

热处理对高强铝合金搅拌摩擦焊 接头组织及力学性能的影响

李 迎 张 玉 芝 张 仲 宝 彭 齐 张 国 庆

(首都航天机械有限公司, 北京 100076)

文 摘 通过“搅拌摩擦焊+固溶+人工时效热处理”的方法实现了12 mm厚航天用高强铝合金2A14M的焊接及接头性能改善。研究表明未进行焊后热处理的焊接接头断裂位置位于焊核区,平均抗拉强度为192.3 MPa,接头显微硬度呈“几”字形分布,硬度分布峰值位于焊缝区,接头不同特征区域的硬度差高达60。采取的焊后热处理对焊接接头及母材不仅具有细化晶粒、改善组织均匀性及优化强化相分布的作用,还能削弱拉伸过程中尖锐晶界对接头的撕裂作用,从而达到提高接头性能的目的,表现为:焊后热处理使接头内部显微硬度差为20,接头拉伸断裂于焊核区,抗拉强度达到440 MPa,为未进行焊后热处理接头的2.29倍;焊后固溶热处理的搅拌摩擦焊接头其断裂位置在焊核区及母材的几率大致相同,各占约50%,从而实现了提高搅拌摩擦焊接头性能的目标。

关键词 2A14M 铝合金,搅拌摩擦焊,焊后固溶,人工时效热处理

中图分类号: TG407

DOI: 10. 12044/j. issn. 1007-2330. 2018. 06. 009

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of High-Strength Aluminum Alloy Friction Stir Welding Joints

LI Ying ZHANG Yuzhi ZHANG Zhongbao PENG Qi ZHANG Guoqing

(Capital Aerospace Machinery Co., Ltd, Beijing 100076)

Abstract A 12mm thickness 2A14M high-strength aluminum alloy welding joint with improved mechanical performance was achieved by using the “friction stir welding + solidification + artificial aging heat treatment” procedure. The result show that tensile fracture occurs in the weld nugget zone of the welded joint without heat treatment. The average tensile strength is 192.3 MPa. The micro hardness distribution of the joint shows a π like shape with the peak area in the weld zone. The gap of hardness between different characteristic areas reach up to 60HRC. The presented post-weld heat treatment has refined the grains, improved the uniformity of the microstructure, optimized the distribution of the strengthening phase and weakened the tearing effects by the the sharp grain boundaries during tensile cracking process, thus significantly improved themechanical performances of the joint. As a result, the maximum hardness gap has been reduced to below 20HRC in the joint after the post-weld heat treatment. Moreover, tensile fracture may takes place in the base metal area or the weld seam with the tensile strength of up to 440 MPa which is 2.29 times of that of the joint without post-weld heat treatment. After post-welding heat treatment, probabilities of fracture appearance in base metal and weld nugget zone are same, both are 50%, and thus the goal of improving the performance of friction stir welded joints is achieved.

收稿日期: 2018-03-07

第一作者简介: 李迎, 1986年出生, 工程师, 研究方向为金属材料加工工程。E-mail: liying04090611@sina.com

Key words 2A14M aluminum alloy, Friction stir welding, Post-weld solid solution, Artificial aging heat treatment

0 引言

2A14 铝合金由于其性能较好,质量轻,成为航天产品使用的重要材料^[1-6]。2A14 M 态铝合金其焊接性能较差,在不进行热处理时,其抗拉强度为 190 MPa 左右。但在实际生产中,较多产品使用 2A14 M 态的铝合金,为了提高产品的焊接性能,要求产品最终的状态为 2A14CS 状态,此状态的铝合金的性能较高,产品的性能需要达到 430 MPa 以上,这就要求在焊接完成后,进行固溶时效热处理来提高焊接性能。本文就是以此为研究背景,使用“搅拌摩擦焊”及“搅拌摩擦焊+固溶时效”的工艺方法进行对比试验,研究热处理后焊接接头的性能变化及原因。

1 实验

1.1 材料

焊接母材为 2A14M 铝合金(室温力学性能 $\sigma_b=185$ MPa),其规格为 400 mm×150 mm×12 mm,其主要的化学成分如表 1 所示。

表 1 2A14 铝合金主要的化学成分
Tab.1 Chemical composition of 2A14 aluminum alloy base metal % (质量分数)

Cu	Mg	Si	Mn	Ti	Fe	Zn	Al
3.9~4.8	0.4~0.8	0.60~1.2	0.4~1.0	≤0.15	≤0.7	≤0.3	余量

搅拌摩擦焊试验在 FSW-5M 型立式搅拌摩擦焊设备上,采用平板对接的方式,焊前采用酸洗的方式去除试样表面的氧化膜。通过对试片的对接面进行机械铣切,保证焊接对接间隙≤0.3 mm。

