

# 喷丸成形压力对 7B50-T7751 铝合金力学性能的影响

尹佳, 胡彦华, 徐刚, 张炜, 姜伟

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

**摘要:** **目的** 研究 7B50-T7751 铝合金在不同喷丸成形压力下力学性能的变化规律, 探究喷丸成形压力对材料表面形貌、疲劳寿命及静力性能的影响。**方法** 在不同的喷丸成形压力(0.42、0.50 MPa)下对 7B50-T7751 铝合金进行处理, 分析材料的表面形貌。在此基础上, 通过细节额定疲劳基准值和截止值进行计算, 并进行压缩试验, 结合铝合金材料在喷丸前后应变层的位错密度和形态, 分析喷丸成形压力对合金材料疲劳寿命和静力性能的影响。**结果** 与未喷丸试件相比, 在 0.42 MPa 的成形压力下, 合金材料的疲劳寿命和静力性能均有所提高。喷丸成形之后, 材料表层引入了一定深度的残余压应力层, 形成位错密度较大的加工硬化组织, 阻碍裂纹扩展, 宏观上提高了材料的强度。在 0.50 MPa 的成形压力下, 材料表面更加粗糙, 裂纹易在晶粒连接薄弱处萌生, 导致合金材料的疲劳寿命有所降低。**结论** 随着喷丸成形压力的增大, 合金材料的疲劳寿命先增大后减小, 抗压强度有所增大。在 0.50 MPa 的成形压力下, 部分裂纹易于在弹坑边缘萌生, 在一定程度上会降低合金材料的疲劳强度。

**关键词:** 喷丸成形压力; 7B50-T7751 铝合金; 力学性能; 疲劳寿命; 抗压强度

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.04.009

**中图分类号:** TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2023)04-0074-09

## Effects of Shot Peening Forming Pressure on Mechanical Properties of 7B50-T7751 Aluminum Alloy

YIN Jia, HU Yan-hua, XU Gang, ZHANG Wei, JIANG Wei

(AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the change law of mechanical properties of 7B50-T7751 aluminum alloy under different shot peening forming pressure, investigate and the effects of shot peening forming pressure on the surface morphology, fatigue life, and static properties of the material. The 7B50-T7751 aluminum alloy was treated under different shot peening forming pressure (0.42, 0.50 MPa), and the surface morphology of the material was analyzed. Based on this, the effects of shot peening forming pressure on the fatigue life and static properties of the material were analyzed through base and cutoff values calculated through the detailed fatigue rating (DFR) method, as well as compression tests, combined with the dislocation density and morphology of the strain layer before and after shot peening. Compared with the unpeened specimens, the fatigue life and static

收稿日期: 2022-03-20

Received: 2022-03-20

作者简介: 尹佳 (1981—), 男, 硕士。

**Biography:** YIN Jia (1981-), Male, Master.

**引文格式:** 尹佳, 胡彦华, 徐刚, 等. 喷丸成形压力对 7B50-T7751 铝合金力学性能的影响[J]. 精密成形工程, 2023, 15(4): 74-82.

YIN Jia, HU Yan-hua, XU Gang, et al. Effects of Shot Peening Forming Pressure on Mechanical Properties of 7B50-T7751 Aluminum Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(4): 74-82.

properties of the alloy were improved under forming pressure of 0.42 MPa. After shot peening, a residual compressive stress layer of certain depth was introduced into the surface layer of the material, forming a work-hardened structure with high dislocation density, hindering crack growth, and improving the strength of the material macroscopically. Under forming pressure of 0.50 MPa, the surface of the material became rougher, and cracks were prone to initiate at weak grain connections, resulting in a decrease in the fatigue life of the alloy material. With the increase of the shot peening forming pressure, the fatigue life of the alloy material increases first and then decreases, and the compressive strength increases to some extent. Under forming pressure of 0.50 MPa, some cracks are prone to initiate at the edge of the crater, which to some extent reduces the fatigue strength of the alloy material.

**KEY WORDS:** shot peening forming pressure; 7B50-T7751 aluminum alloy; mechanical properties; fatigue life; compressive strength

7B50-T7751 铝合金是在 7050 铝合金的基础上通过增大 Cu 元素的含量及 Zn 与 Mg 的比例等方法而研制的新型高强度铝合金,其具有密度低、比强度高、加工性能好等特点,是用于制造飞机整体框架、梁、接头等关键承力结构件的理想材料<sup>[1-5]</sup>。结合开发的 T77 三级时效热处理工艺,在强度达到 600 MPa 以上时,该合金还具有优良的断裂韧性、抗应力腐蚀性能及良好的淬透性<sup>[6-10]</sup>。由于疲劳断裂一般始于零件表面,采用合理的表面强化工艺可有效提高铝合金的抗疲劳性能,其中使用最多的是喷丸技术。喷丸技术通过在零件表面引入残余压应力场,可以抵消疲劳载荷中的部分拉应力,并使零件表面产生加工硬化,可有效提高铝合金的疲劳极限<sup>[11]</sup>。残余压应力场在改善材料表层组织结构及性能的同时,也会对材料的静力性能产生影响。研究表明,随着喷丸强度的提高,残余压应力场深度和最大残余压应力深度均呈逐渐增大的趋势。然而,过高的喷丸强度导致喷丸后工件表面的粗糙度增大,甚至使工件表面产生微裂纹,不利于合金材料力学性能的提高<sup>[12-15]</sup>。因此,文中选取 7B50-T7751 铝合金为研究对象,通过细节疲劳额定强度试验和压缩性能试验研究喷丸成形压力对合金材料疲劳性能及静力性能的影响规律,为喷丸参数优选提供参考,以期改善飞机结构件的力学性能。

