

[文章编号] 1004-0609(2002)06-1162-05

防锈铝 LF6 的固态塑性连接工艺^①

邢 丽, 柯黎明, 周细应, 刘鸽平
(南昌航空工业学院 材料科学与工程系, 南昌 330034)

[摘 要] 针对防锈铝 LF6 研究了搅拌摩擦焊焊接规范对焊缝成型及接头力学性能的影响, 分析了搅拌摩擦焊缺陷产生的原因。结果表明, LF6(M) 搅拌摩擦焊接头强度可以达到母材的强度, 其背弯和正弯角度可达到 180°; 焊接规范对接头的力学性能有影响, 存在一个最佳力学性能规范区; 某些规范条件下可能出现单边沟槽或隧道型缺陷, 它们的位置与搅拌头的旋转方向有关。

[关键词] 防锈铝; 固态塑性连接; 搅拌摩擦焊

[中图分类号] TG 453

[文献标识码] A

铝合金是一种高比强度材料, 由于其熔点、密度较低, 与氧的亲合力大, 热传导系数大, 熔焊时易产生气孔、裂纹、变形较大等缺陷。并且由于焊接加热使其性能降低, 限制了其在飞机、船舶等结构中的应用。利用搅拌摩擦焊技术, 可以消除熔焊时的缺陷, 且能保证焊接接头的性能^[1, 2]。

搅拌摩擦焊(简称 FSW) 是英国焊接研究所于 20 世纪 90 年代发明的一种用于低熔点合金板材的新型固态连接技术。它利用一种带有探针(pin) 和轴肩(shoulder) 的特殊形式的搅拌头, 将探针插入接合面, 轴肩紧靠工件上表面, 进行旋转搅拌摩擦, 摩擦热使探针周围金属处于热塑性状态, 探针前方的塑性状态金属在搅拌头的驱动下向后方流动, 在该处塑性融合, 从而使待焊件压焊为一个整体^[3~5]。

影响搅拌摩擦焊焊缝成型质量的主要因素是搅拌摩擦的发热量和材料在搅拌头作用下的塑性流动形态, 它与搅拌头形状、尺寸及焊接规范参数有关^[6~9]。文献[10~12] 对 6063 和 7075 铝合金及镁合金 FSW 的显微组织和接头性能进行了研究。本文作者针对我国常用的防锈铝 LF6, 研究了搅拌摩擦焊工艺参数对焊缝成型及接头性能的影响, 分析了焊接时可能形成的缺陷, 旨在为该工艺在航空航天、造船、汽车、铁路等工业领域的应用提供理论和实践依据。

1 实验方法

实验选用厚度为 1~3 mm 的防锈铝 LF6(M)

薄板作为待焊材料, 用自制的设备进行 FSW 工艺实验。焊接时, 分别改变焊接规范参数, 观察焊缝成型, 分析规范参数对焊缝成型的影响。选择典型焊接试件, 将其制成金相试样, 用混合酸溶液浸蚀后, 在金相显微镜下观察显微组织, 用 71 型显微硬度计测量焊接接头的显微硬度; 对无外观缺陷并经检查无内部缺陷的 FSW 试件, 按国标 GB2651—89 和 GB2653—89 加工成标准试样, 在 WE-10A 型万能材料试验机上进行性能试验, 研究工艺参数对接头性能的影响。

2 结果与分析

2.1 焊接规范对焊缝成型的影响

搅拌摩擦焊时, 焊缝成型不良主要表现为: 焊缝表面成型不好; 表面有沟槽或在焊缝内部出现孔洞或隧道型缺陷; 焊缝背面有金属熔化点或缩孔。这些不良的成型主要取决于搅拌头的形状和工艺参数。图 1 所示为厚度 3 mm 的 LF6 板材 FSW 焊缝表面沟槽和背表面缩孔的图像以及相应的焊接工艺参数, n 表示转速, v 表示焊接速度; 图 1(a), (c) 所示为无缺陷的上、下表面的图像, 图 1(b), (d) 所示为有缺陷的上、下表面的图像。

