

# 超声喷丸强化搅拌摩擦焊接接头性能

## Properties of Friction Stir Welding Joint by Ultrasonic Shot Peening

北京航空制造工程研究所 张新华 曾元松  
天津大学材料科学与工程学院 王东坡

**[摘要]** 采用超声喷丸焊后处理工艺分别对 7075-T651 铝合金母材及搅拌摩擦焊焊接接头进行了处理, 并与其原始状态进行了疲劳对比试验。对比疲劳性能试验结果证明该处理技术可用于提高 7075-T651 铝合金母材及搅拌摩擦焊焊接接头试件的疲劳性能。

**关键词:** 超声喷丸 7075-T651 铝合金 搅拌摩擦焊焊接接头 疲劳性能

**[ABSTRACT]** The processing of hardening effectiveness by ultrasonic shot peening is used to deal with base metals of 7075-T651 aluminum alloy and joint of friction stir welding, and is then compared with its original condition in fatigue comparative test. The result of the test of fatigue property shows that ultrasonic shot peening is available for improving the fatigue property of base metals of 7075-T651 aluminum alloy and specimen of friction stir welding joint.

**Keywords:** Ultrasonic shot peening 7075-T651 aluminum alloy Joint of friction stir welding Fatigue property

7075-T651 是 Al-Zn-Mg-Cu 系超硬铝, 具有高的比强度和比刚度、较好的耐腐蚀性和较高的韧性等优点, 是航空、航天、兵器、交通运输等行业最重要的结构材料之一。该材料常用于飞机结构件及其他要求强度高的高应力结构件中, 充分展示了其在航空航天工业广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。

搅拌摩擦焊(FSW)<sup>[4]</sup> 是英国焊接研究所针对焊接性差的铝合金发明的一种固相连接新工艺, 具有连接温度低、焊后残余应力小、接头性能高等一系列优点<sup>[5]</sup>。近年来, 航天、军工和汽车等行业对熔焊性差的高强铝合金等特殊材料的需求量不断增加, 推动了搅拌摩擦焊接技术的发展。

超声喷丸(USSP) 是一种较新的材料表面改性方法。其与普通喷丸的主要区别在于弹丸是从各方向以超声频撞击已被固定的材料表面的。由于其引入材料内部

的能变较大, 常用于实现材料表面纳米化, 降低氮化温度等用途。该方法具有实施方便、效果显著、适应面广、消耗低等多种优势, 在飞机、坦克、汽车和各种机械设备的齿轮、轴承、焊接件、弹簧、涡轮盘、叶片及模具、切削工具等的表面清理和提高使用寿命与防腐能力方面发挥了重要的作用, 取得了令人满意的效果<sup>[6-10]</sup>。本课题将超声喷丸方法应用于 7075-T651 铝合金母材及搅拌摩擦焊焊接接头, 着重研究超声喷丸技术对于 7075-T651 铝合金疲劳性能的影响。

### 1 试验材料及方法

#### 1.1 试验材料

试验用 7075-T651 铝合金化学成分及机械性能指标见表 1、2, 母材及搅拌摩擦焊试验件由中国搅拌摩擦焊中心提供, 接头疲劳试件尺寸如图 1、2 所示。

表 1 7075-T651 铝合金化学成分 w/%

| Mn      | Mg      | Cr       | Fe  | Si  | Ti  | Cu      | Zn      | Al |
|---------|---------|----------|-----|-----|-----|---------|---------|----|
| 1.8~2.3 | 4.5~5.6 | 0.1~0.28 | 0.5 | 0.4 | 0.2 | 1.2~2.0 | 5.1~6.1 | 其余 |

表 2 7075-T651 铝合金机械性能参数

| 弹性模量<br>$E/\text{GPa}$ | 抗拉强度<br>$\sigma_b/\text{MPa}$ | 屈服强度<br>$\sigma_s/\text{MPa}$ | 密度<br>$\rho/(\text{g}\cdot\text{mm}^{-3})$ | 延伸率<br>$\delta/\%$ |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|--------------------|
| 71                     | 538                           | 462                           | 2.8  | 9                  |