## 1 试验

### 1.1 试验材料与试件制备

试验采用的 7B50-T7751 铝合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 系高强高韧铝合金,由纯 Al、纯 Zn、纯 Mg、

Al-Cu 及 Al-Zr 中间合金等原料配比熔炼而成,成分见表 1。

图 1 为 7B50-T7751 铝合金的微观组织,可以看到,材料表面晶粒大小均匀,同时合金晶界处存在大量细小的第二相及粗大的未溶相。大部分相衬度较暗,而衬度较亮的为非平衡相,在  $\alpha$  固溶体基体上分布着残留 S 相 ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$  相) 和不溶的  $\text{Al}(\text{Mn})\text{SiFe}$  相。

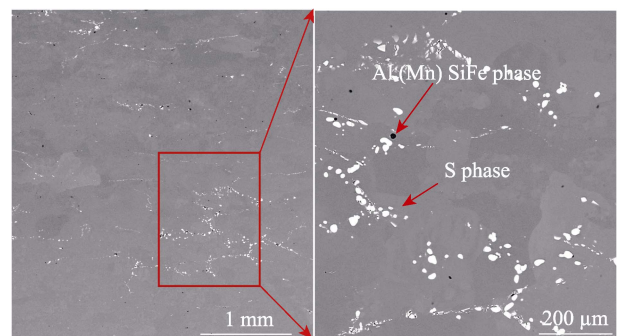


图 1 7B50-T7751 铝合金微观组织  
Fig.1 Microstructure of 7B50-T7751 alloy

为研究喷丸工艺参数对 7B50-T7751 铝合金材料疲劳性能的影响,采用成形压力分别取 0.42、0.50 MPa 的方案制备试件,经喷丸成形后对试件进行喷丸强化处理,具体参数见表 2。

对不同压力成形的喷丸试件进行力学性能测试,依据 HB7110—1994 及试验条件,疲劳试件沿坯料厚度为 40 mm 的板材轧制方向取料加工,试件的具体几何尺寸如图 2 所示。

依据《金属材料室温压缩试验方法》(GB/T 7314—2017)中规定的试件标准对试件进行加工,压缩试件的几何尺寸如图 3 所示。

表 1 7B50-T7751 合金化学成分  
Tab.1 Chemical composition of 7B50-T7751 alloy

Element	Si	Fe	Zn	Cu	Mn	Mg	Cr	Zr	Al
Mass fraction/%	0.10	0.10	6.48	2.06	0.10	2.24	0.04	0.09	Bal.

表2 喷丸成形及强化工艺参数  
Tab.2 Process parameters of shot peening and strengthening process

The forming pressure/MPa	Strengthening process parameters
0.42	Coverage rate: 100%; Shot peening flow rate: 8 kg/min; Moving speed of the nozzle: 3 m/min; Shot peening intensity: 0.1-0.2 mmA
0.50	Coverage rate: 100%; Shot peening flow rate: 8 kg/min; Moving speed of the nozzle: 3 m/min; Shot peening intensity: 0.1-0.2 mmA

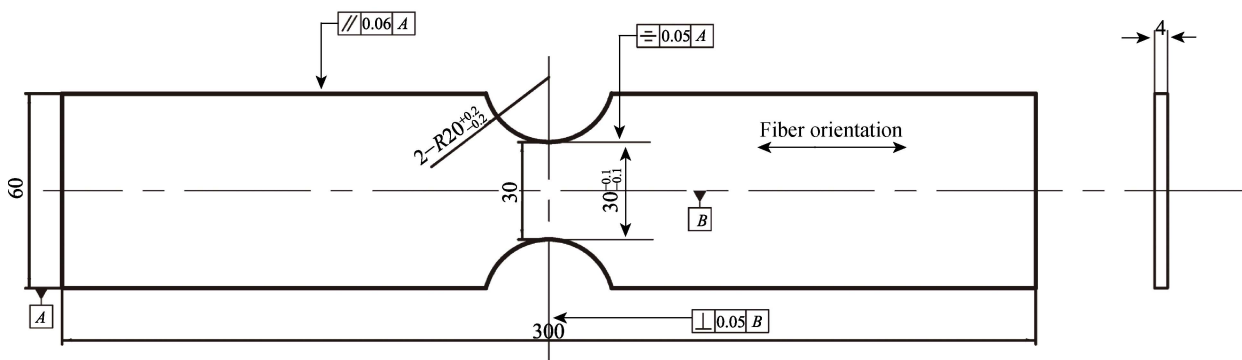


图2 疲劳试件几何尺寸(单位: mm)  
Fig.2 Geometric dimension of the fatigue specimen (unit: mm)

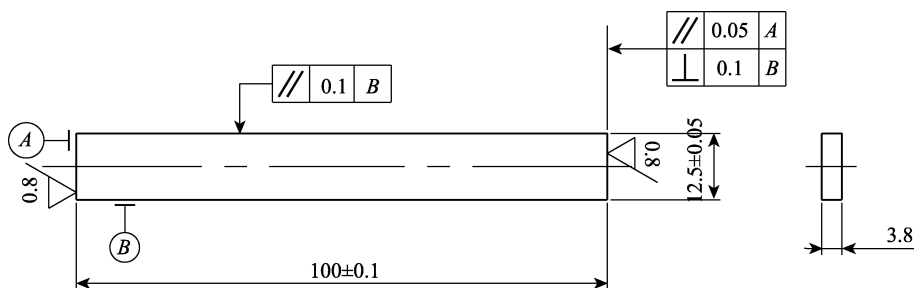


图3 压缩试件几何尺寸(单位: mm)  
Fig.3 Geometric dimension of the compressed specimen (unit: mm)