实验表明, 对于一定形状的搅拌头, 影响 FSW 焊缝成型的主要因素是搅拌头的转速 n 、焊接速度 v 和压力。若焊接速度一定, 在搅拌头转速较低时, 焊缝表面出现沟槽型缺陷; 转速升高时, 表面沟槽

① [基金项目] 江西省自然科学基金资助项目(9950010)

[收稿日期] 2002-01-23; [修订日期] 2002-05-08

[作者简介] 邢 丽(1959-), 女, 副教授, 硕士。

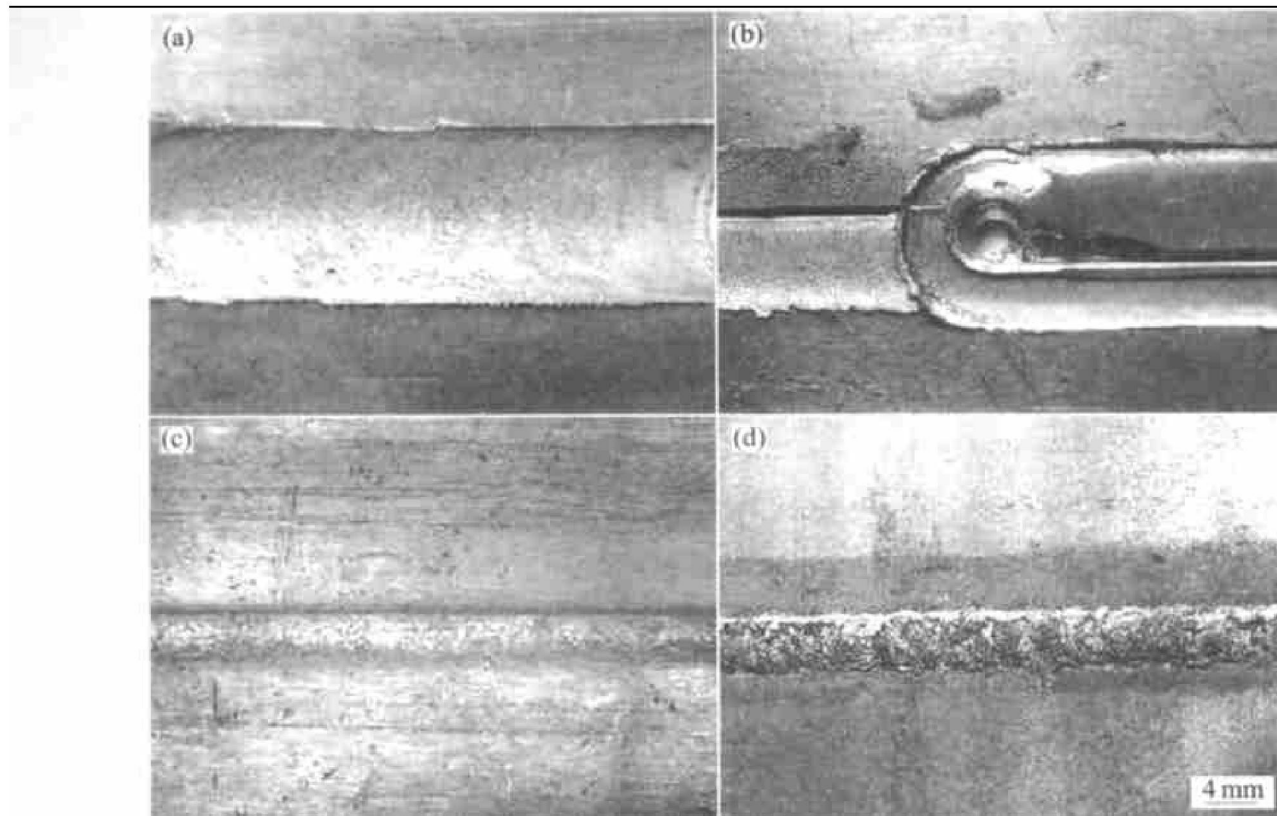


图1 FSW 焊缝表面沟槽和背面熔化现象

Fig. 1 Groove at upper surface and melting point and hole at bottom surface

(a) —Upper surface, $n = 750 \text{ r/min}$, $v = 150 \text{ mm/min}$;

(b) —Groove at upper surface, $n = 750 \text{ r/min}$, $v = 375 \text{ mm/min}$;

