

搅拌摩擦焊过程中下压力的检测及影响因素

兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料国家重点实验室 (730050) 王希靖 韩道彬 张忠科

摘要 针对搅拌摩擦焊过程,利用数据采集系统,研究了工艺参数对焊接下压力的影响,得到了下压力的变化规律。结果表明:当采用不同的工艺参数时,所检测的下压力变化曲线也不同。根据采集到的曲线特征分析发现:在同一参数下,焊接不同的材料时,材料所受的下压力不同;在不同的工艺参数下,焊接同一种材料时,材料所受的下压力也不同。试验证明,下压力随下压速度和下压量的增加而增加,随旋转速度的增加而减小。影响焊接过程中下压力的主要因素是旋转速度、下压量及下压速度。

关键词: LF21铝合金 LY12铝合金 搅拌摩擦焊 下压力 数据采集

中图分类号: TG453

0 前言

搅拌摩擦焊(简称FSW)是英国焊接研究所于1991年发明的一项新型固相连接技术。它作为一种新型的低熔点有色金属连接工艺,在铝合金的焊接方面具有得天独厚的优势。搅拌摩擦焊成形,是一个温度变化、组织转变、存在应力应变和金属流动等多方面相互耦合、共同作用的复杂过程;随材料种类、材料厚度、焊接参数、摩擦头几何尺寸等条件的变化而变化。其中力学因素的影响是其关键部分,已经成为FSW研究发展的重要方向。这对于搞清搅拌摩擦焊成形机理,优化焊接工艺、提高焊接质量、改进焊接设备均有重要的作用。对其深入理解有助于FSW关键部件搅拌头的设计及难焊材料的成形条件分析都具有举足轻重的作用。在研究与发展航空、航天、兵器等金属加工领域的FSW成形技术方面具有重要科学意义和应用前景^[1]。

目前国内外对搅拌摩擦焊过程中力学因素的研究有以下几个方面:

(1) 张洪武等采用基于固体力学的有限元方法,

针对不同过程参数情况下,对搅拌头的受力情况进行了模拟^[2]。

(2) 李庆华、张昭等利用有限元方法分别模拟了搅拌摩擦焊过程中的热力耦合及在不同压紧力作用下构件材料的三维流动过程^[3,4]。

(3) Carl D. Sorensen和 Aaron L. Stahl对焊接过程中,搅拌针上纵向力的分布进行了研究。研究表明,搅拌针上的力随着与轴肩之间的距离增加而线性地增加^[5]。

(4) K. Kumar和 Satish V. Kailas通过改变搅拌头与焊件之间的角度来改变轴向力,研究了不同的轴向力对焊缝抗拉强度的影响^[6]。

目前,国内对搅拌摩擦焊过程中下压力的研究很少。文中对搅拌摩擦焊过程中下压力的实时检测进行了试验研究。

1 试验材料及方法

试验采用LF21和LY12铝合金,经机加工制成规格为300 mm×60 mm×6 mm的板件进行焊接。两种铝合金材料主要成分和力学性能见表1。

表1 LY12与LF21铝合金的化学成分和力学性能

材料	化学成分(质量分数,%)				抗拉强度 R_m / MPa	布氏硬度 $\text{HB} / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$
	Mg	Mn	Cu	Al		
LF21	0.05	1.0~1.6	—	余量	130	30
LY12	1.2~1.8	0.3~0.9	3.8~4.9	余量	480	131

收稿日期: 2008-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10577010)。

试验设备为FSW-3LM-015型搅拌摩擦焊机,焊速为0~2000 mm/min,转速为250~2500 r/min,对铝

合金最大焊接厚度为 14 mm, 完全满足试验的连接要求。选用有螺纹的普通搅拌头, 没有锥度, 如图 1 所示。其主要参数见表 2。



图 1 试验用搅拌头

表 2 搅拌头主要参数

针的直径 d/mm	针的长度 l/mm	轴肩的直径 D/mm
5.3	5.3	20.2

下压力的测量采用压力传感器, 其输出为电压信号。该型号传感器线性度为 0.03。根据压力传感器尺寸自行设计力学信号测量装置(工作台), 将传感器分别安装于其上选定的位置。轴向方向, 在焊缝起始点正下方放置两个, 纵向方向前后各放置一个, 侧向左右各放置两个。因为试验仅针对焊接下压力进行实时检测, 所以仅采集焊缝中心线正下方的两个传感器的信号, 定义位于焊缝起始点正下方的为 1 号传感器, 终点正下方的为 2 号传感器。试验采集电路主体框图如图 2 所示。

