

喷丸成形及强化对 2024HDT-T351 板材疲劳特性的影响

王旭¹, 沈培良¹, 高玉魁^{1,2}, 李强¹

(1.上海飞机设计研究院强度部, 上海 201210; 2.同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘要: **目的** 获得喷丸成形及喷丸强化工艺对 2024HDT-T351 板材疲劳特性的影响规律。**方法** 设计了一种不传载的含紧固件单细节结构疲劳品质试验件, 各组试验件相同, 变化各组的喷丸参数, 进行了试验基准组、喷丸强化组和 4 种不同参数喷丸成形组、4 种不同参数喷丸成形后喷丸强化组的疲劳试验。**结果** 通过疲劳试验和数据处理, 获得了各组的疲劳性能、细节疲劳额定值和在相应应力水平下的疲劳寿命。试验结果表明, 所有组的细节疲劳额定值均高于试验基准组, 其中喷丸强化试验组的疲劳性能提高了 24%, 喷丸成形试验组的疲劳性能提高了 9%~13%, 喷丸成形后喷丸强化试验组的疲劳性能提高了 9%~24%。**结论** 给出了 2024HDT-T351 板材喷丸成形及强化疲劳分析合金和表面处理系数 B 。2024HDT-T351 铝合金板材经喷丸强化后、经大弹丸喷丸成形后和经大弹丸喷丸成形后喷丸强化, 疲劳分析时合金和表面处理系数 B 可保守取 1.2、1.05、1.05。

关键词: 喷丸成形; 喷丸强化; 细节疲劳额定值; 疲劳试验; 合金和表面处理系数; 大弹丸

中图分类号: V250.3; TG115.5+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)08-0165-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.08.027

Influence of Shot Blasting Forming and Strengthening on Fatigue Property of 2024HDT-T351 Plate

WANG Xu¹, SHEN Pei-liang¹, GAO Yu-kui^{1,2}, LI Qiang¹

(1.Stress Department of Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China;

2.School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

ABSTRACT: The work aims to study effects of shot blasting forming and shot blasting strengthening on fatigue property of 2024HDT-T351 plate. A non-load transferring fatigue quality test piece of single detail structure with fastener was designed. Provided with same quantity of specimens and different shot blasting parameters, fatigue test was performed to test baseline group, shot blasting strengthening group, shot blasting forming group with 4 kinds of parameters and combined shot blasting forming & shot blasting strengthening group with 4 kinds of parameters. Fatigue properties, detail fatigue ratings and fatigue life under corresponding stress of all groups were obtained from fatigue test and by data processing. The detail fatigue ratings of all groups were higher than that of the test baseline group, fatigue property of shot blasting strengthening group increased by 24%; for the shot blasting forming group, by 9%~13%; and for the combined shot blasting forming & shot blasting strengthening group, by 9%~24%. The surface treatment coefficient B of 2024HDT-T351 subject to shot blasting forming and shot blasting

收稿日期: 2017-02-03; 修订日期: 2017-06-09

Received: 2017-02-03; Revised: 2017-06-09

作者简介: 王旭 (1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为飞机结构疲劳、断裂及可靠性分析。

Biography: WANG Xu (1987—), Male, Master, Engineer, Research focus: fatigue, damage tolerance and dependability analysis of airplane structure.

strengthening for DFR analysis is given. The coefficient B of 2024HDT-T351 plate after shot blasting strengthening, after big shot blasting forming and after combined treatment can be taken as 1.2, 1.05 and 1.05.

KEY WORDS: shot blasting forming; shot blasting strengthening; detail fatigue rating; fatigue test; alloy and surface treatment coefficient; big shot