(c) —Bottom surface, $n = 750 \text{ r/min}$, $v = 150 \text{ mm/min}$;

(d) —Melting point and hole at bottom surface, $n = 1500 \text{ r/min}$, $v = 60 \text{ mm/min}$;

逐渐变细, 最终消失, 但此时切开焊缝, 会发现隧道型缺陷; 继续增加转速, 隧道型缺陷消失, 获得组织致密的焊缝。搅拌头的转速一定时, 若焊速较慢, 焊缝表面光洁明亮, 但在焊缝背面可见到由于金属熔化出现的缩孔; 随焊速增加, 这种缩孔会消失; 继续增加焊接速度, 焊缝表面的光洁度变差, 切开试样会发现隧道型缺陷; 若焊速过快, 隧道型缺陷逐渐增大, 甚至会在表面出现沟槽。搅拌头旋转速度和焊接速度在一个较宽的范围内变化时可以获得成型较好的焊缝。保持相同的搅拌头旋转速度和焊接速度而改变搅拌头对工件的压力时, 同样会影响焊缝的成型, 压力较小时, 会出现内部隧道型缺陷或表面沟槽; 若加大压力, 会使焊缝成型得到改善。

上述焊接缺陷的出现与搅拌摩擦焊时的搅拌头与工件间的摩擦发热量和焊缝金属的塑性流动状态有关。首先, 搅拌头转速直接影响搅拌头与工件间摩擦面的相对运动速度, 从而影响摩擦发热量, 即在其它条件不变的情况下, 当搅拌头的转速较低时, 单位时间内搅拌头产生的摩擦热少, 不足以将

焊缝金属加热到塑性状态, 使得搅拌摩擦过程类似于金属的铣削加工, 从而在焊缝表面出现沟槽。而焊接速度影响单位长度焊缝吸收的热量。转速一定而焊速过慢时, 单位长度焊缝上获得的热量过多, 使焊缝温度达到铝合金的熔化温度而出现局部熔化现象; 反之, 当焊速过快时, 焊缝获得的热量较少, 不能形成足够的塑性区并充分流动, 以致形成隧道型缺陷或在表面出现沟槽。只有当焊接速度和搅拌头的转速合理匹配时, 才能得到外观成型质量好、内部无缺陷的焊缝。

至于搅拌摩擦焊时焊缝金属的塑性流动状态对焊接缺陷的影响, 可以通过分析焊缝形成过程来说明。当搅拌头与工件间的摩擦热足够高时, 可以在搅拌头周围形成一层很薄的热塑性层。当搅拌头向前行走时, 在搅拌头后方形成空腔, 由于夹具垫板和搅拌头轴肩的密封挤压作用, 热塑性金属向后流动并填充空腔。实际上, 空腔的产生与填充几乎是同时发生的, 即 FSW 接头的形成是一个空腔不断产生并被填充的连续过程。若焊接过程中不能及时填满空腔, 则焊后遗留下孔洞。由于这种工艺具有

极好的再现性, 连续的孔洞表现为隧道型缺陷。当焊接压力过低或焊接速度过快时, 隧道型缺陷会延伸到表面, 形成表面沟槽。有趣的是, 隧道型缺陷或表面沟槽不是位于焊缝中心, 而是处于搅拌头的某一侧, 如图 1(b) 所示。图 2 所示为表面沟槽位置与搅拌头的旋转方向的关系示意图。可见, 当焊接方向不变而改变旋转方向时, 沟槽会从焊缝的一侧移向另一侧。单边沟槽现象表明, 空腔最后填充的部位大约位于与搅拌头相切、并逆着搅拌头旋转方向的位置。这也说明了焊缝塑化材料的塑性流动状

