

# 弹丸对喷丸强化效果的影响

刘莲莲<sup>\*</sup> 易妹玉 康菊云 付小强

(上海飞机制造有限公司, 上海 200436)

**摘要:**为了研究喷丸强化工艺中弹丸类型对疲劳性能的影响规律,设计了应力集中系数为1.5的单细节结构疲劳试验件,分别采用陶瓷丸和不同尺寸的铸钢丸在低、中、高强度下对7055-T7451铝合金试验件进行喷丸强化和疲劳性能测试,通过细节疲劳额定值(DFR)方法对试验数据进行处理和分析,获取试验件喷丸强化后疲劳性能的增益。结果表明:喷丸强化可以明显提高材料的疲劳寿命,疲劳增益为9%~57%;喷丸强化采用的弹丸类型对试验件疲劳增益有明显的影响;同样强度下,陶瓷丸喷丸强化效果优于铸钢丸;弹丸种类相同时,小尺寸弹丸喷丸强化效果优于大尺寸弹丸;陶瓷丸喷丸强度对疲劳性能的影响规律表现为抛物线形,即随着喷丸强度的增加,疲劳性能先增加后减少。

**关键词:**喷丸强化;细节疲劳额定值;疲劳性能;弹丸

中图分类号: V252

文献标识码: A

OSID: 

## 0 引言

喷丸强化是指利用运动弹丸对金属表面的冲击而使金属表面产生塑性应变层,由此导致该层的显微组织发生有利变化并使表层引入残余应力,表层的残余应力层能提高金属零件的疲劳断裂和应力腐蚀断裂抗力,从而使零件的疲劳寿命和耐应力腐蚀性获得提高的一种工艺方法<sup>[1-3]</sup>。喷丸强化工艺在航空航天、汽车、轮船等都有广泛的应用。喷丸强化常用的喷丸介质有铸钢丸、陶瓷丸,玻璃丸因为易于破碎并且能达到的强度低,喷丸强化中应用较少<sup>[4-5]</sup>。近年来,有许多学者就喷丸强化对材料性能的影响做了大量的研究,赵远兴<sup>[6]</sup>等人研究了陶瓷丸喷丸对2024HDT铝合金疲劳性能的影响,结果表明合理的喷丸强化参数能够有效提高材料的疲劳性能;王旭<sup>[7]</sup>等人研究了喷丸成形及强化对2024-T351板材疲劳特性的影响,结果为喷丸成形后在喷丸强化试验组的疲劳性能优于单纯喷丸成形组;WANG Cheng<sup>[8]</sup>等基于有限元模型对喷丸强化残余应力进行了模拟分析,结果表明在覆盖率200%以下时,残余应力与喷丸覆盖率有较好的关联

性;李明睿<sup>[9]</sup>建立了喷丸强化DD6单晶合金低周疲劳寿命模型,并进行实验室测试,模型预测结果具有较高的精度。

但是目前对不同介质的喷丸强化后疲劳性能的对比分析研究较少,本文分别采用陶瓷丸AZB425、铸钢丸S230和铸钢丸S110在低、中、高三组喷丸强度下对试验件进行喷丸强化,试验材料选用国内某型号民用飞机常用的铝合金7050-T7451进行试验,喷丸强化后测试疲劳性能,通过计算DFR的方式研究喷丸强化对试验件产生的疲劳增益,分析喷丸强化工艺选用的弹丸种类对7055-T7451铝合金疲劳性能的增益影响,为喷丸强化工艺中弹丸的选用提供试验依据。

## 1 试验材料与方法

试验材料为7050-T7451铝合金板材,疲劳试验件几何尺寸和形状见图1,试验件厚度t为4 mm。喷丸弹丸为铸钢丸S230、S110和陶瓷丸AZB425,分别设置了低、中、高3组喷丸强度并分别进行喷丸强化,具体数据及分组情况见表1。采用气动式喷丸机对试验件所有表面进行喷丸强化,覆盖率为

\* 通信作者。E-mail: liulianlian@comac.cc

引用格式: 刘莲莲,易妹玉,康菊云,等.弹丸对喷丸强化效果的影响[J].民用飞机设计与研究,2024(2):126-130. LIU L L, YI M Y, KANG J Y, et al. Effect of shot on shot peening[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(2):126-130(in Chinese).

