

焊后热处理对 Al-Zn-Mg-Cu 合金 MIG 焊接接头组织与性能的影响

张翔^{1,2}, 陈波^{1,2}, 解德杰¹

(1. 徐工集团江苏徐州工程机械研究院, 江苏 徐州 221004;

2. 徐工集团高端工程机械智能制造国家重点实验室, 江苏 徐州 221004)

摘要:采用 ER5356 焊丝对 Al-4.6Zn-1.5Mg-0.15Cu 合金板材进行熔化极钨极氩弧焊试验,并对焊接接头进行了不同的焊后热处理。借助光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)研究不同焊后热处理试样的组织变化规律,并进行了显微硬度测试与拉伸试验。结果表明:经固溶加时效处理后,焊接接头抗拉强度与显微硬度得到明显提升,抗拉强度与焊缝硬度均值分别提高至 304 MPa 与 85 HV,相比焊后未处理的 263 MPa 与 66 HV,增幅分别达 15.6% 与 28.8%。焊接接头经时效处理后,组织的不均匀性及强化相的分布得到改善;而经重新固溶后,第二相发生回溶,再经时效处理将使得一部分不稳定的过饱和固溶体重新析出且弥散分布。

关键词: Al-Zn-Mg-Cu 合金; MIG 焊接; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG441.8; TG407 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-6051(2020)04-0176-04

Influence of post weld heat treatment on microstructure and properties of MIG welded joint of Al-Zn-Mg-Cu alloy

Zhang Xiang^{1,2}, Chen Bo^{1,2}, Xie Dejie¹

(1. Jiangsu Xuzhou Construction Machinery Research Institute, Xuzhou Construction Machinery Group, Xuzhou Jiangsu 221004, China;

2. State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Advanced Construction Machinery,

Xuzhou Construction Machinery Group, Xuzhou Jiangsu 221004, China)

Abstract: Al-4.6Zn-1.5Mg-0.15Cu alloy plate was welded by using metal inert-gas welding (MIG) with ER5356 welding wire as filler metal. And different post weld heat treatments were carried out on the welded joints. The microstructure evolution of the welded joints after different post weld heat treatments was investigated using optical microscopy (OM) and scanning electron microscope (SEM). In addition, the microhardness measurements and tensile tests were conducted. The results show that after solution and aging treatments, the tensile strength and microhardness of the welded joints are significantly improved. The microhardness of the welded joint is increased from 66 HV before heat treatment to 85 HV after solution and aging treatments, increasing by 28.8%. The tensile strength is increased from 263 MPa before heat treatment to 304 MPa after solution and aging treatments, increasing by 15.6%. After aging treatment, the inhomogeneity of microstructure and the distribution of strengthening phase are improved. After solution treatment, the second phase of the welded joint can be re-dissolved, and then aging treatment makes some unstable supersaturated solid solution re-precipitated and diffusely distributed.

Keywords: Al-Zn-Mg-Cu alloy; melt inert-gas welding (MIG); microstructure; mechanical properties

Al-Zn-Mg-Cu 系中高强度铝合金是典型的可热处理强化型合金,经固溶强化处理后,显微组织为铝基固溶体和 η' (MgZn_2) 亚稳定强化相。其通常具有比强度高、抗蚀性好、易于加工成形等优异的力学性能和工艺性能^[1],是轻量化车身的理想材料。而铝合金车身制造主要是基于大热量输入的 MIG 或 TIG 焊接成形^[2-3]。作为典型凝固组织的焊缝,其强度与硬度波动较大,是焊接接头力学性能最薄弱的部位。同时,由

于焊接热输入的影响,焊缝容易发生第二相偏析、晶间腐蚀和应力腐蚀^[4]。而焊后接头软化严重,将直接影响车辆的安全性能与使用寿命。通常,焊后热处理作为一种提高铝合金材料焊后性能的有效手段被广泛应用^[5]。曾强等^[6]对 7075 铝合金脉冲 MIG 补焊接头进行了焊后热处理,结果表明,焊后热处理有效改善了焊缝和热影响区的组织,提高了母材区的硬度,但焊后热处理对补焊焊缝区的硬度提高不明显。因此,本文针对性地研究了不同焊后热处理工艺对 MIG 焊接接头组织与力学性能的影响,特别关注了焊后热处理对焊缝区硬度的影响。这些研究将为扩大 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金的工程应用提供理论依据。

