

超声冲击对铝合金搅拌摩擦焊接头组织及性能的影响

邓云发, 张体明, 干贤威, 尤一鸣, 陈玉华

(南昌航空大学 江西省航空构件成形与连接重点实验室, 南昌 330063)

摘要: **目的** 分析超声冲击对铝合金搅拌摩擦焊成形后接头的组织及耐蚀性的作用效果。**方法** 采用超声冲击设备对 2A12 铝合金搅拌摩擦焊接头表面进行超声冲击处理, 并对超声冲击前后接头的显微组织、显微硬度以及耐腐蚀性能进行了分析。**结果** 经过超声冲击处理后的铝合金接头上表面会产生一层塑性变形层, 并且塑性层内位错密度增大, 使表层金属得到一定程度的加工硬化, 促使冲击后接头各区域的表面硬度明显提高, 冲击后接头热机械影响区和热影响区硬度提高达 60%以上; 腐蚀浸泡试验发现, 超声冲击后接头的点蚀程度较超声冲击前明显减缓, 腐蚀速率约是冲击前的 1/2。**结论** 超声冲击有效改善了铝合金搅拌摩擦焊接头区域材料过时效的软化现象, 并且有效改善了接头的抗腐蚀性能。

关键词: 超声冲击; 搅拌摩擦焊; 2A12 铝合金; 显微组织; 腐蚀性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.05.011

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)05-0078-08

Effects of Ultrasonic Impact on Microstructure and Properties of Friction Stir Welded Aluminum Alloy

DENG Yun-fa, ZHANG Ti-ming, GAN Xian-wei, YOU Yi-ming, CHEN Yu-hua

(Jiangxi Key Laboratory of Forming and Joining Technology for Aviation Components, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

ABSTRACT: The paper aims to analyze the effects of ultrasonic impact on joint structure and corrosion resistance of aluminum alloy joint after friction stir weld. UIT was firstly applied to the surface of 2A12 aluminum alloy friction stir welded joint. The microstructure, micro-hardness and corrosion resistance of the joints before and after UIT were analyzed. A layer of plastic deformation was observed on the surface of the joints after UIT, and the dislocation density in the plastic layer was increased, leading to work hardening and surface hardness increase. The hardness of the thermo-mechanical affected zone (TMAZ) and heat-affected zone (HAZ) of the joint was increased by more than 60%. Immersion test results showed that the corrosion rate was halved after UIT. Therefore, it can be concluded that UIT can effectively improve the hardness of friction stir welded aluminum alloy, and improve the corrosion resistance as well.

KEY WORDS: ultrasonic impact; friction stir welding; 2A12 aluminum alloy; microstructure; corrosion properties

收稿日期: 2019-07-21

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ180507)

作者简介: 邓云发 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为先进连接技术。

通讯作者: 张体明 (1987—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为材料连接及腐蚀防护。

2A12 铝合金属于 Al-Cu-Mg 系,属于高强度硬铝合金,由于其优异的性价比和良好的综合性能,成为现代航空航天、交通运输和武器装备机体结构的重要材料^[1-2]。2A12 铝合金焊接性较差,传统的熔焊工艺热输入较大,焊缝容易产生热裂纹、气孔、夹渣等缺陷,且接头变形大、抗拉强度低^[3-4]。搅拌摩擦焊(Friction stir welding, 简称 FSW)是一种固相连接技术,是由英国焊接研究所(TWI)研制发明的,与传统的熔焊相比,具有高效、节能、环保、接头质量好等诸多优点,是最有前途的轻质合金焊接技术之一。

在铝合金搅拌摩擦焊过程中,由于焊接缺陷容易导致接头性能不佳^[5-10],为此国内外学者采取了很多措施,一方面在焊接过程中增加热输入,用调整焊接工艺参数、加大轴肩下压量或者在焊接时加入辅助加热装置,以使焊接过程中金属微粒获得足够的能量,从而使金属材料得到软化,让金属微粒在搅拌过程中流动更充分,从而使接头性能得到提高^[11-13];另一方面,焊接后,通过对焊缝接头表面施加一定的压力,使接头表面晶粒细化,并且降低表面拉伸残余应力,使其以有益的压缩应力的形式存在,从而改善接头的性能^[14-15]。超声冲击处理(Ultrasonic Impact Treatment, 简称 UIT)是一种近年来迅速发展的金属材料表面强化技术^[16]。超声冲击是利用超声波驱动冲击针对试件表面进行低应力高速、高频撞击,当材料表面受到冲击时,会发生严重的塑性变形,表面大尺寸的晶粒经过冲击后得到细化,材料近表层位错密度增加,从而使其强度和硬度等性能得到提高^[17]。此外,超声冲击后材料表面应力-应变状态的变化也会影响耐腐蚀性能,例如江明明等^[18]在研究超声冲击时间对 MB8 镁合金表面耐腐蚀性能的影响中发现,镁合金表面经过超声冲击后,其表面产生残余压应力,与此同时,还形成了一层有由细小晶粒组成的塑性层,使其在 NaCl 溶液中的耐蚀性增强。杨建海等^[19]在研究 2A14 铝合金混合表面纳米化对电化学腐蚀行为的影响中发现,2A14 铝合金经混合表面后经过超音速微粒轰击(SFPB)和表面机械滚压处理(SMRT)纳米化处理,其表层晶粒细化、晶界显著增多,并且产生了残余压应力,使 2A12 表面耐腐蚀性得到提高。目前文献中只出现对 2A12 铝合金搅拌摩擦焊接头的腐蚀相关性研究,关于超声冲击对 2A12 铝合金搅拌摩擦焊接头的腐蚀性能的影响相关研究有待补充和完善。

