

# 铜板搅拌摩擦焊接头金相组织及力学性能

刘小文, 鄢君辉, 薛朝改, 段立宇

(西北工业大学 摩擦焊接工程技术中心, 西安 710072)



刘小文

摘 要: 通过大量试验分析, 在优化了铜板搅拌摩擦焊接工艺的基础上, 分析了铜板搅拌摩擦焊接头的组织、性能及其与工艺参数的关系。研究表明: 工业纯铜具有良好的搅拌摩擦焊接性能, 优化工艺可获得超强于母材的搅拌摩擦焊接接头。焊合区金属在热力耦合作用下发生塑性变形, 造成大量晶粒破碎, 破碎的晶粒发生动态再结晶, 热力影响区组织可以分成再结晶区、不完全再结晶区和动态回复区。

关键词: 铜板; 搅拌摩擦焊; 组织性能

中图分类号: TG407 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2003)06-47-04

## 0 序 言

搅拌摩擦焊(FSW)是近几年发展起来的新型摩擦焊接技术, 它不仅具有传统摩擦焊接的优点, 而且突破了传统摩擦焊接只能焊接轴类零件的限制, 可以焊接板类零件, 实现多种接头形式, 不同位置的焊接。自从 21 世纪问世以来, 受到焊接界的高度重视。搅拌摩擦焊焊接时温度相对较低, 因此焊接后结构的残余应力和变形比熔化焊小得多, 适用于熔化温度较低、塑性较好的有色金属如 Al、Cu 的焊接<sup>[1]</sup>。在海洋开发、石油化工、电子仪表、空间技术及军事工程等方面, 经常遇到铝铜等有色合金的焊接结构, 这是因为铝与铜及其合金具有特殊的性能, 并可有效降低结构成本, 减轻结构重量。目前铝合金搅拌摩擦焊接已成为国内外研究的热点, 但至今还未见有铜及其合金搅拌摩擦焊接的报道。因此研究铜及其合金的搅拌摩擦焊接技术具有重要的理论意义和工程应用价值。

## 1 试 验

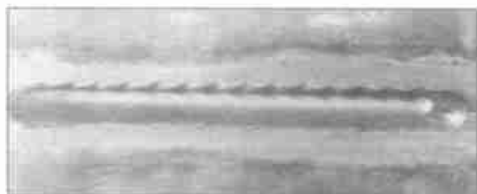
试验材料选用厚度为 4 mm 厚的 T2 纯铜, 试验设备是在自行改制的搅拌摩擦焊机上进行; 在光学显微镜下对焊合区、热力影响区的晶粒大小、形态、晶粒走向及母材组织进行观察。用 Olympus 显微相机在 300 倍及 100 倍放大倍数下对已腐蚀的试样进行照相。分别得到焊合区、热力影响区及母材区、焊缝母材过渡区的金相组织照片。用 HX-1000 型维氏硬度计分别测定焊合区、热力影响区、母材区的维氏硬度, 得到搅拌摩擦焊接头的维氏硬度分布规

律。拉伸试验是在 WE-300 液压万能实验机上进行的。拉伸试样的形状尺寸参照了国标 GB639-86 而得出的。弯曲性能试验在 INSTRON 公司伺服液压动态试验系统上进行。

## 2 试验结果分析讨论

### 2.1 接头宏观形貌

铜—铜搅拌摩擦焊的宏观形貌如图 1a 所示,



(a) Aspect of frontispiece



(b) Aspect of joint after burred



(c) Aspect of back

图 1 铜板搅拌摩擦焊接头宏观形貌

Fig. 1 Macro aspect of copperplate FSW joint

搅拌焊合区表面光滑平整, 由于搅拌头的旋转方向使其与板材间相对速度的差异导致左右飞边不等,

搅拌头的旋转方向为顺时针时,沿横向速度方向左边飞边大,金属表面有与搅拌头轴肩两倍宽度的变色区域。去除飞边后焊缝形貌如图 1b 所示,背面焊合平整,形貌如图 1c 所示。

2.2 金相分析

金相试样取自工艺参数为旋转速度 1180 rpm、横向速度 75 mm/min、压力 2350N 的试件。腐蚀剂为 6gFeCl<sub>3</sub>, 10mlHCl, 90mlH<sub>2</sub>O。焊接接头经腐蚀后可以看出区域中间为焊接时搅拌头所处的位置——焊合区,由于焊合区金属发生强烈的塑性变形和流动,相互搅拌和混和,发生动态回复和再结晶等物理冶金和力学冶金过程,可明显看到焊合区晶粒比母材晶粒细小<sup>[2]</sup>。焊合区的两侧为热力影响区,热力影响区是搅拌摩擦焊接过程中在热与力的共同作用下,母材组织与性能发生变化的区域。该区域温度

