



1060 铝板搅拌摩擦焊工艺参数与 接头力学性能间的关系

周哲炜, 李红军

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘要: 为研究 3 mm 厚 1060 铝板的搅拌摩擦焊工艺参数和接头力学性能之间的关系, 使用经典函数关系式对焊接温度、晶粒大小和力学性能数据进行拟合。首先对厚度为 3 mm 的 1060 铝板进行搅拌摩擦焊试验, 焊接过程中采用热电偶测量温度, 然后利用显微镜分析接头组织形貌, 最后对接头试样进行拉伸试验和硬度试验, 并用扫描电镜分析断口特征。研究表明: 焊接温度随搅拌头转速增大而提高, 随焊接速度增大而降低, 并且和搅拌头转速平方与焊接速度之比的 0.168 次方呈线性关系; 焊接温度和焊核区的 Zener-Hollomon 数值的对数与焊核区晶粒大小的对数呈线性关系; 焊核区晶粒大小与接头屈服强度符合 Hall-Petch 公式; 硬度分布呈“W”形; 断口主要呈韧性断裂。该研究结果可为搅拌摩擦焊生产工艺制定提供理论支撑。

关键词: 1060 铝板; 搅拌摩擦焊; 工艺参数; 温度; 显微硬度; 力学性能

中图分类号: TG407

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2021)09-0633-09

The relationship between the process parameters of friction stir welding and mechanical properties of joint for 1060 aluminum plates

ZHOU Zhewei, LI Hongjun

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech
University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to study the relationship between the process parameters of friction stir welding and mechanical properties of joints for 3 mm thick 1060 aluminum plates, classical function relations were used to fit the data of welding temperature, grain size and mechanical properties. Firstly, a friction stir welding test was carried out on a 3 mm thick 1060 aluminum plate, and the temperature was measured by a thermocouple during welding. Then, a microscope was used to analyze the microstructure of joints. Finally, a tensile test and a hardness test were conducted on the joint samples, and the fracture characteristics were analyzed by means of scanning electron microscopy. The results show that the welding temperature increases with the increase of rotating speed of friction stir tool, decreases with the increase of welding speed, and has a linear relationship with the ratio to the power of 0.168 of the square of rotating speed to the welding speed. The logarithm of the Zener-Hollomon value of the welding temperature and the weld nugget shows a linear relationship with the logarithm of the grain size. The grain size of the weld nugget and the yield strength of joints conform to Hall-Petch formula. The hardness distribution presents a

“W” shape. The fracture is dominated by ductile fracture. The results provide a theoretical support for the design of the production process of friction stir welding.

Key words: 1060 aluminum plate; friction stir welding; process parameters; temperature; micro-hardness; mechanical properties

0 引言

搅拌摩擦焊自1991年发明至今,已有了长足的发展,它在众多领域得到了广泛应用,它的工艺研究是该技术发展的重点方向。关于搅拌摩擦焊工艺的研究,主要包括温度控制与材料流动、接头组织形貌和力学性能等。力学性能反映了焊接质量,是该工艺水平的重要指标。力学性能包括屈服强度、抗拉强度以及硬度等,其数值与接头组织形貌相关^[1]。接头组织形貌的形成由焊接温度以及材料的流动决定^[2],焊接温度和材料流动由工艺参数控制^[3]。若能了解从工艺参数到力学性能各焊接变量之间的关系,就能在加工前实现结果预估,为设计工作带来便利。

已有很多学者对搅拌摩擦焊工艺参数与各个焊接变量之间的关系进行了研究。Prabha等^[4]对搅拌头转速和力学性能的关系进行了研究,发现厚度为4 mm的AA5083铝合金在搅拌头转速为1120 r/min时能获得最大抗拉强度。而荆洪阳等^[5]在保持搅拌头转速不变的情况下,研究了焊接速度与抗拉强度的关系,发现随着焊接速度的提高,抗拉强度先增大后减小。这些研究对于焊接变量之间的关系描述都是定性的,没有得出具体函数关系。Hu等^[6]使用不同搅拌头转速和焊接速度之比进行了搅拌摩擦焊试验,并利用Hall-Petch公式对晶粒大小与硬度进行拟合,发现不同焊接参数下晶粒与硬度都符合拟合公式。张昭等^[3]建立了预测晶粒生长过程的三维蒙特卡洛模型,通过模型预测了不同搅拌头转速下的焊核区晶粒大小。这些研究对焊接变量间的数值关系进行了探究,但是研究对象是中间环节的变量,没有完成从工艺参数到力学性能的计算。Raguraman等^[7]、Astuti等^[8]另辟蹊径,分别使用人工神经网络、回归方程以及向量机模型完成了由工艺参数输入到力学性能输出的预测,这些方法的共同点是需要进行较多不同工艺参数的搅拌摩擦焊试验来训练校准模型,并且没有从工艺参数到力学性能之间的关于温度或微观组织的研究,对于力学性能的计算缺乏理论解释。万震宇等^[9]对铝合金强化机理进行了研究,先建立了搅拌摩擦焊过程热力

耦合模型,再利用算得的热力过程数据,模拟了焊接过程中铝合金的相的固溶与析出过程,最后根据析出相粒子的分布与大小,结合固溶相和铝本身的强化机制,计算出焊接接头整体硬度与屈服强度分布,实现了从工艺参数到力学性能的预测。但是该计算过程复杂且耗时,需要查询大量材料常数才能完成计算。