文中利用超声冲击技术对 2A12 铝合金 FSW 接头进行超声冲击处理,对超声冲击前后表面显微组织、硬度和腐蚀性能进行对比分析研究。

1 材料及方法

试验材料为 2A12-T4 态铝合金,其规格为 200

mm×100 mm×10 mm,化学成分见表 1。焊前用质量分数为 20%的 NaOH 浸泡 10 min,然后用体积分数为 30%的 HNO₃ 溶液将表面擦拭干净,并将对接面用砂纸打磨平整,以保证对接面齐平。焊接前用丙酮擦拭表面以去除表面油污。

表 1 2A12 铝合金化学成分(质量分数)
Tab.1 Chemical composition of 2A12 aluminum alloy (mass fraction) %

Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Zn	Al
4.29	1.48	0.11	0.29	0.61	0.02	余量

FSW 工艺参数:搅拌头的旋转速度为 600 r/min,焊接速度为 47.5 mm/min,下压量为 0.3 mm,倾斜角度为 2°,搅拌针螺纹采用左螺纹。搅拌头的规格:轴肩直径是 $\Phi 30$ mm,搅拌针直径是 $\Phi 10$ mm,搅拌针长度是 9.6 mm,搅拌针的锥度为 20°,搅拌具体尺寸如图 1 所示。

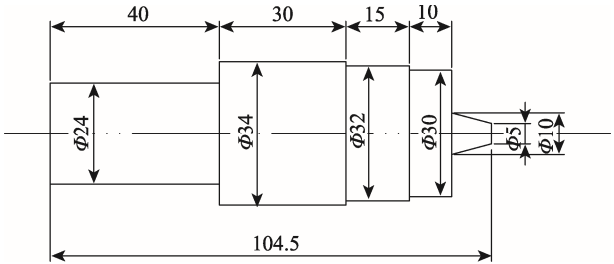


图 1 搅拌头尺寸
Fig.1 Geometric dimensioning of tool

超声冲击装置的功率为 2 kW,超声振动频率为 20 kHz,表面往复冲击 3 道。随后,截取接头横截面试样,打磨抛光后用 Keller 试剂进行腐蚀,并采用 4XB-TV 型金相显微镜进行观察。超声冲击前后接头表面硬度使用 WT-401MVD 型数字显微硬度计依次在横截面试样上表面进行测量,加载载荷为 100 g,加载时间为 15 s。从接头上表面垂直于焊核方向截取 90 mm×10 mm×3 mm 试样,切割时确保焊核位于试样长度方向的中间位置,随后进行上下两面的超声冲击处理,非处理区采用环氧树脂镶嵌,并用酒精擦拭干净备用。将处理好的试样以挂片的形式放在质量分数为 3.5%的 NaCl 溶液中,环境温度为(30±0.5)°C,浸泡时间为 480 h。浸泡试验结束后,采用静态失重法测量腐蚀速率。

$$v = \frac{m_0 - m'_0}{t \times S} \quad (1)$$

式中: m_0 为腐蚀试验前的试样质量; m'_0 为腐蚀试验后的试样质量(g); t 为腐蚀时间(h); S 为试样暴露与腐蚀介质的总面积(mm^2); v 为腐蚀速率($\text{g}/(\text{mm}^2 \cdot \text{h})$)。此外,考虑到铝合金焊接接头可能会出现局部腐蚀,浸泡后截取接头的横截面,通过多次测量获得最大局部腐蚀深度及位置。

2 结果及分析

2.1 超声冲击前后接头表面成形

图 2a 和 2b 分别表示的是超声冲击前后接头表面的宏观形貌,从图 2a 可以看出,超声冲击前的接头

表面是平整的,并且具有金属光泽;从图 2b 可以看出接头表面在经过超声冲击后,接头表面不平整,有明显的冲击痕迹,这是由于接头表面材料经过超声波驱动冲击针低应力高速、高频撞击后,表面材料发生塑性变形而留下的痕迹,从而使接头表面出现凹凸不平的现象。

