

# LY12 搅拌摩擦焊接技术

刘小文， 鄢君辉， 杜随更

(西北工业大学 西安 710072)

**摘要：**搅拌摩擦焊接是一种新兴的焊接工艺，本文作者在立式铣床上配置辅助夹具，对 LY12 铝合金做了大量的搅拌摩擦焊接(Friction Stir Welding)工艺试验，在焊接过程中捕捉到一些与接头形成相关的理化信息，进而探讨了 FSW 接头的形成机理，初步优化了 LY12 铝合金 FSW 工艺参数，分析研究了搅拌头形状、旋转速度、焊接速度对 FSW 接头质量的影响。试验结果表明，焊接厚度为 4 mm 的 LY12 铝合金，夹持器与特形指棒直径之比 3:1 为好，特形指棒直径与焊件厚度之比 1:1 为好。焊接速度选择 37.5 mm/min，搅拌头旋转速度选择 2000 r/min 时，接头质量良好。本文试验结果为进一步研究开发搅拌摩擦焊接技术奠定了理论与试验基础。

**关键词：**搅拌摩擦焊接；铝合金；工艺研究

中图分类号：TG453 文献标识码：A 文章编号：0253—360X(2001)04—55—03

刘小文



## 0 序言

传统摩擦焊接是在轴向压力与扭矩作用下，利用工件接触面之间的相对摩擦运动所产生的热量，使得接触面及附近金属达到粘塑性状态并通过原子扩散、动态再结晶等实现“体”的结合。因其具有优质、高效、节能、无污染等特点，在航空航天、造船、石油、汽车等领域得到了广泛的应用。然而传统摩擦焊接过程中必须有一个工件是回转体，主要用于圆形截面盘轴类零件的焊接，因而其应用受到一定的限制。近年来，随着金属材料、结构的发展，一些特殊摩擦焊接技术如径向摩擦焊接、线性摩擦焊接的研究工作已引起人们的重视。新兴的搅拌摩擦焊接(Friction Stir Welding)则是 21 世纪国内外研究的热点<sup>[1]</sup>。

FSW 工作原理如图 1 所示，搅拌头由夹持器与特形指棒两部分构成。焊接时，搅拌头高速旋转并首先使特形指棒迅速钻进被焊对接板的接缝，夹持器的圆柱体端面与工件表面紧密接触，进而夹持器带着施焊特形指棒沿着焊接方向移动，由于旋转的特形指棒与工件的摩擦作用而产生大量的热作用，加上夹持器轴间与被焊板件表面辅助的摩擦热，使得在搅拌头特形指棒周围产生热塑性金属层，由于搅拌力的作用被转移到特形指棒的后侧，并经过扩散、再结晶形成焊缝。FSW 可实现板材的对接、搭

接、丁字接头等。为高性能重量比，但熔焊性差的材料如高强铝合金、铝锂合金、钛合金等的焊接开拓了新的领域<sup>[2]</sup>。

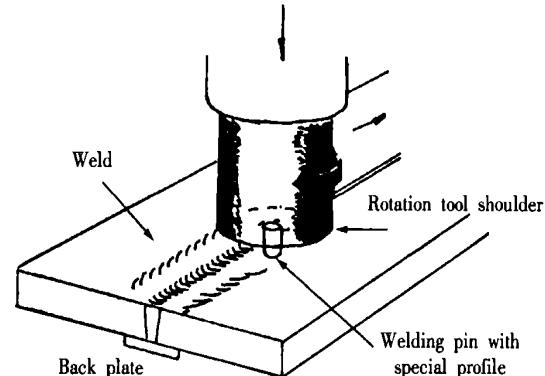


图 1 搅拌摩擦焊接过程示意图

Fig. 1 The sketch map of friction stir welding

## 1 试验条件与方法

本试验所用材料为厚度 4 mm 的 LY12 硬铝。该材料是热处理强化铝合金中应用最广泛的一种，常用于受力较大的构件如飞机蒙皮、翼梁、壁板、长桁和隔框等。其化学成分如表 1 所示，力学性能如表 2 所示。

表 1 LY12 材料的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of LY12

Material	Cu	Mg	Mn	Si	Zn	Cr	Ti
LY12	4.2	1.5	0.6	0.5	0.3	0.1	0.1

表 2 LY12 材料的力学性能

Table 2 Mechanical properties of LY12 alloy

Heat treatment state	$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\delta\%$
Quench + natural aging	451	402	6

本试验所用设备是将 X52K 立式升降台铣床进行改造, 增加一些辅助夹具。其工作台宽度 320 mm, 长度为 1 250 mm, 转速为 30~2 000 r/min, 走刀速度 23.5~1 180 mm/min。