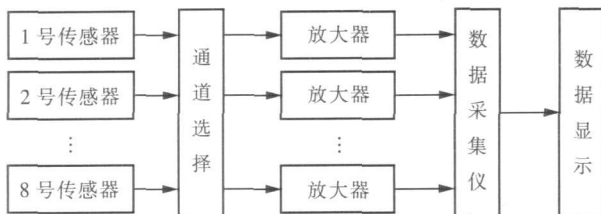


图 2 采集电路主体框图

压力信号的采集使用 JW 5200 型数据采集仪, 该仪器采集传感器输出的电压信号, 并把 (电压-时间) 图像显示在面板上。试验方案如图 3 所示。试验时:

(1) 针对同一种材料, 在保持其它工艺条件和参数不变的情况下, 分别改变搅拌头旋转速度 ω 和下压速度 v 观察下压力的变化曲线;

(2) 针对 LF21 和 LY12 这两种材料, 在保证工艺条件和参数均相同的条件下, 得到每一种材料在焊接过程的下压力的变化曲线, 并比较所得下压力的区别。

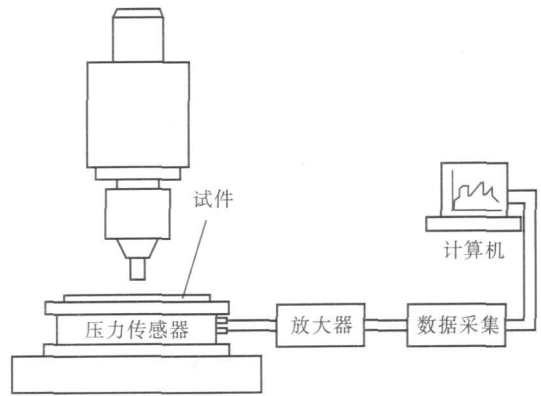


图 3 试验方案示意图

2 试验结果及分析

2.1 搅拌头旋转速度差异对下压力的影响

针对 LY12 铝合金板, 在保证其它工艺和参数不变的情况下, 焊接速度 100 mm/m in, 下压速度为 10 mm/m in, 下压力 0.20 mm。选用 600 r/m in, 800 r/m in, 1 000 r/m in, 1 200 r/m in 的旋转速度分别进行搅拌摩擦焊接, 得到如图 4 所示结果。

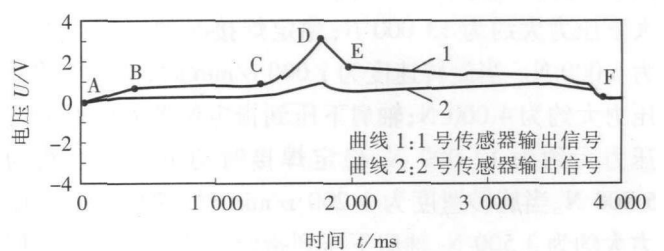


图 4 旋转速度为 600 r/m in 的下压力曲线

分析图 4 中 A-B 段可知, 当搅拌针与铝板接触时, 材料还没有吸收足够的热量, 此时材料硬度还比较高, 所以下压力迅速增大。B-C 段, 随着热输入的增加, 搅拌针周围材料塑化, 下压力变化平缓, 由图可知, 此时两个传感器输出的电压信号约为 1 V, 对应的下压力大约为 0.5 t 也就是 5 000 N。C-D 段, 因为之前只是搅拌针与材料接触并摩擦生热, 但距离搅拌针较远, 轴肩正下方的金属吸收热量不足, 仍处于固相状态, 所

以当轴肩继续向下运动与铝板开始接触时,下压力又迅速增大,直到达到指定的下压位置时,下压力增至最大,此时两个传感器输出的电压信号约为 3.4 V,对应的下压力为 17 000 N。D—E段,此时由于搅拌头的高速旋转,轴肩下方的金属逐渐软化,所以下压力又迅速减小。E—F段,在起焊前保持旋转的这段时间内,对轴肩下金属的热输入更多,使之逐渐达到塑化状态,此时两个传感器输出的电压信号缓慢减小至 1.6 V,并保持不变,直至焊接结束,对应的下压力为 8 000 N。

采用的旋转速度分别为 800 r/min, 1 000 r/min 和 1 200 r/min 时,下压力变化曲线的特征与图 4 类似,所以把每一特征段的下压力值归纳如图 5 所示。