### 1.2 疲劳试验方法

细节疲劳额定值法 (Detail Fatigue Rating, DFR) 是基于概率疲劳的结构疲劳可靠性寿命分析方法之一。本试验采用 Instron 50 kN 疲劳试验机, 试验频率为 15 Hz, 应力比为 0.06, 试验波形为正弦波, 实验室温度保持在 20 °C 左右。

DFR 试验数据处理方法如下: 依据 HB7110—1994, 按照威布尔分布分别求出各组试验数据的特征寿命  $\beta$ , 如式 (1) 所示。

$$\beta = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i^\alpha \right]^{1/\alpha} \quad (1)$$

$$P_{DFR-cutoff} = \frac{0.94S_{mo}}{0.94S_{mo} / \sigma_{max} S^{(5-\lg N)} - (0.47S^{(5-\lg N)} - 0.53) - (0.028S^{(5-\lg N)} + 0.0318)} \quad (3)$$

式中:  $S_{mo}$  为破坏应力;  $\sigma_{max}$  为最大应力;  $S$  为 S-N 曲线的斜度参数, 对于 7B50-T7751 铝合金,  $S=2$ , 应力幅值为 0 时的破坏应力  $S_{mo}=310$  MPa。

### 1.3 静力性能测试及表征方法

采用 GNT100 电子式万能材料试验机在室温下

式中:  $\beta$  为特征寿命;  $n$  为试样个数;  $N$  为疲劳试样寿命;  $\alpha$  为形状参数, 对于 7B50-T7751 铝合金,  $\alpha=4$ 。

按照式 (2) 求可靠度  $R=95\%$ 、置信度  $C=95\%$  时的疲劳寿命。

$$N_{95/95} = \frac{\beta}{S_T S_R S_C} \quad (2)$$

式中: 试件系数  $S_T=1.3$ ; 置信度  $C=95\%$  时, 置信度系数  $S_C$  取 1.15; 对于铝合金, 可靠度系数  $S_R=2.1$ 。

按照式 (3) 计算细节疲劳额定强度截止  $P_{DFR-cutoff}$

对试件进行压缩性能测试, 在明显的塑性变形范围内采用控制应变速率的方法, 应变速率控制在  $0.000\ 05 \sim 0.000\ 1\ s^{-1}$  范围内。

本研究采用光学显微镜和扫描电子显微镜对喷丸试件进行表面形貌及疲劳断口的观察和分析。疲劳试验后, 采用扫描电镜对未喷丸和不同喷丸工艺参数

下的试件断口和损伤机理进行分析研究。

## 2 结果与分析

### 2.1 表面形貌

对 7B50-T7751 铝合金材料进行喷丸成形, 工艺参数如表 2 所示。图 4 所示为母材及喷丸成形后的试件在光镜下的表面形貌, 母材表面加工刀痕未进行打磨是为了与成形喷丸表面进行统一条件下的对比。

由图 4 可知, 在母材表面可以看到清晰的加工刀痕; 在 0.42 MPa 压力下进行喷丸成形后, 试件表面出现较为均匀的强化痕迹, 说明覆盖率较高, 弹丸对材料表面造成塑性变形留下弹坑, 局部弹坑还保留了机械加工刀痕。从放大图 (图 4b-2) 可以看到, 喷丸

处理后样品表面形成较为致密的强化层, 且强化层未出现明显裂纹。图 4c 显示的是 0.50 MPa 成形压力下试件的表面形貌, 可以看到, 强化痕迹不均匀且塑性变形较为严重, 试件表面较 0.42 MPa 成形试件更加粗糙, 同时材料表面留下的弹坑较大。

### 2.2 喷丸成形压力对试件疲劳寿命的影响

为研究喷丸成形压力对 7B50-T7751 铝合金疲劳性能的影响, 采用不同的成形压力 (0.42、0.50 MPa) 对合金材料进行成形, 再进行 DFR 截止值试验。通过取母体板材的蒙皮展向机加原始材料, 并采用单点法对 DFR 截止值试验数据进行处理, 名义应力  $\sigma=225$  MPa, 结合式 (1) 和式 (2), 得到特征寿命:  $\beta_1=120\ 045$ ,  $N_{95/95}=37\ 907.351\ 3$ ,  $P_{DFR-cutoff}=186.126\ 7$  MPa。

