

# 激光喷丸对 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头的影响

李 杰

(西安航空发动机(集团)有限公司,西安 710021)

**文 摘** 以 7075 铝合金试样的搅拌摩擦焊接头为对象,利用激光喷丸和常规喷丸工艺对其进行后续处理,通过试验对比分析了激光喷丸工艺对表面粗糙度、显微硬度、接头残余应力、裂纹扩展、疲劳寿命的影响。结果表明,经激光喷丸处理的搅拌摩擦焊接头的表面粗糙度远小于常规喷丸处理的接头表面,而对接头显微硬度的影响差异不大。激光喷丸可改变接头的残余应力分布,是增强搅拌摩擦焊接头抗疲劳性的有效方法,对其他焊接接头及构件的激光喷丸处理具有一定的参考价值。

**关键词** 激光喷丸,搅拌摩擦焊接头,抗疲劳性能

## Effects of Laser Peen on 7075 Aluminum Alloy Friction Stir Welding Joints

Li Jie

(Xi'an Aero-Engine (Group) LTD., Xi'an 710021)

**Abstract** The effect of laser peen and shot peen treatments on the friction stir welding (FSW) joints of 7075 aluminum alloy was investigated. The effect of these treatments on surface roughness, micro-hardness, residual stress, crack extension and fatigue life was analyzed. The test results show that the surface roughness of laser peened FSW joint is much better than that of shot peened FSW joint, the micro-hardness of FSW joints is similar for different treatments. The residual stress distribution of FSW joints can be changed by laser peen, so laser peen is an effective way to increase fatigue strength for FSW joints. The test results may serve as a reference for laser peen on some other welding joints and components.

**Key words** Laser peen, Friction stir welding joints, Fatigue performance

### 0 引言

近几年来激光喷丸在国外的航空制造领域中的发展很快并得到越来越广的应用。我国对激光喷丸工艺的研究起步也较早,目前正在进行激光喷丸工业应用方面的研究,有望在航空制造业首先得到推广应用。因此对该项技术展开跟踪研究,具有十分重要的现实意义<sup>[1-2]</sup>。

激光喷丸还被称为激光表面硬化或激光冲击处理。虽然,激光喷丸和常规喷丸都是能增强金属零件抗疲劳性能的工艺方法,但激光喷丸和常规喷丸的原理不同,作用也不相同,因此,所产生的效果也有所不同<sup>[1-2]</sup>。

搅拌摩擦焊是一种全新的高强度结合材料的焊接方法。同其他焊接方法相同,搅拌摩擦焊接头中的

残余应力同样会在材料的使用过程中导致裂纹的出现和增生,从而造成材料的失效,同时残余应力还会造成材料的应力腐蚀开裂。

应用激光喷丸或常规喷丸对搅拌摩擦焊的接头进行后续处理,是否能有效增强其抗疲劳性能是非常值得研究的课题。本文对 7075 铝合金利用激光喷丸和常规喷丸对搅拌摩擦焊接头进行后续处理,通过对实验结果的分析,以期得出有益的结论。

### 1 实验

#### 1.1 材料

7075 铝合金,尺寸为 1 220 mm × 400 mm × 6.35 mm;焊后样品按 SAE AMS - H - 6088 由 T651 状况时效到 T7351 状况。对两种试片在横向和纵向接头内均选择 5 个测试点,如图 1 所示。

收稿日期:2009 - 06 - 04

作者简介:李杰,1957 年出生,高级工程师,主要从事外贸技术与管理工作。E-mail: xae - tts@xaec.com

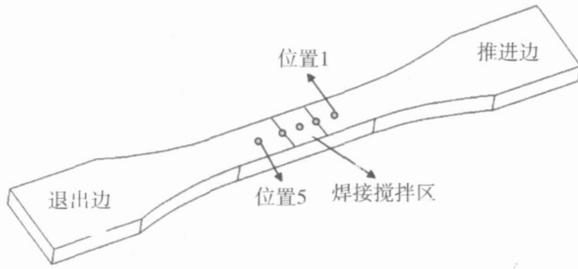


图 1 对比用搅拌摩擦焊试片及测试点示意图

Fig 1 FSW specimen and five measuring locations across weld

## 1.2 测试条件

### (1) 激光喷丸条件

涂敷层为  $76.2 \mu\text{m}$  的铝箔;约束层约为  $1 \text{ mm}$  厚的流动水覆盖;激光能量密度为  $4 \text{ GW}/\text{cm}^2$ ;持续时间为  $18 \text{ ns}$ ;疲劳裂纹生长试片的两面都做激光喷丸处理。