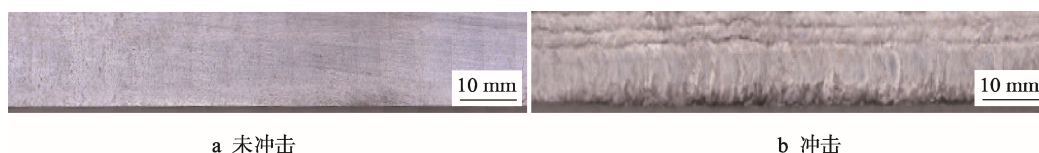


图 2 超声冲击前后接头的表面宏观形貌

Fig.2 Macroscopic morphology of joint surface before and after UIT

2.2 显微组织分析

超声冲击前后的显微组织见图 3—6,分别对应母材、热机械影响区、热影响区和焊核区。从图 3b 母材区域超声冲击后的显微组织形貌可以看出,母材部分的晶粒经过超声冲击后,上表面粗大的晶粒发生明显的塑性变形,并且表层晶粒发生细化,可以明显看出表面有一层由细小晶粒组成的塑性层,并且从金相图片中测量得到冲击层的厚度达 110 μm ;随着厚度方向的增加,离冲击面越远,冲击效果越弱,并且在细小晶粒与大尺寸晶粒交界处可以看出部分大尺寸晶粒发生了扭曲变形。

图 4a 和 4c 分别表示的是未受超声冲击时的前进侧和后退侧热机械影响区显微组织形貌,从图 4a 可以看出晶粒发生变形,并且产生大角度倾斜,这是由于在焊接过程中,当搅拌头顺时针旋转时,前进侧金属发生较大的塑性流动,使母材与焊缝金属之间发生很大的相对变形差。与此同时,受到机械搅拌热的影响,使晶粒组织增大。图 4c 为后退侧热力影响区超声冲击前的显微组织形貌,在搅拌针不断旋转挤压过程中,后退侧金属材料向下流动的趋势比前进侧小,

因此,后退侧的晶粒弯曲程度较小。图 4b 和 4d 分别为前进侧和后退侧热机械影响区经过超声冲击后的显微组织形貌,可以看出,和母材近表面组织一样,经过超声冲击后,在表面能形成一层塑性变形层,塑性层晶粒尺寸明显减小。

图 5a 和 5b 分别表示的是冲击前后的热影响区显微组织形貌。由于在焊接过程中热影响区受到焊接热作用的影响,晶粒尺寸与母材相比稍有增加(见图 5a);图 5b 是热影响区经过超声冲击后的显微组织形貌,可以明显看出超声冲击后近表面形成一层塑性层,变形程度和母材相似。

图 6 为不同情况下焊核区的显微组织形貌。其中,图 6a 和 6c 分别表示的是不同放大倍数下的焊核区域未受超声冲击时的显微组织形貌,可以明显看出,该区域组织主要是由细小的等轴晶组成,晶粒大小无明显的区别,这是由于在焊接过程中,由于搅拌针的转动,使搅拌区及附近的母材温度升高,从而使金属处于完全塑性状态,随后,焊核区经历了动态再结晶过程,形成了细小的等轴晶。图 6b 和 6d 分别表示的是不同放大倍数下焊核区受超声冲击后的显微组织形貌,由于焊核区域主要是细小的等轴晶,经过超声冲