1.2 焊接过程及焊后热处理工艺参数设置

采用转速 500 r/min、焊速 100mm/min 焊接工艺参数进行焊接。焊后试片分为两种:(1)焊后不进行热处理;(2)焊后热处理,固溶+时效热处理(空气循环电炉),具体热处理工艺参数如表 2 所示。

表 2 热处理工艺参数
Tab.2 Heat treatment process parameters

热处理温度 /°C	时间 /min	时效温度 /°C	时间 /h
495±5	45~55	160±5	8

1.3 检测分析

对上述两种热处理前后焊接接头的组织形貌进行宏观及微观分析,包括金相、扫描电镜分析;对焊接接头进行性能测试,包括显微硬度测试、抗拉强度检测;热处理前后的试样分别取 9 个试样进行拉伸试验,试验使用的标准为 GB/T228.1—2010,并进行拉伸断口分析。

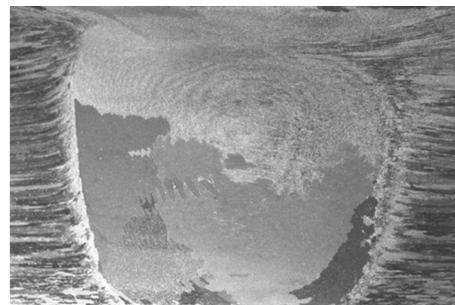
2 结果及分析

2.1 接头热处理前后的微观组织特征

焊接接头及其热处理后的宏观形貌如图 1 所示,焊接接头不同特征区域的微观组织形貌如图 2 所示。可以看出,相对焊接母材,焊接过程使焊核区发生比较明显的组织改变,表现为组织细化和白色二次相密度明显降低。



(a) 热处理前



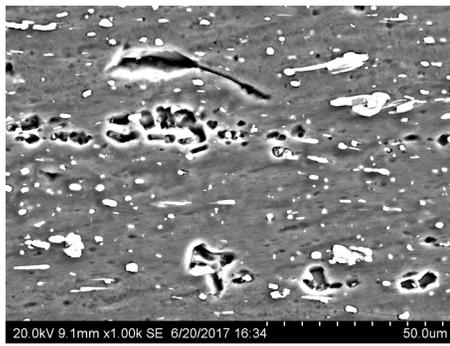
(b) 热处理后

图 1 焊后热处理前后焊接接头宏观形貌

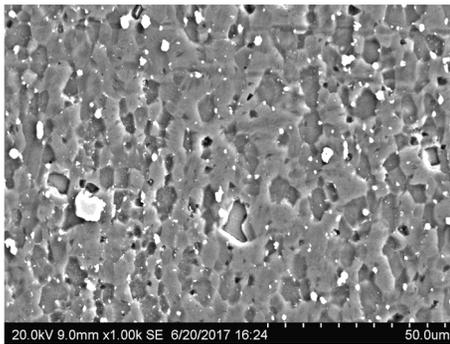
Fig.1 Macrographs of the joint before and after post-weld heat treatment

焊后经过热处理,母材及焊核区微观组织如图 3 所示。可以看出,经固溶+时效热处理后,母材中出现了粗大的二次相;而焊核区则表现为晶粒分布更加均匀细密,二次相分布密度提高,且二次相大小及

