

# 焊接速度对 7050 - T7451 铝合金搅拌摩擦焊 接头疲劳性能的影响

王希靖 张杰 牛勇 李树伟 徐成

(兰州理工大学甘肃省有色金属新材料国家重点实验室, 兰州 730050)

**文 摘** 针对 5 mm 厚航空用铝合金 7050 - T7451 进行了不同焊速时搅拌摩擦焊接头的微观结构和低周疲劳性能的研究。结果表明:接头焊核区面积与焊核区晶粒度都随着焊接速度的增加而减小;转速为 400 r/min、焊速为 40 mm/m in 时,接头具有最好的疲劳性能;搅拌摩擦焊接头的低周疲劳裂纹均在接头底部启裂,沿前进侧热机械影响区与焊核区的过渡区域扩展至断裂。

**关键词** 搅拌摩擦焊, 7050 - T7451 铝合金, 微观结构, 低周疲劳, 焊接速度

## Effect of Welding Speed on Microstructure and Fatigue Property of 7050 - T7451 Aluminum Alloy by Friction Stir Welding

Wang Xijing Zhang Jie Niu Yong Li Shuwei Xu Cheng

(State Key Laboratory of Advanced Non-Ferrous Metal Materials, Gansu Province,  
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

**Abstract** In this paper, the microstructure and low cycle fatigue properties of friction stir welded 5mm-thick aero aluminum alloy 7050 - T7451 were investigated under different welding speed. The results show that as welding speed increasing, there is a considerable decrease for weld nugget area and grain size. The best low cycle fatigue life is obtained with the rotating speed of stirring joint at 400 r/min and welding speed at 40 mm/m in. The fatigue cracks initiate from the root of the welds, and then propagate to fracture along the boundary between the advancing side of the thermo-mechanically affected zone and weld nugget. Crack formation and growth life become shortening with welding speed increasing.

**Key words** Friction stir welding (FSW), 7050 - T7451 aluminum alloy, Microstructure, Low cycle fatigue, Welding speed

### 0 序言

7050 - T7451 为沉淀强化高强铝合金,具有较好的综合性能,但经传统熔焊方法加工后,会在熔合区出现共晶组织而严重影响接头的力学性能,所以被认为是不可焊的材料,只能用铆接等方法加工,从而增加了结构质量和制造成本。

搅拌摩擦焊(FSW)作为一种高效、优质、环保、低成本的新型焊接方法,对 7xxx 系列高强铝合金可

以进行很好的焊接<sup>[1-3]</sup>。目前,各种铝合金的搅拌摩擦焊接工艺及微观组织研究已比较成熟,关于搅拌摩擦焊接头的疲劳性能也有了一定的研究<sup>[4-7]</sup>,但对航空铝合金低周疲劳特性的认识尚待深入。

飞行器的许多重要零件和结构承受的载荷波动程度大、应力水平高并进入弹塑性范围,需要进行有限寿命设计,其疲劳破坏方式主要是高应力低循环疲劳。本文对航空用铝合金 7050 - T7451 搅拌摩擦焊

收稿日期: 2008 - 02 - 29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10577010)

作者简介: 王希靖, 1956 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事焊接新技术及焊接质量控制方面的研究。E-mail: wangxj@lut.cn

接头的低周疲劳特性进行了研究,建立了焊接接头应变-寿命曲线,结合接头的微观组织结构,分析了相同旋转速度、不同焊接速度时接头的疲劳特性。

## 1 实验

焊接材料为 5 mm 厚 7050 - T7451 铝合金,其化学成分和力学性能分别见表 1、表 2。

表 1 7050 - T7451 铝合金的化学成分

Tab 1 Chemical composition of aluminum

alloy 7050 - T7451						% (质量分数)	
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al	
0.12	0.15	2.0~2.6	0.10	1.9~2.6	6.0	余量	