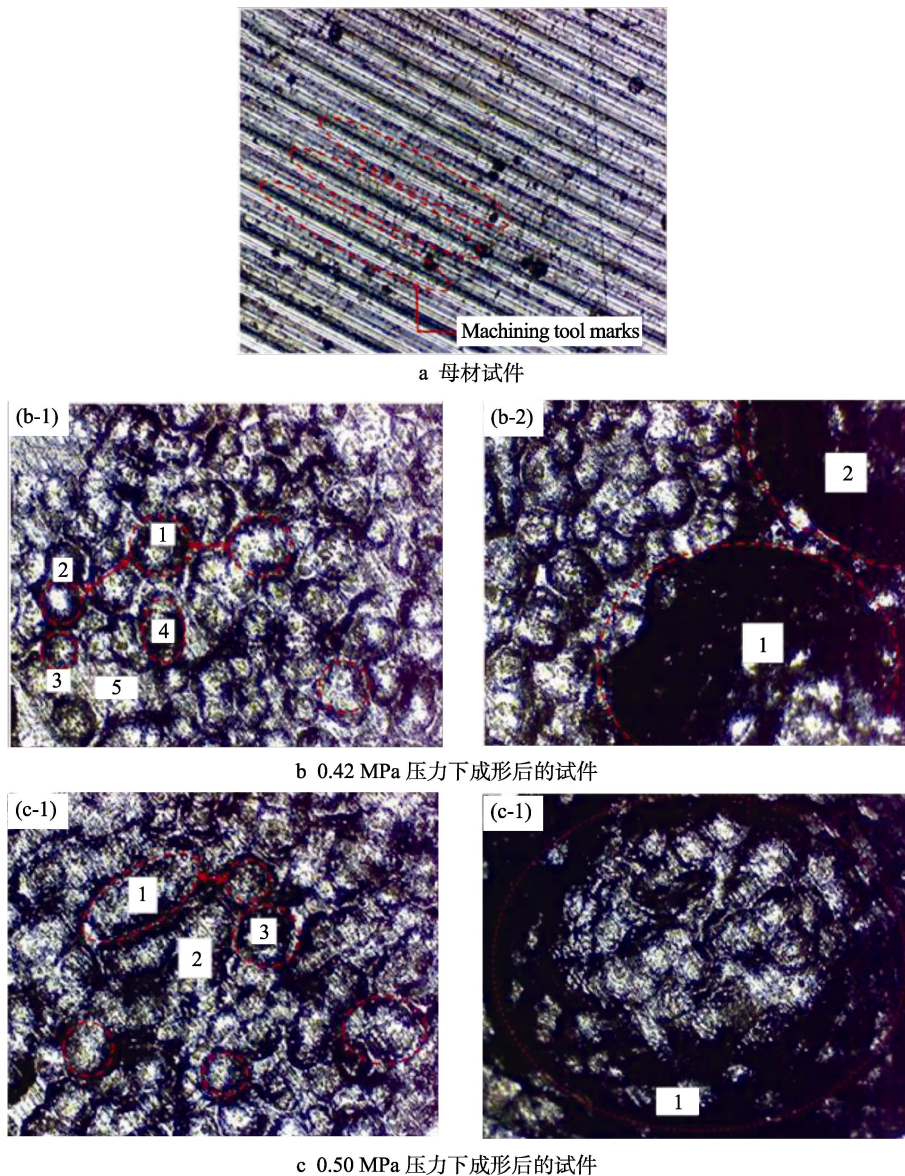


图 4 不同成形压力下试件的表面形貌

Fig.4 Surface morphology of specimen under different forming pressure: a) base material; b) specimen formed under 0.42 MPa; c) specimen formed under 0.50 MPa

同位置处 0.42、0.50 MPa 试件的数据处理同上,不再赘述。

对不同喷丸成形压力下的试件进行 DFR 基准值试验,并与 7B50 铝合金未进行表面处理的原始状态试件进行对比。采用载荷控制的方式进行加载,应力比为 0.06,波形为正弦波,试验数据处理方法同上,得到母体板材沿蒙皮展向的机加原始材料特征寿命为:  $\beta_1=141\ 323$ ,  $N_{95/95}=44\ 626.436\ 8$ ,  $P_{DFR-base}=148.053\ 8$  MPa; 0.42、0.50 MPa 试件的数据处理同上。综上,得到  $P_{DFR-cutoff}$  试验和  $P_{DFR-base}$  试验的结果,如表 3 所示。

可以看到,随着喷丸成形压力的增大,7B50-T7751 铝合金的 DFR 基准值逐渐减小,说明试件经喷丸成形后,弹丸对预制缺口产生一定的破坏作用,导致疲劳强度性能下降,而这一影响可控制在喷丸影响深度范围内,结合上述疲劳裂纹扩展速率分析,合理的喷丸成形压力对材料疲劳寿命的影响利大于弊。

7B50-T7751 铝合金材料经过喷丸成形处理后,通过高速弹丸对材料表面的冲击,使得表层材料围绕弹坑向周围延伸,在强度超过弹性极限后,表层区域发生了循环塑性变形<sup>[12,16]</sup>。如图 5 所示,随着喷丸次数的增加,材料的塑性变形程度增大,应变层内的位错密度增大,晶格发生畸变,组织中的亚晶粒和晶粒形状均发生改变。这些因素阻碍了疲劳裂纹在材料表层和次表层的萌生,延长了疲劳裂纹成核寿命<sup>[8,17]</sup>。通过喷丸处理,材料表面与内部塑性变形不均匀,使得材料表层产生残余应力场,阻碍位错的进一步运

动,同时减缓疲劳裂纹扩展,提高材料表面疲劳极限,减少了表面裂纹的萌生。当表面最大应力等于或低于表面材料疲劳极限时,疲劳源可能萌生于次表层,这同样可提升合金材料表面的疲劳性能。

0.42、0.50 MPa 2 种工艺参数成形的喷丸试件在频率为 15 Hz、应力比为 0.06 的疲劳加载条件下发生疲劳断裂,通过观察断口形貌,确定疲劳断裂的裂纹源、裂纹扩展区域和瞬间断裂区域,以及喷丸对材料内部的影响深度和影响区域,结果如图 6—8 所示。

图 6 所示为母体板材取蒙皮展向机加未进行喷丸处理的基准值试件疲劳断口形貌,由图可知,疲劳裂纹在预制缺口的表面质点萌生,断口处出现韧窝的特征形貌,随着裂纹的扩展,疲劳裂纹出现脆性断裂的特征。

图 7 所示为在 0.42 MPa 压力下喷丸成形后的疲劳断口形貌,疲劳裂纹起源于被弹丸击打的表面质点处,由断口形貌可知,表面喷丸对材料的影响深度约 1.5 mm 左右,且材料内部由于弹丸的冲击出现微小裂纹。

图 8 所示为 0.50 MPa 压力下喷丸成形后的疲劳断口形貌,预制缺口处出现多个疲劳裂纹源,均起源于表面质点处,图中白色箭头为裂纹扩展的方向,可以看出,预制缺口内部存在多个被弹丸冲击留下的弹坑,且上、下表面均有一定厚度的材料形貌受到影响。

