

研究 与 设计

旋转速度对 6063 铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能的影响

柴 鹏, 栾国红, 孙成彬, 张志斌
(中国搅拌摩擦焊中心, 北京 100024)

摘要: 搅拌摩擦焊是一项固相焊接技术, 在航空航天、高速列车、汽车以及船舶等行业均得到不同程度的应用。在此以工艺试验为基础, 研究了旋转速度及其与焊接速度的匹配对 6063 铝合金搅拌摩擦焊接头形貌以及力学性能的影响。研究表明, 在高旋转速度、高焊接速度匹配条件下能够获得优质 6063 铝合金搅拌摩擦焊接头。

关键词: 6063 铝合金; 搅拌摩擦焊; 旋转速度

中图分类号: TG453+.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-2303(2005)03-0031-04

Effect of rotating speed on FSW joint

CAI Peng, LUAN Guo-hong, SUN Cheng-bin, ZHANG Zhi-bin
(FSW Center, Beijing 100024, China)

Abstract: Friction stir welding is a solid-state welding process which has been used in aeronautics, high speed vehicle, train and ship industry. In this paper, the effect of matching of rotation speed and travel speed on 6063 aluminum FSW joints is researched. The result shows that the high quality joints could be acquired under high rotation speed and high travel speed.

Key words: 6063 aluminum; friction stir welding; rotated speed

前言

搅拌摩擦焊是一项固相连接技术, 该技术是由英国焊接研究所(The Welding Institute, 简称 TWI)于 1991 年发明的, 并于次年在全球范围内申请了专利保护^[1-3]。自产生以来, 通过发放专利技术使用许可以及组织合作研究等方式, 该技术在短短 10 多年里就得到了迅猛发展。

从目前的实际应用来看, 搅拌摩擦焊技术具有许多优点。波音公司的应用表明^[4], 搅拌摩擦焊技术能够有效提高焊接接头强度、缩短生产周期、节约制造费用并减少焊接缺陷。比如搅拌摩擦焊技术在 Delta IV 型火箭中心助推器上的应用使焊接接头

强度增加了 30%~50%; 制造周期降低了大约 80%, 由原来的 23 天减少为 6 天; 通过改进接头设计, Delta IV 和 Delta II 的制造费用节省了 60%; 截止 2002 年 4 月, 波音公司已经用搅拌摩擦焊技术为 Delta II 型火箭生产了 2 100 m 长的无缺陷焊缝。在日立公司的应用表明, 采用搅拌摩擦焊技术焊接铝合金列车壁板结构, 可以获得较小的变形量(仅为 MIG 结构的 1/12)、较高的冲击韧性(约为母材的 1.7 倍, 是 MIG 接头的 2.4 倍)。

由于以上种种优点, 搅拌摩擦焊技术不仅被用于火箭和高速列车的制造, 在飞机、装甲运兵车、汽车以及船舶等领域同样得到了不同程度的应用^[5]。目前, 搅拌摩擦焊技术的研究主要集中在搅拌摩擦焊工艺参数优化、搅拌摩擦焊接过程数值模拟以及搅拌头等方面。在此将在试验基础上分析旋转速度

收稿日期: 2004-04-14

作者简介: 柴 鹏(1976—), 男, 山西垣曲人, 工程师, 硕士, 主要从事搅拌摩擦焊技术的研究工作。

对 6063 铝合金搅拌摩擦焊接头的影响。

1 试验材料及方法

6063 铝合金属于可显著热处理强化铝合金,合金中的主要强化相是 Mg_2Si 和 $AlSiFe$ 。退火状态下,6063 铝合金挤压型材的抗拉强度为 100~120 MPa;淬火及自然时效处理后可提高到 180~200 MPa^[6]。6063 铝合金的主要化学成分如表 1 所示。

表 1 6063 铝合金的主要化学成分 %

| ω (Si) | ω (Fe) | ω (Cu) | ω (Mn) | ω (Mg) | ω (Al) |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0.40 | 0.25 | 0.10 | 0.15 | 0.60 | 其余 |

试验件厚度 8 mm,平板对接。选用带螺纹的搅拌头,搅拌针长度 7.6 mm,轴肩直径 24 mm。焊前将焊接接头部分略作处理,清洗油污,然后固定在专用夹具上。试验设备采用自主研发的大型悬臂式搅拌摩擦焊设备,如图 1 所示。