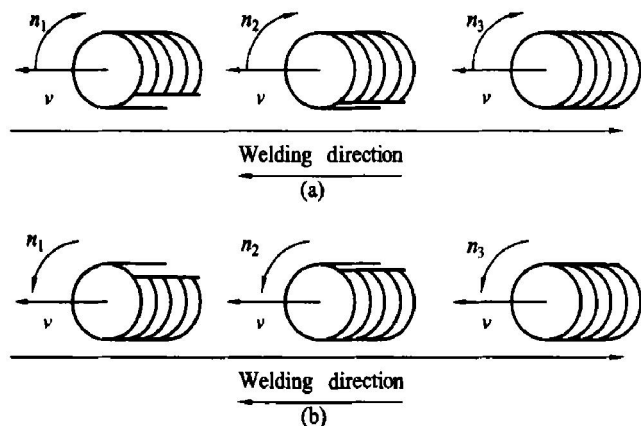


图 2 沟槽位置与搅拌头旋转方向关系示意图

Fig. 2 Schematic relation between position of groove and rotation direction of pin

- (a) —Rotation of pin in clockwise ($n_1 < n_2 < n_3$)
 (b) —Rotation of pin in counterclockwise ($n_1 < n_2 < n_3$)

态对形成缺陷的影响。

形成焊缝内部隧道型缺陷的另一个因素是厚度方向上的不均匀产热。因为在焊缝的上表面, 除了搅拌头的探针部分对焊缝金属产生搅拌摩擦外, 轴肩对焊缝上表面也产生摩擦, 使得焊缝上表面的温度更高, 这部分金属先达到塑性并融合在一起; 而沿厚度方向, 由于垫板的传热, 其散热能力逐渐增加。若摩擦热量不足, 塑性流动不充分, 在搅拌头的后方就会留下了孔洞。在其它条件不变的情况下, 随着转速的提高, 摩擦热不断增大, 热塑性区由上表面向下表面逐渐延伸, 使得焊缝中的孔洞逐渐减小直至消失。但是, 当转速过高、焊接压力过低时, 有可能在焊缝背面出现金属熔化点或缩孔。

2.2 焊接接头的组织

对焊缝横截面的观察可见, 腐蚀后, 宏观上焊缝比母材更明亮, 焊缝和母材的显微组织存在分界线。此外, 在焊缝处可观察到呈洋葱瓣样的塑性流动痕迹, 如图 3 所示。这种洋葱瓣的截面形态可能

是接头在形成过程中塑性变形呈周期性变化所致。

图 4 所示为 LF6(M) FSW 焊缝及热影响区(简称 HAZ)的组织。可见, 焊缝组织为细小的等轴晶, 就晶粒度而言, 焊缝中心的晶粒明显比 HAZ 细小, HAZ 的晶粒随离焊缝的距离增加而增大, 逐渐过渡到母材。焊缝内部晶粒比较细小, 是由于在焊接过程中, 焊缝金属经历了剧烈的塑性变形, 并在摩擦热的驱动下, 发生再结晶从而使晶粒细化。



