

10 mm 厚 LF2 铝合金搅拌摩擦焊温度分布及组织分析

张忠科, 王丽, 王希靖, 孙丙岩, 苏东波

(兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 采用嵌入热电偶测温法得到了 10 mm 厚 LF2 铝合金搅拌摩擦对焊时不同深度(2.5 和 8 mm)、距离搅拌针不同位置的 FSW 温度分布;通过对焊缝不同位置的金相观察,分析了温度场对 10 mm LF2 搅拌摩擦焊焊缝金属组织的影响。实验结果表明,返回侧温度略高于前进侧,但最大不超过 40 °C;焊缝顶部的最高温度出现在与轴肩接触的边沿区域,而焊缝底部的最高温度出现在搅拌针边缘;同时焊缝底部出现的“鼓”形组织表明焊缝不同深度的温度分布不仅与热源产热量有关,还与材料的流动情况有关。

关键词: 搅拌摩擦焊;温度分布;显微组织

中图分类号: TG453

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2006)19-0008-03

Analysis on Temperature Distribution and Microstructure of Friction Stir Welding for 10mm LF2 Aluminum Alloy Plate

ZHANG Zhong-ke, WANG li, WANG Xi-jing, SUN Bing-yan, SU Dong-bo

(State Key Lab. of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: The thermal history and evolution were obtained by embedding thermal couples at specific locations for the 10mm LF2 aluminum alloy during the FSW butt welding. The temperature distribution feature in different depth(2.5, 8mm) from the top, and different distance from the pin was found. The effect of temperature on microstructure was analyzed by observing its metallic phase. The results show that the temperature of retreating side is higher than advancing side, but less than 40 °C; the maximum temperature of top locates at the shoulder margin, and that of bottom locates at the pin round. Meanwhile, from the “drum” zone of welded seam, it can be concluded that the temperature distribution of different depth is related to the thermal source and the flow pattern of materials.

Key words: friction stir welding; temperature distribution; microstructure

搅拌摩擦焊接(FSW)温度场是一个受多种因素(如热源形式、材料热物理性能以及周围换热条件等)共同影响的连续变化过程。以往的研究者主要通过数值模拟与试验数据相结合的方法对薄板温度场进行了研究^[1-7]。本研究是在此基础上针对铝合金厚板进行焊缝温度测量试验和组织观测,确定焊缝温度场的特点及对焊缝组织的影响。

1 实验材料及方法

试验用材料为 10mm 厚 LF2 铝合金板,采用在待焊板材中嵌入 K 型镍铬-镍硅热电偶测量温

度场。试验在自制 FSW 焊机上进行,温度数据记录是采用 JOVLAN 5217 多通道数据采集仪。

将 10 mm LF2 进行搅拌摩擦焊对接,由于受板厚及搅拌摩擦焊机性能的限制,其焊接参数的可选择范围很窄,焊接参数的小范围波动会对焊缝成型产生较大的影响,因此只选用了一组最优的焊接参数(表 1)进行焊接。焊接过程中的平均功率为 6 200 W,平均转矩为 58.7 N·m。焊接过程中,对焊缝在不同深度(2.5 和 8 mm)、距离焊缝中心不同位置的特征点(其位置见图 1)温度进行测量。焊后分

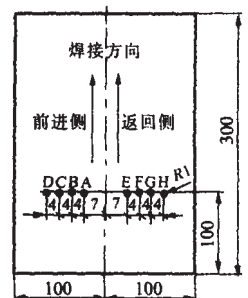


表 1 焊接参数

轴肩直径/mm	搅拌针直径/mm	旋转速度 / r·min ⁻¹	焊接速度 / mm·min ⁻¹
32	10	950	10

图 1 特征点位置分布

收稿日期: 2006-06-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10577010)

作者简介:张忠科(1978-),男,山东济南人,博士生,研究方向:焊接设备及其自动化,新型连接技术;电话:0931-2806865; E-mail: zhangzke@lut.cn.

别截取焊缝不同位置的截面制成试样,用 Keller s 腐蚀剂腐蚀 50 s 后在 XJP-200 光学显微镜下观察其组织。

2 试验结果与分析

2.1 焊缝各特征点的热循环曲线

根据不同深度的热电偶测温数据,利用 Origin 软件分别绘制出各个特征点的热循环曲线,如图 2 所示。可看出,各点温度历史趋势基本相同,由于是从稳定焊接开始后数据进行记录的,直到搅拌针上提,所以,开始时温度迅速升高并达到最高值;随着焊接热源的远去及冷却过程的进行,温度逐渐降低,但是由于垫板的温度还很高,其温度下降梯度不如升温时的大,在搅拌针上提时,基本上没有热源提供热量,所以温度开始迅速下降(稳定焊接开始后大约 14 min)。