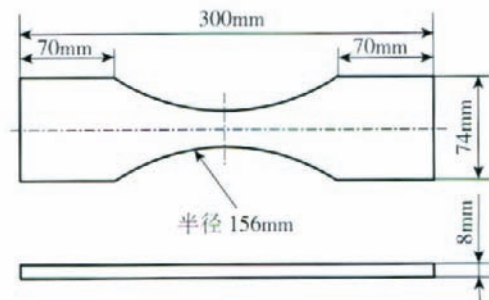


图 1 母材疲劳试件几何形状与尺寸

Fig.1 Geometric form and demission of the base metal fatigue specimen

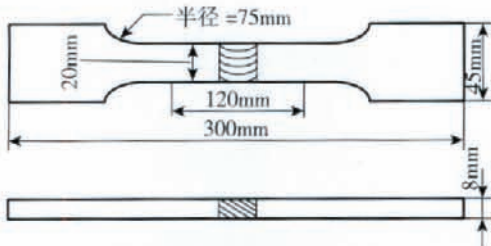


图2 搅拌摩擦焊接头疲劳试件几何形状与尺寸  
Fig.2 Geometric form and demission of friction stir welding joint of fatigue specimen

1.2 超声喷丸处理工艺

采用超声喷丸机对 7075-T651 铝合金试件进行处理,加工参数如表 3 所示。

表 3 7075-T651 铝合金超声喷丸强化参数

| 喷丸参数组合 | 冲击时间 /s | 喷丸强度 /mm |
|--------|---------|----------|
| M12    | 24      | 0.57A    |

疲劳试验在 200kN 高频疲劳试验机上进行,试验机静载精度满量程为 ±0.5%,动载振幅波动度满量程为 ±1%。施加载荷情况:载荷类型均为拉伸载荷,采用的应力比为 R=0.1。

2 试验结果与讨论

2.1 疲劳试验数据的统计方法

根据国际焊接学会(IIW)的有关文件<sup>[1-3]</sup>,采用如下统计方法对各种焊接接头的相应疲劳试验数据进行处理,该统计处理方法的特点如下:

假设疲劳试验结果符合对数正态分布,用具有相

表 4 7075-T651 超声喷丸前后母材试件疲劳试验结果(R=0.1)

| 试件编号 | 疲劳寿命 N/周    | 范围应力 Δσ/MPa | 试件编号 | 疲劳寿命 N/周    | 范围应力 Δσ/MPa |
|------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|
| A1   | 62 516      | 225         | B1   | 133 352     | 198         |
| A2   | 92 353      | 216         | B2   | 345 649     | 189         |
| A3   | 78 364      | 207         | B3   | 985 347     | 180         |
| A4   | 145 189     | 198         | B4   | 613 859     | 171         |
| A5   | 261 204     | 180         | B5   | 2 654 051   | 162         |
| A6   | 6 556 757   | 180         | B6   | 227 502     | 216         |
| A7   | 2 692 224   | 162         | B7   | 612 467     | 189         |
| A8   | >10 253 867 | 198         | B8   | 2 989 345   | 162         |
| A9   | 61 462      | 189         | B9   | 3 301 126   | 157.5       |
| A10  | 253 481     | 225         | B10  | >10 343 987 | 198         |

同斜率 m,且分别对应 K 倍正负标准差的两条标称 S-N 曲线形成数据分散带。使试验数据在某一置信度下以一定概率落在此分散带内。其中 K 为与试验数据数量落在分散带内概率及相应置信度密切相关的一个参量,称之为特征值。IIW 指定存活概率为 95%,置信度为 75%。标称值可通过下述程序计算出:

(1) 计算所有疲劳试验数据点的应力范围 Δσ、循环次数 N 以 10 为底的对数值。

(2) 采用幂函数模型回归计算指数 m 和常数 logC 值:

$$m \log \Delta \sigma + \log N = \log C \quad (1)$$

(3) 设 C<sub>i</sub> 是试验数据的对数值,利用所获得的 m 值,计算 logC 的平均值 C<sub>m</sub> 和标准偏差 stdv:

$$C_m = \frac{\sum C_i}{n} \quad (2)$$

$$stdv = \sqrt{\frac{\sum (C_m - C_i)^2}{n - 1}} \quad (3)$$

(4) 计算特征值 C<sub>k</sub>:

$$C_k = C_m - K \cdot stdv \quad (4)$$

2.2 疲劳试验结果及分析

7075-T651 母材的疲劳试验结果列于表 4 中。其中, A 组为原始母材, B 组为经超声喷丸处理的母材试样。7075-T651 搅拌摩擦焊接头原始焊态试件的疲劳试验结果见表 5。超声喷丸接头试件的疲劳试验结果见表 6。