### (2) 常规喷丸条件

常规喷丸的丸粒为  $56.1 \mu\text{m}$  的玻璃珠;A 类强度为  $(0.008 \sim 0.012)A$ ;覆盖率为  $100\%$ 。

### (3) 疲劳寿命测试和对比条件

不同处理状态搅拌摩擦焊接接头疲劳裂纹扩展试片的尺寸规格和裂纹引入位置如图 2 所示。

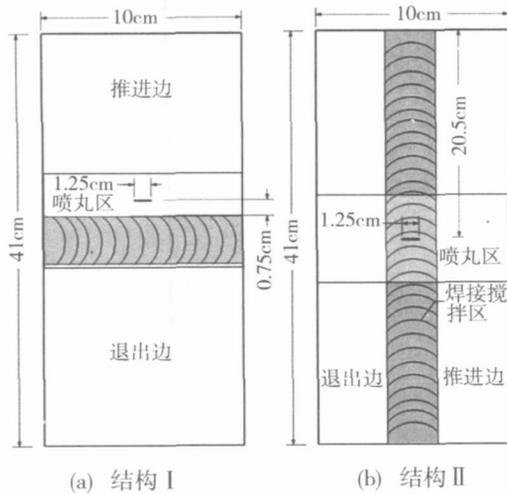


图 2 搅拌摩擦焊接接头疲劳裂纹扩展试片裂纹示意

Fig 2 Crack growth and crack location of FSW specimen

进行疲劳寿命测试和对比的条件为:室温,加载恒定振幅的轴向载荷(频率  $22 \text{ Hz}$ ,压比  $R=0.1$ ,最大载荷  $190 \text{ MPa}$ );在进行喷丸前,试片两边在焊接顶部铣加工去掉  $0.4 \text{ mm}$  的材料;焊缝位于试片正中,与加载方向垂直;研究的试片分为:激光喷丸、常规喷丸、激光和常规组合喷丸、无喷丸和非焊接基体材料。

### (4) 表面残余应力测定

http://www.yhclgy.com 宇航材料工艺 2010年 第1期

对喷丸的搅拌摩擦焊试片的表面残余压应力用 X-光衍射法测定。

## 2 结果分析

### 2.1 搅拌摩擦焊接头的微观结构

搅拌摩擦焊接头微观结构如图 3 所示<sup>[3~4]</sup>,由搅拌区、热-力影响区和热影响区三部分构成。

搅拌区:在该区域内,由于大的塑性变形和高温再结晶,晶粒通常是很细的等轴晶。

热-力影响区:该区域内的晶粒通常是拉伸的,并具有相当可观的扭曲变形,原因是该区域的温度低、变形小,未发生再结晶,晶粒由于机械的作用而发生变形。

热影响区:在该区域内由不受机械作用的影响,只有热影响,热影响区的大小取决于摩擦生热的大小。

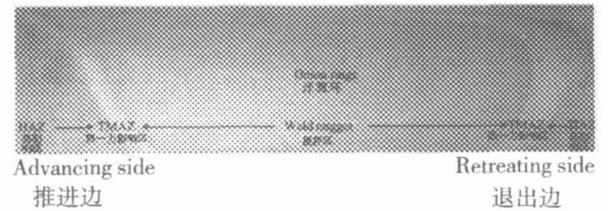


图 3 搅拌摩擦焊接头区域的微观结构图

Fig 3 Microstructure of FSW joint

### 2.2 激光喷丸和常规喷丸对搅拌摩擦接头的影响

#### 2.2.1 不同处理状态对显微硬度的影响

搅拌摩擦焊接头在不同喷丸处理状态下的显微硬度如图 4 所示<sup>[3~4]</sup>。从图 4 可见,在不同处理状态下,接头的显微硬度分布规律基本一致。说明常规喷丸、激光喷丸或组合喷丸,对 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头显微硬度影响的差异不大。