图 3 FSW 焊缝的截面形状

Fig. 3 Cross section of welding joint

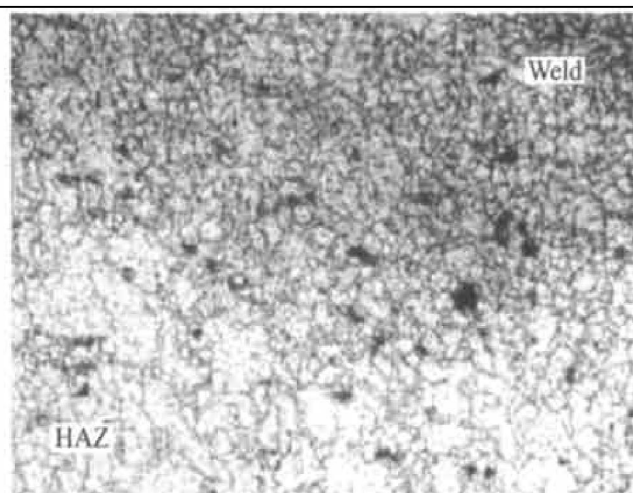


图 4 焊缝及 HAZ 的组织

Fig. 4 Microstructure of weld and HAZ

2.3 焊接规范参数对焊接接头力学性能的影响

对无缺陷的 FSW 试件进行了抗拉强度和弯曲强度实验。结果表明, 焊接规范参数不仅对焊缝成型有影响, 而且对接头的力学性能也有影响。对于 LF6(M) 铝合金, 当焊接规范合适时, 对接接头的抗拉强度可达到母材标称强度的 100%, 背弯和正弯的角度都能达到 180° 。图 5 所示为固定搅拌头转速和其它参数时, 焊接速度对铝合金 LF6(M) 的搅拌摩擦焊对接接头的抗拉强度的影响, 在一定速度范围内接头强度较高。若将接头强度大于母材抗拉强度的 90% 所对应的规范定义为最佳力学性能规范, 由图 5 可见, 最佳规范与板厚有关。对于 LF6 的对接接头, 当板厚 $\delta = 3 \text{ mm}$ 时, 焊接速度 $v = 47.5 \sim 75 \text{ mm/min}$ 为其最佳力学性能规范; 板厚 δ

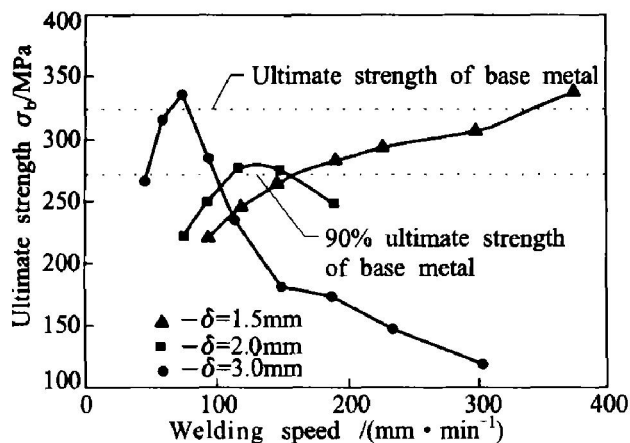


图5 抗拉强度与焊接速度的关系

Fig. 5 Relationship between ultimate strength of FSW joint and welding speed

= 2 和 1.5 mm 时所对应的最佳力学性能规范的焊接速度分别为 118~ 150 mm/min 和 190~ 375 mm/min。

若定义不出现缺陷的规范为最佳焊缝成型规范, 对实验数据进行分析, 可发现 FSW 的焊接规范有一个最佳焊缝成型区和最佳力学性能区, 通常最佳焊缝成型区的规范比最佳力学性能区的要宽。

最佳规范区的存在说明焊缝成型及性能取决于单位长度焊缝上搅拌头产生的摩擦热的大小及焊缝处于塑性状态的时间的长短。图 5 表明在某个焊速区间, 搅拌头对被焊金属产生的摩擦热恰好能使结合处的金属产生一定的塑性变形区, 搅拌时间内高温塑性金属能得到充分的流动, 得到性能较好的组织形态。而焊速大于或小于这个区间, 会使塑性区存在时间过短, 塑性流动作用不充分, 组织不能通过足够的应变得得到强化; 或者会使温度过高, β (Mg_5Al_8) 相析出, 使强度降低。这些都会使接头的性能降低。

图 6 所示为接头显微硬度测量结果。可见, 对板厚为 2 mm 的 LF6(M) 接头, 从母材到焊缝, 显微硬度值没有太大的变化, 但焊接规范变化时, 接头显微硬度的幅值有变化, 其变化趋势与接头抗拉强度的变化趋势一致, 即焊速为 118~ 150 mm/min 时的显微硬度值高于焊速 190 mm/min 时的硬度值。因此, 在合适的焊接规范参数条件下, 用搅拌摩擦焊方法可以获得性能与母材类似的焊缝。

3 结论

1) 用固态塑性连接方法焊接防锈铝 LF6(M), 其接头强度可以达到母材的强度, 其背弯和正弯角

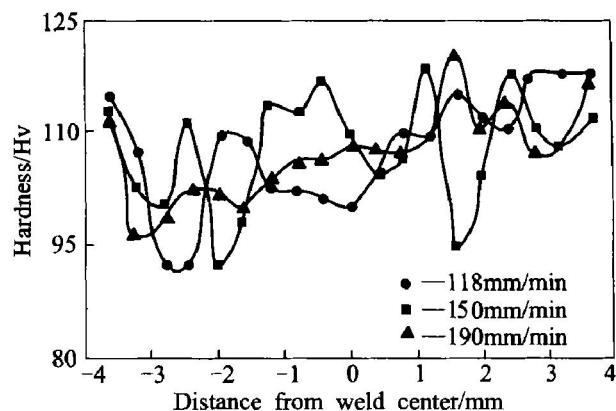


图6 接头的显微硬度

Fig. 6 Microhardness profile for LF6 Al FSW joint

度可达到 180°。

2) 焊接规范对接头的力学性能有影响, 不同厚度的板材, 存在一个最佳力学性能规范区。

3) FSW 单边沟槽缺陷的形成和位置与焊接规范和搅拌头的旋转方向有关, 它们是金属塑性流动的结果。

[REFERENCES]

