

文章编号:1673-9981(2010)04-0568-04

## 搅拌摩擦焊接 5083 铝合金焊缝缺陷分析\*

李仲华, 袁鸽成, 朱振华, 路浩东, 曾国勋

(广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510090)

**摘要:**在搅拌转速为 250~1400 r/min 范围内,采用搅拌摩擦焊焊接了 5083 铝合金壁板,当转速低于 700 r/min 和高于 1000 r/min 时,焊缝均产生不同类型的缺陷.通过肉眼、光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)及拉伸试验机研究了带缺陷焊缝的摩擦面和横截面形貌、力学性能及断口形貌,从热量输入和材料流动两方面分析了缺陷的成因.结果表明,转速低于 700 r/min 时,焊缝易产生吻接缺陷,其拉伸断口呈现沿“吻接线”的分层断裂形貌;高于 1000 r/min 时,焊缝易形成飞边及隧道缺陷,其拉伸断口呈现包含孔洞缺陷的断裂形貌;带缺陷焊缝的力学性能明显降低.热量不足或过高是形成焊缝缺陷的本质原因.

**关键词:**5083 铝合金; 搅拌摩擦焊; 焊缝; 缺陷

**中图分类号:** TG 441.7 **文献标识码:** A

搅拌摩擦焊(FSW)是 1991 年由英国焊接研究所(TWI)发明的一种先进的固相焊接技术.其焊接过程是利用一个柱形带特殊轴肩和针凸的搅拌头旋转着插入被焊工件,搅拌头和被焊材料之间的摩擦产生了摩擦热,使材料热塑化,当搅拌工具沿着待焊界面向前移动时,热塑化的材料由搅拌头的前部向后部转移,并且在搅拌工具的机械锻造作用下,实现工件间的固相连接.

搅拌头尺寸及形状和焊接参数(焊速、转速、倾角及下压量)是 FSW 工艺的主要控制因素.搅拌头设计不合理或焊接参数不恰当都会导致焊缝缺陷的产生.其中,转速和焊速是 FSW 过程中最重要的两个参数,有文献研究转速与焊速两者的比值  $n/v$  对 FSW 焊缝性能的影响.缺陷的存在严重影响焊缝的力学性能,因此研究缺陷的成因并获得有效的控制措施是一项很有意义的工作.

### 1 实验方法

被焊材料为 5083-H321 铝合金壁板,尺寸为

250 mm×80 mm×4 mm(长×宽×厚).焊接设备为小型搅拌摩擦焊机,搅拌头轴肩直径 22 mm,设计为光滑凹槽形状,搅拌针设计为带有螺纹的圆台形状,长 3.4 mm,近轴肩处直径 7 mm,另一端直径 6 mm.焊接速度为 80 mm/min,转速分别为 250, 350, 500, 700, 1000, 1400 r/min,焊接倾角 3°,下压量 0.5 mm.

拉伸试样沿垂直焊缝的横向切割,按 GB/T228-2002 制备.焊缝摩擦面及横截面经打磨及抛光后,摩擦面用 NaOH 溶液侵蚀,酸洗;焊缝横截面采用 Poulton 试剂侵蚀.采用数码相机及扫描电子显微镜研究焊缝摩擦面、横截面及拉伸断口.

### 2 结果与讨论

#### 2.1 飞边缺陷

图 1 为不同转速下的焊缝宏观形貌.从图 1(a)可见,当转速为 250 r/min 时,焊缝摩擦面外观平整,弧形叠纹较规则,无飞边缺陷;当转速为 700 r/

收稿日期:收稿日期:2010-10-27

\* 基金项目:广东省重大科技专项(2008A090300004);广东省教育厅 211 学科建设资助项目

作者简介:李仲华(1982-),男,河北邯郸人,硕士研究生.

min 时,焊缝摩擦面的前进侧出现轻微的飞边,如图 1(b)所示;当转速为 1400 r/min 时,焊缝表面出现

过热,表现为摩擦面凹凸不平,弧形叠纹不规则,且在前进侧出现严重飞边缺陷,如图 1(c)所示。

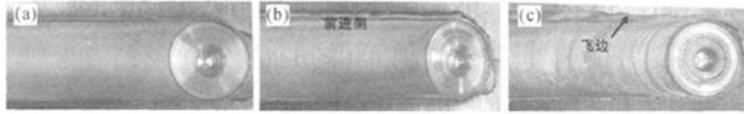


图 1 不同转速下的焊缝形貌  
(a)250 r/min;(b)700 r/min;(c)1400 r/min

### 2.2 吻接缺陷

图 2 为转速 250 r/min 时焊缝摩擦面及横截面形貌。从图 2(a)可见,在焊缝中心沿焊接方向有一条白色条纹;从图 2(b)可见,焊缝中心为焊核,经测量宽度为 6.22 mm,在焊核上部有一条起始于焊缝摩擦面,终止于焊核前进侧边缘的“Z”型白色条纹。