根据对比疲劳试验结果(表 4-6),按方程 S<sup>m</sup>N=C 分别拟合出超声喷丸处理前后母材及搅拌摩擦焊接接头试件的相应 S-N 曲线,绘于图 3,拟合结果列于表 7 中。按疲劳强度的常规测试方法确定了超声喷丸处理前后母材以及搅拌摩擦焊试件在循环周次为 2 × 10<sup>6</sup> 时

表 5 7075-T651 搅拌摩擦焊接接头原始焊态试件疲劳试验结果(R=0.1)

| 试件编号 | 疲劳寿命 N/周 | 范围应力 Δσ/MPa | 断裂位置 |
|------|----------|-------------|------|
| 1    | 0.684    | 160         | 母材   |
| 2    | 0.241    | 150         | 焊缝   |
| 3    | 4.462    | 140         | 母材   |
| 4    | 0.524    | 180         | 母材   |
| 5    | 0.103    | 170         | 焊缝   |
| 6    | 0.066    | 190         | 焊缝   |
| 7    | 0.166    | 160         | 焊缝   |
| 8    | 0.159    | 140         | 焊缝   |
| 9    | 3.952    | 130         | 母材   |
| 10   | 0.742    | 150         | 母材   |

的疲劳强度值,结果列于表 8。

从表 4~6 及图 3 可知:应力比  $R=0.1$  条件下,7075-T651 铝合金搅拌摩擦焊焊接接头的疲劳强度较母材本身有所降低,经超声喷丸处理后其疲劳性能基本与母材

表 6 7075-T651 搅拌摩擦焊焊接接头超声喷丸试件疲劳试验结果 ( $R=0.1$ )

| 试件编号 | 疲劳寿命 $N$ /周 | 范围应力 $\Delta\sigma$ /MPa | 断裂位置 |
|------|-------------|--------------------------|------|
| 1    | 0.871       | 160                      | 焊缝   |
| 2    | 3.670       | 150                      | 母材   |
| 3    | 0.412       | 180                      | 母材   |
| 4    | 0.351       | 170                      | 焊缝   |
| 5    | 1.897       | 160                      | 母材   |
| 6    | 0.196       | 180                      | 焊缝   |
| 7    | 0.159       | 190                      | 母材   |
| 8    | 0.519       | 170                      | 母材   |
| 9    | 0.819       | 165                      | 母材   |
| 10   | 2.110       | 155                      | 母材   |

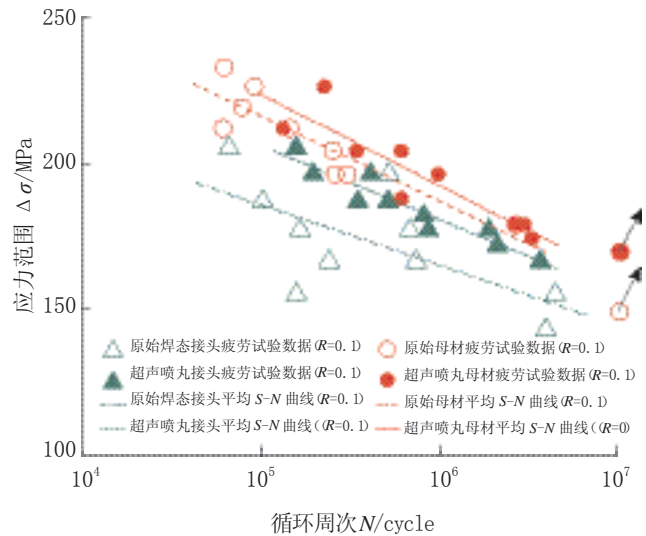


图 3 7075-T651 铝合金母材及搅拌摩擦焊焊接接头对比  $S-N$  曲线 ( $R=0.1$ )