表 2 7050 - T7451 铝合金的力学性能

Tab 2 Mechanical properties of aluminum alloy 7050 - T7451

$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta$ /%	HV
510	455	10	135

焊接实验在 FSW - 3LM - 015 型搅拌摩擦焊机上进行。

室温下的低周疲劳实验在 Instron—8802 伺服液压动态试验系统上完成,试验按照 GB6399—86《金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法》进行。三角波控制,应变速率为  $10^{-3}$  Hz,应变比  $R = -1$ ,疲劳失效以载荷下降 30% 判定,得到不同工艺参数时的焊缝微观组织结构和接头的应变-寿命曲线。

## 2 结果与分析

### 2.1 焊接速度对微观结构的影响

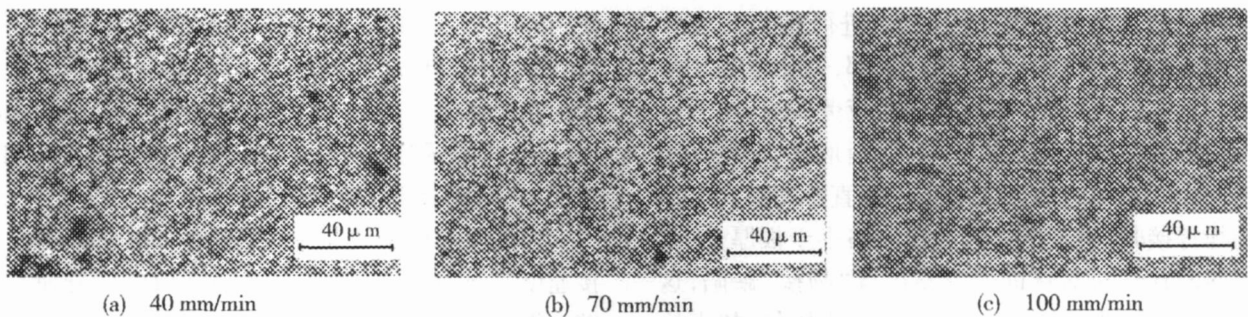


图 2 焊接速度对焊核区晶粒度的影响

Fig 2 Effect of welding speed on nugget grain size

### 2.2 焊接速度对低周疲劳性能的影响

#### 2.2.1 低周疲劳试验结果

搅拌摩擦焊接头的疲劳试验结果按照 Manson-Coffin 方程进行拟合处理<sup>[8]</sup>,总应变幅  $\epsilon/2$  等于弹性应变分量  $\epsilon_e/2$  与塑性应变分量  $\epsilon_p/2$  之和,即

$$\epsilon/2 = \epsilon_e/2 + \epsilon_p/2 = (\sigma_f/E)(2N_f)^b + \epsilon_f(2N_f)^c$$

式中,  $\sigma_f$  为疲劳强度系数;  $\epsilon_f$  为疲劳塑性系数;  $b$

宇航材料工艺 2008 年 第 4 期

图 1 是不同焊速接头的断面金相图。可以看出,焊接速度为 40 mm/min 时接头的焊核区面积最大,随着焊接速度的增加,焊核区面积逐渐减小;焊核区与两侧热机械影响区均有明显的交界线,各参数下后退侧交界线与焊缝厚度方向的夹角几乎相同;但在前进侧该夹角差异较大,母材晶粒的弯曲程度不同。