通过对疲劳断口形貌的分析可知,母材的裂纹萌生于材料的表面质点处,而经过喷丸成形的试件一般有多个裂纹源,裂纹起源于弹丸撞击预制缺口产生的

表 3  $P_{DFR-cutoff}$  试验与  $P_{DFR-base}$  试验的结果

Tab.3 Results of the  $P_{DFR-cutoff}$  test and the  $P_{DFR-base}$  test

Testing method	Base material	Specimen formed under pressure of 0.42 MPa	Specimen formed under pressure of 0.50 MPa
$P_{DFR-cutoff}/\text{MPa}$	186.126 7	128.890 1	137.141 0
$P_{DFR-base}/\text{MPa}$	148.053 8	123.053 8	116.197 9

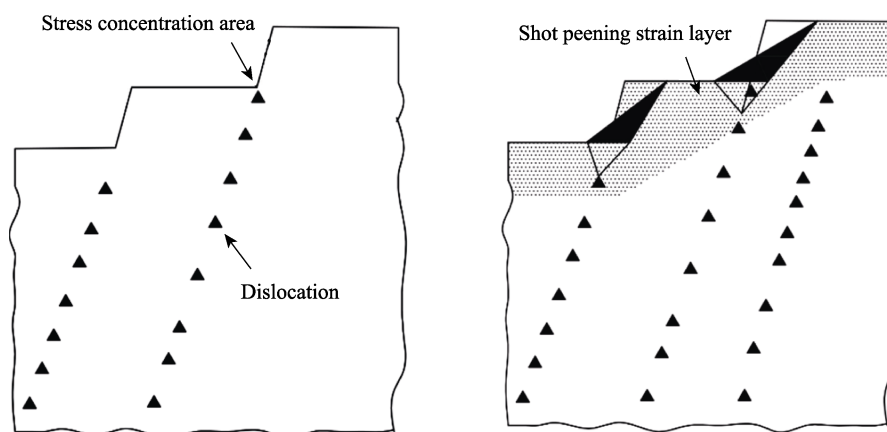


图 5 喷丸试件的应变层位错密度及形态

Fig.5 Dislocation density and morphology at strain layer of shot peening specimen

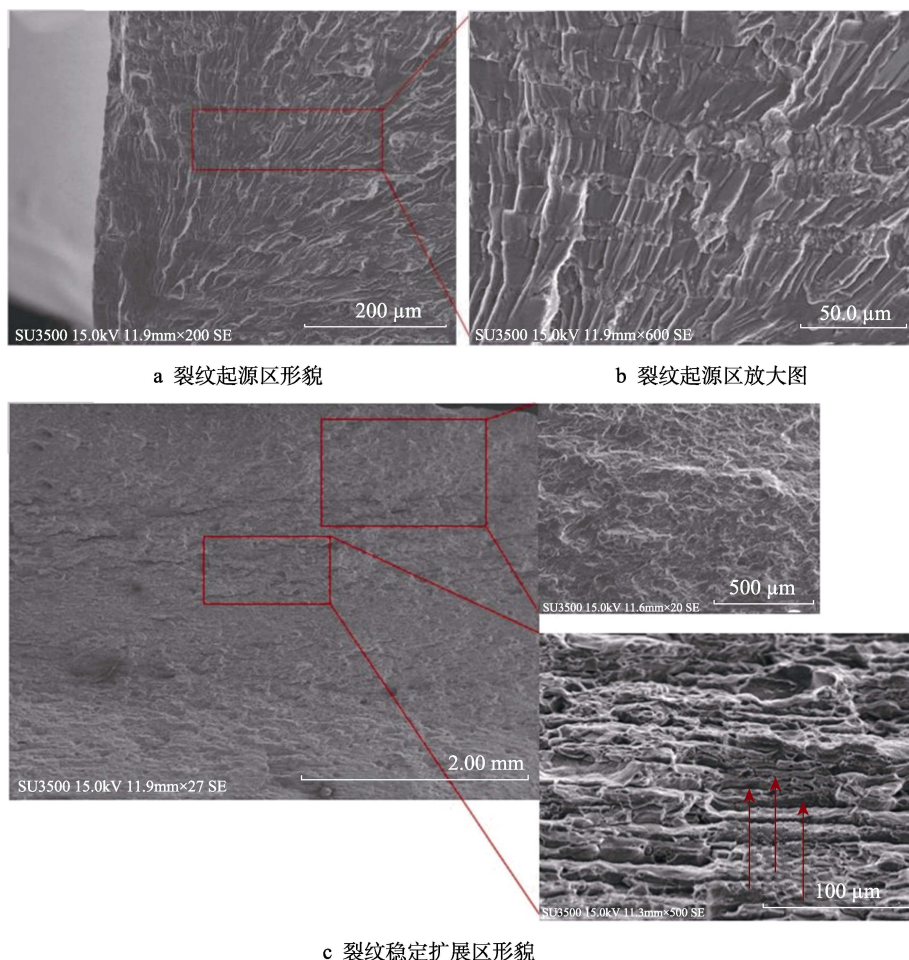


图 6 母材试件疲劳断口形貌

Fig.6 Fatigue fracture morphology of base metal specimen: a) morphology of crack initiation area; b) enlarged view of crack initiation area; c) morphology of stable crack propagation area