收稿日期:2019-10-05

作者简介:张翔(1986—),男,工程师,博士,主要从事轻合金材料先进制备工艺及组织性能调控研究,发表论文 10 余篇,E-mail:vip525@163.com

DOI:10.13251/j.issn.0254-6051.2020.04.037

1 试验材料和方法

试验材料为 Al-4.6Zn-1.5Mg-0.15Cu 铝合金轧制板材(T6 态)。试验板材(尺寸为 300 mm × 200 mm × 5 mm)长度方向平行于轧制方向,采用熔化极惰性气体保护焊(Melt inert-gas welding, MIG)沿长度方向进行对接焊接试验,焊丝采用 ER5356 合金。经 ARL 3460 火花直读光谱仪对母材进行元素含量测定,母材化学成分(质量分数,%)为 4.6Zn、1.5Mg、0.15Cu、0.10Si、0.14Fe、0.39Mn、0.13Cr,余量为 Al,焊丝化学成分(质量分数,%)为 4.97Mg、0.09Cr、0.17Si、0.13Fe、0.04Cu、0.05Zn、0.14Mn、0.09Ti,余量为 Al。

MIG 焊接接头形式及 V 型坡口尺寸如图 1 所示,其中板厚 $t=5$ mm,剖口角度 $\alpha=70^\circ$,间隙 $b=0\sim 0.5$ mm。焊前使用气动钢丝刷对母材表面焊接部位进行打磨,去除表面油污,并使其露出金属光泽。采用 TPS 5000 焊机对试验材料进行 MIG 焊接成形。焊丝选用直径为 $\phi 1.2$ mm 的 ER5356,保护气体为高纯氩气。焊接样件按照 NB/T 47013.5—2015《承压设备无损检测第 5 部分:渗透检测》进行渗透检测,结果符合要求。对焊接样件进行焊后热处理,热处理工艺分别为:①焊后时效处理($150^\circ\text{C} \times 6\text{ h}$),②固溶处理($520^\circ\text{C} \times 30\text{ min}$) + 时效处理($150^\circ\text{C} \times 6\text{ h}$),并与③焊后未处理、④焊后自然时效 30 天进行对比。

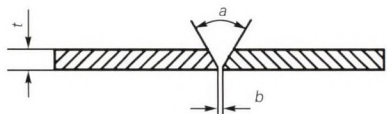


图 1 焊缝类型及剖口尺寸

Fig. 1 Weld joint type and groove size

采用电火花线切割机制取组织与性能测试试样。显微组织试样取自试样焊缝处横截面,并通过金相镶嵌机(Simplimet 3000)进行热镶嵌预处理,在自动研磨抛光机(Ewmet250pro)上进行水磨砂纸研磨处理,并进行机械抛光。随后经科勒试剂腐蚀后,采用徕卡倒置光学显微镜(DMI5000M)观察试样显微组织。按照 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》要求制备试样,每块试验板垂直于焊缝方向截取 3 个拉伸试样,拉伸试样取样位置如图 2 所示。

使用 AG-X 100KNH 型电子万能试验机进行拉伸试验,加载速率 10 mm/min。通过实验室自有的 FEI 钨灯丝扫描电镜(Inspect S50)对拉伸试样断口进行 SEM 观察。基于 KB30 全自动显微维氏硬度试验机测试了试样焊缝处的显微维氏硬度梯度,加载砝码为 1 kg,保压时间 15 s,硬度测试位置见图 3 所示。

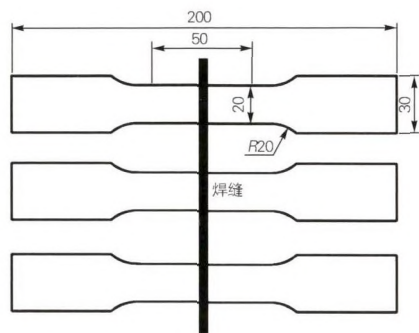


图 2 焊接取样位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the welding sampling position



图 3 试样显微硬度测试位置

Fig. 3 Test location of the microhardness for the specimen

2 结果和讨论

2.1 显微组织

图 4 为试样焊后经不同热处理制度的焊缝组织。焊缝区组织可见柱状树枝晶,沿热传导方向长大,均为典型铝合金铸态组织。从图 4(a)、(b)看出,组织受焊接热循环影响发生了再结晶,晶粒长大,并有长大的黑色 Mg_2Si 相存在。由图 4(c)可知,焊缝组织经时效处理,显微组织得到一定程度的改善。由图 4(d)可知,经过重新固溶加时效后,热影响区粗大的 Mg_2Si 相发生回溶,重新析出弥散分布的强化相,组织均匀性得到明显改善。