综上所述,目前的搅拌摩擦焊工艺研究,尚不能完成从工艺参数到温度、微观形貌以及力学性能每个环节之间简洁高效的计算,实际生产工艺制定仍需根据经验试错决定。本文对厚度为3 mm的1060铝板进行了搅拌摩擦焊试验,采集焊接温度、分析接头组织形貌和检测力学性能,并建立工艺参数与温度、温度与焊核晶粒大小、焊核晶粒大小与屈服强度及硬度的关系,完成从工艺参数到力学性能高效简洁的计算,以期在实际生产工艺制定提供理论依据。

1 试验方法

本文中,搅拌摩擦焊接试验使用的工件材料为轧制1060铝板,抗拉强度为168.0 MPa,尺寸为200.0 mm×80.0 mm×3.0 mm。搅拌头采用轴肩无内凹、搅拌针为圆柱型的常规搅拌头,轴肩直径为18.0 mm,搅拌针直径4.5 mm,长2.7 mm,实物如图1所示。焊接时轴肩下压量为0.1 mm,搅拌头倾角为2°。焊接工艺试验分两批来进行。首批焊接工艺参数范围较大,搅拌头转速分别为400、600、800 r/min和1000 r/min,焊接速度分别为100、200、300 mm/min和400 mm/min,通过参数组合,共进行16组试验,观察判断焊缝内部是否有缺陷。第二批试验在首批试验的无缺陷参数范围内,增加9组参数组合进行试验。在每次焊接过程中,将4个热电偶埋入1060铝板两侧不同位置来获得温度数据,热电偶放置位置如图2所示。热电偶CH01、CH02分别位于前进侧和后退侧距离焊缝中心12.5 mm处的对称位置,该位置距焊接起始边100.0 mm;热电偶CH07、CH08位于前进侧和后退侧距离焊缝中心18.0 mm处的对称位置,该位置距焊接起始边为120.0 mm。焊接时环境温度为10.0℃,支撑1060铝板的底板为钢材。



图 1 搅拌头实物图(mm)

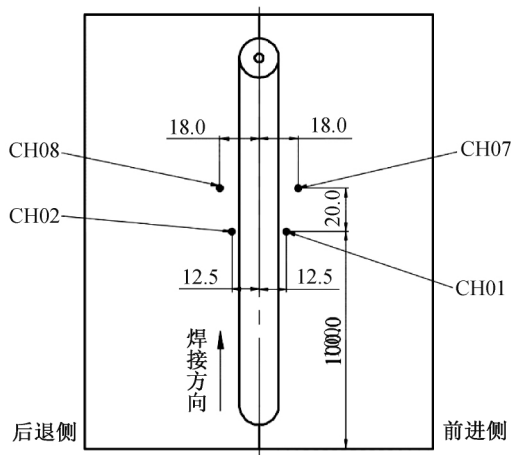


图 2 热电偶放置位置示意图(mm)

焊接完成后,切取焊缝部分试样,将试样的焊缝横截面进行打磨抛光至表面光亮之后,使用体积比为 6.5:100.0 氟硼酸水溶液对其进行阳极覆膜,覆膜电压为 10.0 V,保持 10.0 min。覆膜完成后,使用倒置光学显微镜观察焊缝横截面组织的微观形貌。观察完成后,将焊缝横截面重新打磨光亮,对其进行维氏硬度实验。硬度实验共进行 4 层,分别距离底面 0.6、1.2、1.8、2.4 mm,每层当中点与点之间间隔 1.0 mm。硬度试验的保压载荷为 9.8×10^{-1} N,保压时间为 10.0 s。

拉伸试验试样的尺寸形状参照《金属材料拉伸试验方法》(ASTM-E8)标准制定,取样位置为焊缝 1/2 长度处,拉伸试样垂直于焊缝。使用电火花线切割机将拉伸试样切下,再使用砂纸打磨试样边缘以消除边缘的毛刺和划痕,防止拉伸过程中应力集中。处理好的拉伸试样使用拉伸测试机进行拉伸试验,试验过程中的拉伸速度为 2.0 mm/min。拉伸完成后使用 JSM-5610LV 扫描电镜观察拉伸试样断口的微观样貌。

2 试验结果及分析

按本文设定的首批焊接试验的工艺参数进行 16 组焊接试验,焊接过程中记录温度数据。焊接完成后对焊接试样进行金相试验,结果发现:工艺参数中搅拌头转速为 800~1000 r/min、焊接速度为 100~300 mm/min 时,焊接试样的焊缝内部不会出现缺陷。确认焊缝内部无缺陷的工艺参数的范围之后,进行第二批焊接试验,其工艺参数为搅拌头转速 850、900、950 r/min,焊接速度 100、200、300 mm/min,共 9 组,焊接过程记录温度数据。焊接完成后对第二批焊接试样进行金相试验,发现第二批焊接试样焊缝内部都没有缺陷。对所有焊缝内部无缺陷试样进行整理、编号,结果见表 1。对表 1 中的试样进行拉伸试验、硬度试验和扫描电镜观察分析。

表 1 焊缝内部无缺陷试样工艺参数

试验号	搅拌头转速/($r \cdot \min^{-1}$)	焊接速度/($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)
1	800	100
2	800	200
3	800	300
4	850	100
5	850	200
6	850	300
7	900	100
8	900	200
9	900	300
10	950	100
11	950	200
12	950	300
13	1000	100
14	1000	200
15	1000	300