为 100%。

疲劳试验采用液压疲劳试验机,加载方式为拉-拉加载,应力比  $R$  为 0.06,试验频率为 15 Hz,试验件的最大载荷水平根据材料和试验件形式确定,使试验件破坏次数尽量控制在  $10^4 \sim 10^6$  之间,试验件的有效破坏形式为中间部位断裂,每组试验的有效数据个数不少于 6 个。

试验件安装要求:试验件安装夹头要对中,加载轴线与试验件形心同轴,在试验件远离考核区两端表面前后左右 4 个对称位置进行应变测量,测量的弯曲度误差小于 5%。

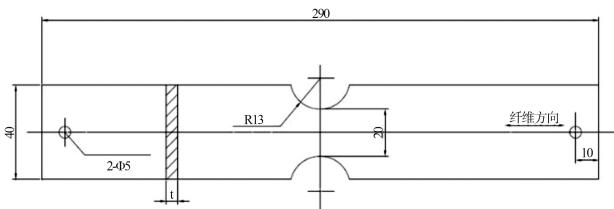


图 1 试验件几何尺寸(单位:mm)

表 1 试验件分组情况

组别	弹丸类型	喷丸强度	试验件个数
1	未喷丸	—	10
2	陶瓷丸 AZB425	0.1 mmN	10
3	陶瓷丸 AZB425	0.2 mmN	10
4	陶瓷丸 AZB425	0.3 mmN	10
5	陶瓷丸 AZB425	0.6 mmN	10
6	铸钢丸 S230	0.1 mmA	10
7	铸钢丸 S230	0.2 mmA	10
8	铸钢丸 S230	0.3 mmA	10
9	铸钢丸 S110	0.2 mmA	10

## 2 试验结果与分析

### 2.1 数据计算处理

细节疲劳额定值(DFR)<sup>[10-11]</sup>确定方法为疲劳试验中拉-拉加载载荷应力比为 0.06 时,构件寿命具有 95% 的置信度和 95% 的可靠度,能够达到  $10^5$  次循环寿命的最大应力。它是用来描述材料和结构固有疲劳性能特征值的一个重要参数,是对材料和结构耐重复载荷能力即疲劳能力的度量,它与加载在材料上的载荷无关,因此可采用 DFR 方法研究喷丸强化对疲劳寿命的影响规律。DFR 计算公式

如下:

$$DFR = \frac{0.94 \times \sigma_{m0}}{\frac{0.94 \times \sigma_{m0} \times S^{(5-\lg(N))}}{\sigma_{max}} - (0.47 \times S^{(5-\lg(N))} - 0.53) - (0.0282 \times S^{(5-\lg(N))} + 0.0318)} \quad (1)$$

式中: $S$  为双对数 S-N 曲线的斜度, $S=2$ ; $\sigma_{m0}$  为等寿命图中应力幅为零时的破坏应力, $\sigma_{m0}=310$  MPa; $\sigma_{max}$  为试验最大应力; $N$  为在某一应力水平下做  $n$  个试验件,按照双参数威布尔分布原理,具有 95% 置信度和 95% 可靠度的疲劳寿命,可用下式计算:

$$N = \frac{\beta}{S_r \times S_R \times S_C} \quad (2)$$

式中: $\beta$  为特征寿命。

$$\beta = \left( \sum_{i=1}^n N_i^\alpha \right)^{1/\alpha} \quad (3)$$

式中:铝合金形状参数  $\alpha=4$ ,试件系数  $S_r=1.3$ ,可靠度系数  $S_R=2.1$ ,置信度系数  $S_C$  根据有效试验件个数在 HB7110《金属材料细节疲劳额定强度截止值试验方法》中查表选取<sup>[10]</sup>。

对试验数据进行处理,并观察每个试样断裂位置,有效断裂位置应该在中间缺口部位,见图 2,如断裂在缺口以外,应将该数据舍弃。另外对于可疑数据按照肖维奈准则进行取舍<sup>[12]</sup>,按照 DFR 计算方法计算每一组的 DFR 值,用于计算的每组有效数据不少于 6 个,计算结果见表 2,疲劳增益为喷丸强化组 DFR 与未喷丸组 DFR 比值的百分数减去 100%。



图 2 试验件有效断裂

表 2 试验结果

组别	弹丸类型	喷丸强度	DFR/MPa	疲劳增益
1	未喷丸	—	161	—
2	陶瓷丸 AZB425	0.1 mmN	200	24%
3	陶瓷丸 AZB425	0.2 mmN	252	57%
4	陶瓷丸 AZB425	0.3 mmN	235	24%
5	陶瓷丸 AZB425	0.6 mmN	189	17%
6	铸钢丸 S230	0.1 mmA	199	24%
7	铸钢丸 S230	0.2 mmA	177	10%
8	铸钢丸 S230	0.3 mmA	175	9%
9	铸钢丸 S110	0.2 mmA	186	12%

## 2.2 DFR 结果分析

对比 DFR 结果可知, 喷丸强化组 DFR 值明显比未喷丸组高, 疲劳增益最大提高了 57%, 原因是喷丸强化在表面引入残余压应力, 可以阻碍疲劳裂纹的萌生, 因此会提高疲劳寿命。另外喷丸强化是双刃剑, 在引入残余压应力的同时, 会增加表面粗糙度, 而粗糙度增加, 又会降低疲劳性能, 因此需要选取一个最佳的喷丸强度, 以获取最佳的疲劳增益。