2.2 显微硬度

对不同焊后热处理试样进行显微硬度测试,测试结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,焊缝的硬度变化趋势基本相同,即随着距焊缝距离的增大,硬度先增加后降低、再增加至母材硬度水平并保持稳定,焊缝处硬度最低,热影响区次之。焊后未处理试样在焊缝处硬度最低,焊缝硬度均值为 66 HV,并且在热影响区存在十分明显的软化。相比焊后未处理试样,焊后自然时效 30 天试样与焊后人工时效试样在焊缝区与热影响区的硬度均得到一定提高,焊缝处硬度均值分别为 71 HV 与 74 HV。焊缝经固溶加时效处理后,焊接接头硬度分布情况发生明显变化,除焊缝硬度有提升外,热影响区软化得到明显改善。其焊缝处硬度均值为 85 HV,相比焊后未处理试样,增幅达 28.8%。这是由于固溶处理使得母材中的 Zn 原子向焊缝组织扩散,同时焊丝中的 Mg 扩散至母材区,铝、镁等合金元素形成过饱和固溶体与足够的空位密度,经时效处理后,得到了较好

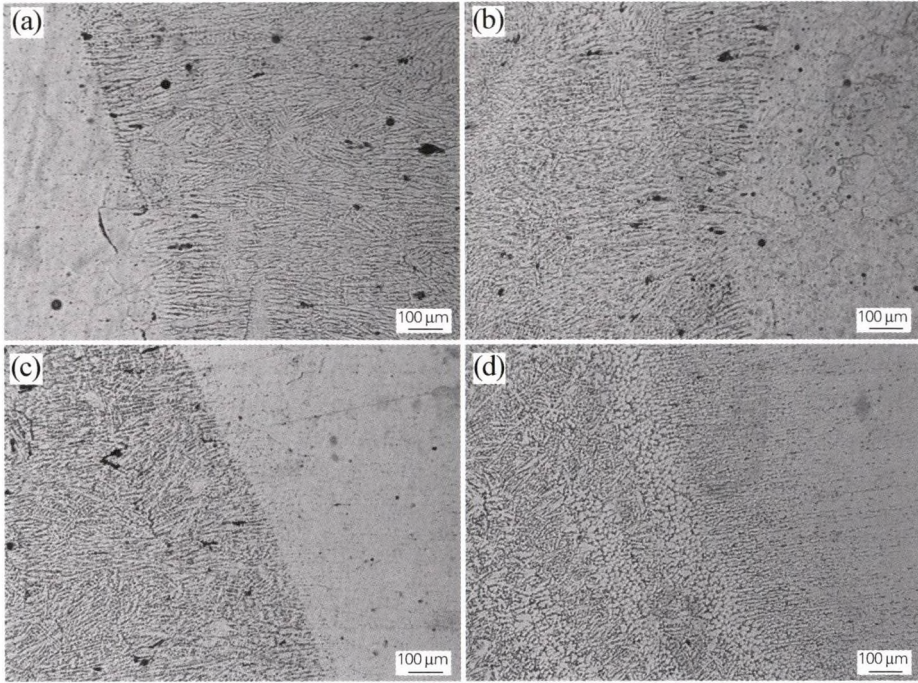


图 4 不同焊后热处理焊接接头的显微组织

(a) 焊后未处理; (b) 自然时效 30 天; (c) 时效 (150 °C × 6 h); (d) 固溶 (530 °C × 30 min) + 时效 (150 °C × 6 h)

Fig. 4 Microstructure of the welded joints after different post weld heat treatments

(a) untreated; (b) natural aged for 30 days; (c) aged at 150 °C for 6 h; (d) solution treated at 530 °C for 30 min and aged at 150 °C for 6 h