场与应变场分布极不均匀,愈靠近焊合区温度愈高,塑性变形程度愈大。在焊接过程中所受的热循环及应力应变决定了该区在焊后的组织与性能。热力影响区晶粒比母材晶粒小但比焊合区晶粒稍大。因焊接时,搅拌头向一个方向旋转,导致热力影响区并不对称于搅拌头,甚至有很大的差别。金相试样的照片见图 2,图 2a 为母材组织照片,母材晶粒较大,由于母材铜的层错能较低,所以母材中有孪晶组织;母材中所含杂质成小黑点分布于铜母材基体上,晶粒沿轧制方向。焊合区组织见图 2b,其组织与母材有很大不同,晶粒细小,杂质相仍然弥散分布于其中,已经看不出孪晶组织。说明在焊接过程中,由于搅拌头的搅拌作用,金属材料在热与力的作用下发生塑性变形,造成大量晶粒破碎,破碎的晶粒发生动态再结晶,这是搅拌摩擦焊的基本特征。

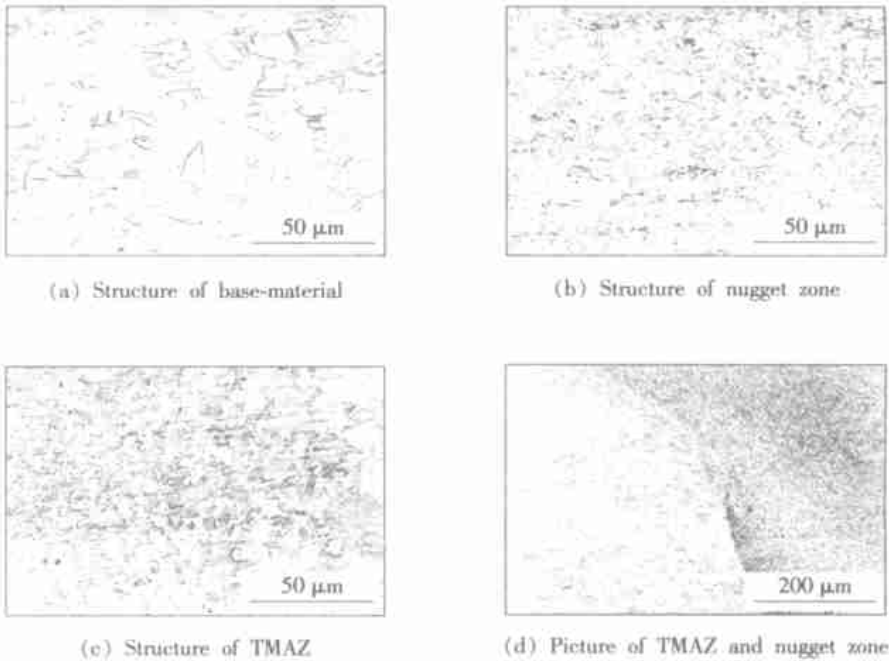


图 2 铜搅拌摩擦焊接头金相组织

Fig. 2 Microstructure of copperplate FSW

图 2c 为焊接热力影响区组织照片,它也可以分成再结晶区、不完全再结晶区、动态回复区。其中在再结晶区,晶粒已发生再结晶,晶粒尺寸与焊合区相当。在部分再结晶区,晶粒发生部分再结晶,晶粒尺寸比焊合区的偏大,但比母材晶粒要小。在动态回复区,仅发生动态回复,与母材晶粒相差不大。图 2d 为热力影响区与焊合区的过渡区域,图中下部有明显的分界线,上部可以看到均匀过渡区。这是由于焊接过程中搅拌头轴肩与金属表面摩擦生热,使焊缝上部金属有足够的温度在搅拌头的作用下发生再结晶。因此上部晶粒过渡比较均匀,而在焊缝的底部,由于搅拌头比母材厚度稍短,搅拌头的产热不足,所

以焊合区底部较窄。此照片中的明显过渡部分在高倍显微镜下观察,可以看出黑线不是焊缝中的缺陷,而是较细小的晶粒和杂质相,此处不耐腐蚀,因此有明显的黑线。而在优化的焊接参数下,这种晶粒突变的区域不再出现。该图为焊合区的左部,在焊合区的右边其过渡比较均匀,明显可以看出过渡的热力影响区。焊合区两侧晶粒粗细过渡不对称现象的出现是由于搅拌头沿一定的方向旋转,导致搅拌区两侧温度场、应力应变场分布不同所为。

2.3 维氏硬度分析

在试件上,取穿过焊缝热力影响区、焊合区和母材的直线进行维氏硬度测试。所打直线的位置对应

于图 3, 载荷为 100 g, 载荷停留时间为 15 s。得出的硬度曲线如图 4。从图中可以看出铜—铜搅拌摩擦焊接后接头维氏硬度波动不大, 焊合区、热力影响区的维氏硬度差别不大, 但焊合区、热力影响区的维氏硬度与母材维氏硬度有很大的差异, 焊后维氏硬度变高。其原因是铜板经过焊接后, 焊合区出现了细晶组织, 而母材由于受搅拌摩擦焊接热输入的影响, 消除了加工硬化, 母材软化, 致使焊合区硬度值比母