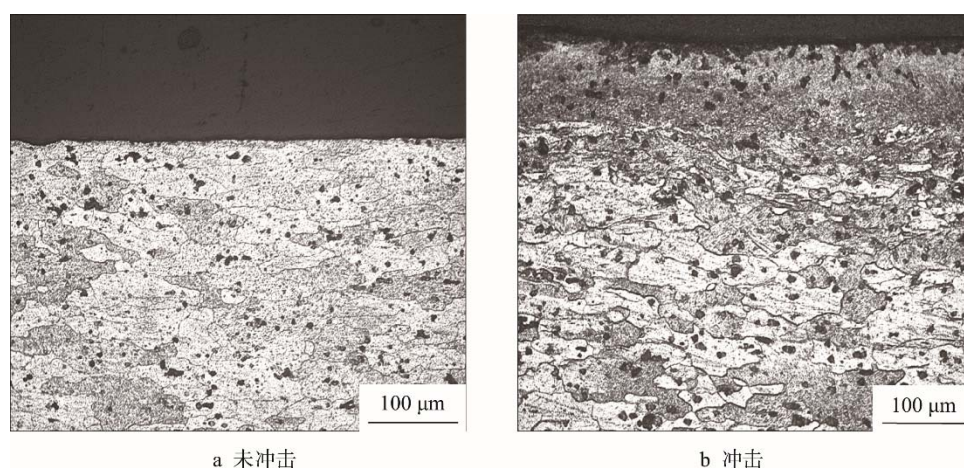


图 3 母材区显微组织

Fig.3 Microstructure of base material

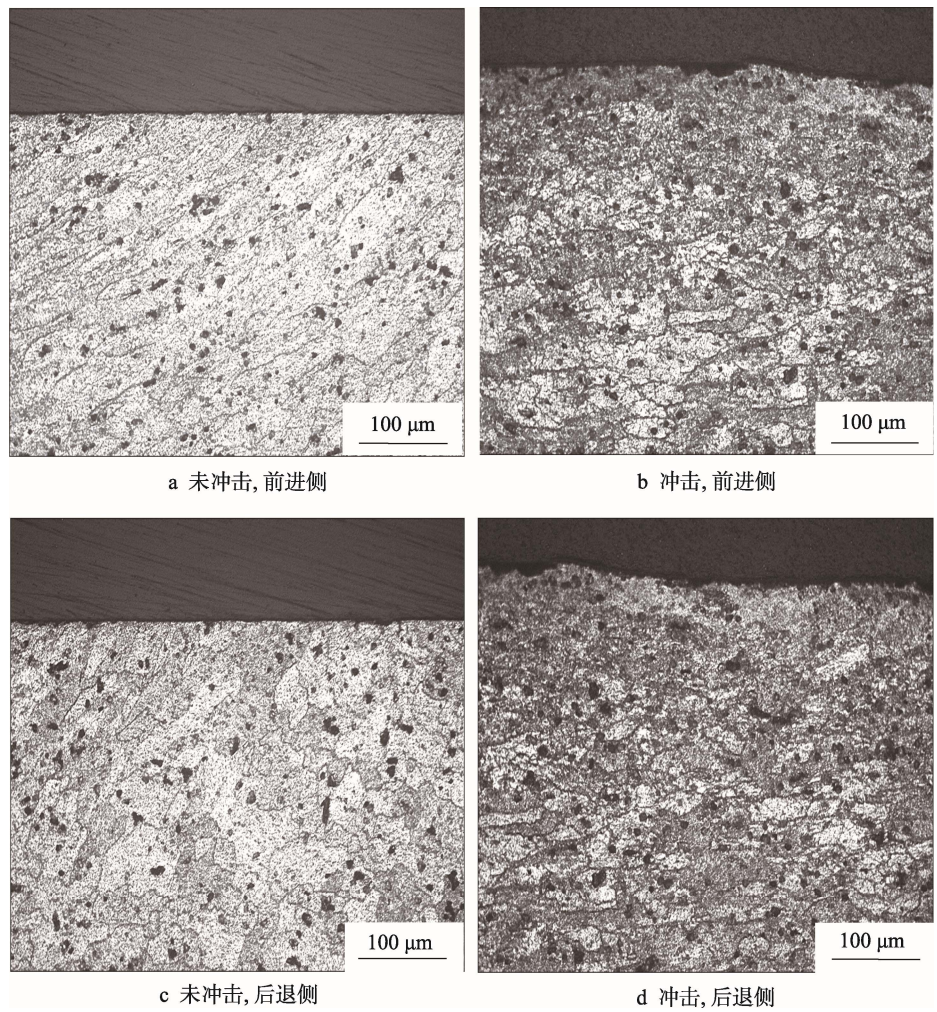


图 4 热机械影响区显微组织
Fig.4 Microstructure of TMAZ

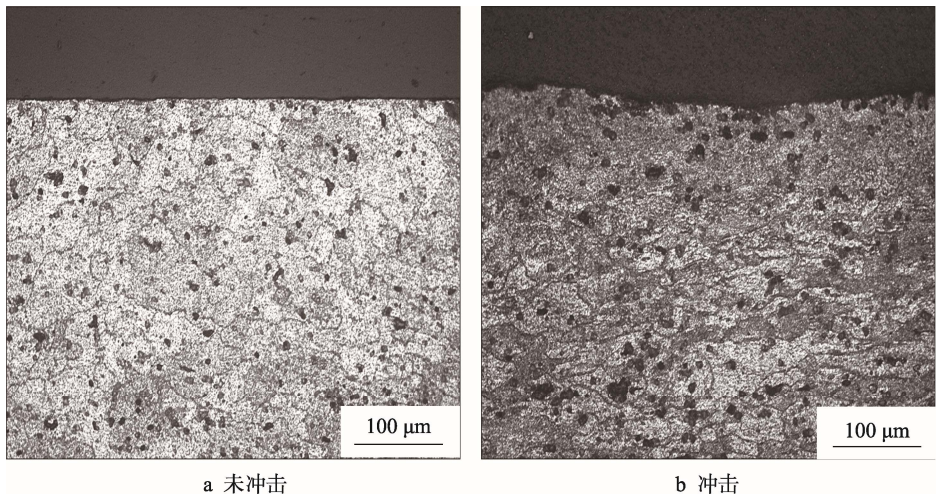


图 5 热影响区显微组织
Fig.5 Microstructure of heat affected zone

击后，放大倍数为 200 倍时，可以观察到近表面有一层更细小的晶粒，但现象并不明显，而当放大倍数为 500 倍时，可以观察到焊核区域近表面的晶粒呈糊状，这是因为经过超声冲击后，晶粒发生严重的塑性变形。

