

2524 铝合金的搅拌摩擦焊对接工艺

郭辉华¹ 李明仁¹ 贺地求² 徐亮¹

(1 上海飞机设计研究院, 上海 200232)

(2 中南大学, 长沙 410083)

文 摘 以 2524-T3 板材作为试验材料, 研究了薄板的搅拌摩擦焊对接工艺, 优化了对接焊的工艺参数, 获得了焊接工艺窗口及最优工艺参数。在最优工艺参数下生产的对接焊件具有良好的质量外观, 焊件的变形量和焊缝减薄量极小; 焊件的 X 射线检测结果表明焊件内部质量良好, 没有在照片上发现缺陷; 金相组织分析显示, 焊缝横截面组织均匀致密; 焊接接头静力拉伸性能测试结果表明焊缝抗拉强度的平均为 397 MPa, 为母材抗拉强度的 90.4%。

关键词 铝合金, 搅拌摩擦焊, 工艺试验, 力学性能

Butt Process of Friction Stir Welding for 2524 Aluminum Alloys

Guo Huihua¹ Li Mingren¹ He Diqu² Xu Liang¹

(1 Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 200232)

(2 Central South University, Changsha 410083)

Abstract Butt weld process of friction stir welding for thin slab are studied in this paper, 2524-T3 plate are selected as testing materials. The joining process is optimized to obtain the window of weld process and the best process parameters. The butt weld produced in optimized process parameters have an excellent appearance, as the deformation and the thickness reduction of weld are little; X-ray inspection results show the inner quality of welds is good, and no defects are found in the picture; metallographic analysis indicates the texture of weld in cross-section is uniform and dense; mechanical property test result shows that the mean tensile strength of butt joint is 397 MPa, which is the 90.4% of base metal's tensile strength.

Key words Aluminum alloys, Friction Stir Welding, Process testing, Mechanical properties

0 引言

搅拌摩擦焊(FSW)是由英国焊接研究所于 1991 年发明的一种新型固相连接技术。与传统焊接技术相比, FSW 具有如下显著优点^[1]。

(1) 固态连接。无粗大凝固组织和熔焊缺陷, 热变形和残余应力小, 可以实现大型结构的精密焊接。

(2) 制造成本低。焊前无需开坡口和特殊清理, 无需金属填料、保护气体或焊剂, 能量消耗比熔化焊降低 80%。

(3) 绿色环保。没有烟尘、飞溅、强弧光和辐射, 噪音低。

(4) 易于实现机械化/自动化。

(5) 焊缝外观好。焊后工件表面平整, 无明显焊缝凸起和焊滴。

FSW 可实现多种连接方式, 如图 1 所示^[2], 其中以平头对接最为常用。目前, FSW 技术在航空航天

领域获得了大量的研究及应用。空客公司在 A320 中央翼盒、A340 机翼承力墙、A350 和 A380 飞机机身蒙皮等结构中应用了 FSW 技术^[3]。美国波音公司在 1999 年把 FSW 技术成功地应用于 DELTA 系列火箭的制造上。此外还应用 FSW 实现了 C17 和 C130 大型军用运输机货舱地板的制造。美国 Eclipse-500 公务机大量使用 FSW, 263 条焊缝共 136 m, 取代 7378 个铆钉, 该飞机已于 2002 年 5 月得到 FAA 的批准。巴西航空工业公司于 2003 年开始了 FSW 技术的应用开发, 于 2010 年 4 月 20 日发布, 莱格赛 500 喷气公务机中已经成功地采用了 FSW 技术^[4]。FSW 接技术已经成为国际航空企业提高制造生产率、降低生产成本的重要手段。