Fig.3 Comparative curve  $S-N$  of base metal of 7075-T651 aluminum alloy and friction stir welding joint ( $R=0.1$ )

表 7 拟合  $S-N$  曲线参数表

| 处理状态 | 接头形式 | 应力比       | 焊接方法  | 指数 $m$ | 平均值 $C_m$              | 特征值 $C_k$              | 标准偏差 $Stdv$ |
|------|------|-----------|-------|--------|------------------------|------------------------|-------------|
| 原始母材 | —    | $R = 0.1$ | —     | 13.0   | $2.495 \times 10^{35}$ | $2.559 \times 10^{33}$ | 0.736 6     |
| 喷丸母材 |      |           |       | 12.1   | $2.138 \times 10^{33}$ | $6.457 \times 10^{31}$ | 0.562 8     |
| 原始焊态 | 对接   |           | 搅拌摩擦焊 | 18.3   | $5.821 \times 10^{45}$ | $7.047 \times 10^{43}$ | 0.709 7     |
| 喷丸接头 |      |           |       | 14.8   | $5.728 \times 10^{38}$ | $2.307 \times 10^{38}$ | 0.146 3     |

表 8 疲劳强度结果对比

| 处理状态 | 接头形式 | 应力比     | 循环周次为 $2 \times 10^6$ 条件下疲劳强度 $\Delta\sigma$ /MPa | 提高效果 /% |
|------|------|---------|---|---------|
| 原始母材 | —    | $R=0.1$ | 158   | 5.06    |
| 喷丸母材 |      |         | 166   |         |
| 原始焊态 | 对接   |         | 143   | 9.09    |
| 喷丸接头 |      |         | 156   |         |

表 9 疲劳寿命结果对比

| 处理状态 | 应力范围 $\Delta\sigma_1$ /MPa | 循环周次为疲劳寿命 $N_1$ /周 | 应力范围 $\Delta\sigma_2$ /MPa | 疲劳寿命 $N_2$ /周      |
|------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|
| 原始母材 | 203                        | $1.0 \times 10^5$  | 145                        | $7.97 \times 10^6$ |
| 喷丸母材 | 203                        | $1.73 \times 10^5$ | 145                        | $1.0 \times 10^7$  |
| 原始焊态 | 169                        | $1.0 \times 10^5$  | 140                        | $2.99 \times 10^6$ |
| 喷丸接头 | 169                        | $6.24 \times 10^5$ | 140                        | $1.0 \times 10^7$  |

相当。

对比图 3 中相应  $S-N$  曲线及表 8 中超声喷丸处理试件与原始状态试件在循环寿命为  $2 \times 10^6$  条件下获得的疲劳强度值。结果表明:在应力比  $R=0.1$  条件下,7075-T651 铝合金超声喷丸母材与原始母材相比疲劳强度提高了 5.06%;7075-T651 铝合金搅拌摩擦焊接接头超声喷丸试件与原始焊态相比疲劳强度的改善程度高达 9.09% 左右。

为了获得在相同应力水平下超声喷丸处理前后试件的疲劳寿命的变化情况,将超声喷丸处理 7075-T651 铝合金母材及搅拌摩擦焊接接头试件在寿命为  $10^7$  次时所对应应力范围下原始状态试件的疲劳寿命以及原始状态试件在寿命为  $10^5$  次时所对应应力范围下的超声喷丸处理试件的疲劳寿命列于表中 9。对比表 9 中相应数据,粗略估计在应力比  $R=0.1$  条件下,7075-T651 铝合金母材经过超声喷丸处理后,其疲劳寿命延长为原来的 1~2 倍;搅拌摩擦焊接接头经过超声喷丸处理后,疲劳寿命延长为原来的 3~7 倍。

试验证明可以利用超声喷丸处理技术提高铝合金母材及搅拌摩擦焊接接头试件的疲劳性能。分析其原因有如下几点:

(1) 超声喷丸处理在材料的表面形成了性能优异的强化层,该强化层能够有效阻止疲劳裂纹在材料表面的形成;

