高转速 FSW 工艺特征及焊缝组织性能 演变规律研究

谢胜楠,张会杰,孙舒蕾,纪子杰,刘倩如,张育萱

(东北大学秦皇岛分校 资源与材料学院,河北 秦皇岛 066004)

摘要:目的 研究不同转速的焊缝性能变化对组织的影响,以期为高转速搅拌摩擦焊工艺参数的优化和更大 范围的应用提供指导。方法 在 3000~8000 r/min 的高转速范围内对 3A21-O 态铝合金进行搅拌摩擦焊试验, 焊后分析了焊缝成形特征和晶粒形态并测试了接头截面显微硬度。结果 当转速由 1000~4000 r/min 区间升高 至 5000~8000 r/min 区间时,焊核宽度急剧增大了近 50%。这是由于焊具产热机制以滑移摩擦为主向以粘着 摩擦为主转变,导致上述焊核宽度增大的行为。随着转速的增大,焊缝温度呈现出常规搅拌摩擦焊工艺中 鲜见的先增大而后趋于稳定的变化趋势;温度随转速的这一演变特征导致焊缝焊核区的亚结构数量比例以 及显微硬度都随转速呈现出与此相近的演变规律。结论 在高转速搅拌摩擦焊中,转速提高能提高焊缝性能, 且增强的焊缝性能能够在较宽的高转速区间内保持相对稳定的状态。 关键词:高转速搅拌摩擦焊;焊接转速;温度场;微观组织;力学性能 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.02.010

中图分类号:TG453.9 文献标识码:A 文章编号:1674-6457(2020)02-0061-06

Process Characteristics and Weld Structure-property Evolutions of High Rotation Speed FSW

XIE Sheng-nan, ZHANG Hui-jie, SUN Shu-lei, JI Zi-jie, LIU Qian-ru, ZHANG Yu-xuan

(School of Resources and Materials, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the effects of weld performance changes at different rotating speeds on the microstructure in order to provide guidance for optimization of process parameters and wider application of friction stir welding at high rotating speeds. Friction stir welding test at a high speed range of 3000-8000 r/min was carried out on 3A21-O-state aluminum alloy. The weld feature and grain morphology were analyzed and the micro-hardness of the joint was tested after welding. It was found that the nugget width was dramatically enlarged by nearly 50% as the rotation speed was increased from the range of 1000-4000 r/min to 5000-8000 r/min, which should be attributed to the change of predominant heat generation mechanism from sliding friction to sticking friction. With the increase of speed, the weld temperature increased firstly and then showed a stable change trend, which was rare in normal friction stir welding. The evolution trends of temperature with speed caused that the proportion and microhardness of substructures in nugget area showed a very similar evolvement rule. During high speed friction stir welding, the increase of rotation speed can improve the joint property. Additionally, the strengthened joint property can be maintained in a relatively large rotation speed range.

收稿日期: 2019-06-26

基金项目:东北大学秦皇岛分校大学生科技创新创业项目(CX19607);秦皇岛市大学生科技创新创业专项资金(PZB1810008T-20);河北省高等学校青年拔尖人才计划(BJ2019201);中央高校基本科研业务专项资金(N172304043) 作者简介:谢胜楠(1998—),女,东北大学秦皇岛分校资源与材料学院本科生。

通讯作者:张会杰(1985-),男,博士,副教授,主要研究方向为特种搅拌摩擦焊技术、轻量化搅拌摩擦焊技术。

KEY WORDS: high rotation speed friction stir welding; rotation speed of welding; temperature field; microstructure; mechanical property

随着制造业的快速发展,针对复杂大型结构件的 现场连接制造及维护维修日渐增多,并且对搅拌摩擦 焊(Friction stir welding, FSW)这一高质量的焊接技 术提出了迫切的应用需求^[1]。传统 FSW 工艺所需的 焊接载荷较高,导致常规 FSW 设备的体积和重量都 比较庞大^[2],从而极大限制了 FSW 技术在现场焊接 制造及就位修复等方面的应用。为了解决这一问题, 开发具有低重量、小体积特征的小型 FSW 设备已经 势在必行。而要研发出这样的 FSW 设备,首要条件 就是要从工艺的角度降低 FSW 所需的焊接载荷,即 开发出低载荷 FSW 工艺技术^[3]。