试验组 2 至试验组 5 为陶瓷丸喷丸, 分析可知, 随着喷丸强度的增加, 疲劳性能先增加后减少, 见图 3, 最佳的喷丸强度在 0.2~0.3 mmN 之间; 试验组 6 至试验组 8 为铸钢丸喷丸, 随着喷丸强度的增加, 疲劳性能降低, 说明最优的喷丸强度应该比 0.1 mmA 更小。根据 Almen 试片强度换算, 同样强度下, N 型试片弧高值大约等于 A 型试片的 3 倍, 即试验组 4 和试验组 6 强度相当, 试验组 5 和试验组 7 强度相当。可以得出结论: 同样强度下, 陶瓷丸强

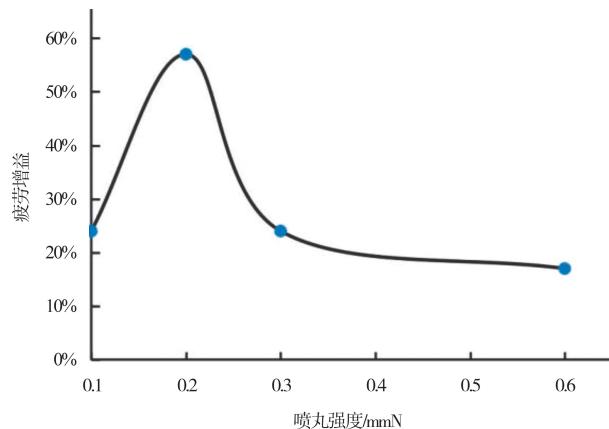


图 3 AZB425 喷丸强化疲劳增益曲线

化效果高于铸钢丸, 其原因为陶瓷丸喷丸后表面无铁污染, 且陶瓷丸尺寸小, 喷丸后试样表面弹坑较小, 表面粗糙度产生的对疲劳性能的弱化效果优于铸钢丸, 所以陶瓷丸喷丸强化效果优于铸钢丸<sup>[13]</sup>。

试验组 7 和试验组 9 喷丸强度一致, 弹丸都为铸钢丸, 但 S110 弹丸尺寸小于 S230, 小尺寸的弹丸喷丸在试验件表面产生的弹坑直径较小, 试验组 9 的试验件表面粗糙度明显小于试验组 7, 试验结果为试验组 9 疲劳增益略优于试验组 7, 与分析结论一致。

## 2.3 断口分析

通过扫描电镜对断口进行观察, 如图 4 所示, 断口表现为明显的疲劳断裂特征, 断口可以看到疲劳源区、扩展区和瞬断区<sup>[14]</sup>。疲劳源区位于表面以下的部位, 这是由于喷丸强化在表面产生残余压应力, 表面残余压应力可以弱化外加疲劳拉应力的效果, 而且残余应力导致表面发生塑性应变还可以使表面微裂纹等缺陷闭合, 因此使裂纹源产生于次表面, 并且裂纹萌生初期会反复磨损, 所以疲劳源位置比较光滑。扩展区有明显的疲劳条带, 疲劳条带凸出的方向为疲劳裂纹扩展方向, 并且沿着裂纹扩展方向疲劳条带之间的间距逐渐增大, 不同小平面上的疲劳条带不连续、不平行。当疲劳裂纹扩展接近临近尺寸, 试片不足以继续承受外加载荷时, 发生瞬间断裂对应的区域即为瞬断区, 该区域断面粗糙。

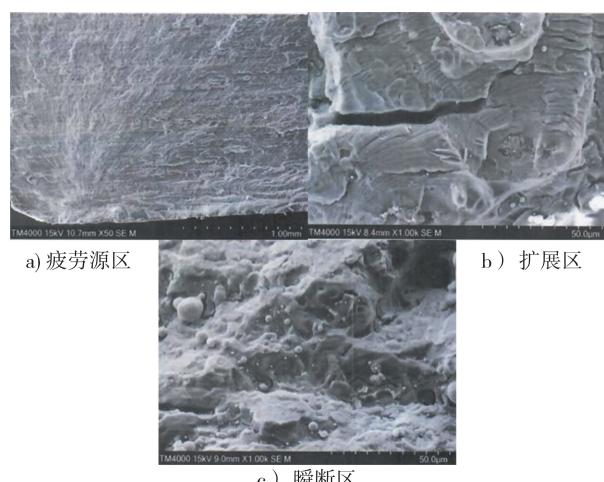


图 4 断口的 SEM 照片

## 3 结论

1) 未喷丸强化的试片与喷丸强化试片相比, 喷丸强化后可以明显提高材料的疲劳寿命, 疲劳增

益为9%~57%。

2) 陶瓷丸喷丸强化后疲劳增益为24%~57%,铸钢丸为9%~24%,陶瓷丸喷丸强化的疲劳增益随喷丸强度先增加后减少,中强度疲劳增益最优,铸钢丸低强度时疲劳增益较优,陶瓷丸强化效果整体优于铸钢丸。