试验时, 将被焊材料用压板紧压于工作台上, 以防止工件在焊接过程中变形或位移并保持工件与搅拌头的纵轴成垂直状态。

## 2 试验结果分析讨论

### 2.1 搅拌头的形状尺寸设计

初步优选的搅拌头的形状尺寸如图 2 所示。大量试验结果表明, 搅拌头的形状尺寸对 FSW 焊缝成形的影响甚大, 搅拌头特形指棒的长度应略小于焊件厚度, 夹持器与特形指棒直径之比 3:1 为好, 特性指棒与焊件厚度之比 1:1 为佳<sup>[4]</sup>。特形指棒表面开与旋转方向相反的螺纹槽有利于焊缝金属的搅拌和转移。

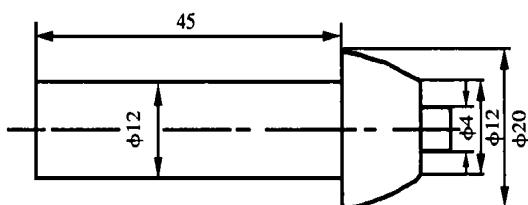


图 2 优选的搅拌头形状尺寸

Fig. 2 Shape and scale of preferred stirrer

### 2.2 焊接速度对 FSW 焊缝质量的影响

在转速一定的情况下, 本试验采用了四种不同的焊接速度进行试验, 焊缝外观如图 3 所示, 图中从左至右焊接速度分别为 23.5 mm/min、37.5 mm/min、47.5 mm/min、60.0 mm/min, 图中可明显看出

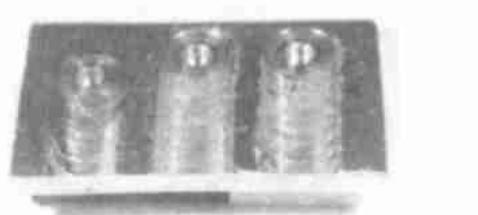


图 3 焊接速度对外观成形的影响

Fig. 3 Influence of welding speed on appearance figure

焊接速度为 37.5 mm/min 的焊缝外观成形良好。从 FSW 过程中材料的热塑性行为来看, 当焊接速度过大时, 搅拌摩擦焊接所产生的热量来不及使其周围金属达到热塑性状态, 故不能形成完好的焊缝, 而当焊接速度过慢时, 搅拌头摩擦生热过量。当焊合区金属温度接近金属熔点时, 使焊缝表面凹凸不平, 内部金属因过烧出现疏松, 如图 4 所示。热影响区过热, 存在液化裂纹痕迹, 如图 5 所示。故只有在一定焊接速度下才能获得良好的焊接接头。

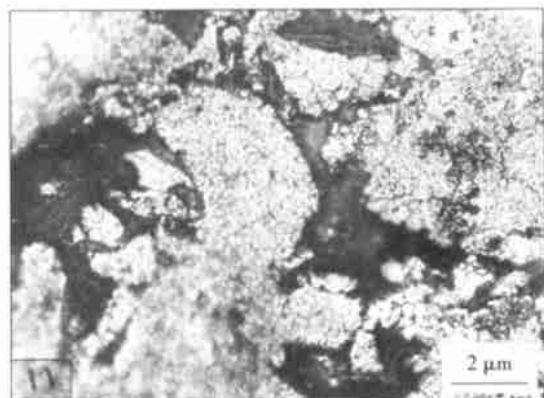


图 4 焊接速度过慢而引起的疏松

Fig. 4 Looseness because of too low welding speed

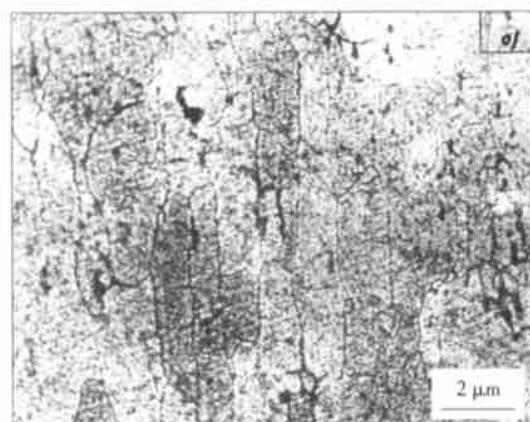


图 5 热影响区的过热组织

Fig. 5 Overheated structure of HAZ

### 2.3 搅拌头旋转速度对 FSW 焊缝孔洞的影响

用同样形状尺寸的搅拌头, 选定同样的焊接速度, 在不同的搅拌头转速下进行试验, 发现当转速较低时, 不能形成良好的 FSW 焊缝, 搅拌头的后边是一条沟槽。随着搅拌头转速的提高, 沟槽的宽度减小, 当搅拌头转速提高到一定值时, 沟槽消失, 焊缝外观成形良好。但解剖焊缝发现, 焊缝的外观成形虽然良好, 但焊缝中有孔洞, 如图 6 所示。不同转速的焊接试验表明, 随着转速的再提高, 孔洞逐渐减小。这是由于在 FSW 过程中, 搅拌头特形指棒在焊件内部的摩擦作用及夹持器下端面与焊件表面的