2.3 超声冲击对表面硬度的影响

图 7 所示为超声冲击前后搅拌摩擦焊接头硬度分布曲线，可以看出，冲击前接头表面的热机械影响区和热影响区硬度值较低，因为热影响区只受热的影

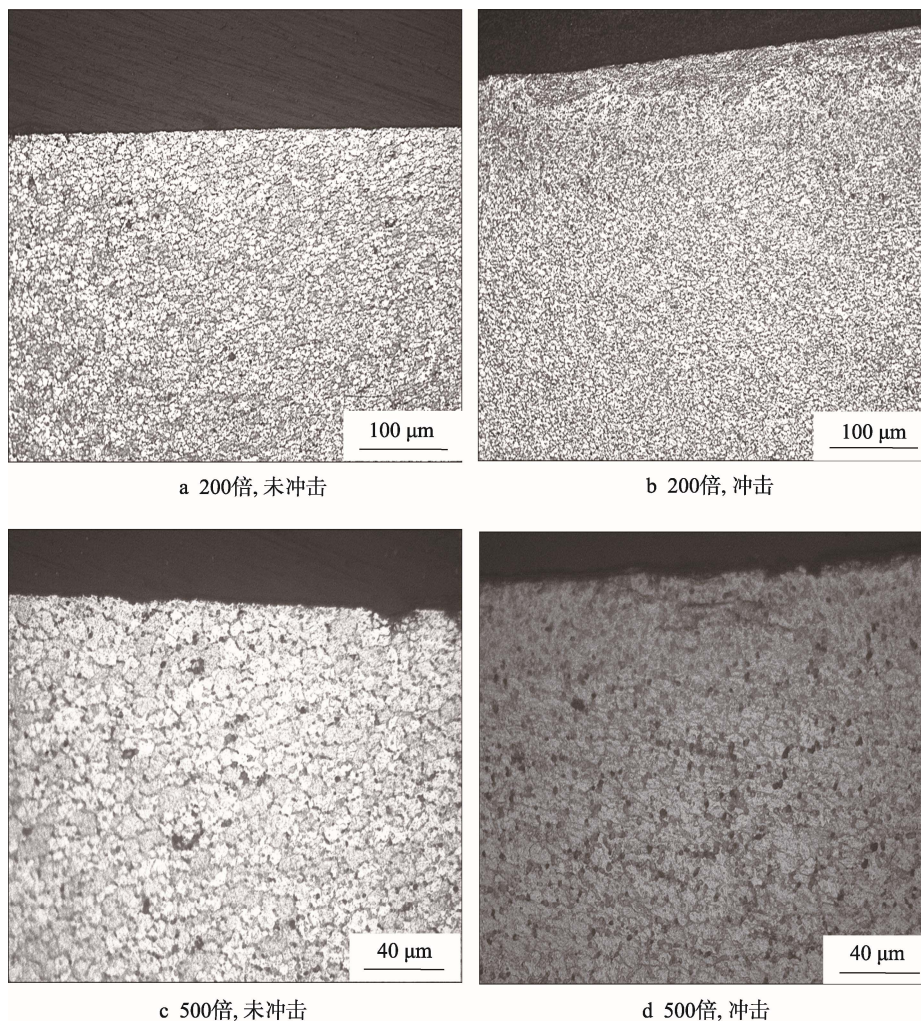


图6 焊核区微观组织形貌
Fig.6 Microstructure of stir zone

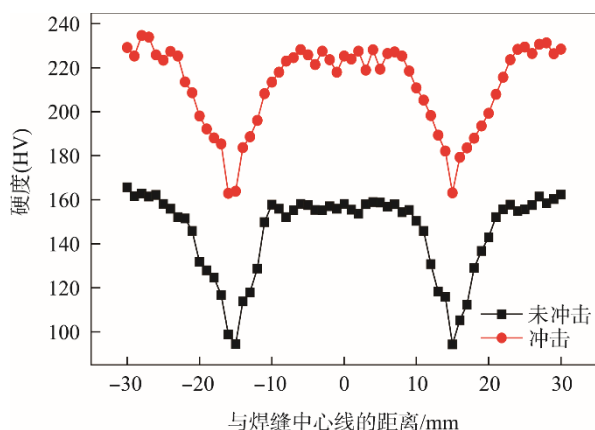


图7 接头表面不同区域的显微硬度分布
Fig.7 Micro-hardness distribution in different areas of joint surface

响,热机械影响区受热和机械力的作用,原来弥散分布的细小的强化相受热作用发生丛聚,使材料发生过时效而产生软化现象,所以硬度相对母材较低。焊缝中心焊核处是由细小的等轴再结晶晶粒组成,并且析出相也因搅拌针搅拌作用被搅碎弥散分布在基体中,使晶界位错密度增加,从而起到细晶强化作用,使硬