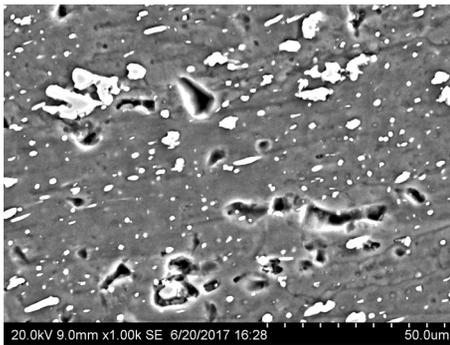
分布更加均匀。



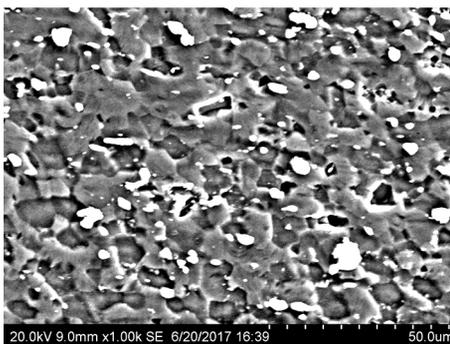
(a) 母材区



(b) 焊核区



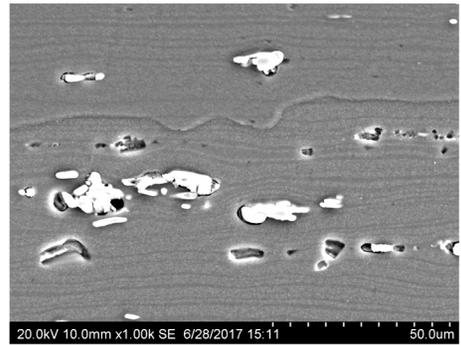
(c) 后退侧热机影响区



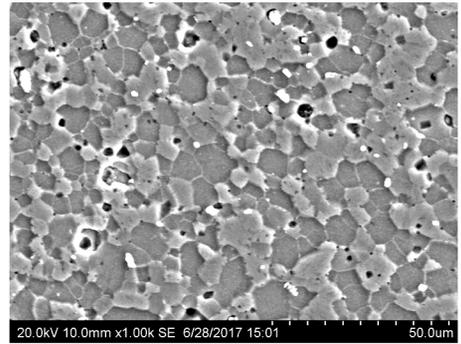
(d) 前进侧热机影响区

图2 焊后热处理前接头各特征区域微观组织形貌

Fig.2 Micrographs of different characteristic zones in the weld joint without post-weld heat treatment



(a) 母材区



(b) 焊核区

图3 焊后热处理后母材区和焊核区的微观组织形貌

Fig.3 Micrographs of base metal zone and weld nugget zone in weld joint after post-weld heat treatment

2.2 接头热处理前后的力学性能特征

2.2.1 显微硬度分布特征

图4分别为热处理前后焊接接头的显微硬度分布曲线。可以看出,热处理前,焊接接头显微硬度分布呈“几”字形,显微硬度值介于50~120,变化幅度较大,其中焊缝区的显微硬度最高,母材区的显微硬度最低,在焊缝的前进侧及后退侧热机影响区均出现硬度的急剧变化;同时,前进侧热机影响区的硬度低于后退侧热机影响区。这是由于母材的状态为M态,即退火状态(软态),此状态下,母材的晶粒较粗大,主要相组成为 $\alpha(\text{Al})$ 基体相和粗大的 CuAl_2 二次相,和少量的S项(CuMgAl_2)。热影响区晶粒虽受到焊接热循环的影响,但晶粒尺寸变化不明显;在后退侧热影响区由于热量散退的速度比前进侧快,热量聚集的较少一些,使得后退侧的晶粒比前进侧的晶粒细化的多,后退侧晶粒尺寸比前进侧更加细小,二次相的分布比前进侧均匀,从而导致其显微硬度比前进侧略高。由于焊核区在焊接过程中受热较多,晶粒细化较多[图3(b)],且粗大的二次相被打碎,形成弥散分布的强化相,因此,焊核区显微硬度最高。经过焊后热处理,焊接接头的显微硬度值介于140~160,硬度明显提高,且波动幅度明显减小,即母材与

焊接接头的显微硬度接近。

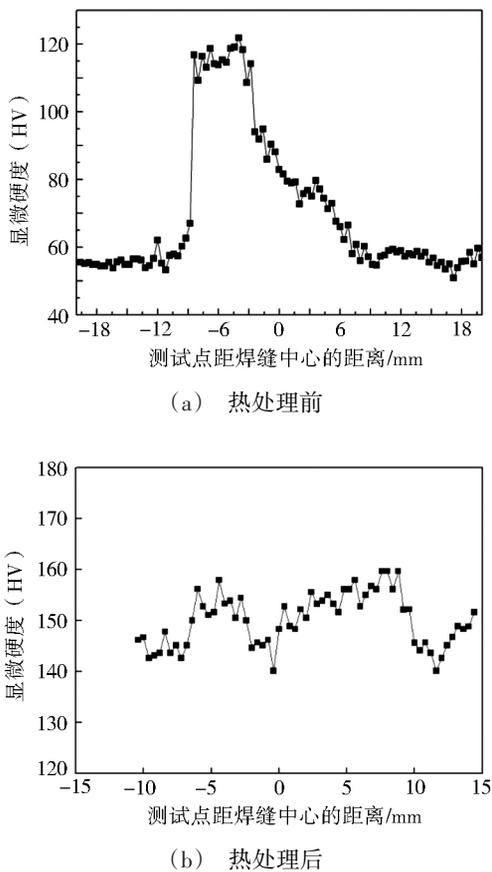


图4 热处理前后焊接接头的显微硬度

Fig. 4 Micro hardness distribution in the joint before and after post-weld heat treatment