高转速 FSW 工艺是降低 FSW 焊接载荷的有效手 段^[4—7]。所谓高转速,是相对常规焊接转速而言的。 在常规 FSW 中,焊具转速一般不会超过 3000 r/min, 而高转速 FSW 则是指焊具在 3000 r/min 以上实施焊 接的过程。在这样的工艺条件下,焊具的产热速率较 高,设备只需提供较低的焊接载荷,即可克服被焊材 料对焊具所施加的阻力并完成焊接。

近年来,高转速 FSW 已得到了广泛重视,国外 已在焊缝成形控制、接头力学性能、焊接过程模拟等 方面进行了一系列的研究^[5—7],国内也已开展了铝合 金的高转速焊接试验,并分析了焊缝形态和温度场的 特征^[8—9]。就这一工艺而言,转速是决定焊接质量的 最重要因素,但目前有关焊接转速对工艺特性作用规 律的研究还鲜见报道,这一关键问题亟待阐明。

文中以 3A21 铝合金为焊接对象,进行了高转速 FSW 工艺试验研究。通过对焊接温度场、焊缝成形 特征及接头组织性能与焊接转速相关性进行深入分 析,期望能更为深入地理解高转速 FSW 工艺的机理 和本质,并为其优化控制奠定技术基础。

1 实验

1.1 材料

试验材料为 5 mm 厚的 3A21-O 态铝合金,其主 要微量元素的质量分数见表 1。母材的晶粒为板条状 结构(见图 1),尺寸为 181.1±41.2 μm。由于试验材 料经历了退火过程,其内部位错密度较低,小角度晶

表 1 3A21-O 态铝合金的化学成分 Tab.1 Chemical compositions of 3A21-O-state aluminum alloy

| 合金元素 | Mn | Fe | Si | Cu | Zn | Al |
|--------|---------|-----|-----|-----|------|----|
| 质量分数/% | 1.0~1.6 | 0.7 | 0.6 | 0.2 | 0.15 | 余量 |



图 1 3A21-O 态铝合金的原始微观组织 Fig.1 Initial microstructure of 3A21-O-state aluminum alloy

界数量所占比例仅为9%。

1.2 设备

试验设备为自行研制的高精度搅拌摩擦焊机床, 通过在设备上安放主轴增速机构,可实现主轴高转速 的输出。当焊具处于高速旋转状态时,易引起焊缝表 面过热,被焊材料容易被挤出焊具轴肩导致飞边、孔 洞等缺陷的产生^[10],因此,在高转速FSW中,焊缝 成形控制是关键。文中所设计的焊具轴肩直径是 12 mm,轴肩端面上加工有螺旋槽结构,以保证能对 被焊材料提供充分的向心驱动力,确保焊缝的优质成 形。焊具搅拌针为锥状螺纹结构。在前期的焊接试验 研究中发现,高转速焊接所形成的焊核的高度要明显 大于焊具对被焊工件的压入深度,因此,为了保证焊 接时搅拌针不会扎到被焊工件背部的垫板上,所选的 焊具搅拌针长度要小于工件的厚度,其值为2.65 mm。

1.3 方法

焊接过程在尺寸规格为 150 mm×150 mm 的单个 试片上进行,焊接方向为垂直于板材的轧制方向。焊 接转速范围为 1000~8000 r/min。在所有转速下,焊 接速度均为 25 mm/min,焊具轴肩压入量为 0.05 mm, 焊具倾角为 0°。焊接中采用 K 型热电偶测量位于焊 具搅拌针行进路径正下方的工件下表面的热循环。

焊后沿垂直于焊接方向截取接头横截面,经粗磨、精磨和抛光处理后,用 Keller 试剂对试样进行腐蚀,并用光学显微镜分析焊缝成形特征。焊缝晶粒形态采用电子背散射衍射(EBSD)的分析方法予以观察。在抛光后的焊缝横截面上进行显微硬度测试,分析位置位于焊具扎入深度的中部所在的截面上,硬度测试载荷及停留时间分别为 200 g 和 10 s。

第12卷 第2期

(1)