焊缝拉伸结果表明抗拉强度仅为 281 MPa,比优质焊缝降低了 31 MPa。延伸率只有 9.5%,远低于母材的 14%。图 4 为该转速下焊缝的断口形貌。从图 4(a)断口侧视图可看出断口分上下两层,均成 45°断裂,且上层侧视轮廓与前述“Z”型线形状一致。测量发现上层厚度与“Z”型线位置吻合较好。综合上述分析结果,确认白线为焊缝中的一条吻接缺陷。图 4(b)为焊缝断口正面形貌,可看出上下两层的断口形貌存在明显差异。上层具有典型的韧窝特征,局部之间韧窝大小、疏密相差很大,如图 4(c)所示;下层区域韧窝特征已消失,表现为一种脆性断裂形貌,如图 4(d)所示。



图 2 转速 250 r/min 时的焊缝形貌  
(a)摩擦面;(b)横截面

图 3 分别为摩擦面及横截面上白线的放大形貌。从图 3(a)可见,摩擦面白色条纹为一条浅沟,沟两边材料呈现分层形貌,沟部分区域断续连接;从图 3(b)可更清楚地看到“洋葱环”上面的“Z”型白色条纹,局部可看到裂纹形貌。经测量发现,“Z”型条纹的起始位置与摩擦面上的白色条纹位置相吻合。

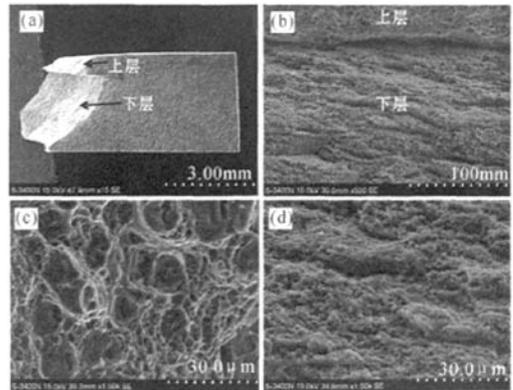


图 4 转速为 250 rpm 时拉伸断口形貌  
(a)侧视;(b)分层处;(c)上层;(d)下层

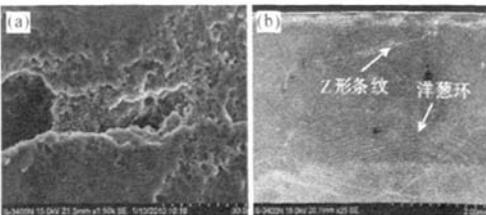


图 3 白色条纹放大形貌  
(a)摩擦面;(b)横截面

### 2.3 隧道缺陷

图 5 为转速 1400 r/min 时焊缝的横截面形貌。从图可知,转速的增加使焊核尺寸由 250 r/min 时的 6.22 mm 增加到 7.20 mm,在焊核区前进侧观察到孔洞存在。

图6为焊核区孔洞的放大形貌,图6(a)可看到材料的塑性流动轨迹,材料都流向焊核区前进侧的孔洞区域,推测孔洞是材料未能充分填充搅拌针经过的区域.检查焊缝其它部位发现,孔洞贯穿整条焊缝,是一条隧道缺陷.



图5 转速为1400 r/min时焊缝横截面形貌

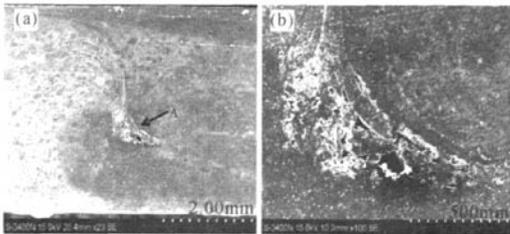


图6 隧道缺陷在横截面上的形貌:(b)为(a)中A处的放大图

焊缝断裂于有隧道缺陷处,抗拉强度为291 MPa,比优质焊缝减小21 MPa.断口形貌如图7所示.由图7(a)可见,断口存在较大孔洞区域.从图7(b)可见断口形貌为韧性断裂,表面分布大量韧窝,且有大的孔洞.从力学性能和断口形貌可见,与低转速相比,转速的提高使焊缝性能得到了改善.