2.2.2 静态拉伸力学性能特征

热处理前后焊接接头的抗拉强度监测结果如图5所示,焊接接头初始抗拉强度为190~195 MPa,接头拉伸延伸率为12.0%~19.5%;其断裂位置在母材,焊接过程中焊接区的晶粒发生了明显的变化,在搅拌针的搅拌作用及焊接热作用下,发生了晶粒细化及粗大二次相的重溶,使得焊接区的强度加强。

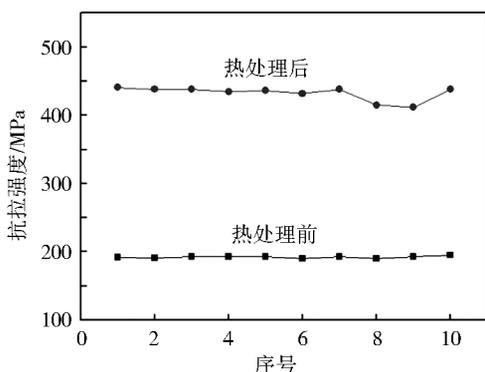


图5 热处理前后接头的抗拉强度

Fig. 5 Tensile strengths of the joint before and after post-weld heat treatment

而热处理后抗拉强度达到440 MPa,延伸率为7.0%~12.5%。热处理前后试样的断裂位置发生了变化,如图6所示,在热处理前断裂位置在母材位置处,而热处理后断裂位置发生在母材及焊接接头的概率相同,各为50%,使焊接接头的力学性能呈现出与母材相近的趋势。

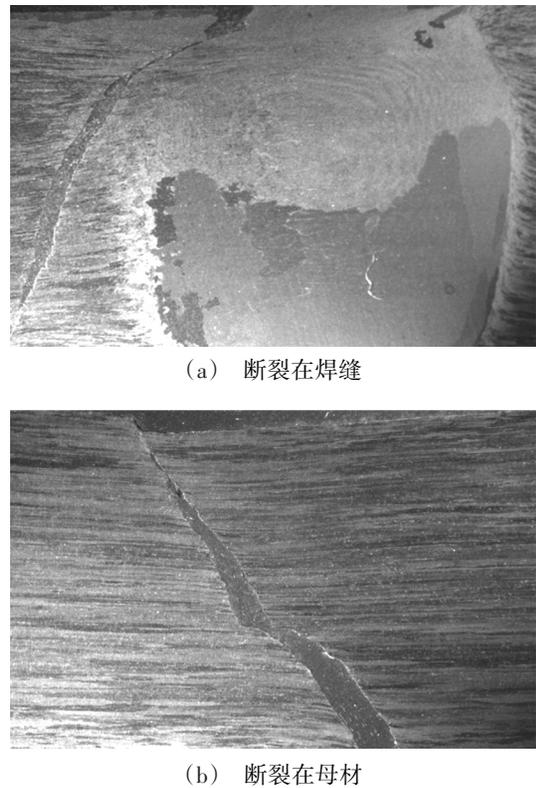


图6 热处理前后焊接接头拉伸断裂位置

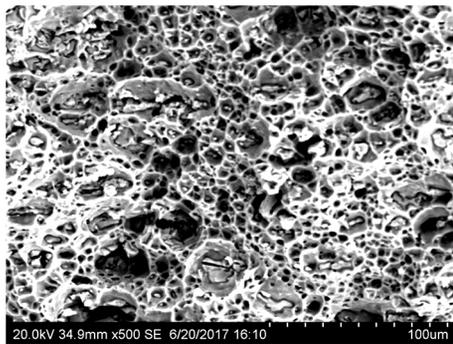
Fig.6 Tensile fracture locations of welded joints before and after heat treatment