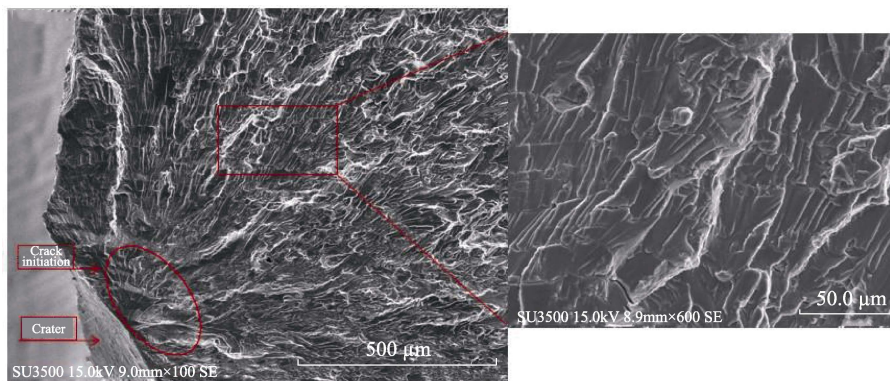
弹坑处；且喷丸成形可在材料内部产生较多的微裂纹，在离表面一定的厚度处产生不同的喷丸影响区，从而导致疲劳寿命分散性和裂纹扩展快慢的差别<sup>[18]</sup>。喷丸成形造成表层晶粒细化，畸变增大，导致喷丸形变层内的位错难以运动，或使得位错塞积在形变层与基体界面之间，从而阻碍疲劳裂纹在表面及次表面的萌生，延长了疲劳寿命<sup>[19-22]</sup>，使得试件在 0.42 MPa 压力下成形后疲劳强度有所提升。当合金材料在 0.50 MPa 压力下成形时，由于压力变大，产生的弹坑较大，表面更加粗糙，疲劳裂纹易在材料连接的薄弱处，例如弹坑边缘、预制缺口边缘萌生和发展，导致材料的疲劳强度有所下降。因此，合理控制喷丸成形压力在 0.42 MPa 内可提高 7B50-T7751 铝合金材料的疲劳寿命。

### 2.3 喷丸成形压力对材料静力性能的影响

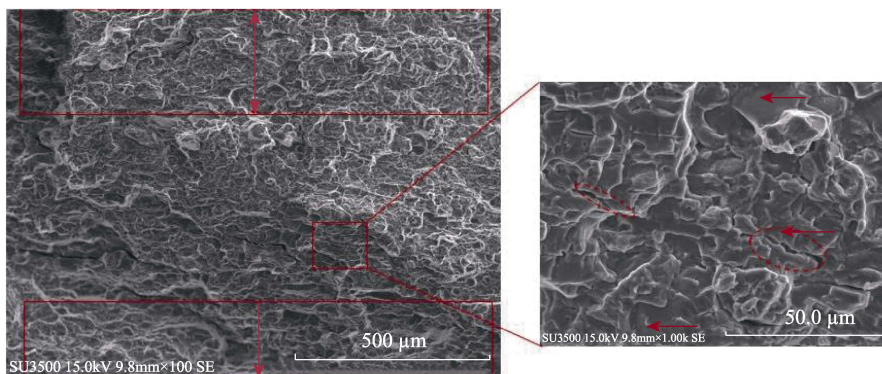
对不同喷丸工艺参数下处理的铝合金材料进行室温压缩性能试验，结果如图 9—10 所示。图 9 显示了不同喷丸成形压力下材料的压缩弹性模量，图 10 显示了不同喷丸成形压力下材料的抗压强度。

如图 9 所示，经过喷丸处理后，7B50-T7751 铝合金压缩弹性模量比未经处理时有所降低，随着喷丸成形压力的逐渐增大，7B50-T7751 铝合金的压缩弹性模量逐渐降低。未经喷丸处理的试件压缩弹性模量为 38.46 GPa，经过 0.42 MPa 压力喷丸成形的试件压缩弹性模量为 36.69 GPa，与未经喷丸的试件相比，降低了约 4.6%；经过 0.5 MPa 压力喷丸成形处理的试件压缩弹性模量为 33.41 GPa，与未经喷丸的试件相比，降低了约 13.13%。从图 10 可以看出，经过喷丸成形处理的 7B50-T7751 铝合金抗压强度远大于未处理时，其中，未经喷丸处理的试件抗压强度为 795.38 MPa；经过 0.42 MPa 压力喷丸成形处理的试件抗压强度最大，为 983.44 MPa；经 0.50 MPa 压力喷丸成形处理的试件抗压强度为 933.01 MPa，喷丸成形后的试件抗压强度分别提高了约 23.64%和 17.3%。

产生上述现象的原因在于，试件在喷丸成形后，表层引入了一定深度的残余压应力层，并形成位错密度较大的加工硬化组织，阻碍裂纹扩展，组织结构的强化宏观上提高了材料表层的硬度和强度，对合金材料抗压性能产生了有利影响<sup>[20,23-25]</sup>。合金材料在喷丸



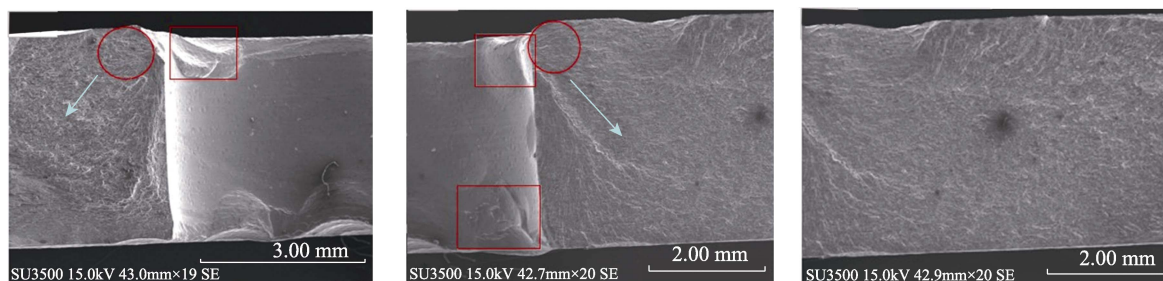
a 裂纹起源区形貌



b 断口形貌及放大图

图7 0.42 MPa 压力下喷丸成形后试件的疲劳断口形貌

Fig.7 Fatigue fracture morphology of shot peening specimen formed under 0.42 MPa: a) morphology of crack initiation area; b) fracture morphology and enlarged view



a A 区裂纹起源区形貌及放大图

b B 区裂纹起源区形貌及放大图

c 断口形貌图

图8 0.50 MPa 压力下喷丸成形后试件的疲劳断口形貌

Fig.8 Fatigue fracture morphology of shot peening specimen formed under 0.50 MPa: a) morphology and enlarged view of the crack initiation area A; b) morphology and enlarged view of the crack initiation area B; c) fracture morphology