度值增高,几乎与母材硬度相近,接头表面硬度大体呈现如“W”型分布^[20]。冲击后的接头表面硬度明显提高,热机械影响区和热影响区的硬度值提高达60%,使材料的软化现象得到改善。这是由于表面经过超声冲击针高频振动后,材料表面金属微粒获得能量。与此同时,这种冲击作用力迫使原来材料表面的晶界破碎,使接头近表面晶粒得到细化,形成一层由细小晶粒组成的塑性层,相当于在材料近表面发生加工硬化现象,使表面强度增加。并且,从塑性层晶粒下面的大尺寸晶粒被压扁可知,接头表面材料经过超声冲击,近表面金属材料多晶体中晶粒的取向在塑性变形过程中得到调整,由原来任意取向的晶粒逐渐转变为择优取向的晶粒,从而形成一层具有纤维状的组织,这种纤维状的组织可以使材料表面的硬度得到强化,因此超声冲击后接头表面硬度得到提高^[20]。

2.4 腐蚀性能分析

表2所示为2A12铝合金搅拌摩擦焊接头超声冲击前后的腐蚀速率,可见,超声冲击前接头的腐蚀速率大约是超声冲击后的2倍,说明接头表面经过超声

冲击处理后,耐蚀性能得到明显提高。表 2 仅是从平均腐蚀速率的角度对超声冲击的效果进行评价。此外,还进行了接头试样的腐蚀形貌观察,图 8 所示为超声冲击前后搅拌摩擦焊接头表面经过 480 h 浸泡后的宏观形貌,从图 8a 可以明显看出接头表面腐蚀后留下的点蚀坑,局部区域存在尺寸较大腐蚀坑,并产生腐蚀剥落现象。将图 8a 中的局部区域 1 和 2 放大后发现,热影响区(2 区域)的点蚀坑最大直径可达 $300\text{ }\mu\text{m}$,远远大于周边的母材区(1 区域)。从图 8b 可以看出,超声冲击后的接头表面经过 480 h 浸泡腐蚀后,接头表面无明显可见的点蚀坑,整个接头呈现出均匀腐蚀的形态。为了进一步定量比较超声冲击对接头点腐蚀速率的影响,制备了接头的截面金相试样,测量获得超声冲击前后接头的最大腐蚀深度,结果见图 9。没

有进行超声冲击的铝合金搅拌摩擦焊接头最大点蚀坑出现在热影响区位置,腐蚀深度最大可达 $126\text{ }\mu\text{m}$,经过超声冲击处理后,接头的点腐蚀速率大大降低,最大点蚀坑深度仅为 $38\text{ }\mu\text{m}$,进一步证明超声冲击可以降低铝合金点腐蚀速率。

由于接头表面经过超声冲击后,表面粗糙和表面损伤得到了有效降低,并且在近表层能形成一层细小的晶粒,表层微结构细化有效地抑制点蚀和晶间腐蚀的发生和发展,防止了点蚀的发生和发展。与此同时,接头表面经过多次超声冲击后,表面的金属间析出相经历多次超声冲击后可能发生细化,并且基体中析出物的溶解促进了表层组织的均匀化,从而使接头表面的点蚀尺寸也有所减小^[21],从而提高了 2A12 铝合金的抗腐蚀性能。