2 结果与分析

2.1 焊接温度场

焊接中,采用热电偶记录了焊缝底部温度随焊 接时间的变化情况,并获得了如图 2a 所示的热循环 曲线(4000 r/min)。可见,在 1000~4000 r/min 的转 速区间内,随着转速的升高,焊缝温度也逐渐升高; 但当转速继续增大至 5000 r/min 以上时,焊缝温度 随着转速的升高却呈现出趋于稳定的变化趋势(见 图 2b)。

FSW 过程产热包括摩擦产热和塑性变形产热两部分,在假定焊具周围材料的塑性变形层为面热源, 且变形层的摩擦切应力和屈服切应力相等的前提下, 可以将摩擦产热和塑性变形产热统一为式(1)^[11-12]。

 $q = \omega r \tau(T)$

式中:q 为热流密度; ω 为焊具转速;r 为焊具 表面上任一点到焊具轴线的距离; $\tau(T)$ 为与温度相关 的材料切应力。

在转速较高时,焊具对被焊材料的加热速率也较高,使位于焊具前沿的被焊材料迅速受热并被软化至较低的应力状态。这也正是高转速 FSW 能够降低焊接载荷的本质原因。由式(1)可知,FSW 过程产热由转速 ω 和材料切应力 τ 来决定。可以推断,在 1000~4000 r/min 的转速范围内,转速的增大对焊接产热量的影响起到了主导作用,而在转速从 4000 r/min 增大到 8000 r/min 的过程中,材料切应力的减小应该是影响产热的主要因素,从而导致逐渐趋于稳定的温度变化趋势。

可见,转速增大时,决定焊接产热的主导因素会 发生变化,最终使焊缝温度显现出了图 2b 所示的变 化特征。正是由于高转速 FSW 能够显著降低材料切 应力,焊缝温度在转速升高至一定程度时才能达到稳 定状态。这与常规 FSW 中常见的焊缝温度随转速增 大而升高的变化趋势是不同的^[13]。



Fig.2 Measurement results of welding temperature field

2.2 焊缝成形特征

为显示焊缝的成形情况,图3给出了焊缝横截面的照片。需说明的是,所有横截面的左侧均为后退侧, 右侧均为前进侧。在所研究的转速范围内,均获得了 无内部缺陷的焊缝成形。进一步观察发现,转速对焊 缝的焊核形态产生了显著的影响。在转速较低时(如 2000 r/min 和 4000 r/min),由于焊具轴肩对被焊材料 的搅拌作用较弱,焊核显现出上窄下宽的形态特征; 而当转速较高时(如 6000 r/min 和 8000 r/min),焊缝 上部受到了焊具轴肩较为强烈的热机作用,从而观察 到了上宽下窄的焊核形状。



图 3 焊缝横截面显微形貌 Fig.3 Micro morphology of weld cross section

另外,焊核宽度也与转速存在很强的相关性。图 4汇总了焊具在扎入深度的中心位置所对应的焊核宽 度值。可见,当转速位于1000~4000 r/min 区间时, 焊核宽度较小,略大于对应位置的搅拌针直径;而继 续增大到 5000 r/min 以上时,焊核宽度发生突变,急 剧增大了 50%以上,并在 5000~8000 r/min 范围内保 持了一个比较稳定的状态。焊核宽度的突然增大实际 上是由焊接产热机制发生突变所引起的。在 1000~ 4000 r/min 的转速范围内,焊具周围大多数材料的流 动速度要低于焊具旋转速度,即焊具/被焊材料的界 面相互作用以滑动摩擦为主;而当转速升至 5000 r/min 以上时,被焊材料应变速率增大,较多的塑性 变形材料能够粘着到焊具表面,并随之高速旋转,焊 具/被焊材料的界面产热就转变为以粘着摩擦为主的 产热机制[14-15];此时焊具周围材料塑性变形能力得 到显著增强,较大体积范围的材料都能够在焊具的旋 转带动下发生塑性流动[15],并参与到焊核组织的形成 过程当中,从而引起焊核宽度的突然增大。