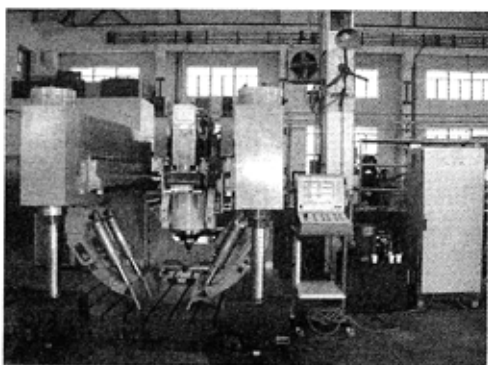


图 1 大型悬臂式搅拌摩擦焊设备

试验共分两次进行。第一次试验参数:材料为 T6 状态的 6063 铝合金,旋转速度分别为 950 r/min、1 180 r/min 和 1 500 r/min,在每个转速下分别选用低焊接速度和高焊接速度匹配。在第一次试验基础上,选用第二组参数进行试验:材料为 T5 状态的 6063 铝合金,旋转速度分别为 1 500 r/min、1 600 r/min、1 800 r/min 以及 2 000 r/min,在每个转速下分别有 4 个焊接速度与其相匹配。

2 试验结果及讨论

在此,将从宏观形貌和力学性能两方面分析旋转速度对 6063 铝合金搅拌摩擦焊接头的影响。

2.1 宏观形貌分析

图 2~图 4 为第一次试验中不同旋转速度下的 6063 铝合金搅拌摩擦焊接头的宏观形貌。图中分界线左侧为相应旋转速度条件下的低焊接速度匹配,右侧为相应旋转速度条件下的高焊接速度匹配。

950 r/min 条件下的高焊接速度与 1 180 r/min 条件下的低焊接速度相同,而 1 180 r/min 条件下的高焊接速度与 1 500 r/min 条件下的低焊接速度相同,可以认为是一种叠合匹配试验方法。



图 2 旋转速度 950 r/min 时的焊缝形貌



图 3 旋转速度 1 180 r/min 时的焊缝形貌



图 4 旋转速度 1 500 r/min 时的焊缝形貌

由图中可以看出,旋转速度相同条件下,焊接速度越高,焊缝表面越粗糙,甚至出现参差不齐的飞边。而相同焊接速度条件下,旋转速度越高,焊缝表面越光滑,没有或仅有少量飞边。由文献[7]可知,搅拌摩擦焊接过程中的焊接线能量可以表示为

$$E = \pi \omega \mu F (r_0^2 + r_0 r_1 + r_1^2) / [45(r_0 + r_1)v], \quad (1)$$

式中 ω 为旋转速度; μ 为摩擦系数; F 为焊接力; r_0 为轴肩半径; r_1 为搅拌针半径; v 为焊接速度。

从式中可以看出,搅拌摩擦焊接过程中的线能量与旋转速度、摩擦系数和焊接力等成正比,与焊接速度成反比。因此,旋转速度相同时,焊接速度越高,焊接线能量越低,相应的接头金属塑化情况变差,焊缝表面越粗糙。而相同焊接速度条件下,旋转速度越高,焊接线能量越高,接头金属塑化情况得到改善,因而焊缝表面越光滑。

此外,不同旋转速度条件下焊缝表面亮度不同。旋转速度较低时,焊缝表面比较暗,转速 950 r/min 时焊缝表面局部发黑;随着旋转速度的提高,焊缝表面的亮度增加,在旋转速度为 1 500 r/min 时,焊缝表面呈银白色。这是由于作用于接头的搅拌头分为搅拌针和轴肩两部分,如图 5 所示。随着旋转速度的增加,轴肩与接头金属之间作用产生的热量不能够迅速向接头内部扩散,在焊缝表面形成能量聚积,可以认为焊缝表层的能量聚积使表层金属塑化程度提高、晶粒度减小。这一假设有待进一步的试验分析,尤其是焊缝表层金属的微观金相组织分析。

2.2 力学性能分析

每道焊缝分别在起始位置、中间位置以及终止位置(不包括焊缝末端的匙孔)取一个试样;力学

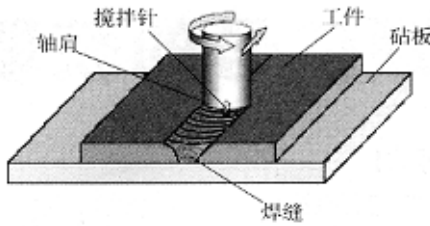


图 5 搅拌摩擦焊接原理

性能试验在 ZD10/90 电子拉力试验机上进行。根据每道焊缝中 3 个试样的拉伸试验值求平均值,分析旋转速度对 6063 铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能的影响。

2.2.1 试验一的力学性能分析

图 6 为旋转速度对 6063 铝合金搅拌摩擦焊接头抗拉强度的影响。随着旋转速度的提高,接头强度也增加。当旋转速度为 950 r/min 时,接头强度约为 105 MPa;当旋转速度为 1 500 r/min 时,接头强度在 140 MPa 以上。