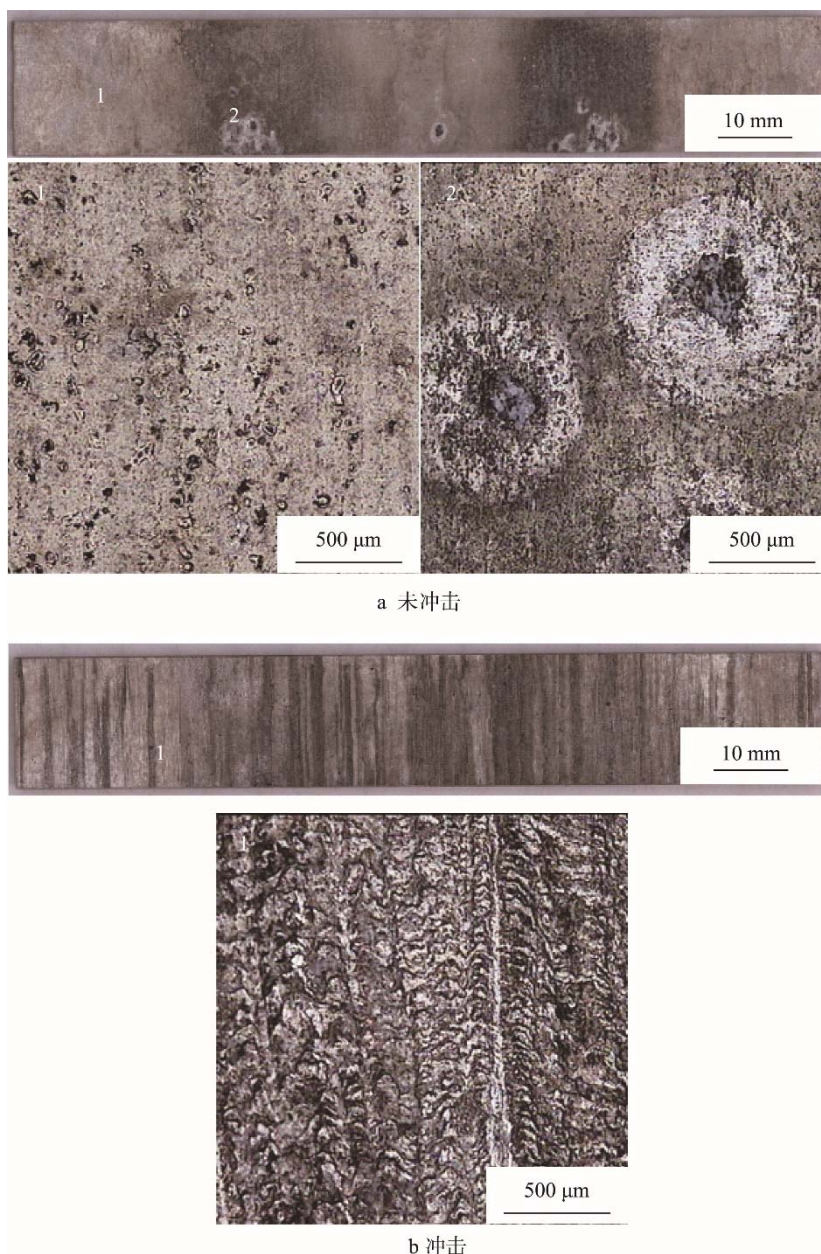


图 8 超声冲击前后浸泡试样的表面形貌

Fig.8 Surface morphology of sample before and after UIT

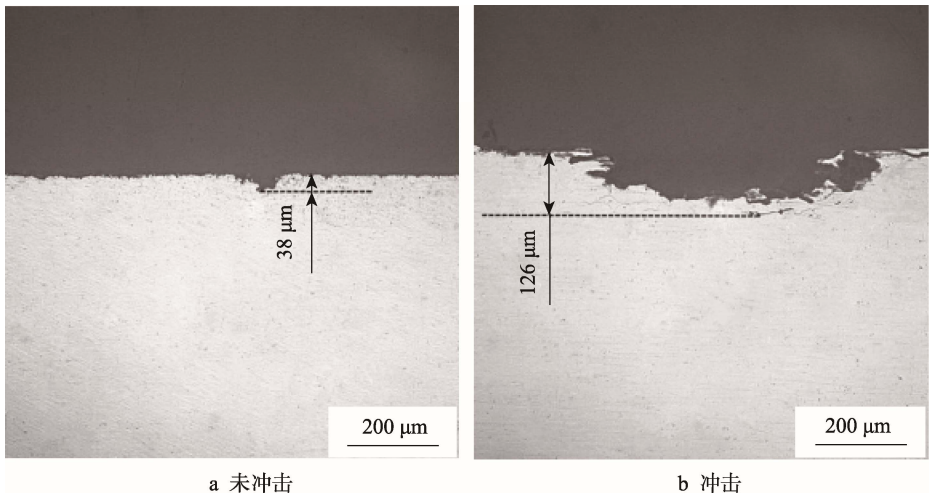


图 9 超声冲击前后腐蚀坑的形貌
Fig.9 Morphologies of corrosion pits before and after ultrasonic impact

表 2 超声冲击前后 2A12 铝合金的腐蚀速率
Tab.2 Corrosion rate of 2A12 aluminum alloy before and after ultrasonic impact

试验 种类	试样 编号	腐蚀速率/ ($\text{g}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	平均值/ ($\text{g}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)
冲击	1	0.1549	0.1490
	2	0.1534	
	3	0.1387	
未冲击	1	0.2528	0.2756
	2	0.2990	
	3	0.2749	

3 结论

采用超声冲击设备对 2A12 铝合金搅拌摩擦焊后接头表面进行超声冲击处理,并对搅拌摩擦焊接头组织、硬度和耐蚀性能进行分析,得出以下主要结论。

1) 搅拌摩擦焊接头经过超声冲击处理后,其接头各区域近表层晶粒组织得到细化,在近表层形成一层晶粒细小的塑性层,塑性层厚度可达 110 μm ,并且可以看出塑性层下大尺寸晶粒发生了扭曲变形。

2) 搅拌摩擦焊接头经过超声冲击后,材料近表面形成的塑性层位错密度增加,相当于在表面进行了加工硬化,因此,金属材料表面的硬度较冲击前有了明显的提高,热机械影响区和热影响区的硬度提高达 60%,使材料的软化现象得到改善。

3) 超声冲击后将搅拌摩擦焊接头试样置于质量分数 3.5%的 NaCl 溶液中,接头表面基本呈现均匀腐蚀的形态,表面没有观察到较大直径的腐蚀坑;并且超声冲击后的腐蚀速率大约是超声冲击前的一半,使材料的耐腐蚀性得到显著提高。

参考文献:

[1] TRACIEP. Friction Stir Welding of Metal Matrix Composites for Use in Aerospace Structures[J]. Acta Astronautica, 2014, 93(1): 366—373.

[2] 张田仓,郭德伦,栾国红,等. 搅拌摩擦焊技术[J]. 航空制造技术, 1999(2): 35—39.