2.1 温度分析

经过首批与第二批共 25 次焊接试验,结果发现,4 个热电偶测得的温度随时间变化的趋势类似。以 13 号试验为例,焊接过程中温度变化如图 3 所示。从图 3 中可以看出:热电偶位置的温度随时间逐渐上升,在搅拌头经过该位置时达到峰值,搅拌头远离该位置后下降。

热电偶 CH01、CH02 的位置贴近焊缝,不受搅拌头运动和飞边的影响,所以取热电偶 CH01、CH02 所采集温度的峰值的平均值 T_0 作为研究温度变化的参考值。统计焊缝内部无缺陷试样的 T_0 数据,结果如图 4 所示,从图中可以看出:在相同搅拌头转速的条件下, T_0 随着焊接速度的升高而下降;在焊接速度不变的情况下, T_0 随着搅拌头转速

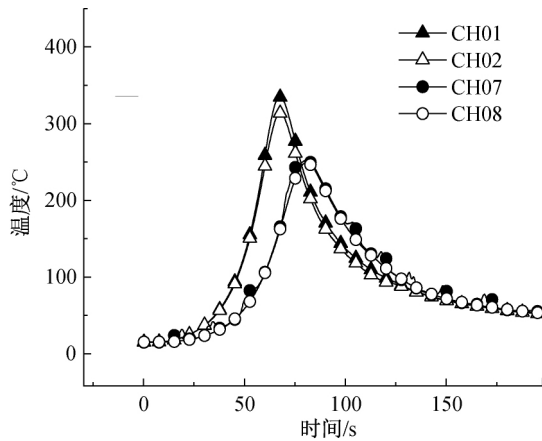


图3 13号试验焊接过程中温度变化曲线

的升高而上升。出现该现象的原因是,在搅拌头转速不变时,焊接速度的增大使单位时间单位体积的材料吸收的热量减少,温度降低;而在焊接速度保持一定时,搅拌头转速的提高使产热功率增大,产生的热量增加,温度提高。但是,搅拌区域的热传导以及热平衡机制复杂。在导热过程中,材料的导热系数和比热容随温度的变化而变化、试验环境造成空气与材料热对流系数变化等因素的影响使得 T_0 并非线性变化。

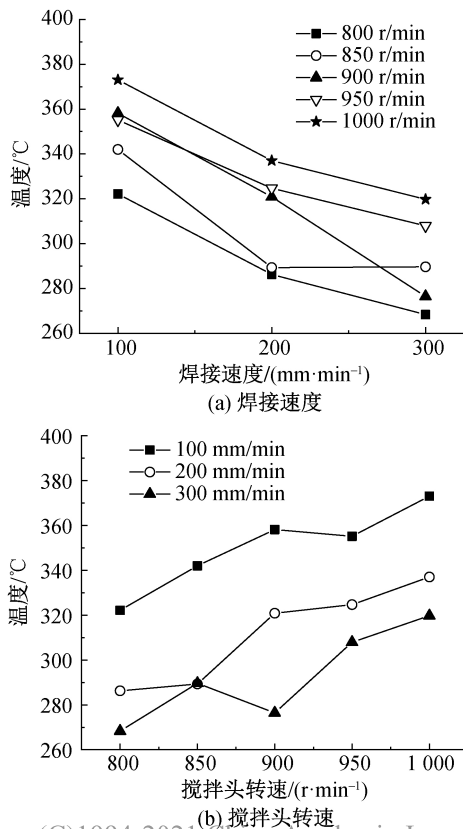


图4 温度随焊接速度和搅拌头转速的变化曲线

Rasti^[10]经研究得出,1060 铝搅拌摩擦焊接的最高温度在不考虑焊接压力的情况下与工艺参数存

在如下函数关系:

$$\frac{T_{\max}}{T_m} = 0.125 \left(\frac{\omega^2}{v} \right)^{0.120} \quad (1)$$

其中: T_{\max} 为焊接时的最高温度, °C; T_m 为材料熔点温度 649 °C; ω 为搅拌头转速, r/min; v 为焊接速度, mm/min。然而,式(1)中的最高温度 T_{\max} 出现在焊核区域。由于搅拌针的存在,焊接过程中很难测量焊核区域的温度。此外,其他试验条件,如底板散热能力不同会造成式(1)中的系数不同,故式(1)中的系数不适用于本文。

本文尝试使用不同工艺参数以及对应的 T_0 来拟合出适用于本试验的温度与工艺参数的关系式。将式(1)中的系数分别设为 K 和 β , 对式(1)取对数有:

$$\ln T_{\max} = \ln T_m + \ln K + \beta \ln \left(\frac{\omega^2}{v} \right) \quad (2)$$