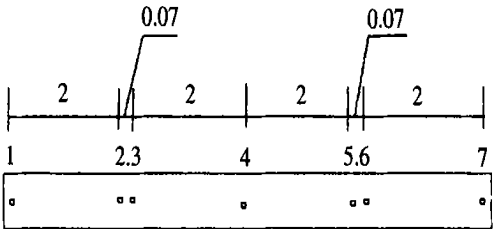


图 3 铜维氏硬度位置图  
Fig. 3 Location of test point

材硬度高。而在热力影响区由于焊接热循环的作用, 发生不完全动态再结晶, 晶粒比母材细小, 但比焊合区晶粒要大, 所以导致热力影响区维氏硬度值

比焊合区下降。  
2.4 拉伸试验结果分析  
对不同参数下搅拌摩擦焊接试样进行拉伸试验得到结果如表 1 所示。

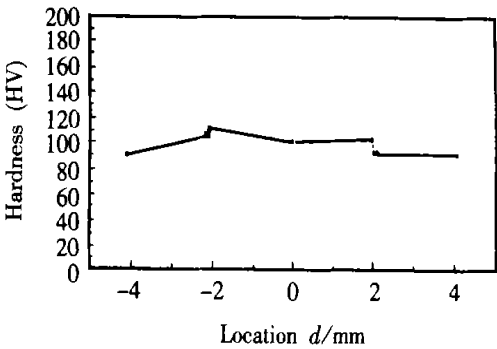


图 4 维氏硬度曲线  
Fig. 4 Hardness profile

该拉伸试验的重复系数为 2, 接头强度值、延伸率取两次试验的平均值。从拉伸试验结果中可以看出第七、九组工艺参数所得接头强度高于母材, 前三组参数接头强度达不到母材强度的 80%, 其余参数

表 1 拉伸试验结果  
Table 1 Result of the tensile test

No.	Rotation speed $n/(r \cdot \min^{-1})$	Translation speed $v/(mm \cdot \min^{-1})$	Pressure $p/N$	Strength $\sigma/MPa$	Tensile ratio $\delta(\%)$	Break location
1	1500	75	300	210.6	5.01	TMAZ
2	1500	60	200	260.1	8.03	TMAZ
3	1500	47.5	100	264.85	7.53	TMAZ
4	1180	75	200	406.75	10.31	TMAZ
5	1180	60	100	402.42	14.3	TMAZ
6	1180	47.5	300	412.7	18.39	TMAZ
7	950	75	100	426.38	24.73	Base-material
8	950	60	300	389.18	7.38	TMAZ
9	950	47.5	200	430.06	30.55	Base-material

可达到接头强度的 80% 以上。说明工业纯铜的搅拌摩擦焊接工艺性较好。从断口可以看出断于母材的接头为延性断裂, 母材处发生屈服后断裂, 断口为乳红色。说明搅拌摩擦焊接头的细晶组织较母材晶粒组织的强度高。断于焊缝的接头较齐, 并且断口形貌明显分为两层, 上层与搅拌头轴肩接触的金属材料类似于断于母材的塑性断裂的断口, 下层属于脆性断裂。其原因是搅拌头尺寸略小于板材厚度, 在焊缝底层金属未参与搅拌, 而是靠搅拌头尖端搅拌的热量传至最下层金属, 焊合面金属在热的作用下发生扩散、结合而并未发生动态再结晶。因此最底层金属比较薄弱, 易发生脆断, 搅拌焊接头的这种

分层导致了强度的降低<sup>[3]</sup>。断口上层位于焊缝热力影响区是由于热力影响区是不同尺寸、不同形态晶粒的混合区, 是接头比较薄弱的区域, 所以拉伸试验时接头起裂于焊缝底层, 终断于热力影响区。

从搅拌摩擦焊接头的延伸率可以看出: 搅拌摩擦焊接头的延伸率比母材延伸率低、抗拉强度高的接头的延伸率也较大。

2.5 接头的弯曲性能

铜—铜搅拌摩擦焊接头的弯曲性能较好, 在跨距为 20 mm 的弯曲破坏试样上施加 514.214 MPa 的力仍未断裂, 说明搅拌摩擦焊接可获得很好的接头弯曲性能。由于铜本身具有很好的塑性, 经过搅