喷丸强化工艺是一种用高速运动的弹丸撞击靶材,在靶材表面引入残余压应力,从而提高靶材的疲劳性能的方法。因此喷丸强化已被广泛应用于航天、航空和汽车等领域,并成为国内外学者研究的重点问题之一^[1]。喷丸成形工艺是 20 世纪 50 年代初伴随飞机整体壁板的应用,在喷丸强化工艺的基础上发展起来的一项新工艺,是飞机制造中整体壁板和整体厚蒙皮零件成型的主要方法之一。它是一种借助高速弹丸流撞击金属构件表面,使构件产生变形的金属成形方法。与喷丸强化不同,喷丸成形的弹丸尺寸和喷丸气压等一般比喷丸强化大。喷丸成形对覆盖率没有要求,只要求达到外形要求,一般用于较厚板。国外在大量飞机机翼下蒙皮制造中都采用了该工艺,如 B747、A380 等^[2-4]。国内某型民机外翼下壁板也采用了喷丸成形和强化工艺。Klemenž 应用有限元法研究了喷丸强化后材料表面的特征^[5]。Liu 等研究了在不同条件下喷丸强化对 Mg-10Gd-3Y 合金高周疲劳性能的影响^[6]。Dalaei 等研究了喷丸强化对珠光体微合金钢疲劳寿命的影响^[7]。高少龙研究了喷丸成形及强化工艺对铝合金疲劳性能及裂纹扩展的影响^[8]。王旭等研究了喷丸成形工艺对 2024HDT-T351 板材疲劳性能的影响^[9]。

为研究喷丸成形及喷丸强化工艺对 2024HDT-T351 铝合金板材疲劳特性的影响,本文设计了一种不转载紧固件结构单细节疲劳额定值试验件,进行了疲劳对比试验,按照细节疲劳额定值 (DFR) 方法对试验数据进行处理和分析,有效解决了喷丸工艺对 2024HDT-T351 板材疲劳性能是否有影响及影响如何

的问题,为 2024HDT-T351 板材喷丸成形及强化的工程应用提供试验依据。

1 试验件及分组

疲劳试验时,通常选取标准试验件(狗骨状或圆棒形)进行试验^[10-13]。不同于传统的试验件,本文根据某型飞机的外翼下壁板结构细节及其喷丸成形、喷丸强化工艺的情况,设计了一种新的不转载的含紧固件结构单细节 DFR 试验件,在考核区进行了开孔,并装配了紧固件,来考虑装配对疲劳性能的影响,如图 1 所示。基于结构典型细节的装配和紧固件等信息,设计了这种试验件,同时考虑了影响 DFR 的孔填充系数 A 、合金和表面处理系数 B 、埋头深度系数 C 、材料叠层系数 D 、螺栓夹紧系数 E 、凸台有效系数 U 和构件疲劳额定系数 R_c 等,但是不同喷丸状态改变的仅是合金和表面处理状态,将 DFR 的其他影响因素进行了剥离,不同喷丸参数试验组仅合金和表面处理系数 B 值不同,DFR 的其他参数均一致。

喷丸过程中,涉及喷丸强化的试验件,采用 AZB425 弹丸对试验件全表面进行喷丸强化,喷丸强度为 0.1~0.25 mmA,覆盖率为 100%。涉及喷丸成形的试验件采用双面对喷丸成形,空气压力、弹丸流量、机床速度、喷丸距离和喷丸角度等成形参数,参考某型飞机外翼下壁板蒙皮。成形过程中,对试验件棱边进行保护。选取了喷丸成形的两种直径的大弹丸: $\phi 3.18$ mm (渗碳钢丸) 和 $\phi 4.8$ mm (渗碳钢丸)。

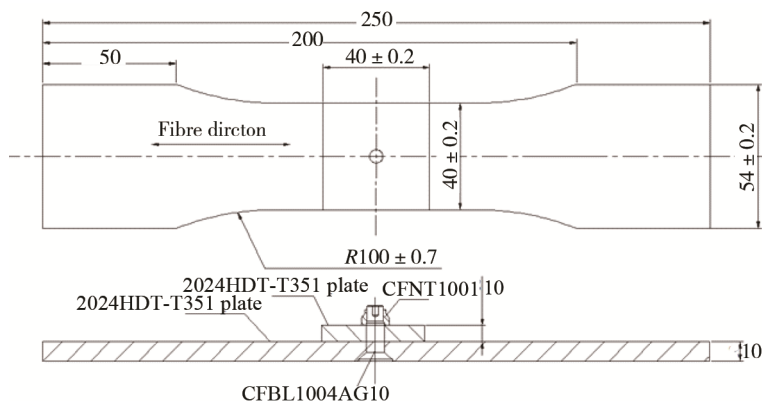


图 1 试验件示意图

Fig.1 Specimen picture

选取了两种喷丸成形气压： p_1 和 p_2 ，其中 p_1 小于 p_2 ， p_1 和 p_2 介于 0.3~0.6 MPa 之间。仅改变喷丸成形大弹丸的直径和喷丸气压，其他喷丸成形参数一致。