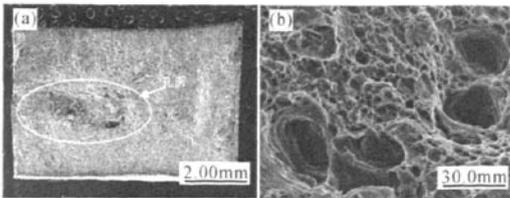


图7 转速1400 r/min时拉伸断口形貌  
(a)宏观;(b)微观

其它条件不变时,搅拌摩擦焊热量输入主要由转速与焊速的比值 $n/v$ 决定,可由公式表述为

$$q_E = \frac{Q}{v} = k \frac{\mu n F}{v} = A \frac{n}{v} \quad (1)$$

式(1)中 $q_E$ 为热功率, $Q$ 为热输入, $k$ 为形状因子, $\mu$ 为摩擦系数, $F$ 为焊接压力, $A$ 为常量系数, $n$ 为搅拌头转速, $v$ 为焊接速度<sup>[3]</sup>.

由式(1)可知,在其它焊接参数不变时,低转速导致热输入不足,进而影响材料的塑性流动及材料之间的有效结合;并且焊缝的上部主要受轴肩的剪切作用,而轴肩对待焊材料塑性流动及搅拌作用比带有螺纹的搅拌针要小,导致焊缝上部待焊材料流动不充分,材料未真正焊合,最终形成吻接缺陷.因此热量不足及流动性差,是焊缝形成未焊合吻接线的根本原因.

高转速能够产生足够的热量,使待焊材料流动性趋好.在焊接过程中,待焊材料从后退侧流向前进侧,因此在焊接过程中,搅拌头在高转速形成的摩擦力和离心力作用下使待焊材料流出焊缝区域,在焊缝前进侧边缘形成飞边缺陷.

文献[4]指出只有当下压力达到某一临界值,才会得到合格的焊缝,下压力不足会导致隧道缺陷的产生.文献[5]的模拟结果表明在前进侧会出现材料流动停滞区,材料流动性差会造成隧道缺陷.本研究的结果表明在较高转速时,待焊材料流动性偏好形成了飞边缺陷,导致在焊接过程中流向焊核区的材料减少,不足以填充搅拌针行走后形成的空洞,最终在焊核区的前进侧形成贯穿焊缝的隧道缺陷.

### 3 结论

(1)转速小于700 r/min时,热输入不足,焊缝易产生未焊合的吻接缺陷,其拉伸断口呈现沿“吻接线”的分层断裂形貌,上下两层断口形貌明显不同,上层为典型韧窝形貌,下层为未焊合形貌.

(2)转速高于1000 r/min时,热输入过多,焊缝易形成飞边及隧道缺陷,其拉伸断口呈现包含孔洞缺陷的断裂形貌;缺陷严重降低焊缝的力学性能.

#### 参考文献:

- [1] 栾国红,柴鹏.搅拌摩擦焊技术应用现状和发展趋势[J].金属加工,2004,24:19-22.
- [2] NANDAN R, DDBROY T, BHADSHIA H K D H. Recent advances in friction-stir welding—process, weldment structure and properties[J]. Progress in Materials Science,2008(53):980-1023.
- [3] 周万盛,姚君山.铝及铝合金的焊接[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [4] KUMAR K, KAILAS S V. The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation [J]. Materials Science and Engineering,2008(485):367-374.

[5] SEIDEL T U, REYNOLDS A P. Two-dimensional friction stir welding process model based on fluid mechanics

[J]. *Sci Technol Weld Join*, 2003(8):175-83.

## The analysis of welding defects for 5083 aluminum alloy friction stir welds

LI Zhong-hua, YUAN Ge-cheng, ZHU Zhen-hua, LU Hao-dong, ZENG Guo-xun

(*Faculty of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China*)

**Abstract:** In the range of rotation from 250 to 1400rpm, friction stir welding (FSW) is conducted for 5083-H321 aluminum alloy plates. As the rotation is lower than 700rpm or higher than 1000rpm, some types of defects generated easily in the welds. The microstructure of friction surface and transverse section, mechanical properties and fracture morphology of the joints with defects were investigated by using naked eye, OM, SEM. The reasons of defects are analyzed from heat input and material flow. The results show that the welds are prone to kissing bond as lower than 700rpm, and the rupture happens along the kissing bond line. However, the welds are prone to flash and tunnel defects as higher than 1000rpm, and the fracture surface shows the voids morphology caused by tunnel. The mechanical properties decrease severely by the defects. The improper heat input is the substantial reason of defects formation.

**Key words:** 5083 aluminum alloy; friction stir welding; joint; welding defect