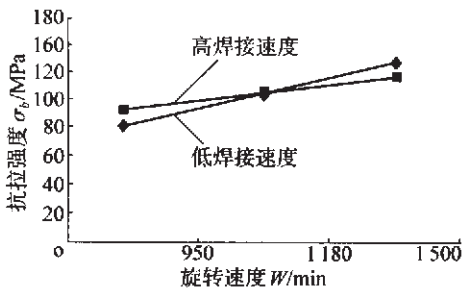


图 6 试验一中旋转速度对接头抗拉强度的影响

图 7 为旋转速度对 6063 铝合金搅拌摩擦焊接头延伸率的影响。接头延伸率与接头强度有着类似的影响,旋转速度以及焊接速度对接头延伸率有着类似的影响。当旋转速度为 950 r/min 时,接头延伸率仅为 2.0;当旋转速度为 1 500 r/min,采用低焊接速度匹配时,接头延伸率达到 4.0;而当采用高焊接速度匹配时,接头延伸率可以达到 6.0 以上。

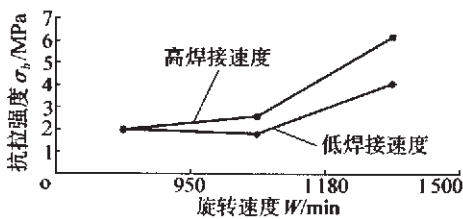


图 7 试验一中旋转速度对接头延伸率的影响

由试验一的结果可以看出,高旋转速度、高焊接速度匹配条件下的接头强度、延伸率均比较高。根据这一结果,设计了第二次试验,试验材料改为 T5

状态 6063 铝合金。

2.2.2 试验二的力学性能分析

根据第一次试验结果可知,随着旋转速度的提高,接头强度以及延伸率均有所提高。因此,在第二次试验中选择旋转速度为 1 500 r/min、1 600 r/min、1 800 r/min 以及 2 000 r/min。在每个旋转速度下,均有 4 个焊接速度与其相匹配。如图 8、图 9 所示,焊接速度 1、焊接速度 2、焊接速度 3、焊接速度 4 依次提高。

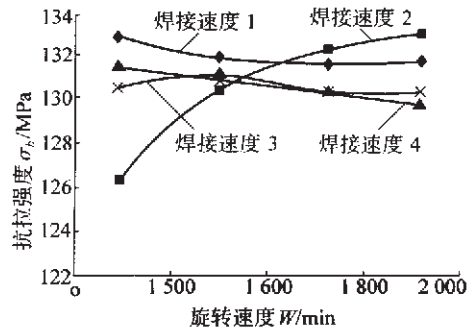


图 8 试验二中旋转速度对接头抗拉强度的影响

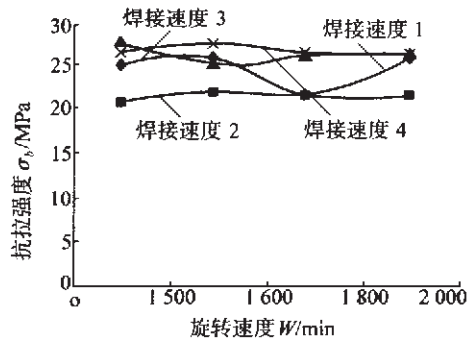


图 9 试验二中旋转速度对接头延伸率的影响

由图 8 可以看出,随着旋转速度的提高,不同焊接速度条件下接头抗拉强度并无统一规律可循。在所选参数范围内,接头强度随旋转速度的变化不大。最大值与最小值之间仅相差 6 MPa,而强度最高可达母材(母材强度为 138.8 MPa)的 96.2%。另外,当旋转速度为 1 600 r/min 和 1 800 r/min 时,数据离散性比较小,最大值与最小值之间相差 2 MPa;当旋转速度为 1 500 r/min 和 2 000 r/min 时,数据离散性比较大,约为 6 MPa。因此,1 600 r/min 和 1 800 r/min 的旋转速度与焊接速度的匹配比较好。

图 9 为第二次试验中接头延伸率的变化情况。由图可以看出,各个旋转速度条件下的数据离散性相差不大,均为 6%左右。只是焊接速度 3、4 在所选参数范围内与旋转速度的匹配比较