ZHANG Tian-cang, GUO De-lun, LUAN Guo-hong, et al. Friction Stir Welding Technology[J]. Aviation Manufacturing Technology, 1999(2): 35—39.

[3] HEINZ A, HASZLER A, KEIDEL C, et al. Recent Development in Aluminum Alloys for Aerospace Applications[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 280(1): 102—107.

[4] WILLIAMS J C, STARKE E A. Progress in Structural Materials for Aerospace Systems[J]. Acta Materialia, 2003, 51(19): 5775—5799.

[5] 张志云,陈茂爱,武传松. 耐磨铝硅铜合金的双面搅拌摩擦焊[J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 37—40.

ZHANG Zhi-yun, CHEN Mao-ai, WU Chuan-song. Double-side Friction Stir Welding of Wear Resistant Aluminum Silicon Copper Alloy[J]. Journal of Welding, 2012, 33(5): 37—40.

[6] HIRASAWA S, BADARINARAYAN H, OKAMOTA K, et al. Analysis of Effect of Tool Geometry on Plastic Flow During Friction Stir Spot Welding Using Particle Method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(11): 1455—1463.

[7] MISHRA R S, MA Z Y. Friction Stir Welding and Processing II[J]. Materials Science and Engineering R Reports, 2005, 50(1): 71—78.

[8] WANG F F, LI W Y, SHEN J, et al. Improving Weld Formability by a Dual-rotation Bobbin Tool Friction Stir Welding[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2017, 30(26): 135—139.

[9] NANDAN R, DEBROY T, BHADESHIA H K D H.

- Recent Advances in Friction-stir Welding Process, Weldment Structure and Properties[J]. *Progress in Materials Science*, 2008, 53(6): 980—1023.
- [10] NIU P, LI W, ZHANG Z, et al. Global and Local Constitutive Behaviors of Friction Stir Welded AA2024 Joints[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2017(9): 83—86.
- [11] FUJII H, CUI L, MAEDA M, et al. Effect of Tool Shape on Mechanical Properties and Microstructure of Friction Stir Welded Aluminum Alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 419(1): 25—31.
- [12] MENDEZ P F, TELLO K E, LIENERT T J. Scaling of Coupled Heat Transfer and Plastic Deformation Around the Pin in Friction Stir Welding[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(18): 6012—6026.
- [13] CHO H H, HONG S T, ROH J H, et al. Three-dimensional Numerical and Experimental Investigation on Friction Stir Welding Processes of Ferritic Stainless Steel[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(7): 2649—2661.
- [14] ROY S, FISHER J W, YEN B T. Fatigue Resistance of Welded Details Enhanced by Ultrasonic Impact Treatment(UIT)[J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(11): 1239—1247.
- [15] HUO L X, WANG D, ZHANG Y. Investigation of the Fatigue Behaviour of the Welded Joints Treated by TIG Dressing and Ultrasonic Peening under Variable Amplitude Load[J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(1): 95—101.
- [16] 金辉, 何柏林. 超声冲击技术强化机理的研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(16): 18—26.
- JIN Hui, HE Bo-lin. Research on Strengthening Mechanism of Ultrasonic Impact Technology[J]. *Thermal Processing*, 2018, 47(16): 18—26.
- [17] WANG T, WANG D, HUO L, et al. Discussion on Fatigue Design of Welded Joints Enhanced by Ultrasonic Peening Treatment(UPT)[J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31(4): 644—650.
- [18] 江明明, 何柏林, 李力, 等. 超声冲击时间对 MB8 镁合金表面耐腐蚀性能的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 2017, 40(3): 70—73.
- JIANG Ming-ming, HE Bo-lin, LI Li, et al. Effect of Ultrasonic Impact Treatment Time on Surface Corrosion Resistance of MB8 Magnesium Alloy[J]. *Weapon Materials Science and Engineering*, 2017, 40(3): 70—73.
- [19] 杨建海, 张玉祥, 葛利玲, 等. 2A14 铝合金混合表面纳米化对电化学腐蚀行为的影响[J]. *金属学报*, 2016, 52(11): 1413—1422.
- YANG Jian-hai, ZHANG Yu-xiang, GE Li-ling, et al. Effect of Hybrid Surface Nanocrystallization on the Electrochemical Corrosion Behavior in 2A14 Aluminum Alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(11): 1413—1422.
- [20] 李占明, 朱有利, 黄元林, 等. 超声冲击处理对 2A12 铝合金焊接接头力学性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2010, 31(7): 104—108.
- LI Zhan-ming, ZHU You-li, HUANG Yuan-lin, et al. Influence of Ultrasonic Impact Treatment on Mechanical Properties of 2A12 Aluminum Alloy Welded Joint[J]. *Journal of Materials Heat Treatment*, 2010, 31(7): 104—108.
- [21] SUN Q, LIU X, HAN Q, et al. A Comparison of AA2024 and AA7150 Subjected to Ultrasonic Shot Peening: Microstructure, Surface Segregation and Corrosion[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 337: 552—560.