用 T_0 代替 T_{\max} , 将 T_0 、 ω 、 v 代入式(2), 结果如图5所示, 从图中可以看出, 数据呈明显的正相关性。

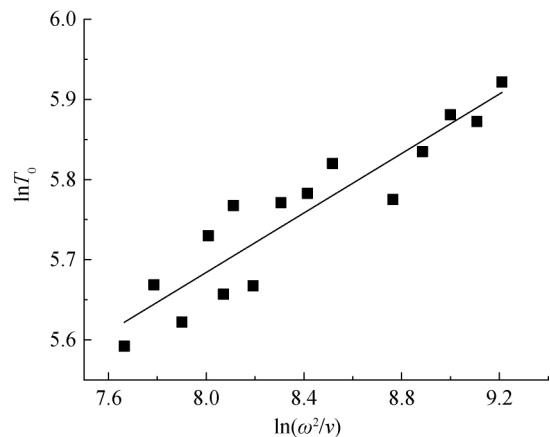


图5 温度与工艺参数拟合曲线

对数据进行线性拟合, 拟合直线的表达式为:

$$\ln T_0 = 0.168 \ln \left(\frac{\omega^2}{v} \right) + 4.119 \quad (3)$$

拟合的决定系数 R^2 为 0.856, 说明 T_0 对于式(3)有较好的拟合优度。将式(3)还原成式(1)的形式, 得到工艺参数与温度之间的函数关系式:

$$\frac{T_0}{T_m} = 0.095 \left(\frac{\omega^2}{v} \right)^{0.168} \quad (4)$$

2.2 接头组织分析

典型的接头组织宏观形貌如图6所示, 其中: b 为焊核区, c 、 d 分别为前进侧和后退侧的热机影响与热影响的过渡区, e 为热影响区, f 为热机影响区。图6对应位置的放大图如图7所示。1060 铝板的母材微观形貌如图7(a)所示, 从图中可以看出: 晶粒组织呈现出长宽比很大的细长条状, 说明该部分材料受到的轧制加工使其产生了很大的变

形。焊核区微观形貌如图 7(b) 所示, 从图中可以看出: 焊核区的材料受到搅拌头的摩擦搅拌, 经历了高温和大变形, 原本的晶粒组织结构被破坏并发生了动态再结晶, 晶粒重新形核长大, 形成了细小的晶粒。前进侧和后退侧的微观形貌图如图 7(c) 和图 7(d) 所示, 从图中可以看出: 前进侧的过渡区范围更小也更为明显, 表现为一条宽度大约为 $400.0\ \mu\text{m}$ 的变形晶粒带; 而后退侧的过渡区则

在一个更大的范围之内有一个更加平和的过渡。观察后退侧热机影响区微观形貌图 7(f) 可以发现: 热机影响区的晶粒受到搅拌作用发生了形变, 晶粒变形方向平行于过渡带。热影响区的微观形貌图如图 7(e) 所示, 从图中可以看出: 该部分的晶粒只受到热循环的作用而没有受到搅拌, 未发生塑性形变, 其形貌跟母材区差别不大, 只是晶粒较母材区略微长大。

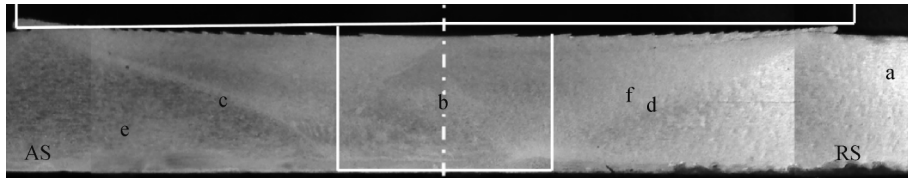
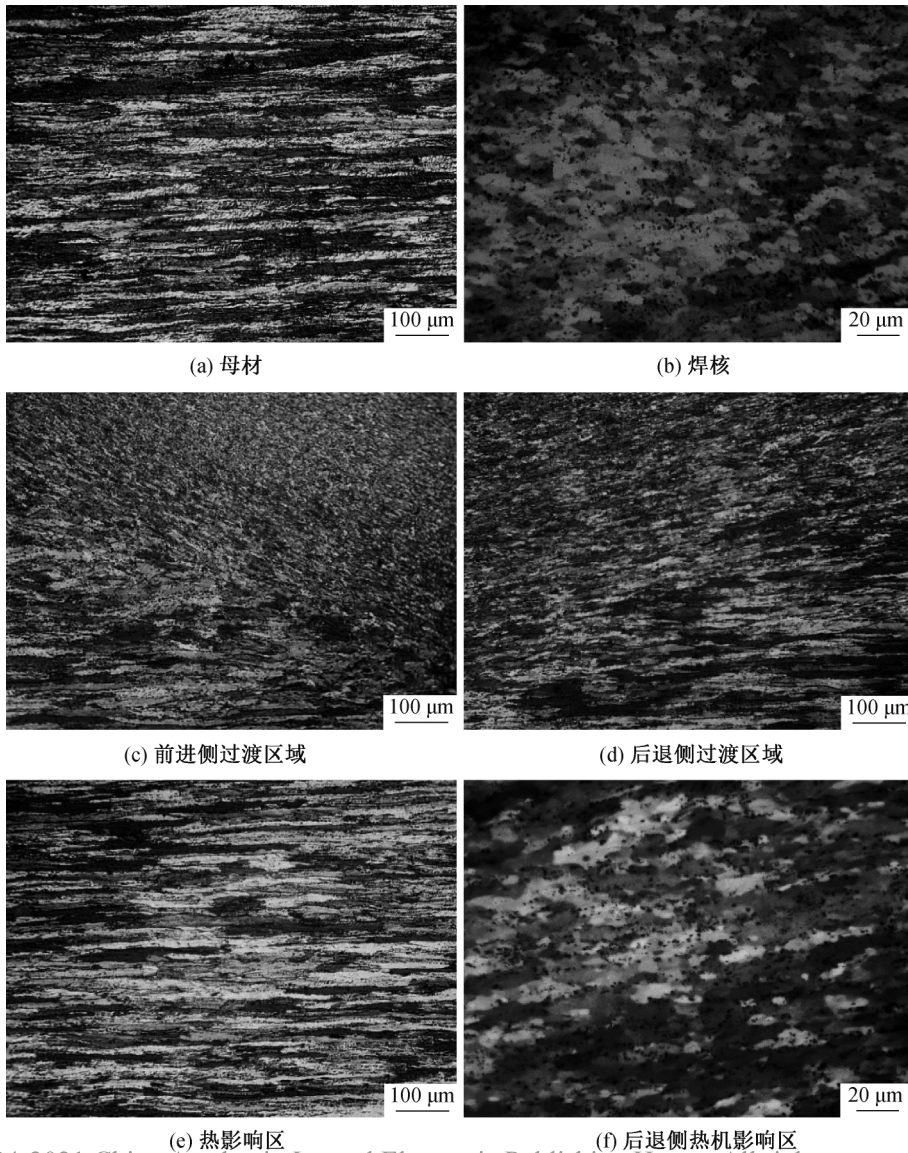