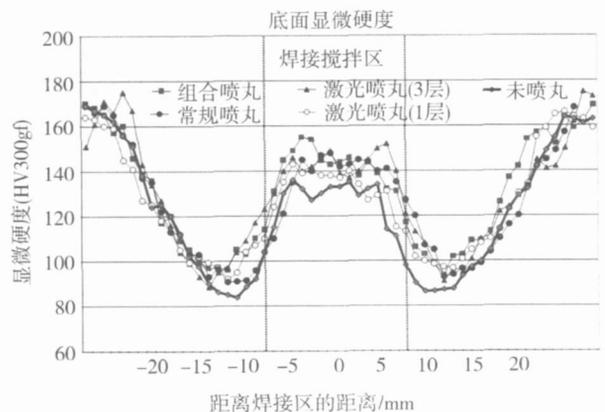


图 4 搅拌摩擦焊接头不同处理状态下显微硬度比较

Fig 4 Microhardness of FSW joint with different treatments

### 2.2.2 不同处理状态对表面粗糙度的影响

非喷丸搅拌摩擦焊表面,激光喷丸处理表面和常规喷丸处理表面的形态完全不同,如图 5 所示,表面粗糙度也不同。三种状况下平均表面粗糙度和最大表面粗糙度值对比见表 1,表面粗糙度显微示意图见图 6<sup>[3~4]</sup>。从表 1 和图 6 可看出:激光喷丸处理的搅拌摩擦焊表面粗糙度要远低于常规喷丸处理表面,表面粗糙度最大值与表面粗糙度平均值的差异也远小

于常规喷丸处理表面。

表 1 平均表面粗糙度和最大表面粗糙度值对比

Tab 1 Average and peak surface roughness values		
接头处理工艺	表面粗糙度	
	平均值 / $\mu\text{m}$	最大值 / $\mu\text{m}$
未喷丸	0.38	5.94
常规喷丸	7.59	73.7
激光喷丸	2.88	20.6