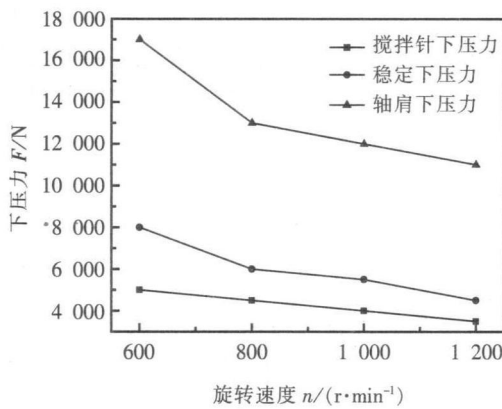


图 5 不同旋转速度的下压力

从图 5 可知,当旋转速度为 800 r/min 时,搅拌针的下压力大约为 4 500 N;轴肩下压到指定位置时的最大下压力大约为 13 000 N;稳定焊接时的下压力大约为 6 000 N。当旋转速度为 1 000 r/min 时,搅拌针的下压力大约为 4 000 N;轴肩下压到指定位置时的最大下压力大约为 12 000 N;稳定焊接时的下压力大约为 5 500 N。当旋转速度为 1 200 r/min 时,搅拌针的下压力大约为 3 500 N;轴肩下压到指定位置时的最大下压力大约为 11 000 N;稳定焊接时的下压力大约为 4 500 N。

采用不同的旋转速度焊接同一种材料时,随着旋转速度的增加,热输入随之增加,材料软化速度逐渐加快,所以搅拌针的下压力、轴肩的下压力以及稳定焊接过程中的下压力都随转速的增加而降低。

2.2 搅拌头下压速度改变对下压力的影响

针对 LY12 铝合金,在保证其它工艺条件不变的情况下,焊接参数采用:旋转速度 600 r/min,焊接速度 60 mm/min,下压量 0.15 mm,均保持不变。分别采用 5 mm/min, 10 mm/min, 15 mm/min 和 20 mm/min 的下压

速度对其进行搅拌摩擦焊。根据采集到的数据图像,归纳每一特征段的下压力值如图 6 所示。

由图 6 可知,当下压速度为 5 mm/min 时,搅拌针对焊件的下压力约为 4 500 N;轴肩下压到指定位置时的最大下压力约为 13 500 N;稳定焊接时的下压力约为 7 500 N。当下压速度为 10 mm/min 时,搅拌针的下压力约为 6 000 N;轴肩下压到指定位置时的最大下压力约为 14 500 N;稳定焊接时的下压力约为 7 400 N。当下压速度为 15 mm/min 时,搅拌针的下压力约为 7 500 N;轴肩下压到指定位置时的最大下压力约为 16 000 N;稳定焊接时的下压力约为 7 500 N。当下压速度为 20 mm/min 时,搅拌针的下压力约为 9 000 N;轴肩下压到指定位置时的最大下压力约为 17 500 N;稳定焊接时的下压力约为 7 400 N。

采用不同的下压速度焊接同种材料时,随着下压速度的增加,搅拌针的下压力及轴肩的下压力均增加。而在稳定焊接过程中,下压力基本保持不变。原因是当搅拌头旋转下压时,下压速度越快,对材料的热输入就越小,导致材料塑化越慢,所以材料对摩擦头的反抗力也就越大,因此下压力越大。但当稳定焊接时,由于采用相同的旋转速度、焊接速度和下压量,所以使被焊材料塑化所输入的热量基本一致,所以材料对摩擦头的反抗力也基本一致。因此,在稳定焊接过程中,下压力基本保持不变。

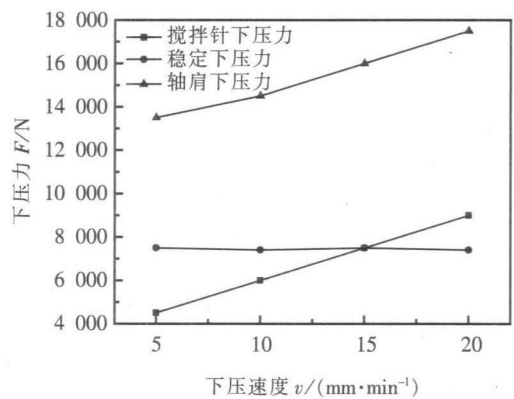


图 6 不同下压速度的下压力

2.3 焊接速度对下压力的影响

针对 LY12 铝合金,在保证其它工艺条件不变的情况下,焊接参数采用:旋转速度 600 r/min,下压速度 18 mm/min,下压量 0.15 mm,均保持不变。分别采用 80 mm/min, 120 mm/min, 160 mm/min 和 200 mm/min 的焊接速度对其进行搅拌摩擦焊。由于其它的参数不变,所以在搅拌头开始下压直至轴肩完全与焊件接触