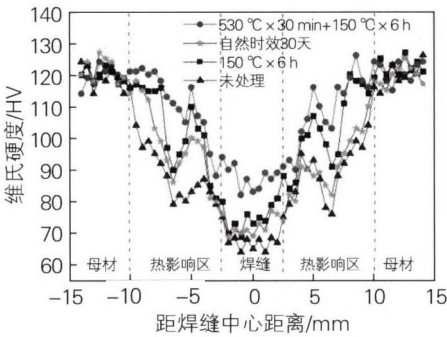


图 5 不同焊后热处理焊接接头的显微硬度

Fig. 5 Hardness of the welded joints after different post weld heat treatments

高,不同焊后热处理试样的伸长率呈下降趋势,由未处理试样的 6.5% 下降至固溶加时效后的 3.4%。但所有试样均在焊缝处发生断裂,表明焊缝强度仍低于母材。这是由于焊缝与母材在析出机制、析出能力、析出物大小与密度上均存在差异,导致焊缝力学性能仍旧低于母材。

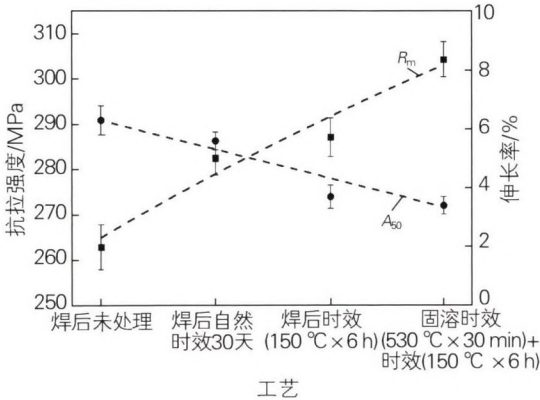


图 6 不同焊后热处理焊接接头的抗拉强度

Fig. 6 Tensile strength of the welded joints after different post weld heat treatments

2.4 断口观察

将不同焊后热处理试样的拉伸断口形貌进行 SEM 观察,结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,所有断口均呈现出典型的微孔聚集性断裂特征^[7],由韧窝、

的析出强化效果。

2.3 拉伸性能

不同焊后热处理试样的抗拉强度与伸长率变化情况如图 6 所示。焊后未处理试样的抗拉强度均值为 263 MPa,强度系数 (接头抗拉强度/母材抗拉强度 (均值为 400 MPa)) 为 65.8%。经自然时效 30 天处理的焊接接头抗拉强度均值为 283 MPa,强度系数为 70.8%。焊后时效与固溶加时效后,抗拉强度均值分别为 287 与 304 MPa,强度系数分别为 71.8% 与 76.0%。相比焊后直接时效处理,重新固溶处理后,接头的抗拉强度再次得到提升,增幅达 15.6%。随着抗拉强度的升

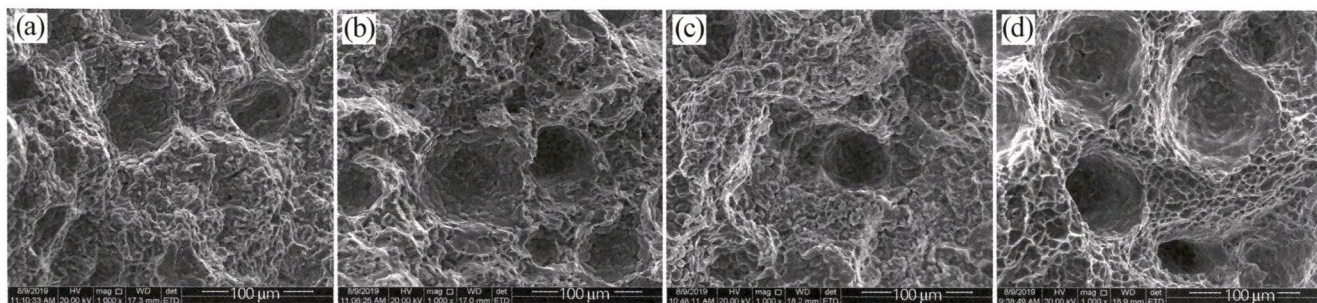


图7 不同焊后热处理试样的拉伸断口 SEM 形貌

(a) 焊后未处理; (b) 焊后自然时效 30 天; (c) 时效 (150 °C × 6 h); (d) 固溶 (530 °C × 30 min) + 时效 (150 °C × 6 h)

Fig. 7 SEM images of the tensile fracture for the specimens after different post weld heat treatments

(a) untreated; (b) natural aged for 30 days; (c) aged at 150 °C for 6 h; (d) solution treated at 530 °C for 30 min and aged at 150 °C for 6 h