试验件制造过程中，共制备了 10 组试验件，每组 10 件，其中第 1 组为原始状态基准组试验件，未进行喷丸；第 2 组试验件进行了全表面喷丸强化；第

3—6 组试验件进行了不同参数的喷丸成形；第 7—10 组试验件采用不同参数喷丸成形后进行了全表面喷丸强化，喷丸强化工艺参数与第 2 组完全一致。试验件除了工艺状态和喷丸参数不一致外，其他完全一致，试验件分组见表 1。

表 1 试验件分组情况
Tab.1 Sample group

试件组别	工艺状态	喷丸参数	试件数量
1	原始状态	—	10 件
2	喷丸强化	强度 0.1~0.25 mmA，覆盖率 100%	10 件
3	喷丸成形	$\phi 3.18\text{ mm}$ ， p_1	10 件
4		$\phi 3.18\text{ mm}$ ， p_2	10 件
5		$\phi 4.8\text{ mm}$ ， p_1	10 件
6		$\phi 4.8\text{ mm}$ ， p_2	10 件
7	喷丸成形+喷丸强化	$\phi 3.18\text{ mm}$ ， p_1	10 件
8		$\phi 3.18\text{ mm}$ ， p_2	10 件
9		$\phi 4.8\text{ mm}$ ， p_1	10 件
10		$\phi 4.8\text{ mm}$ ， p_2	10 件

2 试验结果及处理

试验件安装时，保证加载轴线与试验件形心同轴。试验开始前，对试验件尺寸进行测量，根据截面实际尺寸对试验载荷进行调整，确保每组的试验应力水平相同。疲劳试验前，每组试验件选取 1 件进行应变测量，来保证试验载荷施加的对称性和线性。试验组应力水平根据调试件的调试结果和分析结果确定，保证每组试验件的特征寿命控制在 $(1.5\sim 4)\times 10^5$ 之间，试验应力比为 0.06。所有试验件在 INSTRON 疲劳试验机上进行，试验加载频率为 12 Hz。

根据试件破坏位置和断口形式，将试件破坏形式分为 4 种，见表 2。其中 3 类和 4 类为非正常破坏，试件数量很少。

表 2 试件破坏形式
Tab.2 Fracture form of sample

类别	破坏形式描述	起裂位置
1	裂纹面横穿铆钉孔，且起裂源在铆钉孔边	裂纹源靠近垫块与板接触面
2	裂纹面穿过铆钉孔，但起裂源不在孔边	
3	断裂位置在垫块与试件接触面内，但不经过钉孔	
4	裂纹面在试件过渡圆弧上	

试验件的典型破坏特征是 1 类破坏，如图 2 所示，从紧固件孔处起裂，断面穿过紧固件孔。



图 2 试验件典型破坏特征
Fig.2 Typical fracture picture

工程上常用 DFR 来表征结构的抗疲劳特性，其值为应力比 $R=0.06$ 、结构能够承受 10^5 次循环（95% 的置信度，95% 的可靠度）时所对应的最大应力值^[14]，该值是结构细节本身固有的疲劳性能特征值，与使用的载荷无关。数据处理时仅计入 1 类、2 类破坏模式试验数据，同时采用肖维娜准则^[15]对异常数据进行取舍，根据文献[10]对每个试验组的试验结果进行处理，得到每组的双 95 寿命和 DFR，将喷丸组与原始状态基准组 DFR 进行对比，得到试验结果汇总分析表，如表 3 所示。

表 3 试验结果汇总分析表
Tab.3 Test results analysis

试件 组别	试验应力 /MPa	双 95 寿命	DFR/ MPa	DFR 与基 准组比值
1	151.5	94 804	149.7	1.00
2	180	115 588	185.5	1.24
3	170.0	81 474	162.7	1.09
4	167.0	90 187	163.3	1.09
5	167.0	91 295	163.7	1.09
6	155.0	151 261	169.6	1.13
7	177.0	106 164	179.2	1.20
8	175.8	72 015	163.9	1.09
9	180	62 399	162.8	1.09
10	173	142 274	186.2	1.24