(2) 超声喷丸处理有助于消除材料表层可能存在的各种缺陷,钝化次表层存在的缺陷,这些缺陷即为小裂纹或是裂纹形成的核心;

(3) 超声喷丸处理可以消除材料加工成型过程中引入的对疲劳性能有害的拉应力,并引入有利于提高疲劳性能的压应力层。

### 3 结论

(1) 应力比  $R=0.1$  条件下,7075-T651 铝合金搅拌摩擦焊接接头的疲劳强度较母材本身有所降低,经超声喷丸处理后其疲劳性能与母材相当。

(2) 在应力比  $R=0.1$  加载条件下,7075-T651 铝合金超声喷丸母材与原始母材相比疲劳强度提高了 5.06%,寿命延长为原来的 1~2 倍;超声喷丸处理使 7075-T651 铝合金搅拌摩擦焊接接头疲劳强度提高约 9.09%,寿命延长 3~7 倍。

(3) 超声喷丸处理技术可显著提高 7075-T651 铝合金母材及搅拌摩擦焊接接头试件的疲劳性能,可应用该技术改善搅拌摩擦焊接接头的疲劳性能。

### 参 考 文 献

[1] Maddox S J. Fatigue of steel fillet welds hammer peened under load. *Welding In the World*, 1998, 41: 343-349.

[2] Hobbacher A. Basic philosophy of the new IIW recommendations on fatigue design of welded joints and components. *Welding In the World*, 1997, 39(5): 271-278.

[3] Gurney T R. 焊接结构疲劳. 周店群,译. 北京:机械工业出版社,1998.

[4] Magnusson L, Kallman L. Mechanical properties of friction stir welds in thin sheet of aluminium 2024, 6013 and 7475. Second International Symposium on FSW, Gothenburg, Sweden, 2000.

[5] Guo F A, Trannoy N, Characterization J Lu. Characterization of the thermal properties by scanning thermal microscopy in ultrafine-grained iron surface layer produced by ultrasonic shot peening. *Materials Chemistry and Physics*, 2006, 96: 59-65.

[6] Xing F A, Lu J. An experimental study of residual stress induced by ultrasonic shot peening. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 152: 56-61.

[7] Wang Xiaowei, Wang Jingyang, Wu Ping, et al. The investigation of internal friction and elastic modulus in surface nanostructured materials. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 370: 158-162.

[8] Liu G, Lu J, Lu K. Surface nanocrystallization of 316L stainless steel induced by ultrasonic shot peening. *Materials Science and Engineering A*, 2000, 286: 91-95.

[9] Xue Y, McDowell D L, Horstemeyer M F, et al. Microstructure-based multistage fatigue modeling of aluminum alloy 7075-T651. *Engineering Fracture Mechanics*, 2007, 74: 2 810-2 823.

[10] Campbell C E, Bendersky L A, Boettinger W J, et al. Microstructural characterization of Al-7075-T651 chips and work pieces produced by high-speed machining. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 430: 15-26. (责编 玉龙)

(上接第 86 页)

[3] 沙爱学,李兴无. 热处理工艺参数对 TC18 钛合金显微组织和力学性能的影响. *材料工程*, 2002, 增 208: 23-26.

[4] 盛险峰,丁志文,朱益藩. 变形量和热处理工艺对 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe 钛合金组织和性能的影响. *金属学报*, 1999, 35 (Suppl. D): S465-S468.

[5] 沙爱学,李兴无,王庆如. 热变形温度对 TC18 钛合金显微组织和力学性能的影响. *中国有色金属学报*, 2005, 15(Suppl. 8): S1 161-S1 163.

[6] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册(第 4 卷),2 版. 北京:中国标准出版社 2002.

[7] 李兴无,沙爱学. TC18 钛合金显微组织和力学性能的时效温度敏感性研究. *稀有金属材料科学与工程*, 2005, 34 (Suppl. 3): S417-S4420.

[8] 沙爱学,王庆如. 航空用高强度结构钛合金的研究发展及应用. *稀有金属*, 2004, 28 (Suppl. D): S327-S340. (责编 小颖 玉龙)