同时还可看出,前进侧温度总是比返回侧温

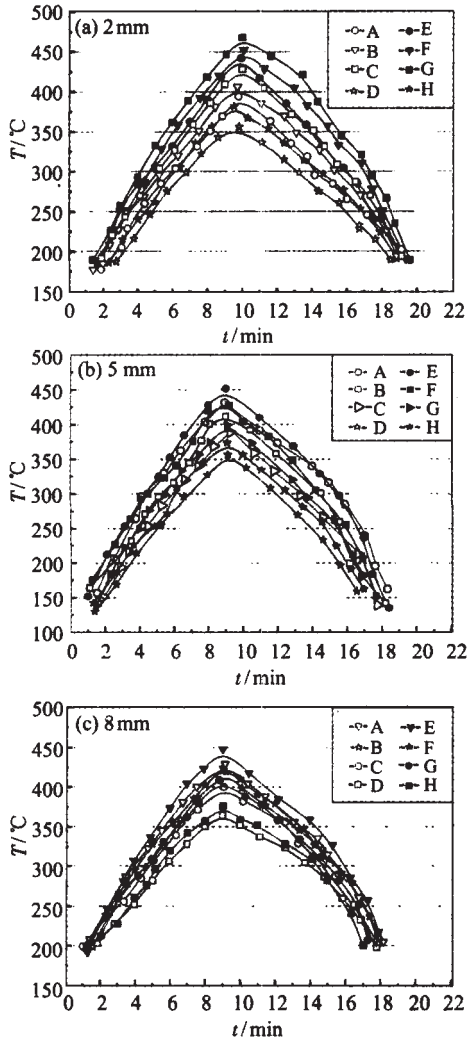


图 2 不同深度特征点温度循环曲线

度稍低,这主要是因为返回侧,搅拌头旋转方向与材料运动方向相反,热塑性材料挤压、摩擦和塑性变形的产热作用比前进侧明显;另外,由于工件受轴肩及搅拌针的旋转、摩擦和搅拌作用,热塑性材料从前进侧越过搅拌针流到返回侧,同时热量也被部分地从前进侧带到返回侧,所以造成返回侧与前进侧存在一定的温差(最大不超过 40)。

在焊缝顶部即靠近轴肩的区域,前进侧与返回侧的最高温度并不是出现在离搅拌针最近的点,而是分别位于 C 点和 G 点区域(图 2a),即在靠近搅拌头轴肩边缘的地方,其最高温度分别达到 428 和 468 ,向两边温度逐渐降低,这是因为在焊缝顶部,热量主要来自于搅拌头轴肩的摩擦生热,越是靠近轴肩边缘的区域,线速度越大,所以摩擦产生的热量越多,即摩擦热沿轴肩的径向呈线性增加^[3],所以在轴肩下部靠近边缘区域的温度最高。同时,从图中还可看出返回侧温度与前进侧温度差相对较大(大约 40),这是因为与轴肩相接触的工件的表面积较大。由于轴肩的旋转摩擦作用,从前进侧流动到返回侧的热塑性材料便相对较多,因而被转移到返回侧的热量也相应的增加,所以温度差比较明显。

而在靠近焊缝底部区域,前进侧与返回侧的最高温度分别出现在离搅拌针最近的 A 点和 E 点(图 2c),温度值分别为 429 和 448 。随着离搅拌针距离的增大,最高温度值逐渐下降,这主要是因为焊缝底部,热量主要来自于旋转着的搅拌针,而受轴肩的影响很小,所以在搅拌针的边缘处,材料受到搅拌针圆柱面的摩擦和剪切作用,温度升高很快,距离搅拌针越远的区域受搅拌针作用越小,所以能够达到的峰值温度也较低,而且由于焊缝底部靠近垫板的金属受搅拌针的搅拌作用不很明显,它只是受到搅拌针端面的摩擦、挤压作用而向上流动,所以这部分材料的温度不会急剧升高,即使它向上流动也不会对上部金属的温度产生较大的影响。因此最高温度出现在离搅拌针最近的区域。

2.2 焊缝接头组织分析

图 3 所示为焊缝接头横截面的宏观组织,焊缝接头分为焊核区(Weld Nugget)、热机械影响区(TMAZ)和热影响区(HAZ)。而组织结构的变化与

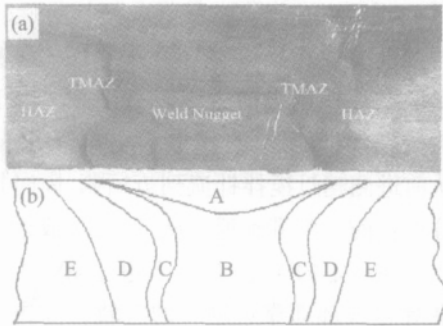


图3 焊缝接头横截面宏观形貌

A-轴肩变形区;B-焊核区;C-TMAZ;D-HAZ;E-母材

经历的焊接热循环关系密切。整个焊缝呈现“花瓶”状,底部有一个“鼓形”区域,这是由于焊缝底部靠近垫板的金属受搅拌针的搅拌作用不很明显,只是受到搅拌针端面的摩擦,但其摩擦温度增加较慢,温度相对较低^[2,8];同时由于受到搅拌针端面的挤压作用而向外向上流动,但它流动的距离不会太远,从而呈现“鼓形”。但从实际测温试验结果分析可知,这部分材料即使向上流动也不会对上部金属的温度产生较大的影响,从而造成焊缝接头横截面组织的“鼓形”区域。