图 6 接头组织宏观形貌图



(e) 热影响区

(f) 后退侧热机影响区

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

图 7 接头组织不同区域微观形貌图

Gerlich 等^[11]研究了搅拌摩擦焊焊核区的 Zener-Hollomon 参数与晶粒大小的关系, 发现晶粒

直径的对数与 Zener-Hollomon 参数的对数呈线性关系, 对于不同材料, 有:

$$\log\left(\frac{d}{D}\right) = a + b \log Z \quad (5)$$

其中: d 表示晶粒直径, μm ; D 表示初始晶粒直径, μm ; a 、 b 为材料常数; Z 是 Zener-Hollomon 参数, 计算方式为:

$$Z = \dot{\epsilon} \cdot e^{\frac{Q_s}{RT}} \quad (6)$$

其中: T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; Q_s 与 R 为材料常数, 其值为 $1.260 \times 10^5 \text{ J/mol}$ 和 $8.314 \text{ J/(K}\cdot\text{mol)}$ [12]。焊核中心应变率 $\dot{\epsilon}$ 可由式(7) [13] 近似得到:

$$\dot{\epsilon} = \left[\ln \left(\frac{2d_p \cdot \cos^{-1} \frac{1}{2}}{v/\omega} \right) + \left| \ln \left(\frac{v/\omega}{2d_p \cdot \cos^{-1} \frac{1}{2}} \right) \right| \right] \cdot \frac{\omega}{60} \quad (7)$$

其中: d_p 为搅拌针直径, 4.5 mm 。但是在上述晶粒估算方式中, 焊核区的温度测量比较困难。若能避免测量焊核区温度就直接估算晶粒大小, 就能为后续研究和生产带来便利。本文尝试将 T_0 代入式(6), 结合焊核中心的应变率 $\dot{\epsilon}$, 计算得到 T_0 的 Zener-Hollomon 参数 Z_0 , 再将 Z_0 代入式(5), 与焊核区中心位置的平均晶粒直径 d_c 进行线性拟合, 探究 T_0 、 $\dot{\epsilon}$ 与 d_c 之间的关系是否也可以满足式(5)。统计每组试验试样的 d_c 及与其相对应的 Z_0 , 结果及拟合直线见图 8。

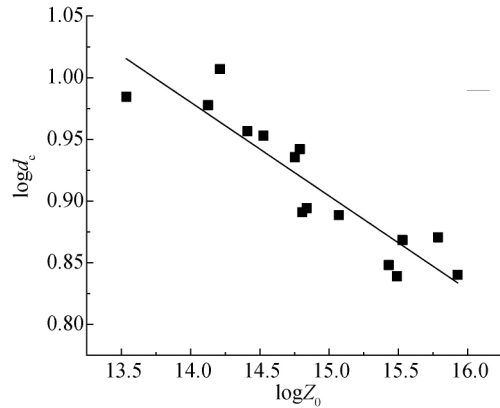


图 8 焊核区中心位置平均晶粒直径与 Z_0 拟合曲线

图 8 中的拟合直线方程为:

$$\log d_c = -0.152 \log Z_0 + 2.445 \quad (8)$$

拟合的决定系数 R^2 的值为 0.845, 说明线性拟合优度较好, 表明使用 T_0 同样可以满足式(5), 式(8)可以作为温度与晶粒大小的函数关系式。

2.3 拉伸试验结果

关于抗拉强度, 焊缝内部无缺陷拉伸试样的抗拉强度随焊接参数变化情况统计如图 9 所示。从图 9 中可以看出: 当焊接参数为 850 r/min 、 200 mm/min 时, 拉伸试样有最大抗拉强度 142.6 MPa , 为母材的 81% ; 当焊接参数为 950 r/min 、 100 mm/min 时拉伸试样的抗拉强度最小, 为 126.5 MPa , 但其抗拉强度在不同搅拌头转速和焊接速度时具有不同的趋势, 整体上没有呈现出稳定的规律。