3) 同样的喷丸强度下,S110铸钢弹丸喷丸强化效果优于S230,因为同样的强度下小尺寸弹丸喷丸后试样表面质量好,对疲劳性能产生的负面影响较小。

### 参考文献:

- [1] 王欣,王强,宋颖刚,等. 陶瓷丸喷丸对2124铝合金疲劳性能的影响[J]. 材料保护,2011,44(9): 9-11, 31,91.
- [2] 李巍. 300M钢件表面的喷丸强化[J]. 金属热处理, 2023,48(4): 277-280.
- [3] 王仁智. 金属材料的喷丸强化原理及其强化机理综述[J]. 中国表面工程,2012,25(6): 1-9.
- [4] 王永军,孙宝龙,张炜,等. 铝锂合金喷丸强化数值模拟及试验[J]. 航空动力学报,2015,30(3): 595-602.
- [5] 王成,李开发,胡兴远,等. 喷丸强化残余应力对AISI 304不锈钢疲劳裂纹扩展行为的影响[J]. 表面技术, 2021,50(9): 81-90,151.
- [6] 赵远兴,刘道新,关艳英,等. 陶瓷丸喷丸对2024HDT铝合金疲劳性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2014,37(4): 15-20.
- [7] 王旭,沈培良,高玉魁,等. 喷丸成形及强化对2024HDT-T351板材疲劳特性的影响[J]. 表面技术, 2017,46(8): 165-169.
- [8] WANG C, HU J C, GU Z B, etc. Simulation on residual stress of shot peening based on a symmetrical cell model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017,30(2): 344-351.
- [9] 李明睿,王荣桥,田腾跃,等. 喷丸强化DD6单晶合金低周疲劳寿命预测[J]. 表面技术,2022,51(10): 1-9.
- [10] 中国航空工业总公司. 金属材料细节疲劳额定强度截止值( $DFR_{cutoff}$ )试验方法:HB7110-94[S]. 北京:中国航空工业总公司, 1995.
- [11] 《民机结构耐久性与损伤容限设计手册》编委会. 民机结构耐久性与损伤容限设计手册:上册:疲劳设计与分析[M]. 北京:航空工业出版社, 2003: 209.
- [12] 常伟,戴东野. 材料疲劳试验中可疑观测值的舍取[J]. 材料工程, 1995(10): 40-41.
- [13] 华程,姚兰,杨屹,等. 复合喷丸强化对PH13-8Mo钢旋转弯曲疲劳寿命的影响[J]. 材料保护,2022,55(8): 125-129,139.
- [14] 周松,谢里阳,回丽,等. 喷丸强化对2XXX铝合金疲劳寿命的影响[J]. 材料工程,2014(12): 86-91.

### 作者简介

刘莲莲 女,硕士,研发工程师。主要研究方向:金属材料工程。E-mail:liulianlian@ comac. cc

易妹玉 女,硕士,研发工程师。主要研究方向:金属材料工程。E-mail:yimeiyu@ comac. cc

康菊云 女,硕士,研发工程师。主要研究方向:金属材料工程。E-mail:kangjuyun@ comac. cc

付小强 男,硕士,研究员。主要研究方向:材料与工艺。E-mail:fuxiaoqiang@ comac. cc

## Effect of shot on shot peening

LIU Lianlian \* YI Meiyu KANG Juyun FU Xiaoqiang

(Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

**Abstract:** In order to study the influence of shot type on fatigue performance in shot peening, a single detail structure fatigue test piece with a stress concentration coefficient of 1.5 was designed. Ceramic shot and cast steel shot of different sizes were used for shot peening of 7055-T7451 aluminum alloy test pieces at low, medium, and high strength, and fatigue performance testing was conducted. The test data was processed and analyzed using the detail fatigue rating (DFR) method to obtain the gain in fatigue performance of the test piece after shot peening. The results show that shot peening can significantly improve the fatigue life of materials, which can increase by 9% ~ 57%. The type of shot used for shot peening has a significant impact on the fatigue gain of the test piece. Under the same strength, the effect of ceramic shot peening is better than that of cast steel shot. When the types of shot are the same, the effect of small size shot peening is better than that of large size shot peening; The effect of ceramic shot peening strength on fatigue performance exhibits a parabolic shape, which means that the fatigue performance first increases and then decreases with the increase of shot peening strength.

**Keywords:** shot peening; detail fatigue rating; fatigue performance; shot

---

\* Corresponding author. E-mail: liulianlian@comac.cc