的这段时间内,下压力的变化曲线是完全相同的。搅拌针对焊件的下压力大约为 8 500 N;轴肩下压到指定位置时的最大下压力大约为 17 000 N;因此,只需分析在稳定焊接过程中的下压力变化。根据采集到的数据图像,归纳在稳定焊接过程中的下压力值如表 3 所示。

表 3 不同焊接速度的下压力

焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	稳定下压力 $F_{\text{稳定}}/\text{N}$
80	7 600
120	7 600
160	7 800
200	7 700

在其它参数不变的情况下,采用不同的焊接速度进行焊接时,下压力变化很小。因此,焊接速度的变化对下压力几乎没有影响。

2.4 焊接不同材料对下压力的影响

针对 6 mm 厚的 LY12 和 LF21 铝合金板,在保证其它工艺和参数均不变的情况下,焊接参数为:旋转速度 800 r/min,焊接速度 60 mm/min,下压速度为 15 mm/min,分别对两种材料进行搅拌摩擦焊,根据采集到的下压力的变化曲线,归纳每一特征段的下压力值如表 4 所示。

表 4 LY12 和 LF21 搅拌摩擦焊过程中的下压力

材料	厚度 δ/mm	搅拌针下压力 $F_{\text{搅拌针}}/\text{N}$	最大下压力 F_{max}/N	稳定下压力 $F_{\text{稳定}}/\text{N}$
LY12	6	6 000	17 000	7 500
LF21	6	5 000	8 000	4 500

对 LY12 铝合金进行搅拌摩擦焊接时,搅拌针的下压力、轴肩的下压力以及稳定焊接过程中的下压力都大于对 LF21 铝合金板焊接所需的力。因为,LY12 属于硬铝合金,其布氏硬度为 131 N/mm²;而 LF21 属于防锈铝合金,其布氏硬度仅为 30 N/mm²,远低于 LY12 的硬度。所以,在对它们进行搅拌摩擦焊时,高硬度金属对搅拌针的反抗力高于低硬度金属。因此,焊接时,高硬度金属的下压力高于低硬度金属的下压力。

3 结 论

(1) 在其它工艺和参数不变的情况下,采用不同

的旋转速度焊接同一种材料时,搅拌针的下压力、轴肩的下压力以及稳定焊接过程中的下压力都随转速的增加而降低。

(2) 在保证其它工艺条件和参数不变的情况下,采用不同的下压速度焊接同种材料时,随着下压速度的增加,搅拌针的下压力及轴肩的下压力均增加。而在稳定焊接过程中,下压力基本保持不变。

(3) 在焊接参数为:旋转速度 800 r/min,焊接速度 60 mm/min,下压速度 15 mm/min 均保持不变的情况下,对 LY12 铝合金进行搅拌摩擦焊时,搅拌针的下压力、轴肩的下压力以及稳定焊接过程中的下压力都大于对 LF21 铝合金板焊接所需的力。

(4) 在搅拌摩擦焊过程中,当轴肩与焊接材料接触时,所受的下压力最大。

(5) 对于同一材料,分别选用不同参数进行焊接,在稳定焊接过程中,下压力基本保持不变。

(6) 影响搅拌摩擦焊过程中下压力的主要因素是:旋转速度、下压速度和下压力。

参 考 文 献

- [1] Masatoshi Enomoto Application of friction stir welding for Al alloy [J]. Light Metal Welding and Construction, 1998, 36 (2): 75~79.
- [2] 张 昭,张洪武.搅拌摩擦焊接中搅拌头的受力分析 [J]. 机械强度, 2006, 28(6): 857~862.
- [3] 李庆华,李付国,傅 莉. LY12 合金摩擦焊接过程的热力耦合有限元数值模拟 [J]. 西北工业大学学报, 2005, 23 (1): 134~137.
- [4] 张 昭,陈金涛,张洪武.搅拌摩擦焊中压紧力的变化对焊接过程的影响 [J]. 航空材料报, 2005, 25(6): 33~37.
- [5] Carl D. Sorensen, Aaron L. Stahl Experimental measurements of load distributions on friction stir weld pin tools [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2007, 38B: 451~459.
- [6] Kumar K, Satish V, Kailas On the role of axial load and the effect of interface position on the tensile strength of a friction stir welded aluminum alloy [J]. Materials and Design, 2007, 1(12): 1~7.