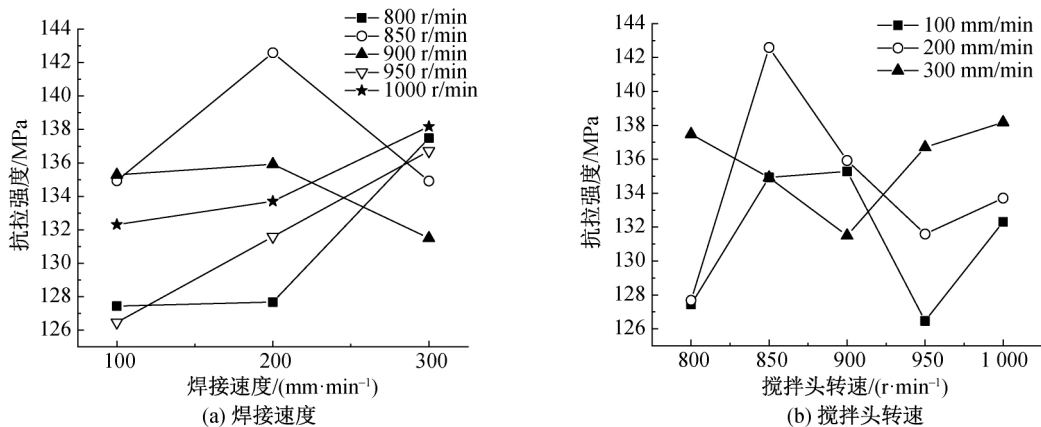


图 9 抗拉强度随焊接速度和搅拌头转速变化的曲线

关于屈服强度, 对于 1060 铝这种在进行拉伸时没有明显屈服点的材料, 以产生 0.2% 残余变形时的应力大小作为其屈服强度。根据 Hall-Petch 公式, 对于金属材料, 其晶粒直径的平方根倒数与其屈服强度呈线性关系, 有:

$$\sigma = \sigma_0 + k d^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

其中: σ 表示屈服强度, MPa ; σ_0 为初始屈服强度, MPa ; k 为材料系数。在本文中, 拉伸试样的屈服强度为试样力学性能最薄弱处的屈服强度。力学性能最薄弱处的位置会随焊接区域的变化而产生变化, 目前尚不能精准定位。本文前面的试验研究已经测得焊核区中心位置的平均晶粒直径 d_c , 焊核区的中

心位置虽然不是力学性能最薄弱处,但是可以体现整个焊缝受到热力过程影响的结果。所以,不妨使用 d_c 来与拉伸试样的屈服强度 σ 进行拟合,探究他们之间的函数关系。统计 σ , 与 d_c 一起代入式(9)进行拟合,统计结果和拟合直线如图 10 所示。

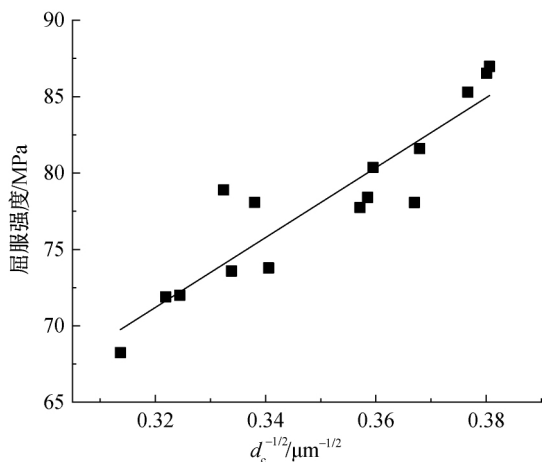


图 10 焊核区中心位置平均晶粒直径与屈服强度拟合曲线

可以发现 σ 与 $d_c^{-1/2}$ 明显正相关,拟合直线为:

$$\sigma = -2.032 + 228.850d_c^{-1/2} \quad (10)$$

拟合的决定系数 R^2 的值为 0.843,拟合优度良好,即说明焊核区中心位置平均晶粒直径与拉伸试样的屈服强度符合 Hall-Petch 公式。

2.4 显微硬度分析

焊缝横截面的硬度分布如图 11 所示,从图中可以看到:硬度分布大致呈现出“W”形,硬度的数值在轴肩范围之外的母材区最高,进入轴肩影响范围之后逐渐降低。根据到底面的距离不同,每层的硬度值最低点出现的位置和数值大小都不同。根据与图 6 接头组织宏观形貌图的对比,推测在热机影响区的范围内出现最低硬度,硬度值在进入焊核范围后又有所升高。根据 Hall-Petch 公式有:

$$H = H_0 + k_H d^{-1/2} \quad (11)$$

其中: H 代表维氏硬度, HV ($1 HV = 1.9 \times 10^{-1} N/mm^2$); H_0 为初始维氏硬度, HV ; k_H 为材料系数。铝合金晶粒越细小,其硬度值越高。焊核区域越靠近中心的位置材料受到的搅拌更充分,能获得更细小的晶粒,这使得焊核最中心的硬度略微高于焊核其他位置。对于本试验,晶粒细小的焊核区的硬度值,比起晶粒粗大的母材区硬度反而更低。这是因为,母材 1060 铝是工业纯铝,铝元素在材料中占比为 99.6%,其他元素在材料中含量很少,使得热处理对材料强度提升有限,故工业生产中常使用轧制加工来对 1060 铝板进行强化。观察图 7(a)的 1060