图 4 焊核宽度随转速的变化情况 Fig.4 Evolutions of nugget zone width with rotation speed

2.3 焊缝微观组织

高转速 FSW 热机作用的特殊性必然会影响到焊 缝微观组织特征。图 5 给出了焊核区晶粒照片,图 6 统计了晶界取向差的分布情况。在晶粒照片中,大角 度晶界(晶界取向差大于 15°)用黑色实线表示,小 角度晶界(晶界取向差位于 2°和 15°之间)用红色实 线表示。

从图 6 所示的晶粒尺寸计算结果来看, 与 2000 r/min 的常规转速相比, 在 5000 r/min 和 8000 r/min 的高转速下,焊核晶粒有所粗化,这是由于在高转速 参数下,焊缝区温度较高,高温停留时间长,更有利 于焊后焊核区组织的长大。

由于 FSW 中发生了塑性变形、位错增殖、动态 回复等过程,与母材相比,焊缝焊核区晶粒的小角度 晶界数量有所提高,且其数量比例同样受到了焊接转



Fig.5 Microstructures of welds at different rotation speeds



图 6 不同转速下的晶粒尺寸及小角度晶界数量百分比 Fig.6 Grain sizes and fractions of low angle grain boundaries at different rotation speeds

速的影响。当转速为 2000 r/min 时,小角度晶界所占 比例为 17.7%,而在 5000 r/min 和 8000 r/min 的转速 下,小角度晶界所占比例分别为 22.9%和 21.6%。高 转速下小角度晶界的比例之所以提高,是因为高转速 下剧烈的塑性变形会产生大量变形位错,且这些变形 位错在高温下更容易发生多边形化(即动态回复), 从而有利于形成小角度晶界。

从上述分析可见,高转速 FSW 中,随着转速的 增大,焊接温度一直都是决定焊缝组织演变的重要因 素,使得焊缝焊核区的晶粒尺寸及亚结构比例等微观 组织特征随转速增大呈现出与温度类似的演变规律。

2.4 焊缝力学性能

为阐明高转速 FSW 接头力学性能的分布情况, 在焊缝横截面上沿焊具扎入深度的中部位置进行了 显微硬度测量,结果如图 7 所示。需要说明的是,硬 度曲线中,实心点所标记的是焊核区的硬度,空心点 所反映的则是焊缝其他区域的硬度。很显然,在3组 转速下,焊核区的硬度都高于母材,显示出了不可热 处理强化铝合金 FSW 接头硬度分布的一般特征。对 比来看,2000 r/min 焊缝的焊核区硬度较低,而 5000 r/min 及 8000 r/min 焊缝的硬度较高且比较接 近。结合图 6 可知,焊核区的硬度值与其组织特征存 在一定的相关性,具体分析如下。



图 7 焊缝硬度分布曲线(实心标记数据为焊核区硬度) Fig.7 Hardness distribution profiles of the welds (the data points marked by solid symbols are located in the nugget zone)

3A21 铝合金作为一种不可热处理强化铝合金, 特别是在退火状态下,其内部第二相质点对材料力学 性能的贡献很小,焊缝性能主要由晶粒尺寸和位错密 度来决定,这已经在已有的一些有关防锈铝合金FSW 工艺的研究结果中得到了证实^[13]。从图 5 和图 6 可知, 当转速由 2000 r/min 提高至 5000 r/min 和 8000 r/min 的高转速时,焊核区晶粒尺寸有所增大。根据 Hall-Petch 公式所描述的晶粒尺寸与显微硬度的关系推 断,晶粒增大将降低焊缝硬度,因此,图 7 所示的焊 核区显微硬度的提高,应该是由转速增高时小角度晶 界数量的增多所引起的。小角度晶界是由变形增殖位 错发生多边形化所形成的,较多的小角度晶界体现了 焊核内储存着较高的塑性变形能,从而对焊核区产生 了亚结构强化效果。

通过对焊接热机特征及焊缝组织性能的分析可 知,高转速 FSW 这种特殊工艺体现出了与常规 FSW 不同的焊接特性。由于它能显著降低材料变形抗力, 导致焊缝温度能够在转速增大到一定范围后保持稳 定状态,并使焊核区组织演变呈现出类似的规律,从 而提高焊缝性能并使其在较宽的转速区间内保持稳 定。这说明当转速提高至一定程度时,高转速 FSW 显现出较宽范围的优质工艺参数调控区间,这一优异 的工艺可控性非常有利于高转速 FSW 在实际焊接制 造中的应用。