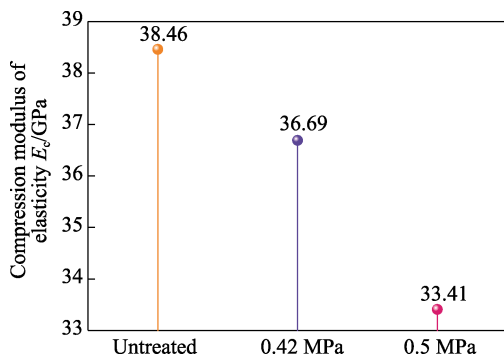


图9 不同喷丸成形压力下试件的压缩弹性模量

Fig.9 Compressed elastic modulus of specimen under different shot peening forming pressure

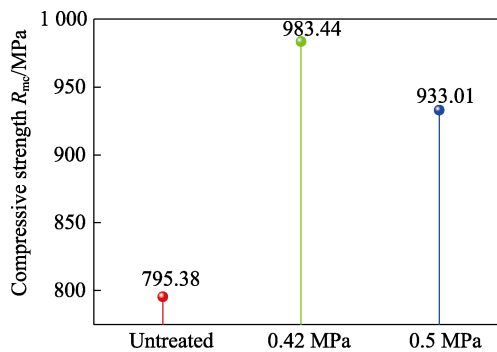


图10 不同喷丸成形压力下试件的抗压强度

Fig.10 Compressive strength of specimen under different shot peening forming pressure

成形后, 表层组织会发生循环塑性变形、位错的攀移和滑移以及位错塞积, 使得晶粒发生细化, 位错密度增大。晶粒尺寸越小, 材料表层的硬度值越大, 相应的抗压强度也越大<sup>[17,19-22]</sup>, 而增大的位错密度也使得位错之间的相互作用需要更大的外力, 从而提高材料抵抗压缩变形的能力。

### 3 结论

1) 随着喷丸成形压力的增大, 7B50-T7751 铝合金 DFR 基准值降低, 经过喷丸成形的试件有多个裂纹源, 裂纹起源于弹丸撞击预制缺口产生的弹坑处。断口处出现韧窝的特征形貌, 随着裂纹的扩展, 疲劳裂纹出现脆性断裂的特征。

2) 随着喷丸成形压力的增大, 相对于母材, 在 0.42、0.50 MPa 压力下成形的试件抗压强度分别提升了 23.64% 和 17.3%。在喷丸成形后, 铝合金材料表层形成了位错密度较大的加工硬化组织, 宏观上提高了材料表层的硬度和强度。

3) 采用 0.42 MPa 压力进行喷丸成形时, 7B50-T7751 铝合金试件表面产生了残余压应力层, 位错密度增大引起的加工硬化对疲劳裂纹的萌生和扩展起到抑制作用。而 0.50 MPa 压力下成形时, 部分裂纹易于在弹坑边缘萌生, 在一定程度上会降低合金材料的疲劳强度。

#### 参考文献:

[1] LV Yuan-bo, ZHANG Wen-dong, WEI Yu-long. The Compression Properties of the Wing Integral Panel Made up of Material 7B50-T7751 and 7150-T7751[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2020, 3(2): 189-192.

[2] 刘蛟蛟, 武岳, 赖永秋, 等. 固溶温度对 7B50 铝合金组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(11): 3100-3106.  
LIU Jiao-jiao, WU Yue, LAI Yong-qiu, et al. Effects of Solution Temperature on Microstructures and Properties of 7B50 Aluminum Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(11): 3100-3106.

[3] 龚澎, 郑林斌, 张坤, 等. 7B50-T7451 铝合金板材孔挤压工艺性能研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31(4): 45-50.  
GONG Peng, ZHENG Lin-bin, ZHANG Kun, et al. Effects of Hole Cold-Expansion on Microstructure and Fatigue Property of 7B50-T7451 Aluminum Alloy Plate[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(4): 45-50.

[4] 刘平. 7B50 铝合金板材疲劳极限强度及 S-N 曲线的测定[J]. 铝加工, 2017(3): 26-30.  
LIU Ping. Determination of Fatigue Ultimate Strength and S-N Curve for 7B50 Aluminum Alloy Plate[J].

Aluminium Fabrication, 2017(3): 26-30.

[5] 李晓谦, 刘诗月, 蒋日鹏. 超声场对 7B50 铝合金凝固组织的影响[J]. 上海有色金属, 2008, 29(2): 47-50.  
LI Xiao-qian, LIU Shi-yue, JIANG Ri-peng. Effect of Ultrasonic Field on Solidified Structure of 7B50 Aluminum Alloy[J]. Shanghai Nonferrous Metals, 2008, 29(2): 47-50.

[6] 彭国胜. 变形和热处理对 Al-Zn-Mg-Cu 系超强铝合金组织和性能的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2012: 25-30.  
PENG Guo-sheng. The effect of Deformation and Heat Treatment on Microstructure and Properties of the Super-Strength Al-Zn-Mg-Cu Aluminium Alloy[D]. Changsha: Central South University, 2012: 25-30.