铝板母材微观形貌图,晶粒明显拉长,说明 1060 铝板在加工时,材料经历了较大应变,获得了位错强化。而 1060 铝板在经过搅拌摩擦焊加工后,原先的晶粒组织被打碎,经历动态再结晶后形成的焊核基本是由等轴晶粒或少量变形的细小晶粒构成,消除了加工产生的位错强化,但增加的细晶强化不足以弥补位错强化的缺失,造成 1060 铝板焊核区硬度降低。

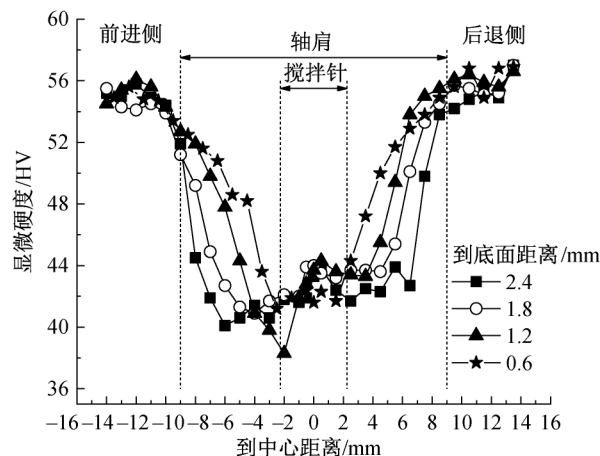


图 11 显微硬度分布图

对焊缝内部无缺陷试样的焊核区中心位置平均硬度 H_c 进行统计,结合上节中得到的焊核区中心位置平均晶粒直径 d_c ,可以得到 H_c 与 d_c 的关系。将 H_c 和 d_c 代入式(11),结果以及拟合直线如图 12 所示。

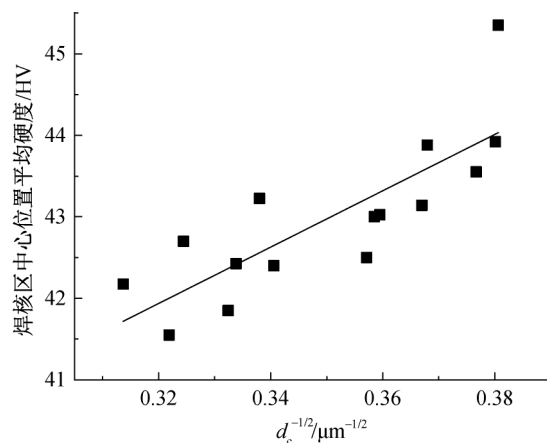


图 12 焊核区中心位置平均硬度与该区域平均晶粒直径拟合曲线

从图 12 中可以看到, $d_c^{-1/2}$ 与 H_c 总体呈正相关,经过线性拟合之后可以得到拟合关系式为:

$H_c = 30.876 + 34.567d_c^{-1/2} \quad (12)$
然而,决定系数 R^2 的值仅为 0.656,说明 $d_c^{-1/2}$ 与 H_c 之间没有非常明显的线性关系,与 Hall-Petch 公式存在一定的差距。分析数据可以发现,硬度值

最高为 45.4 HV, 最低 41.6 HV, 相差仅 3.8 HV, 15 组数据在很小的范围之内波动, 精度不足, 需要更多的数据和更高的精度才能得到更加准确的拟合数据。此外, 铝很容易与空气接触形成氧化层, 测量时操作的误差和环境等因素都会对硬度的测量造成一定的影响, 使得最终的结果并不严格遵循 Hall-Petch 公式。

2.5 断口分析

对拉伸试样的断口进行直接观察和扫描电镜图像分析, 可以明确断口的断裂属性。以断口具有代表性的 2 号试样为例, 从断口的侧面观察, 如图 13(a) 所示, 可以看出: 断口宏观上出现明显的缩颈现

象, 其断口平面与主应力即拉伸方向成 45° 的夹角, 在该平面上具有最大切应力。对左边断裂试样的断口正面进行扫描电镜图像分析, 断口正面的低倍放大图像如图 13(b) 所示, 从图中可以发现: 断口中间部分颜色较浅而上下部边缘部分较深。明亮处的 A 区域微观形貌如图 13(c) 所示, 从图中可以看出: 该区域出现大量大而深的韧窝以及撕裂棱, 是典型的韧性断裂样貌。而断口上部颜色较深的 B 区域放大之后如图 13(d) 所示, 从图中可以看出: 其表面较为平整, 上面只有较少的细小韧窝, 断裂形式为解理断裂占比较多的混合型断裂。从断口的整体来看, 大部分为韧性断裂, 边缘处少部分为混合型断裂。