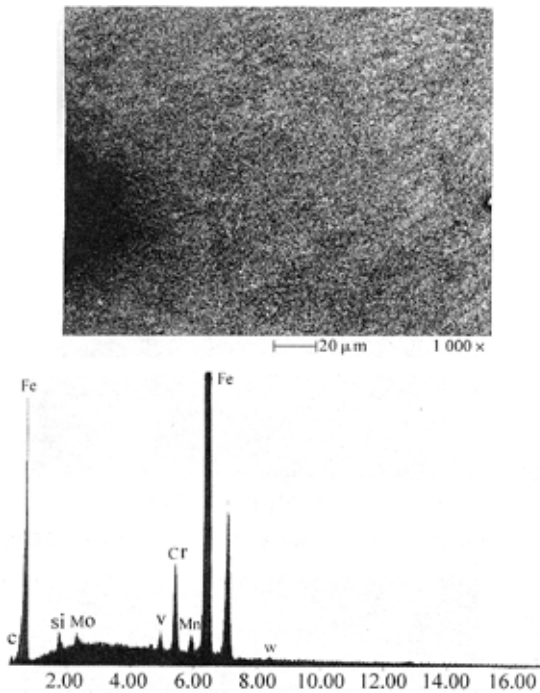


图 3 面扫描图

结果表明, HM1 焊条堆焊层的耐磨性远大于 J422 和 J507 焊条的堆焊层。

好, 延伸率曲线比较平直, 上下波动在 2% 范围内。即在焊接速度比较高时, 接头延伸率比较高, 最高可达母材 (母材延伸率为 32%) 的 85.3%, 且与旋转速度的变化关系不大。

3 结论

旋转速度作为搅拌摩擦焊接过程中的主要参数之一, 对 6063 铝合金搅拌摩擦焊接头的焊缝成形以及力学性能等有重要影响。该研究通过对不同旋转速度条件下焊缝形貌以及接头强度和延伸率的研究, 可以得出以下结论:

a. 旋转速度与焊接速度如匹配不当, 可能在焊缝表面形成飞边, 使焊缝成形粗糙、光洁度变差;

b. 在 1 500 r/min 以下, 随着旋转速度的提高, 6063-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头强度以及延伸率等均有所提高;

c. 在 1 500 r/min 以上, 6063-T5 铝合金搅拌摩擦焊接头强度均可达到母材强度的 90% 以上, 最高可达 96.2%;

d. 在 1 500 r/min 以上, 匹配高焊接速度时 6063-

3 结论

a. HM1 热作模具钢堆焊条以 $\varphi 4 \text{ mm}$ 、 $3\text{Cr}_4\text{Mo}_2\text{V}_1$ 为焊芯, 选择 CaO 、 CaF_2 、 SiO_2 为主要造渣剂, 药皮质量系数 0.5, 配以锰铁、45# 硅铁联合脱氧, 通过焊芯和药皮中钨铁、钨粉过渡合金成分, 可获得良好的焊接工艺性能及冶金性能。堆焊层显微组织中有大量的板条马氏体和少量的针状马氏体, 堆焊层的硬度焊态下为 47 HRC, 淬火态为 50 HRC。各种合金元素如 Cr 、 Mo 、 W 、 V 的含量和分布基本能达到实验要求。HM1 焊条堆焊层的耐磨性远大于 J422 和 J507 焊条。

b. 试验采用手工电弧焊堆焊法, 规范参数为: 直流反接、电流 120~140 A、电压 20~23V。此堆焊工艺可使 HM1 热作模具钢焊条获得良好的工艺性能、冶金性能。

参考文献:

- [1] 陈祝年. 焊接工程师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 陈再枝. 模具钢手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [3] 王德文. 新编模具实用技术 300 例[M]. 北京: 科学出版社, 1995.

T5 铝合金搅拌摩擦焊接头可以得到比较高的延伸率, 最高可达母材的 85.3%。

因此, 适当选择焊接参数可以获得优质的 6063 铝合金搅拌摩擦焊接头。

参考文献:

- [1] Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C, et al. Improvements relating to friction welding[P]. European Patent Specification EP 0615480B1.
- [2] Midling O T, Morley E J, Sandvik A. Friction stir welding[P]. European Patent Specification EP 0752926B1.
- [3] 奥勒·泰耶·米德林, 爱德华·詹姆斯·莫利, 安德斯·桑维克. 摩擦搅拌焊[P]. CN 1144499A.
- [4] Threadgill P L, Num M E. A review of friction stir welding: Part 1 process overview, TWI, 2, 2003.
- [5] Yutaka S, Sato, Hiroyuki Kokawa. Distribution of tensile property and microstructure in friction stir weld of 6063 aluminum[J]. Metallurgical and materials transactions, 2001, 32A(12):3023-3027.
- [6] 张士林, 任颂赞. 简明铝合金手册[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2001.
- [7] 赵勇, 严铿, 李敬勇, 等. 搅拌摩擦焊过程数学模型建立的影响因素及现状[J]. 电焊机, 2004, 34(1):19-21.