作者简介: 王希靖, 1956 年出生, 教授, 博士生导师。主要从事焊接设备及其自动化, 搅拌摩擦焊技术及焊接质量控制方面的研究, 发表论文 50 余篇, 获得部、省级科技进步二等奖 2 项, 三等奖 7 项。

Measurements and influencing factors of longitudinal force of pin tools in friction stir welding process

Wang Xijing, Han Daobin, Zhang Zhongke

(State Key Laboratory of Advanced Nonferrous Metal Materials Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). 22—25

Abstract For friction stir welding process, the effect of welding parameters on the longitudinal force of welding was studied with data acquisition system. The variation of the longitudinal force was obtained. Experimental results show that with different material at the same welding parameter, the longitudinal force is different. Meanwhile, with the same species material at the different welding parameters, the longitudinal force is also different. The experiments proved that longitudinal force increase with pin plug-in speed and amount and decrease with the pin rotating speed. The main factors that influence the longitudinal force are rotate speed, plug-in amounts and plug-in speed.

Key words LF21 aluminum alloy, LY12 aluminum alloy, friction stir welding, longitudinal force, data acquisition

Wettability of Ag-Cu-Ti rapidly cooled brazing filler metal on the Si₃N₄ ceramicWang Chenglong¹, Wang Lei¹, Zou Jiasheng¹, Feng Xingmei²

(1. Jiangsu University of Science and Technology, Provincial Key Lab of Advanced Welding Technology, Zhenjiang 212003, China; 2. 14th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210013, China). p26—28

Abstract Three components of the Ag-Cu-Ti rapidly cooled foil belt filler metal are prepared by single roll rapidly cooled equipment and its melting characteristics, microstructure and wetting property on the Si₃N₄ ceramic were studied. The results indicate that compared with the rapidly cooled foil belt filler metal and the conventional foil belt filler metal, the former has a lower melting temperature, even narrower melting temperature interval, but its structure is not amorphous. Based on the same brazing process, the component of (Ag₂Cu₂₈)₉₆Ti₄ has the best wettability on Si₃N₄ ceramic. With the increasing of brazing temperature and time, both the wetting areas of Ag-Cu-Ti conventional and that of rapidly cooled brazing filler metal are increased. On the same brazing parameters and components, the wetting area of the rapidly-cooled brazing alloy is larger than that of conventional filler metal on the Si₃N₄ ceramic. The reason of this consequence is that the melting trait and microstructure of rapidly cooled brazing alloy is different with that of the conventional filler metal.

Key words Si₃N₄ ceramic, active brazing alloy, wettability, Ag-Cu-Ti filler metal, rapidly cooled brazing alloy

Appearance and properties of welded seam of magnesium alloy by electron beam welding

Shen Bin, Ye Hong, Luo Yi

(School of Materials Science and Engineering, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, China). p29—32

Abstract The accurate prediction of variation of welding temperature field is much important to improve the weld quality. With groups of different parameters, numerical simulation was applied to AZ61 magnesium alloy. By comparing to the results of weld appearance, a group of optimized parameter was used to discuss the results of weld appearance and analyze the distribution of hardness. The results show that the weld bead width and penetration depth in experiment agree well with that of numerical simulation. The hardness decreases along the weld transversal section gradually, which is higher than base material.

Key words magnesium alloy, electron beam welding, numerical simulation

Pulsed MIG welding of A6N01 Al alloy used in high-speed vehicleYang Shangle¹, Meng Lichun¹, Lü Renyuan¹, Chen Qiang², Wang Hongfeng³

(1. CSR, Sifang Locomotive and Rolling Stock Co., Ltd, Qingdao 266111, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China). p33—35

Abstract A6N01 Al alloy was welded by pulsed MIG welding. The mechanical properties and microstructure were investigated. The results of experiments show that the weld appearance is fine. The tensile strength of joint under the welding conditions is 198 MPa and the percentage elongation after fracture is 7.0%. The zone of fracture is located in the weld metal. The microhardness on center of welding metal is the lowest in joint. The microstructure of weld metal is equiaxial structure as cast metal and HAZ near weld metal is tiny equiaxial structure of a thin layer. Some Mg₂Si phases have been solid solution into the base metal.

Key words high-speed vehicle, Al alloy, pulsed MIG welding, mechanical properties, microstructure