本文选用 2524 铝合金针对飞机上常用的结构形式对接进行 FSW 工艺试验。

收稿日期: 2011-08-11; 修回日期: 2011-09-02

作者简介: 郭辉华, 1984 年出生, 工程师, 主要从事飞机制造工艺研究。E-mail: guohuihua@comac.cc

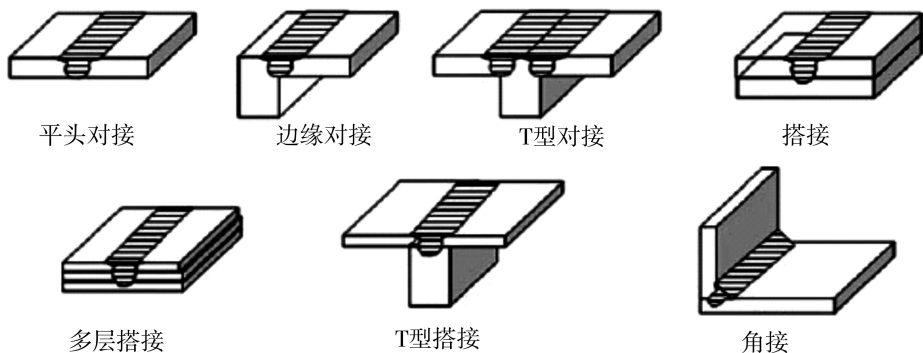


图1 FSW的连接方式

Fig.1 Joint configurations for friction stir welding

1 实验

1.1 材料及设备

采用 2524-T3 板材, 试验件尺寸为 400 mm × 120 mm × 1.8 mm, 成分如表 1 所示。

表 1 2524-T3 成分表

Tab.1 Compositions for 2524-T3 wt%

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn	Al
0.022	0.084	3.69	0.50	1.16	0.027	0.018	余量

所用的设备有: 中南大学自主研制的 FSW 试验机, 焊机转速范围为 500~4000 r/min 及 FSW 薄板搅拌焊头。

1.2 FSW 焊接工艺试验

将两块尺寸为 400 mm × 120 mm × 1.8 mm 的板材进行对接试验。FSW 主要的工艺参数有: 搅拌头的尺寸及形貌、焊接转速、焊接速率、下压量等。为提高工艺优化试验效率, 在试验研究中, 将寻优过程分工艺窗口搜索和精细优化两个阶段进行: 工艺窗口搜索主要依据焊缝外观成形, 即焊缝上表面、焊缝底面、焊件变形, 确定焊接工艺参数的可行域, 即工艺窗口; 精细优化阶段是在焊接工艺参数可行域内, 依据焊缝金相组织、抗拉强度、减薄量、X 射线检测结果, 进行工艺优化。

1.3 焊缝 X 射线检测分析

按照标准航空器无损检测射线检验 MH/T 3009-2004, 采用 XD7600NT 型 X 射线检查仪对工艺优化的焊接试件进行检测。

1.4 焊缝金相组织

采用德国产的 Leica DMILM EC3 金相显微镜对焊缝进行组织分析。

1.5 焊接接头静力拉伸性能测试

采用 00L100 型万能拉伸试验机(最大负荷为 100 kN, 长春机械科学研究院有限公司)测试拉伸性能。

对接焊件的静力拉伸试验按 HB 5143-96 实施, 对接件的拉伸试验件尺寸如图 2 所示。

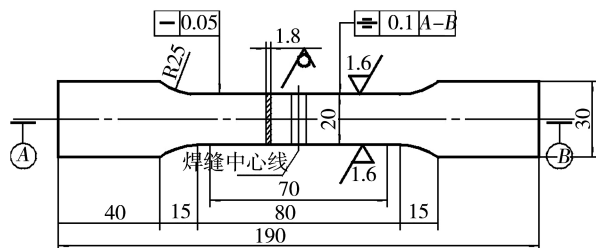


图 2 对接焊缝静力拉伸试验件

Fig.2 Tensile specimen for butt weld

2 结果及分析

2.1 工艺试验结果

影响 FSW 质量的关键工艺参数是搅拌头的转速和焊接速率。

焊接工艺试验表明, 高质量的焊缝必须具有以下外观特征:

- (1) 焊缝上表面无飞边, 纹理细腻均匀;
- (2) 匙孔完整轮廓分明, 孔壁光滑, 无微小蚀点或孔洞;
- (3) 焊底光整, 无融合线, 无材料膨出;
- (4) 2524 合金焊缝上表面色泽均匀。

同时, 要尽量地控制焊件的变形和减薄量。本文采用两种方法控制焊件的变形:

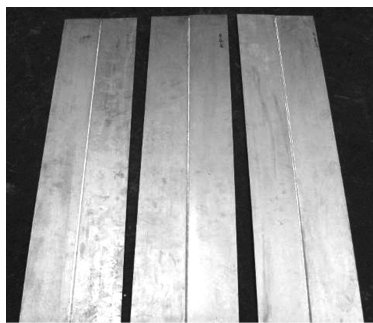
(1) 引入随动水冷系统, 控制焊接热对焊接毗邻区域的影响, 控制热致变形, 降低高温对焊缝组织的负面影响。焊接区温度必须达到熔点的 60%~70%, 形成局部超塑性区, 搅拌焊接过程才能正常进行, 通过调节给水量、雾化气压、喷射距离和喷射角度, 在台肩周围形成大梯度内热外冷可控温度场。