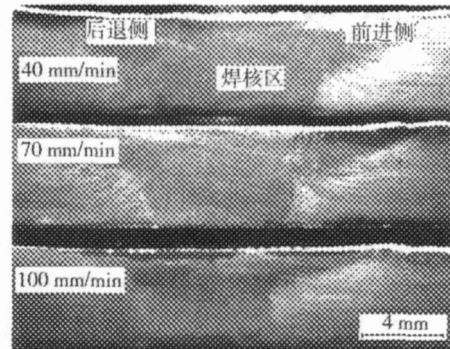


图 1 不同焊速时的断面

Fig 1 Macrographs of different welding speed

另外,焊核区的晶粒尺寸也随着焊接速度的增加而减小,如图 2 所示。搅拌摩擦焊过程中,当搅拌头和旋转速度选定后,焊接速度就决定了焊接时单位焊缝长度上的线能量。随着焊接速度的增加,热输入量减少。焊速为 40 mm/min 时热输入量相对最大,接头处的塑性变形程度最大,从而焊核区的面积也最大。焊核区的晶粒在摩擦热和搅拌针的作用下发生了动态再结晶,晶粒尺寸的大小主要取决于焊接热循环时的峰值温度。焊速小时峰值温度提高,晶粒长大明显。

为疲劳强度指数;  $c$  为疲劳塑性指数。

在高应变幅时,塑性应变分量起主要作用;随着应变幅的减小,弹性应变分量占的比例逐渐增加。低周疲劳损伤主要由循环塑性应变引起。

根据实验数据可以得出不同焊接参数下的应变-寿命曲线,如图 3 所示。从图中可以看出,转速 400 r/min,焊速为 70 和 100 mm/min 时的高应变破

坏周次相近,但低应变时的破坏周次后者比前者高 50%;焊速为 40 mm/m in 时的低周疲劳性能相对最好,在各应变水平下的破坏次数明显高于其他焊速的破坏周次。

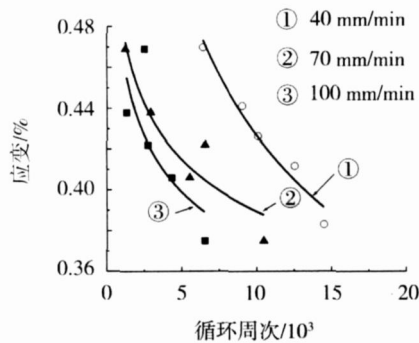


图 3 应变-寿命曲线

Fig 3 Strain-Life curves

### 2.2.2 低周疲劳断裂特性分析

观察宏观断口,各参数下的接头大多在前进侧热机械影响区与焊核区的过渡处发生破坏。结合图 4 所示的前进侧过渡区微观组织发现,当焊速为 40 mm/m in 时,在前进侧热机械影响区,母材中被拉伸的晶粒沿着焊核呈流线型分布,在接近焊核区的附近区域,晶粒沿界面方向被拉长,为呈放射性的条状组织,且晶粒尺寸大于焊核中的晶粒尺寸,表明该区域的金属承受了较大的拉伸变形和热循环作用。焊速为 70 mm/m in 时,前进侧热机械区晶粒长大现象明显,与焊核区晶粒尺寸相差很大,母材晶粒的塑性变形程度较 40 mm/m in 时弱;当焊速为 100 mm/m in 时,在焊核区与热机械区交界处存在不规则的过渡区,在靠近焊缝底部的交界处,局部母材晶粒呈反向变形,这与焊接时的热输入较小有关。