撕裂棱及细小空洞组成。韧窝多呈等轴状,表现出明显的韧性断裂特征。焊后未处理试样断口韧窝较浅,分布不均,且存在台阶状撕裂棱,局部区域的孔洞由第二相粒子脱落造成。韧窝的尺寸还受到第二相粒子尺寸的影响。自然时效与人工时效处理后,焊缝内部应力得到释放,从而使残余应力消除或减小,组织更加稳定。在拉应力作用下,其焊缝能够更好地吸收能量延缓断裂,其韧窝尺寸更加均匀,深度有所增加。这是因为韧窝是由微孔聚集而成,韧性更好、强度更高的材料,微孔在聚集过程中可以吸收更多的功。而当焊缝经固溶处理得到强化后,由于溶解在固溶体中的合金元素来不及析出,形成了一部分不稳定的过饱和固溶体。此后的时效处理可以加速合金元素的析出,得到不同于自然时效的沉淀析出相,使得焊缝强韧化,改善使用性能。其焊接接头软化区明显减弱,断口上韧窝深度加深,韧性特征更加明显。

3 结论

1) Al-4.6Zn-1.5Mg-0.15Cu 铝合金经 ER5356 焊丝焊接成形,全部试样均在焊缝处硬度最低,此处为焊接接头的薄弱区。焊后未处理试样焊缝处硬度均值为 66 HV,经固溶加时效处理后,试样硬度提升最大,其焊缝处硬度均值提高至 85 HV,增幅达 28.8%。

2) 拉伸试验结果表明,焊后未处理试样抗拉强度均值为 263 MPa。经固溶加时效处理后,接头抗拉强度提升最大,其抗拉强度均值提高至 304 MPa,增幅达 15.6%。拉伸断口均呈典型的韧性断裂特征,断口由韧窝、撕裂棱及细小空洞组成。经固溶加时效处理后,拉伸断口韧窝深度加深,韧性特征更加明显。

3) 焊接接头经时效处理后,组织的不均匀性及强化相的分布得到改善;经重新固溶加时效处理后, Mg₂Si 相发生回溶,固溶强化后,重新析出弥散分布的

强化相。因此,焊后热处理是改善可热处理强化型铝合金焊接接头显微组织的一种行之有效的办法。

参考文献:

- [1] 黄奎,宋丰轩,任月路,等.时效制度对 7A04 铝合金铸造固溶处理性能的影响[J].金属热处理,2017,42(7):137-140.
Huang Kui, Song Fengxuan, Ren Yuelu, et al. Effect of aging process on properties of solution treated 7A04 aluminum alloy cast plate[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(7): 137-140.
- [2] Zhang L, Li X, Nie Z, et al. Softening behavior of a new Al-Zn-Mg-Cu alloy due to TIG welding[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(5): 1870-1879.
- [3] 蒋德平,姚宗湘,钟席武.时效处理对 6061 铝合金 MIG 焊接接头组织和性能的影响[J].电焊机,2018,48(2):108-111.
Jiang Deping, Yao Zongxiang, Zhong Xiwu. Effect of aging temperature on microstructure and mechanical properties of MIG weld joint for 6061 aluminum alloy[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(2): 108-111.
- [4] 丁立鹏.汽车车身用 Al-Mg-Si-Cu 合金中析出相演变和热处理工艺研究[D].重庆:重庆大学,2017.
Jiang Deping. Study on the precipitates evolution and heat treatment process of Al-Mg-Si-Cu alloys for automotive bodys[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [5] Zhang D K, Wang G Q, Wu A P, et al. Effects of post weld heat treatment on microstructure, mechanical properties and the role of weld reinforcement in 2219 aluminum alloy TIG-welded joints[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2019(2): 1-11.
- [6] 曾强,朱绍维,付正鸿.焊后热处理对 7075 铝合金脉冲 MIG 补焊接头组织和力学性能的影响[J].金属热处理,2018,43(6):126-131.
Zeng Qiang, Zhu Shaowei, Fu Zhenghong. Effect of post weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of pulse MIG repairing weld joint of 7075 aluminum alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(6): 126-131.
- [7] 张翔,王晓溪,张德坤,等. ECAP 挤压道次对 6061 铝合金力学性能及耐磨性的影响[J].锻压技术,2019,44(2):61-67.
Zhang Xiang, Wang Xiaoxi, Zhang Dekun, et al. Influence of ECAP pass on mechanical properties and wear resistance of aluminum alloy 6061[J]. Forging and Stamping Technology, 2019, 44(2): 61-67.