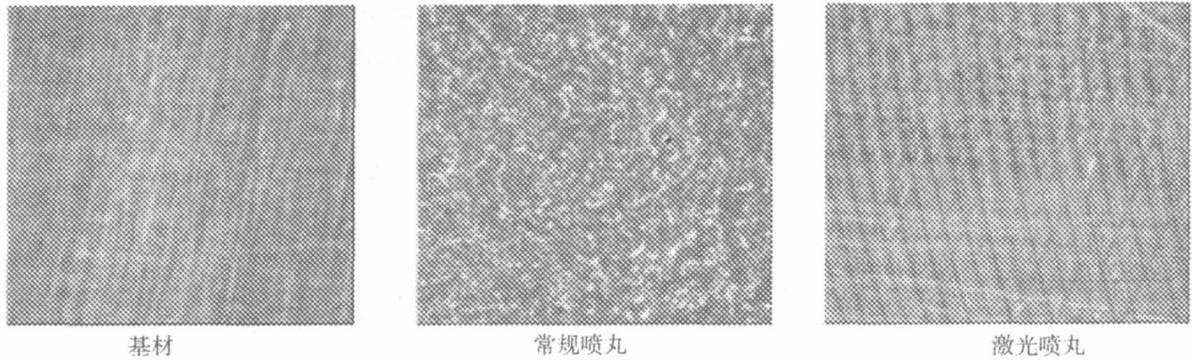


图 5 三种状况下搅拌摩擦焊表面粗糙度对比图

Fig 5 Surface roughness for three different treatments

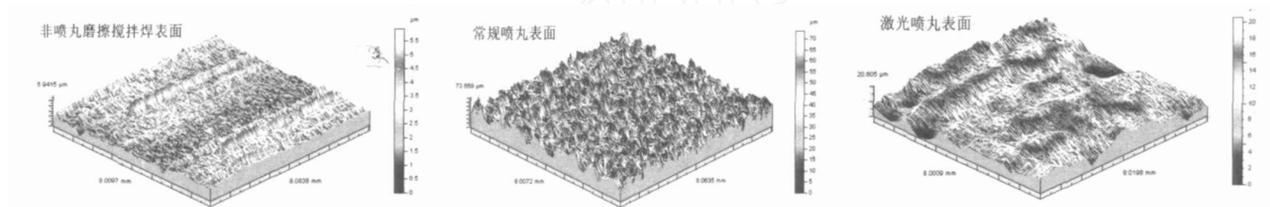


图 6 三种状况下搅拌摩擦焊表面显微示意图

Fig 6 Surface roughness of three kinds of FSW

### 2.2.3 激光喷丸对残余应力分布的影响

由于焊接搅拌区发生了高温再结晶,晶粒是细的等轴晶,因此该区的残余应力相对较低。而热-力影响区的晶粒通常是被拉伸的,并具有相当可观的扭曲

变形,所以该区的残余应力相对较高,并且该区的残余应力类型包含拉伸应力和压应力,且分布方向也较复杂。图 7 为搅拌摩擦焊试片厚度方向上的残余应力分布情况<sup>[3~4]</sup>。

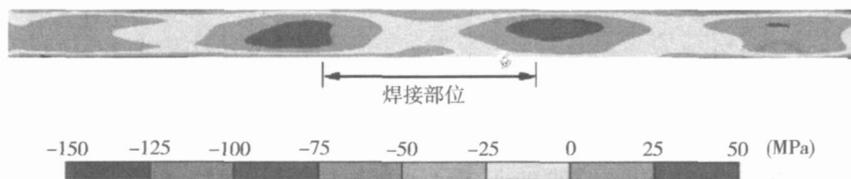


图 7 搅拌摩擦焊试片厚度方向上残余应力分布图

Fig 7 Residual stress along thickness line on FSW specimen

当对搅拌摩擦焊接头区域进行激光喷丸时,会引起接头热-力影响区原有残余应力的释放,与激光喷丸引入的压应力相互作用后会使该区的残余应力相对变低。而在焊接搅拌区,当激光喷丸引入压应力时

会引起细等轴晶较大的压缩变形,从而使该区域的残余应力在激光喷丸后变大。图 8 是经激光喷丸试片厚度方向上的残余应力分布<sup>[3~4]</sup>。由此可见,激光喷丸改变了搅拌摩擦焊接头的残余应力分布。

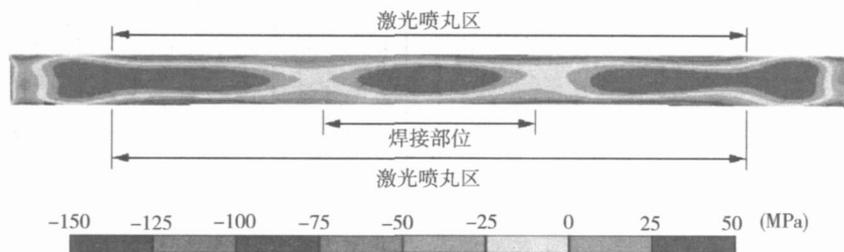


图 8 经激光喷丸处理的搅拌摩擦焊试片厚度方向上残余应力分布图

Fig 8 Residual stress along thickness line on FSW specimen after laser peen

### 2.2.4 不同处理状态对疲劳寿命的影响

在 190MPa 应力测试载荷条件下,不同状态下试片的疲劳寿命值对比见表 2<sup>[3-4]</sup>,可以看出常规喷丸对接头疲劳寿命的提高作用不明显。激光喷丸、激光+常规喷丸、多层激光喷丸的影响显著。因此,应用多层激光喷丸或组合喷丸可大大提高搅拌摩擦焊接头的疲劳寿命。

表 2 搅拌摩擦焊接头不同喷丸状态下的疲劳寿命值对比

Tab 2 Fatigue life of FSW specimens after different treatments

喷丸状态	失效循环次数
无喷丸	155,000
常规喷丸	160,000
激光喷丸(2层)	300,000
激光喷丸(2层)+常规喷丸	350,000
激光喷丸(3层)	380,000