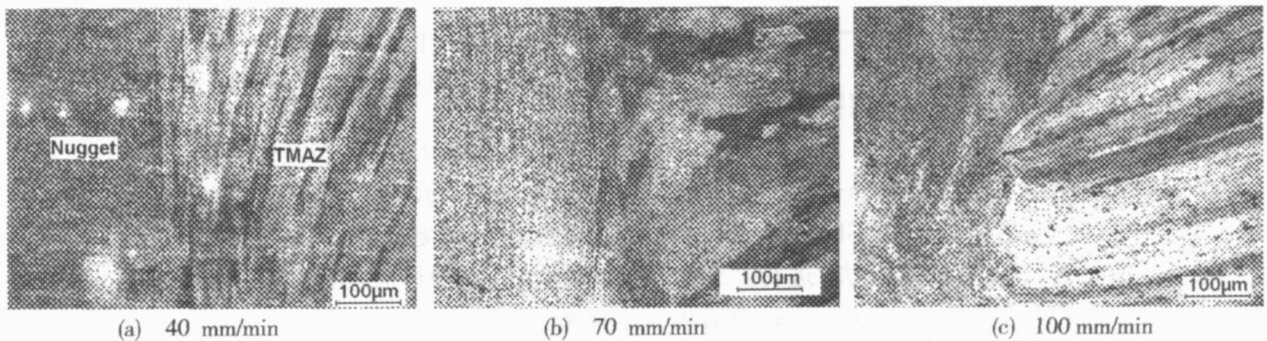


图 4 前进侧过渡区的微观组织结构

Fig 4 Microstructure of advancing side TMAZ and weld nugget

低周疲劳寿命主要有两部分:裂纹形成寿命和裂纹扩展寿命。对多个接头疲劳断口进行观察,发现断口处均有颈缩,裂纹源位于焊缝根部,即从根部缺陷或背面划痕处启裂,形成亚微观的疲劳裂纹,然后沿切应力方向穿透几个晶粒扩展,逐渐形成宏观裂纹,再沿与拉应力垂直的方向继续扩展直至断裂。搅拌摩擦焊焊接时,由于搅拌针的长度略小于板厚,所以在焊接时在试板对接面处容易出现“吻接”缺陷,这种缺陷用传统无损检测方法如 X 射线探伤、超声检测及染色渗透法等无法检测<sup>[5]</sup>。当焊接速度较小时,焊接热输入量充足,在整个厚度方向上对接面处的母材能充分塑化,相应的可以消除“吻接”这种弱连接现象,当焊接速度升高时,随着焊接线能量的降低,虽然可以得到良好的焊接接头,但是焊缝底部金属塑化程度不够,容易出现“吻接”缺陷。因此,在相同的应变幅下,焊接速度为 40 mm/m in 时的接头具有较长的裂纹萌生寿命。

虽然不同参数时接头的疲劳裂纹都沿前进侧热机械影响区与焊核区的过渡部分扩展,但是不同参数

时热输入量的不同,在前进侧过渡区呈现出不同的微观结构特征(图 4),低焊速时母材塑性流动较充分,从焊核区到母材过渡较均匀,低周疲劳试验时,疲劳裂纹扩展速度慢;当焊接速度较高时,前进侧塑化程度较低,焊核区与热机械影响区之间出现微观结构的突变,从而利于疲劳裂纹的扩展。

因此在相同应变变量下,转速为 400 r/m in 时,焊接速度为 40 mm/m in 时,接头的低周疲劳寿命长于较高焊速的接头。

### 3 结论

(1)当搅拌头旋转速度为 400 r/m in 时,焊接速度分别为 40、70 和 100 mm/m in 时,接头焊核区面积与焊核区晶粒度都随着焊接速度的增加而减小。

(2)当搅拌头旋转速度为 400 r/m in 时,焊速为 40 mm/m in 时的接头疲劳性能优于其他焊速。

(3)各参数下焊接接头的低疲劳裂纹均在接头底部启裂,沿前进侧热机械影响区与焊核区的过渡区域扩展至断裂,随着焊接速度的增加,接头应变疲劳裂纹的形成寿命和扩展寿命均减小。

## 参考文献

- 1 Rhodes C G, Mahoney M W, Flintoff J G et al Effect of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum. Scripta Materialia, 1997; 36(1): 69 ~ 71
- 2 Squillace A, De Fenzo A, Giorleo G et al A comparison between FSW and TIG welding techniques: modifications of microstructure and pitting corrosion resistance in AA2024 - T3 butt joints Journal of Materials Processing Technology, 2004; 152(1): 97 ~ 105
- 3 Rollin M, Collins E The use of friction welding technology in maritime application A. In: Jata K V, Mahoe M W. Aluminum 2001 - processing of the TMS 2001 aluminum automotive and joining sessions C Indianapolis, America: TMS, 2001: 189 ~ 195
- 4 Ericsson M, Sandstrom R Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and

