 107081.