2.3 焊后热处理对接头组织的影响

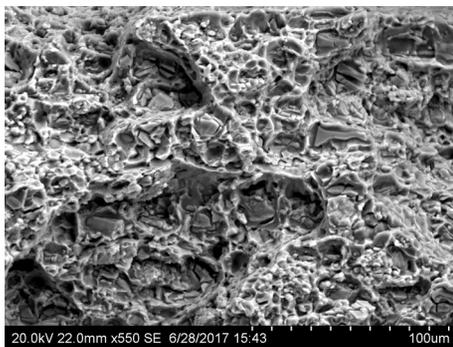
热处理前后,对于焊接接头组织的主要影响因素在于固溶时效的热处理,使焊缝及母材的二次相形态发生了变化,由M态变为CS态,从而使接头的力学性能发生变化。热处理前,在母材区域的二次相主要为粗大的 $\text{CuAl}_2(\theta)$ 相。焊后热处理使母材区的二次相经历了回溶至基体相后又重新析出的过程,其分布形态更加均匀;在低于其共晶温度时, $\alpha(\text{Al})$ 基体相中,过饱和的Cu原子扩散,聚集和局部聚集,当达到 $\theta(\text{CuAl}_2)$ 相的成分时,点阵发生变化,形成 $\theta(\text{CuAl}_2)$ 相,故热处理使热影响区发生明显强化。焊后固溶热处理不仅使粗大的二次相融入基体中,这样可以消除粗大的二次相,减少粗大相对于晶界的影响,还使焊缝区晶粒向等轴晶转变,同样使焊缝区力学性能提高。

2.4 热处理对接头拉伸断口形貌的影响

热处理前、后试样的拉伸断口均出现了大量韧窝,故这两种拉伸断裂过程均表现为典型的韧性断裂,如图7所示。两种情况下,韧窝形貌差异明显,在热处理前,韧窝深且细密,韧窝内部的二次析出相较少;而在热处理后,断面中的韧窝明显增大、深度减小,在韧窝的内部出现断裂的二次析出相。经能谱分析,如图8所示。



(a) 热处理前



(b) 热处理后

图7 热处理前后断口微观形貌

Fig.7 Micro fracture morphology of the joint before and after post-weld heat treatment

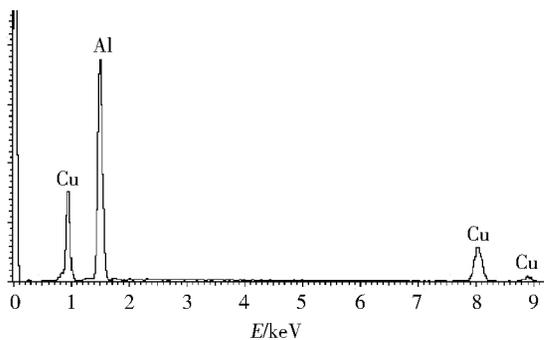


图8 断口能谱分析图

Fig.8 EDS analysis of the fracture surface

断裂颗粒相中主要含有Al、Cu元素,其分布形态为均匀弥散分布,起到强化相的作用;断裂破坏前,强化相颗粒发生大量的塑性变形,可显著增强材料的抗拉强度。

3 结论

(1)采用搅拌摩擦焊实现了2A14铝合金的焊接,采用“固溶+时效”的焊后热处理方法提高了焊接接头的力学性能。

(2)“固溶+时效”焊后热处理可改善焊接接头及母材区晶粒尺寸均匀性,并使晶粒向等轴晶转变;使二次相分布更加均匀细密,成为细小的弥散相,改善了焊接接头的硬度和强度,从而达到提高焊接接头力学性能的目的。

(3)焊后未经热处理的焊接接头显微硬度分布从母材到焊缝到母材呈现“几”字形,显微硬度值介于50~120;而热处理后不同特征区域的显微值介于140~160;焊后热处理虽未改变焊接接头拉伸断裂类型,但使接头抗拉强度由190 MPa提升至440 MPa,且使拉伸断裂位置出现了变化,由单一的断裂在母材(未热处理)呈现出既有断裂在母材又有断裂在焊接接头的情形。

参考文献

- [1] 栾国红,柴鹏,孙成彬,等.飞机制造的前景技术——搅拌摩擦焊[J].航空制造技术,2004(11):44-47
- [2] 张华,林三宝,吴林,等.搅拌摩擦焊研究进展及前景展望[J].焊接学报,2003,24(3):91-95
- [3] COLEGROVE P.A, SHERCLIFF H.R.CFD modeling of friction stir welding of thick plate 7449 aluminum alloy [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11(4): 429-441
- [4] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing [J].Materials Science and Engineering R, 2005, 50: 1-78.
- [5] LIM S G, KIM S, LEE C G, et al.Tensile behaviour of friction stir welded Al 6061-T651 [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35(9):2829-2835.
- [6] PEEL M, STEUWER A, PREUSS M, et al. Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminum AA5083 friction stir welds [J].Acta Materialia, 2003, 51(16):4791-4801