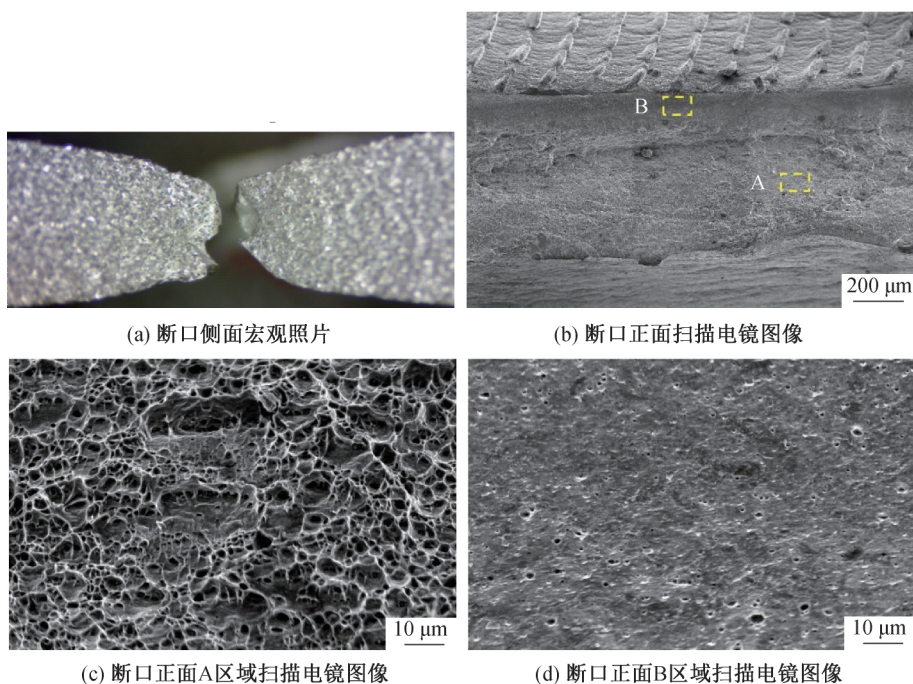


图 13 断口宏观照片及扫描电镜图像

3 结 论

本文对 3 mm 厚 1060 工业纯铝板材进行了搅拌摩擦焊试验, 并通过热电偶测温、金相试验和拉伸试验, 对 1060 铝搅拌摩擦焊工艺性能进行了研究, 并得出了工艺参数与温度、温度与晶粒大小、晶粒大小与力学性能的关系, 为生产工艺制定提供了理论支撑。具体结论如下:

a) 焊接参数在搅拌头转速 $800 \sim 1000$ r/min、焊接速度 $100 \sim 300$ mm/min 时可以得到无内部缺陷的焊缝, 温度随搅拌头转速的增大而升高, 随焊接速度的增大而降低, 通过拟合得到了两侧靠近焊缝处温度峰值平均值关于搅拌头转速平方与焊接速度之比的 0.168 次方的线性关系式。

b) 利用焊接区域之外的参考温度与焊核区中心的应变率计算得到的 Zenner-Hollomon 参数 Z_0 , 可以预测焊核区晶粒大小。 Z_0 的对数与焊核区中心晶粒直径的对数呈线性关系。

c) 当工艺参数为 850 r/min、 200 mm/min 时有最大抗拉强度 142.6 MPa, 为母材的 85%。抗拉强度关于工艺参数没有明显的对应变化趋势, 焊核区晶粒直径与接头屈服强度符合 Hall-Petch 公式。

d) 硬度分布呈“W”型, 热机影响区位置附近硬度值最低并向着母材和焊核区方向增大, 焊核区硬度低于母材硬度。焊核中心平均硬度与焊核中心平均晶粒直径相关。拉伸试样断口出现缩颈现象, 呈 45° 剪切断裂样貌。断口的断裂形式主要是韧性断裂。

参考文献:

- [1] 徐永超, 周斌军, 聂辉. 2219 铝合金板材搅拌摩擦焊接接头局部力学性能研究[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(2): 50-54.
- [2] Miles M P, Nelson T W, Gunter C, et al. Predicting recrystallized grain size in friction stir processed 304L stainless steel [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(4): 491-498.
- [3] 张昭, 胡超平. 搅拌头转速对 2024-T3 铝合金搅拌摩擦焊接中晶粒生长的影响[J]. 机械工程材料, 2018, 42(3): 80-86.
- [4] Prabha K A, Putha P K, Prasad B S. Effect of tool rotational speed on mechanical properties of aluminium alloy 5083 weldments in friction stir welding [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(9): 18535-18543.
- [5] 荆洪阳, 丰琪, 徐连勇, 等. 6063-T6 铝合金搅拌摩擦焊组织与力学性能研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 13-19.
- [6] Hu W, Li Q H, Wang Y, et al. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction-stir-welded Al-Mg-Si alloy [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(2): 866-876.
- [7] Raguraman D, Muruganandam D, Senthilkumar N, et al. Tensile strength prediction on different FSW tools using ANN and regression equations [J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2015, 10(49): 545-551.
- [8] Astuti A W, Saedon J. Development of prediction system model for mechanical property in friction stir welding using support vector machine (SVM) [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 5(5): 216-225.
- [9] 万震宇, 周霞, 张昭. 6005-T6 铝合金搅拌摩擦焊接微观组织演变计算及力学性能预测[J]. 机械工程学报, 2018, 54(8): 129-136.
- [10] Rasti J. Study of the welding parameters effect on the tunnel void area during friction stir welding of 1060 aluminum alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(5/6/7/8): 2221-2230.
- [11] Gerlich A, Yamamoto M, North T H. Strain rates and grain growth in Al5754 and Al6061 friction stir spot welds [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2007, 38(6): 1291-1302.
- [12] Rezaei Ashtiani H R, Parsa M H, Bisadi H. Constitutive equations for elevated temperature flow behavior of commercial purity aluminum [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 545: 61-67.
- [13] Reynolds A P. Flow visualization and simulation in FSW [J]. Scripta Materialia, 2008, 58(5): 338-342.

(责任编辑: 康 锋)