(2) 设置随动贴压滚轮装置, 因夹紧、台面水膜和油膜引等因素引起的焊件接缝与焊台贴合不紧密, 对焊接过程有重大影响, 会造成焊件上表面浮至台肩端面上, 出现严重飞边、焊接空洞和焊接变形, 设置随动贴压滚轮, 可有效防止此类现象出现, 稳定焊接过程。

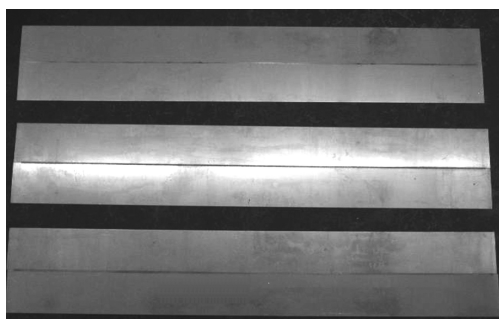
以上两种措施可有效控制对接件的焊接变形, 尺寸为 1 000 mm × 240 mm × 1.8 mm 的 2524-T3 对接焊件在自由状态下的变形 ≤ 2 mm。此外, 焊缝区

域的减薄量可控制在 0.01~0.03 mm 内。如图 3 所

示,为 1 000 mm 长焊接试件的外观。



(a) 正面



(b) 底面

图 3 长焊接试件外观

Fig. 3 Appearance of long weldment

依据以上优化的标准及焊接接头力学性能测试结果,综合比较发现,2524-T3 对接焊的工艺参数窗口如表 2 所示。

表 2 2524 对接焊工艺参数窗口

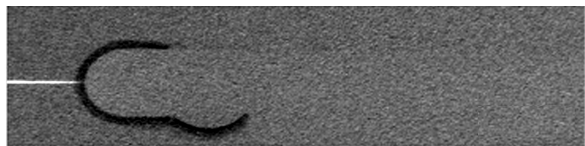
Tab. 2 Windows for butt weld process

工艺参数	转速/ $r \cdot \min^{-1}$	焊接速率/ $\text{mm} \cdot \min^{-1}$
工艺参数窗口	1400~1800	80~160
最佳值	1600	120

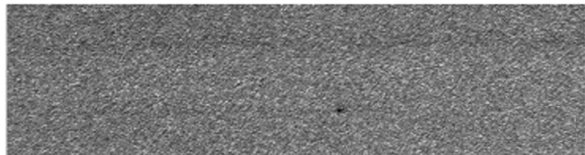
最佳工艺参数中,转速与焊接速率的比值 $n/v=13.3$,这与文献[5]的结论是一致的。

2.2 X 射线检测结果

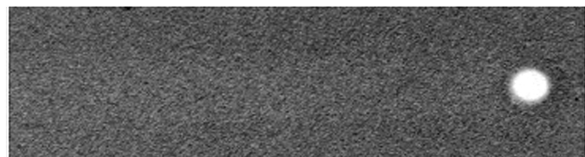
对接焊优化工艺下的 X 射线照片如图 4 所示。在 CT 照片中,焊缝区域与母材并无明显色差。其中图 4(a)中黑色线为起焊飞边,因阻拦 X 射线,在照片显影时呈暗色,属正常现象,图 4(c)中白色圆斑为终焊匙孔。这表明焊缝区域材料均匀、致密,没有明显的缺陷。



(a) 起焊



(b) 中段



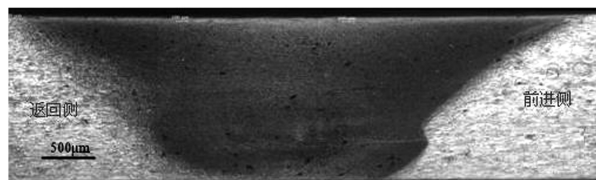
(c) 终焊

图 4 优良焊缝的 X 射线照片

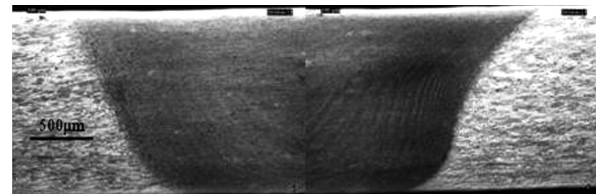
Fig. 4 X-ray picture of excellent weld joint

2.3 接头金相组织

在相同的工艺参数下,采用 JBT-L1.8L 型搅拌头与 JBT-L1.8L 螺旋型搅拌头进行对接工艺试验。各试验件的金相组织照片如图 5 所示。



(a) JBT-L1.8L 型搅拌头



(b) JBT-L1.8L 螺旋型搅拌头

图 5 优化工艺下的焊缝金相组织照片

Fig. 5 Metallograph for weld seam in excellent process

从图 5 中两种搅拌头对应的焊缝金相组织可以看出:

(1)采用螺旋搅拌头的焊核形态明显不同于 JBT-L1.8L 焊头,搅棒影响区显著扩大,焊底增宽,说明螺旋型搅拌头搅拌强度增大,有厚度方向材料流变纹理,并呈洋葱头状焊核;

(2)采用螺旋搅拌头时,焊底透焊层材料流变充分,焊合充分,未见虚焊。

因此,采用 JBT-L1.8L 螺旋型搅拌头更有利于提高焊接质量。

2.4 接头静力拉伸性能

2524-T3 母材的平均抗拉强度为 439 MPa,平均伸长率为 18.98%。采用 JBT-L1.8L 螺旋型搅拌头,并选用表 2 中最优工艺参数,2524-T3 对接焊缝的静力拉伸性能如表 3 所示,焊缝抗拉强度的平均值为 397 MPa,达到了母材的 90.4%。

表 3 2524-T3 对接焊缝静力拉伸性能

Tab. 3 Tensile properties for 2524-T3 butt weld

试样	抗拉强度/MPa	伸长率/%
1#	409	4.91
2#	399	4.78
3#	392	4.68
4#	390	4.53
5#	396	4.66
平均值	397	4.71

3 结论

(1)航空铝合金薄板焊接极易产生焊接变形,采用多种措施可有效控制蒙皮对接的焊接变形,实现近零变形焊接,尺寸为 1 000 mm×240 mm×1.8 mm 的 2524-T3 对接焊件在自由状态下的变形≤2 mm。焊缝区域的减薄量可控制在 0.01~0.03 mm 内。

(2)对焊缝的 X 射线检测结果表明,焊缝内部没有明显的缺陷。

(3)焊缝金相组织表明,采用螺旋型搅拌头比

JBT-L1.8L 型搅拌头具有更好的金相组织,表现在搅棒影响区大,焊缝组织均匀,焊底透焊层材料流变充分,充分焊合,未见虚焊。

(4)2524-T3 的 FSW 对接工艺存在一个可行窗口与最佳工艺参数,在此条件下,可获得高性能无缺陷焊缝,焊缝抗拉强度的平均为 397 MPa,达到母材的 90.4%,伸长率为 4.71%。

参考文献

[1] 马宗义. 搅拌摩擦焊接与加工技术研究进展[J]. 科学观察, 2009,4(5):53-54

[2] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering, 2005,50:1-78

[3] 栾国红. 搅拌摩擦焊技术在飞机制造中的基础研究和验证[J]. 航空制造技术,2009,25:120-125

[4] 巴西航空工业公司. 搅拌摩擦焊技术在巴西航空工业公司的应用[J]. 航空制造技术,2010(9):55-56

[5] 夏罗生,朱树红. 2519 铝合金搅拌摩擦焊工艺研究[J]. 金属铸锻焊技术,2010,39(11):144-146

(编辑 李洪泉)

(上接第 65 页)

3 结论

(1)微晶合金可以在 620℃ 实现渗铝和铝硅共渗。

(2)EB-PVD 制备钛合金薄板渗铝结果表明,渗层与基体的界面平直清新,渗层的相结构主要为 Al₃Ti 相,但由于渗层 Al₃Ti 相为脆性相,在渗后冷却过程中热应力的作用下,易产生裂纹。

(3)EB-PVD 制备钛合金薄板 Al-Si 共渗结果表明,渗层与基体的界面清晰但不平直,渗层的相结构主要为 Al₃Ti 和 Ti₅Si₃ 相,由于 Si 存在渗层中,渗层中不存在裂纹。

参考文献

[1] Unnam J, Shenoy R N, Clark R K. Oxidation of commercial purity titanium[J]. Oxidation of Metal, 1982, 26(4):

231-250

[2] 赵树萍,吕双坤. 钛合金在航空航天领域中的应用[J]. 钛工业进展,2002, 12(6): 18-21

[3] 张亚明,周龙江,王卫林. 钛合金表面渗铝的研究[J]. 稀有金属材料与工程,1993, 22(1): 27-30

[4] 赵宇光,周伟,粮云虹. 低活度外扩散渗铝对钛合金高温氧化行为的影响[J]. 汽车工艺与材料,2004(7): 67-70

[5] Kung S. High temperature coating for titanium aluminizing using the pack cementation technique[J]. Oxidation of Metals, 1990, 34(4): 217-226

[6] 熊华平,李晓红,毛唯. 表面渗硅提高钛铝基合金高温抗氧化性[J]. 金属学报,2003, 39(1): 66-70

(编辑 李洪泉)