拌摩擦焊焊接后,晶粒细化,接头焊合部分维氏硬度提高,接头的抗拉强度高于母材,而且接头延伸率高,因此不能用弯曲试验破坏试样。

3 结 论

- (1)工业纯铜具有良好的搅拌摩擦焊接性能。
- (2)焊合区金属在热力耦合作用下发生塑性变形,造成大量晶粒破碎,破碎的晶粒发生动态再结晶。
- (3)热力影响区组织可以分成再结晶区、不完全再结晶区和动态回复区。再结晶区晶粒尺寸与焊合区相当,部分再结晶区,晶粒发生部分再结晶,晶粒尺寸不均匀,动态回复区,仅发生动态回复,与母材晶粒相差不大。
- (4)搅拌头轴肩和工件表面的摩擦作用以及搅拌头的旋转前进方向,使接头组织上下、左右不对称。

(5)优化工艺可获得超强于母材的搅拌摩擦焊接接头。

参考文献:

[ 1 ] Liu G, Murr L E. Micro structural aspects of the friction stir welding of 6061—T6Al[ J] . Scripta Materialia, 1997, 37(3): 335~361.

[ 2 ] 毛为民,赵新兵.金属的再结晶与晶粒长大[ M] .北京:冶金工业出版社,1994.

[ 3 ] Ma Z Y, Mishra RS, Mahoney M W. *et al.* Distribution of hardness & microstructure in friction stir weld of Al alloy 6063 [ A] . 3rd International Symposium on Friction Stir Welding [ C] Japan Tohoku University & Showa Denko KK, 2001.

作者简介: 刘小文,女,1955 年出生,副教授。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一等奖 1 项 发表论文 35 篇。

Email: liuxiaowen616@sina.com

[ 上接第 25 页]

3 结 论

- (1) Al-Li-Cu 合金采用 TIG 焊时,接头软化非常严重,强度系数只有 0.55,试件在拉伸试验过程中断裂于靠近熔合线的热影响区内。
- (2)经固溶时效处理后的所有试件都断裂在母材上,这表明在接头强度提高的同时,母材发生了不同程度的弱化,其中以 520℃固溶 1 h+220℃时效 10 h 热处理状态下母材弱化较为严重。随着时效温度的提高和时效时间的延长,母材弱化程度增大。
- (3)热处理后,接头的整体性能较焊态下有了一定程度的改善;焊态试件经 520℃固溶 1 h+150℃时效 10 h 热处理后抗拉强度达到 393.1 MPa,接头强度系数高于 0.64。

参考文献:

[ 1 ] Triolo A, Lin J S, Triolo R. Early and late stages of demixing of a commercial Al-Li alloy[ J] . Journal of Materials Science, 2002, 37(6): 1207~1213.

[ 2 ] Gaber A, Afify N. Characterization of the precipitates in Al—Li (8090) alloy using thermal measurements and TEM examination[ J] . Physica. B, 2002, 315(4): 1~6.

[ 3 ] Zhen L, Cui Y X, Shao W Z, *et al.* Deformation and fracture behavior of a RSP Al-Li alloy[ J] . Materials Science and Engineering: A, 2002, 336(10): 135~142.

[ 4 ] Wang Chunsheng, Yin Shiqiang, Chen Yu, *et al.* Strength and microstructure of 2091 Al—Li alloy TIG welded joint[ J] . China Welding, 2000, (1): 48~52.

[ 5 ] Reddy G M, Gokhale A A, Rao K P. Effect of the ratio of peak and background current durations on the fusion zone microstructure of pulsed current gas tungsten arc welded Al-Li alloy [ J] . Journal of Materials Science Letters, 2002, 21(20): 1623~1625.

[ 6 ] Reddy G M, Gokhale A A, Rao K P. Effect of filler metal composition on the microstructure of Al-Li alloy (1441) welds[ J] . International Journal for the Joining of Materials, 1998, 10(3—4): 98~107.

[ 7 ] 于尔靖,郝传勇,应慧筠,等.铝锂合金焊缝凝固组织特性[ J] . 焊接学报, 1996, 17(1): 1~6.

[ 8 ] Reddy G Madhusudhan, Gokhale Amol A, Rao K Prasad. Weld microstructure refinement in a 1441 grade aluminium-lithium alloy[ J] . Journal of Materials Science, 1997, 32(15): 4117~4126.

[ 9 ] Ramulu M, Rubbert M P. Gas tungsten arc welding of Al-Li-Cu alloy 2090[ J] . Welding Journal, 1990, 69(3): 109s~114s.

[ 10 ] 王小玉,刘爱国,张修智. 2091 铝锂合金焊接接头的热处理强化[ J] . 焊接学报, 1995, 16(4): 222~225.

作者简介: 王大勇,男,1973 年 2 月出生,现为哈尔滨工业大学博士研究生。主要从事陶瓷与陶瓷、陶瓷与金属连接以及 Al—Li 合金连接方面的研究,现已发表论文 10 余篇,获国家发明专利一项。E-mail: wdy1973@pal8.com