- [1] Dawes C J, Thomas W M. Friction stir process welds in aluminum alloys[J]. Welding Journal, 1996, 75(3): 41 - 45.
- [2] Jiu H, Ko C, Saimoto S, et al. Microstructure of friction stir welded AA5182[J]. Materials Science Forum, 2000, 331- 337: 1757 - 1762.
- [3] Nicholas E D. Friction processing technologies[J]. Advanced Materials & Processes, 1999, 155(6): 69 - 71.
- [4] 柯黎明, 邢 丽, 刘鸽平, 等. 搅拌摩擦焊工艺及其应用[J]. 焊接技术, 2000, 29(2): 7 - 8.
KE Lǐmíng, XING Li, LIU Gēpíng, et al. Friction stir welding process and its industrial application[J]. Welding Technology, 2000, 29(2): 7 - 8.
- [5] Rhodes C G, Mahoney M W, Bingel W H, et al. Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum[J]. Scripta Materialia, 1997, 36(1): 69 - 75.
- [6] Norman A F, Brough I, Prangnell P B. High resolution EBSD analysis of the grain structure in an AA2024 friction stir weld[J]. Materials Science Forum, 2000, 331 - 337: 1713 - 1718.
- [7] Murr L E, Flores R D, Flores O V, et al. Friction stir welding: microstructural characterization[J]. Mat Res Innovat, 1998, 1: 211 - 223.
- [8] Heinz B, Skotzki B, Eggeler G. Microstructural and mechanical characterization of a friction stir welding Al alloy

- [J]. Materials Science Forum, 2000, 331- 337: 1757 - 1762.
- [9] KE Lǐ-míng, XING Li, Indacochea J E. The materials flow pattern and model in the friction stir welding of aluminum alloy[A]. Materials Solutions 2001[C]. Indianapolis, USA: ASM International, 2001.
- [10] Mahoney M W, Rhodes C G. Properties of friction-stir welded 7075 T651 aluminum [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1998, 28A(7): 1955 - 1964.
- [11] Sato Y S, Kokawa H, Enomoto M. Microstructural evolution of 6063 aluminum during friction-stir welding [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1999, 30A(9): 2429 - 2437.
- [12] 邢 丽, 柯黎明, 孙德超, 等. 镁合金薄板的搅拌摩擦焊工艺[J]. 焊接学报, 2001, 22(6): 18 - 20.
- XING Li, KE Lǐ-míng, SUN Dē-chao, et al. Friction stir welding of process welds MB8-magnesium alloy sheet[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(6): 18 - 20.

Solid-state plasticized joining for aluminum alloy LF6

XING Li, KE Lǐ-míng, ZHOU Xǐ-ying, LIU Gē-píng

(Department of Materials Science and Engineering, Nanchang Institute of Aero-Technology,
Nanchang 330034, China)

[Abstract] Friction stir welding(FSW) is a rather new solid-state joining process, usually for joining low melting temperature alloy. The typical LF6 aluminum alloy was joined by using FSW process. The influences of welding conditions on the weld appearance and mechanical properties were investigated. The reasons of forming defect in FSW were analyzed. It is shown that the strength of the joint can reach that of the parent materials, the bending angle can reach 180° . The mechanical properties of the joint are related to the welding variables, and there is a region in which the mechanical properties are higher than 90% of the parent materials. In some welding conditions, some special appearance, such as groove on one side of the weld surface or channel in the weld, may occur, whose position is related to the rotation direction of the pin.

[Key words] aluminum alloy; friction stir welding; solid-state joining

(编辑 袁赛前)