3 分析讨论

3.1 原始状态基准组 DFR 理论值计算

试验基准组 DFR 理论值按有不传载紧固件结构细节计算。根据文献[14], 计算公式如下:

$$\text{DFR} = \text{DFR}_{\text{base}} \times A \times B \times C \times D \times E \times U \times R_C \quad (1)$$

式中: DFR_{base} 为具有数百个相似细节结构件允许使用的最小 DFR 值的基准值, 基准组试验件 $\text{DFR}_{\text{base}} = 115.56$, $A = 0.93$, $B = 1.0$, $C = 1$, $D = 0.93$, $E = 1.05$, $U = 1$, $R_C = 1.44$ 。故试验基准组 $\text{DFR} = 151.1$ MPa。

3.2 喷丸成形及强化对疲劳特性的影响

基于 DFR 方法及其理论体系, 对每一个试验数据进行筛选和甄别, 对每组试验件的疲劳试验寿命进行数据处理, 最终用于数据处理的试件断口均有明显的疲劳裂纹形貌, 均可见明显的裂纹扩展条带和静强度断裂剖面等。试验确定结构细节 DFR 和双 95 寿命方法的理论和计算公式见参考文献[9]。试验结果表明, 原始基准组试验 DFR 与理论值相当, 试验过程及结果可信。

喷丸强化试验组的 DFR 值较基准组高, 经喷丸强化后疲劳性能提高了 24%。从文献[14]可以看出, 喷丸强化工艺对 2024 材料疲劳性能提高 10%。试验结果表明, 选用合适的喷丸强化工艺参数对 2024HDT-T351 板材进行喷丸强化, 在疲劳分析时, 合金和表面处理系数 B 可保守取 1.2。

4 组不同参数喷丸成形试验组的 DFR 值较基准组高, 经过大弹丸喷丸成形后, 疲劳性能提高 9%~13%。对比可知, 大弹丸喷丸成形工艺对疲劳性能的提高不如喷丸强化工艺, 可能是由于喷丸成形只要求零构件达到目标外形, 覆盖率较低或其他原因导致。试验结果表明, 选用合适的喷丸成形工艺参数对 2024HDT-T351 板材进行喷丸成形, 在疲劳分析时,

合金和表面处理系数 B 可保守取 1.05。

4 组不同参数喷丸成形后喷丸强化试验组的 DFR 值较基准组高, 经过大弹丸喷丸成形后, 喷丸强化疲劳性能提高 9%~24%, 疲劳性能提高量介于单独喷丸成形与单独喷丸强化之间。试验结果表明, 选用合适的喷丸成形和喷丸强化工艺参数对 2024HDT-T351 板材进行喷丸成形和强化, 在疲劳分析时, 合金和表面处理系数 B 可保守取 1.05。不同参数喷丸成形后喷丸强化组的疲劳性能有所差异, 通过优化喷丸成形和强化参数, 可以进一步提高 2024HDT-T351 板材喷丸成形再喷丸强化后的疲劳性能。

4 结论

1) 2024HDT-T351 铝合金板材经喷丸强化后, 疲劳性能比原始组提高了 24%, 疲劳分析时, B 可保守取 1.2。

2) 2024HDT-T351 铝合金板材经大弹丸喷丸成形后, 疲劳性能比原始组提高了 9%~13%, 疲劳分析时, B 可保守取 1.05。

3) 2024HDT-T351 铝合金板材经大弹丸喷丸成形后喷丸强化, 疲劳性能比原始组提高了 9%~24%, 疲劳分析时, B 可保守取 1.05。

4) 2024HDT-T351 铝合金板材不同参数喷丸成形后喷丸强化组疲劳性能有所差异, 可通过优化喷丸成形和强化参数来提高其疲劳性能。

参考文献:

- [1] 张志远, 支希哲, 闫五柱, 等. 2024 铝合金预拉伸板喷丸强化前后疲劳寿命的分布及可靠度模型研究[J]. 航空材料学报, 2012(4): 92-96.
ZHANG Zhi-yuan, ZHI Xi-zhe, YAN Wu-zhu, et al. Effect of Shot Blasting on Fatigue Life and Reliability Model of Prestretching Aluminum Alloy 2024[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012(4): 92-96.
- [2] 尚建勤, 曾元松. 喷丸成形技术及未来发展与思考[J]. 航空制造技术, 2010(16): 26-29.
SHANG Jian-qin, ZENG Yuan-song. Shot Forming Technology and Its Development Trend and Thinking[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(16): 26-29.
- [3] 张伟, 曹亮, 高国强, 等. 国内外航空喷丸技术与装备发展[J]. 航空制造技术, 2013(17): 32-35.
ZHANG Wei, CAO Liang, GAO Guo-qiang, et al. Development of Shot Blasting Technology and Equipment in Aviation Industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(17): 32-35.

- [4] 薛雯娟, 刘林森, 王开阳, 等. 喷丸处理技术的应用及其发展[J]. 材料保护, 2014(5): 46-49.
XUE Wen-juan, LIU Lin-sen, WANG Kai-yang, et al. Application and Development Trend of Shot Blasting Treatment Technologies[J]. Materials Protection, 2014(5): 46-49.
- [5] KLEMENZ M, SCHULZE V, ROHR I, et al. Application of the FEM for the Prediction of the Surface Layer Characteristics after Shot Blasting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 4093-4102.
- [6] LIU W C, DONG J, AHANG P, et al. Improvement of Fatigue Properties by Shot Blasting for Mg-10Gd-3Y Alloys under Different Conditions[J]. Materials Science and Engineering (A), 2011, 528: 5935-5944.
- [7] DALAEI K, KARLSSON B, SVENSSON L E. Stability of Residual Stresses Created by Shot Blasting of Pearlitic Steel and Their Influence on Fatigue Behaviour[J]. Procedia Engineering, 2010(2): 613-622.
- [8] 高少龙. 喷丸成形及强化工艺对铝合金疲劳性能及裂纹扩展的影响[J]. 机械工程师, 2012(9): 65-66.
GAO Shao-long. Influence of Shot Forming and Shot Blasting on Fatigue Property and Crack Growth of Al-alloy[J]. Mechanical Engineer, 2012(9): 65-66.
- [9] 王旭, 沈培良. 2024HDT-T351 板材喷丸成形疲劳特性研究[J]. 中国科技信息, 2016(5): 20-21.
WANG Xu, SHEN Pei-liang. The Fatigue Research of 2024HDT-T351 Aluminium Alloy Plate by Shot Blasting[J]. China Science and Technology Information, 2016 (5): 20-21.
- [10] 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.
ZHOU Song, XIE Li-yang, HUI Li, et al. Influence of Shot Blasting on Fatigue Life of 2XXX Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(12): 86-91.
- [11] 李淑明, 刘贤峰, 胡永会. 7075 铝合金表面喷丸残余应力松弛的试验研究[J]. 热加工工艺, 2013(14): 27-33.
LI Shu-ming, LIU Xian-feng, HU Yong-hui. Experiment Study on Residual Stress Relaxation of Shot Peened 7075 Al Alloy[J]. Hot Working Technology, 2013(14): 27-33.
- [12] 汝继刚, 李超, 王亮, 等. 喷丸强化对 7A12 铝合金微观组织和疲劳性能的影响[J]. 航空材料学报, 2013(6): 51-56.
RU Ji-gang, LI Chao, WANG Liang, et al. Effect of Shot Blasting on Microstructure and Fatigue Life of 7A12 Aluminum[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013(6): 51-56.
- [13] 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(9): 9-11.
WANG Xin, WANG Qiang, SONG Ying-gang, et al. Effect of Ceramic Shot-blasting on Fatigue Behavior of Aluminum Alloy[J]. Materials Protection, 2011(9): 9-11.
- [14] 《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), 疲劳设计与分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003: 209.
《Civil Aircraft Structure Durability and Damage Tolerance Design Manual》Editorial Board. Civil Aircraft Structure Durability and Damage Tolerance Design Manual(book1), Fatigue Design and Analysis[J]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003: 209.
- [15] 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.
CHANG Wei, DAI Dong-ye. Acceptance and Rejection of Dubious Data in Fatigue Testing of Materials[J]. Journal of Materials Engineering, 1995(10): 40-41.