图4为各区组织放大图。由图4(a)可看出,焊核区组织为均匀细小的等轴再结晶,这是因为FSW时,搅拌头高速旋转并以一定的速度向前移动,使得被焊工件局部加热温度高,由测温数据可知焊核区达到了再结晶温度($0.6T_m$),且加热速度快,并伴随有强烈的搅拌作用,在热与力的共同作用下,焊核区金属发生强烈的塑性变形和流动,相互搅拌和混合,相互扩散和渗透,在高温和大变形程度、大变形速度条件下,变形晶粒中的位错密度急剧增大,并形成许多作为再结晶核心的胞状亚结构,进而通过这些再结晶晶核直接形成新的再结晶晶粒。

在输入能量适当时,热机械影响区既受到热的作用,又受到搅拌针的搅拌作用,该区内金属粘度较低,易于流动、成型,所以摩擦头在高速旋转时

此区易出现被拉长或扭曲的组织,但由于该区靠近焊核区,温度较高,会出现部分再结晶,所以表现为拉长晶粒和等轴再结晶晶粒的混合,然而其再结晶晶粒较焊核区的大,如图4(b)所示。热影响区晶粒为典型的受热长大组织,如图4(c)所示,该区主要是受热影响,受力很小或完全不受力,所以畸变能很低。由于铝及其合金的层错能高,变形时扩展位错的宽度窄,位错交滑移和攀移容易进行,而使异号位错相互抵消,位错密度下降,畸变能易降低。所以此处不会发生动态再结晶,而是动态回复,所以在焊缝缓慢冷却的过程中组织仍会沿变形方向长大,而其亚晶粒仍保持等轴状。

3 结论

(1) 返回侧与前进侧存在一定的温度差,即返回侧温度略高于前进侧,但最大不超过40。

(2) 在焊缝顶部轴肩下靠近边缘区域的温度最高;而焊缝底部,靠近搅拌针处的温度最高。

(3) 整个焊缝呈现“花瓶”状,底部出现“鼓”形区域,这与材料的流动状况有关,但这对焊缝的温度分布不会产生显著的影响。

(4) 焊核区组织为等轴再结晶晶粒,热力影响区为拉长晶粒和等轴再结晶晶粒的混合,热影响区为典型受热长大组织。

参考文献:

- [1] 王大勇,冯吉才,王攀峰. 搅拌摩擦焊接热输入数值模型[J]. 焊接学报, 2005, 26(3): 25-28.
- [2] 周鹏展,贺地求,舒霞云,等. 旋转速度对高强铝厚板搅拌摩擦焊温度场的影响[J]. 焊接技术, 2005, 34(2): 10-11.
- [3] 王希靖,包孔,靳龙,等. 3 mm LY12 与 10 mm LF2 搅拌摩擦焊温度场模拟分析比较[J]. 兰州理工大学学报, 2005, 31(3): 1-4.
- [4] 王希靖,郭瑞杰,阿荣,等. 铝合金薄板搅拌摩擦焊温度场模拟[J]. 电焊机, 2004, (增刊): 116-119.
- [5] 王希靖,郭瑞杰,阿荣,等. 搅拌摩擦焊接头的温度检测[J]. 电焊机, 2004, 34(1): 22-23.
- [6] 张华,林三宝,吴林,冯吉才. 镁合金 AZ31 搅拌摩擦焊温度场数值模拟[J]. 宇航材料工艺, 2004, (6): 58-61.
- [7] Chen C M, Kovacevic R. Finite element modeling of friction stir welding-thermal and thermomechanical analysis [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43: 1319-1326.
- [8] Heurtier P, Jones M J. Mechanical and thermal modelling of Friction Stir Welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 171(3): 348-357.

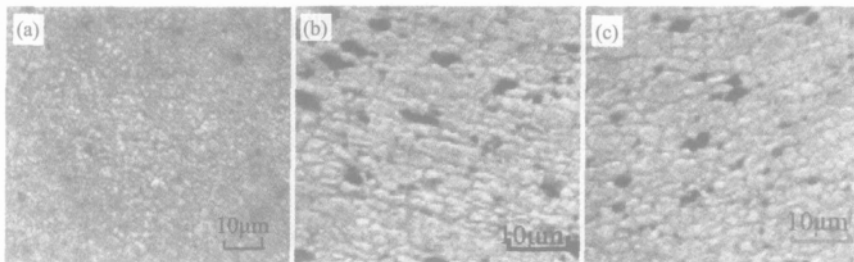


图4 焊缝接头各区微观组织(a-焊核区;b-热力影响区;c-热影响区)×500