辅助摩擦作用,使焊件表面的特种指棒周围首先形成热塑性层,当转速较低时,摩擦功率小,热塑性层厚度有限,焊缝深处未能实现金属的扩散、再结晶,达到固相连接。随着转速的提高,摩擦功率加大,热塑性层由上至下厚度增加,使焊缝中空洞逐渐减小。当转速升高到一定值时,孔洞消失,形成致密焊缝<sup>[6]</sup>,焊合区金相组织如图7所示。

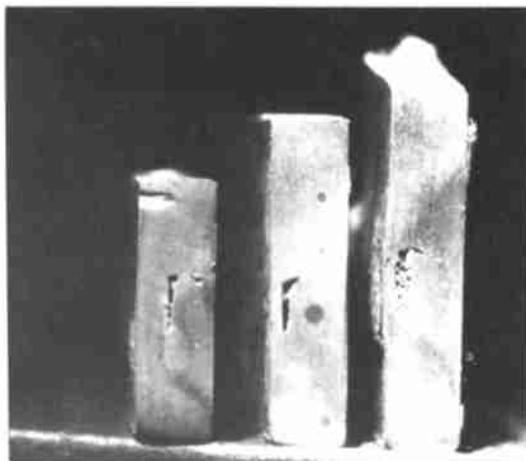


图6 焊合区内孔洞

Fig. 6 Hole in bond

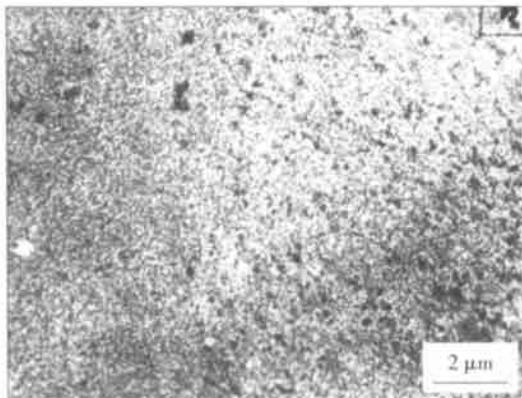


图7 FSW接头金相组织

Fig. 7 Metallographic structure of FWS joint

## 2.4 压台压紧力对 FSW 焊缝成形的影响

工艺试验表明,搅拌头夹持器轴间与被焊工件

表面的接触状态对焊缝成形也有较大影响。压紧程度偏小,热塑性金属“上浮”,溢出焊接平面,焊缝心部则由于金属亏损而形成孔洞。若压紧程度偏大,则轴间与焊件表面摩擦力增大,摩擦热使轴间平台发生“粘头”现象,焊缝表面出现飞边毛刺,不能形成外观成形良好的焊接接头。

## 3 结 论

(1) 搅拌头的形状、尺寸以及搅拌头旋转速度、焊接速度、压紧力是获得优质 FSW 接头的关键技术环节。

(2) 对厚度为 4 mm 的 LY12 板,设计合理的搅拌头形状尺寸,FSW 优化工艺参数为转速 2 000 r/min,焊接速度为 37.5 mm/min。

## 参考文献:

- [1] Karl-Erik Knipstam, Bertil Pekkari. Friction stir welding process goes commercial[J]. Welding Journal, 1997, 76(9): 55~56.
- [2] Rhodes G G, Mahoney M W, Bingel W H. Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum [J]. Scripta Materialia, 1997, 36(1): 69~75.
- [3] Shinoda T, Kondo Y. Friction stir welding of aluminium plate [J]. Welding International, 1997, 11(3): 179~184.
- [4] Colligan K. Material flow behavior during friction stir welding of aluminum [J]. Welding Journal, 1999, 229s~237s.
- [5] 柯黎明,邢丽,孙德超,等.搅拌摩擦焊工艺及其应用[J].南昌航空工业学院学报,1999,13(3):14~16.
- [6] 张田仓,郭德伦,陈沁刚,等.搅拌摩擦焊接技术研究[A].第九次全国焊接会议论文集[C].天津:中国焊接学会 1999.

**作者简介:** 刘小文,女,1955年出生,副教授。1982年毕业于上海交通大学材料科学与工程系焊接专业,1986年毕业于吉林工业大学热加工研究生班,现任西北工业大学摩擦焊接研究所即陕西省摩擦焊接工程技术中心副主任,陕西省焊接协会理事。多年来一直从事焊接冶金、工艺及质量控制方面的教学与科研工作。1998年获陕西省科技进步奖1项,发表论文27篇。

(编辑:闫秀荣)

## 《焊接学报》加入“万方数据——数字化期刊群”的声明

为了实现科技期刊编辑、出版发行工作的电子化,推进科技信息交流的网络化进程,本刊现已入网“万方数据——数字化期刊群”,所以,向本刊投稿并录用的稿件文章,将一律由编辑部统一纳入“万方数据——数字化期刊群”,进入因特网提供信息服务。凡有不同意者,请另投它刊。本刊所付稿酬包含刊物内容上网服务报酬,不再另付。

“万方数据——数字化期刊群”是国家“九五”重点科技攻关项目。本刊全文内容按照统一格式制作,读者可上网查询浏览本刊内容,并征订本刊。

《焊接学报》编辑部

2001年4月25日