3 结论

1)当转速由 1000~4000 r/min 区间增大至 5000~ 8000 r/min 区间时,焊核宽度急剧增大了近 50%。分 析认为这是高转速 FSW 产热机制由以滑移摩擦产热 为主,转变为以粘着摩擦产热为主所导致的。

2)随着转速的增大,高转速FSW 焊缝的温度呈现出特殊的先升高而后趋于稳定的变化趋势。造成这 一变化特征的原因在于,当转速升高至一定值时,主 导焊接产热的因素由焊具转速转变成了被焊材料的 切应力。

3)焊缝温度直接决定了焊缝组织特征及力学性 能。焊核区晶粒尺寸及小角度晶界所占比例都随着转 速增大表现出先增大而后趋于稳定的变化趋势。对于 不可热处理强化铝合金而言,亚结构强化是决定焊核 区硬度的主要因素,因此,提高转速有利于增大小角 度晶界比例并提高焊缝焊核区的力学性能。

参考文献:

- 张欣盟,杨景宏,王春生,等.搅拌摩擦焊技术及其应用发展[J].焊接,2015(1):29—32.
 ZHANG Xin-meng, YANG Jing-hong, WANG Chun-sheng, et al. Applications and Developments of Friction Stir Welding[J]. Welding and Joining, 2015(1): 29—32.
- [2] MENDES N, NETO P, LOUREIRO A, et al. Machines and Control Systems for Friction Stir Welding: A Review[J]. Materials and Design, 2016, 90: 256–265.
- [3] MORISADA Y, TAMASHIRO K, KAMAI M, et al. Development of Small Sized Friction Stir Welding Equipment for Hand Operated Welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2015, 20(3): 249– 253.
- [4] JI L, ZUO D W, WANG M. Force Response Characteristics and Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA2024 Sheets[J]. Materials Science and Technology, 2016, 32(18): 1892–1898.
- [5] MOSHWAN R, YUSOF F, HASSAN M A, et al. Effect

of Tool Rotational Speed on Force Generation, Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al-Mg-Cr-Mn (AA 5052-O) Alloy[J]. Materials and Design, 2015, 66: 118–128.

- [6] CHEN S J, ZHOU Y, XUE J R, et al. High Rotation Speed Friction Stir Welding for 2014 Aluminum Alloy Thin Sheets[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(3): 1337–1345.
- [7] BASKORO A S, SUWARSONO, KISWANTO G, et al. Effects of High Speed Tool Rotation in Micro Friction Stir Spot Welding of Aluminum A1100[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 493: 739—742.
- [8] LIU F J, FU L, CHEN H Y. Microstructure Evolution and Fracture Behaviour of Friction Stir Welded 6061-T6 Thin Plate Joints under High Rotational Speed[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2018, 23(4): 333—343.
- [9] LIU F J, FU L, CHEN H Y. Effect of High Rotational Speed on Temperature Distribution, Microstructure Evolution, and Mechanical Properties of Friction Stir Welded 6061-T6 Thin Plate Joints[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(5/6/7/8): 1823—1833.
- [10] ZENG X H, XUE P, WANG D, et al. Effect of Processing Parameters on Plastic Flow and Defect For-

mation in Friction-stir-welded Aluminum Alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 49: 2673—2683.

- [11] SCHMIDT H B, HATTEL J H. A Thermal-pseudo-mechanical Model for the Heat Generation in Friction Stir Welding[C]. Proceedings of 7th International Symposium on Friction Stir Welding, Awaji Island, Japan, 2008.
- [12] ZHANG H J, LIU H J, YU L. Thermal Modeling of Underwater Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(4): 1114–1122.
- [13] 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.
- [14] SCHMIDT H, HATTEL J, WERT J. An Analytical Model for the Heat Generation in Friction Stir Welding[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2004, 12(1): 143—157.
- [15] SCHNEIDER J, BESHEARS R, NUNES A C J. Interfacial Sticking and Slipping in the Friction Stir Welding Process[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 435: 297—304.