- TIG International Journal of Fatigue, 2003; 25: 1 379 ~ 1 387
- 5 Cai Zhizhou, Yang Xinqi, Luan Guohong Effect of oxide array on the fatigue property of friction stir welds Scripta Materialia 2006; 54: 1 515 ~ 1 520
  - 6 Dickerson T L, Przydatek J Fatigue of friction stir welds in aluminum alloys that contain root flaws. International Journal of Fatigue, 2003; 25: 1 399 ~ 1 409
  - 7 Cavaliere P et al Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6056 joints produced by friction stir welding Journal of Materials Processing Technology, 2006; 180: 263 ~ 270
  - 8 徐灏. 疲劳强度. 北京: 高等教育出版社, 1988: 226 ~ 233

(编辑 李洪泉)

(上接第 65 页)

发生破坏的。扩张段先从大端开始破裂,这主要是由于扩张段大端纤维缠绕角较小,纤维主要提供母线方向强度,而在环向得到的纤维强度分量较小。图 5 是扩张段内压爆破破坏前后的照片,从整体外观上可以看出扩张段的破坏模式为沿一条母线整体断裂破坏,是一种较为理想的破坏形式,这说明设计合理、工艺得当。从断口处看,扩张段破坏同时包括纤维断裂、纤维拔出以及局部界面分层等多种破坏模式。

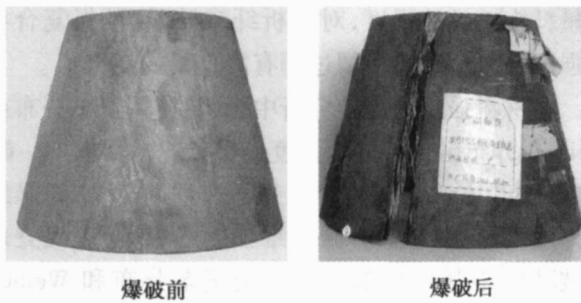


图 5 内压爆破前后扩张段照片

Fig 5 Photo of before and after Hydraulic bursting test

碳纤维单向缠绕 C/C 扩张段的轴向层间剪切强度与整体爆破压强均已达到或超过扩张段的使用指标,但是大端环向 LSS 与环向强度较低,而大端环向力学性能也是整个扩张段最弱点,这是由该工艺本身特点决定的,可以采取在远离燃气的扩张段外层增加大缠绕角缠绕层以提高扩张段环向力学性能。

## 5 结论

(1) 针对 C/C 扩张段特点和现存问题,将“锥形体单向纤维缠绕技术”应用于 C/C 扩张段成型探索研究中,通过一系列工艺实验制备出了 180 mm C/C 扩张段。

(2) C/C 扩张段性能测试结果为:超声探伤结果表明扩张段缺陷面积较小;母线方向的层间剪切强度较高,达到了 10 MPa 以上;内压爆破强度为 0.6 MPa,达到了扩张段的性能设计指标。

(3) 工艺实验及性能测试结果表明,碳纤维单向缠绕 C/C 扩张段成型技术是可行的。

## 参考文献

- 1 霍肖旭,曾晓梅,刘红林. C/C 复合材料及碳纤维增强塑料在固体火箭发动机喷管上的应用. 炭素技术, 2001; (3): 23 ~ 26
- 2 王增加. 锥形体单向纤维缠绕技术探索研究. 航天动力技术研究院硕士学位论文, 2004
- 3 王增加,李辅安,刘建超. 锥体结构单向纤维缠绕线型设计及程序设计研究. 玻璃钢/复合材料, 2005; (2): 34 ~ 37
- 4 肖翠蓉,唐羽章. 复合材料工艺学. 长沙:国防科技大学出版社, 1991
- 5 黄发荣,焦杨声. 酚醛树脂及其应用. 北京:化学工业出版社, 2003
- 6 张玉龙. 先进复合材料制造技术手册. 北京:机械工业出版社, 2003

(编辑 任涛)