[7] 樊喜刚. Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金组织性能和断裂行为的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 48-52.  
FAN Xi-gang. Study on the Microstructures and Mechanical Properties and the Fracture Behavior of the Al-Zn-Mg-Cu-Zr Alloys[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 48-52.

[8] 文康. 高强高韧 Al-Zn-Mg-Cu 合金疲劳断裂性能以及微观组织的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010: 119-121.  
WEN Kang. Study on Fatigue Fracture Properties and Microstructure of High Strength and Toughness Al-Zn-Mg-Cu Alloy[D]. Changsha: Central South University, 2010: 119-121.

[9] 沈茹娟, 肖代红. 时效热处理对 7B50 超强铝合金组织与性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2016, 21(1): 78-84.  
SHEN Ru-juan, XIAO Dai-hong. Effect of Aging Treatment on Microstructure and Properties of 7B50 Super Strength Aluminum Alloys[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2016, 21(1): 78-84.

[10] 陈高红, 李国爱, 陈军洲, 等. 轧制组织特征对 7B50-T7751 铝合金厚板断裂韧性的影响[J]. 轻合金加工技术, 2018, 46(6): 29-33.  
CHEN Gao-hong, LI Guo-ai, CHEN Jun-zhou, et al. Effect of Rolling Microstructure Characteristics on Fracture Toughness of 7B50-T7751 Aluminum Alloy Thick Plate[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2018, 46(6): 29-33.

[11] 王舟, 董锦亮, 黄振彪, 等. 喷丸成形工艺数据库系统研究与开发[J]. 精密成形工程, 2014, 6(3): 54-59.  
WANG Zhou, DONG Jin-liang, HUANG Zhen-biao, et al. Research and Development of the Database System of Shot Blasting Forming Process[J]. Journal of Net-shape Forming Engineering, 2014, 6(3): 54-59.

[12] 曾元松, 黄遐, 李志强. 先进喷丸成形技术及其应用与发展[J]. 塑性工程学报, 2006, 13(3): 23-29.  
ZENG Yuan-song, HUANG Xia, LI Zhi-qiang. The Application and Development of Advanced Shot Peen Forming Technologies[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 13(3): 23-29.

[13] 栾伟玲, 涂善东. 喷丸表面改性技术的研究进展[J]. 中国机械工程, 2005, 16(15): 1405-1409.



- LUAN Wei-ling, TU Shan-dong. Recent Trends on Surface Modification Technology of Shot Peening[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(15): 1405-1409.
- [14] XU Xing-chen, LIU Dao-xin, ZHANG Xiao-hua, et al. Mechanical and Corrosion Fatigue Behaviors of Gradient Structured 7B50-T7751 Aluminum Alloy Processed via Ultrasonic Surface Rolling[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 40: 88-98.
- [15] SHENG Xiang-fei, XIA Qin-xiang, CHENG Xiu-quan, et al. Residual Stress Field Induced by Shot Peening Based on Random-Shots for 7075 Aluminum Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22: s261-s267.
- [16] GAO Y K. Improvement of Fatigue Property in 7050-T7451 Aluminum Alloy by Laser Peening and Shot Peening[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(10/11): 3823-3828.
- [17] ZHOU J, RETRAINT D, SUN Z. Comparative Study of the Effects of Surface Mechanical Attrition Treatment and Conventional Shot Peening on Low Cycle Fatigue of a 316L Stainless Steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 349: 556-566.
- [18] 袁伟, 孙秦. DFR 法结构细节疲劳强度分析[J]. 陕西理工学院学报(自然科学版), 2007, 23(1): 9-11.  
YUAN Wei, SUN Qin. Fatigue Intensity Analysis of Structure Detail Based on Detail Fatigue Rating[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 23(1): 9-11.
- [19] 姚枚, 王声平, 李金魁, 等. 表面强化件的疲劳强度分析及金属的内部疲劳极限[J]. 金属学报, 1993, 29(11): 33-41.  
YAO Mei, WANG Sheng-ping, LI Jin-kui, et al. An Aspect of Internal Fatigue Limit for Metals with Aid of Strength Appraisal on Hardened Steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1993, 29(11): 33-41.
- [20] 刘凤智. 结构金属材料工艺面发屈服特性的表征和研究[D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 1995: 38-44.  
LIU Feng-zhi. Characterization and Study on Yield Characteristics of Structural Metal Materials in Process[D]. Shenyang: Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 1995: 38-44.
- [21] OHTA T, TSUTSUMI S, MA N S. Direct Measurement of Shot Velocity and Numerical Analysis of Residual Stress from Pneumatic Shot Peening[J]. Surfaces and Interfaces, 2021, 22: 100827.
- [22] ZHANG Qi, DUAN Bing-bing, ZHANG Zi-qian, et al. Effect of Ultrasonic Shot Peening on Microstructure Evolution and Corrosion Resistance of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11: 1090-1099.
- [23] HU Yong-xiang, CHENG Han, YU Jian-hua, et al. An Experimental Study on Crack Closure Induced by Laser Peening in Pre-Cracked Aluminum Alloy 2024-T351 and Fatigue Life Extension[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 130: 105232.
- [24] ZHANG Qi, XU Shuo, ZHANG Zi-qian, et al. Residual Stress and Microhardness Evolution Induced by Conventional and Ultrasonic Shot Peening[J]. Materials Science and Technology, 2022, 38(7): 436-443.
- [25] KLUMPP A, RUF M, DIETRIC S, et al. Long Crack Propagation and Closure in DC(T) Specimens of Ni-Based Superalloy Inconel 718 and Stainless Steel AISI 301 after Shot Peening[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 269: 108551.