### 2.2.5 不同处理状态下疲劳裂纹扩展对比

使用 7075 铝合金搅拌摩擦焊疲劳裂纹扩展试片进行对比试验所得结果如图 9 所示<sup>[3-4]</sup>。

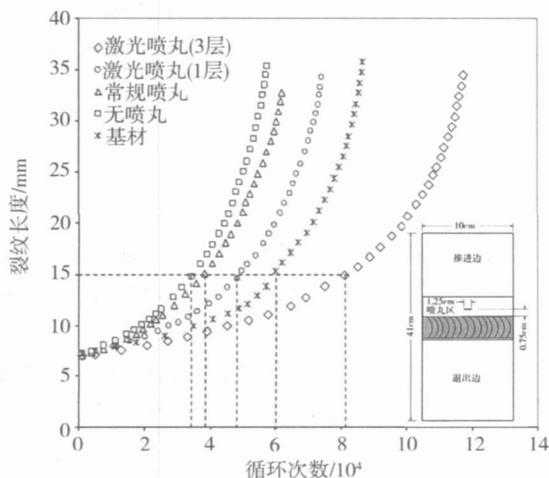


图 9 搅拌摩擦焊试片的疲劳裂纹扩展与循环次数关系图

Fig 9 Crack length vs number of cycles for FSW 7075 - T7351

可以看出:(1)未喷丸的搅拌摩擦焊试片与基材材料相比,具有更高的疲劳裂纹扩展率,说明搅拌摩擦焊对疲劳裂纹扩展率有明显的影响;

http://www.yhclgy.com 宇航材料工艺 2010年 第1期

(2)常规喷丸的搅拌摩擦焊试片的疲劳裂纹扩展率与基材材料相比也要高出很多,可见常规喷丸对接头抗疲劳性的作用有限;常规喷丸的疲劳裂纹扩展率与未喷丸试片相比有所降低,但降低幅度较小;

(3)对搅拌摩擦焊试片的疲劳裂纹扩展率,经 1 层激光喷丸的要低于常规喷丸和无喷丸试片,但依然高于基材材料;

(4)经 3 层激光喷丸的搅拌摩擦焊试片的疲劳裂纹扩展率与无喷丸的相比有明显的降低,在低循环条件下尤为显著。

### 3 结论

对于 7075 铝合金搅拌摩擦焊对基材的抗疲劳性有一定的影响,对疲劳裂纹扩展率有明显影响,因此需要做相应的后续处理。常规喷丸、激光喷丸或组合喷丸,对搅拌摩擦焊接头显微硬度的影响作用有限,显微硬度分布规律及大小基本一致。激光喷丸可以改变搅拌摩擦焊接头残余应力的分布,并且表面粗糙度要远小于常规喷丸的。常规喷丸及单层激光喷丸对搅拌摩擦焊接头抗疲劳性的作用有限,无法大幅度提高搅拌摩擦焊接头的抗疲劳性。对于搅拌摩擦焊接头的焊接搅拌区,激光喷丸后的作用明显。经多层激光喷丸后,搅拌摩擦焊接头材料的抗疲劳性大幅度提高。说明激光喷丸是增强搅拌摩擦焊接头抗疲劳性的有效方法。

### 参考文献

- 1 李杰. 先进激光喷丸工艺原理及特点分析. 航空动力技术, 2008; (4): 3
- 2 李杰. 增强飞机和航空发动机零件抗疲劳性能的激光喷丸工艺. 航空科学技术, 2009; (1): 3
- 3 Omar Hatamleh, PhD. Effects of laser and shot peening on fatigue life in friction stir welds In: 9<sup>th</sup> international fatigue congress Atlanta-Georgia, 2006
- 4 Omar Hatamleh, PhD. Effects of laser and shot peening on fatigue crack growth in friction stir welds In: International conference on residual fatigue life and life time extension of in-service structures, Paris-France, 2006

(编辑 李洪泉)