

机身蒙皮划窝对结构细节疲劳额定值的影响

彭乾坤¹,周颜²,张彦军²,曾建江¹,孙琰翔¹

(1. 南京航空航天大学 航空学院,江苏 南京 210016; 2. 航空工业第一飞机设计研究院,陕西 西安 710072)

摘 要:飞机机身蒙皮疲劳破坏是需要重点关注的问题,为评测连接方式(沉头与平头)对其疲劳性能的影响,选取典型双剪搭接结构进行试验研究。通过试验测定结构疲劳寿命,计算得到结构细节疲劳额定值(DFR)。可以得知,沉头结构 DFR 值降低了约 22%。利用理论方法计算结构 DFR 值,对比试验数据,两种方法平均误差为 2.10%,验证理论方法的可靠性,为机身蒙皮结构疲劳性能的研究提供参考。计算不同蒙皮厚度下结构 DFR 值,得知平头结构随蒙皮厚度增加 DFR 值逐渐下降;对于沉头结构,蒙皮厚度太大或太小均会降低结构 DFR 值,选择 1.5 mm、1.8 mm 厚度蒙皮较合适。

关键词:疲劳;双剪搭接;肖维勒准则;细节疲劳额定值;疲劳寿命

中图分类号:V215.5 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)06-0036-04

Influence of Countersink of Fuselage Skin on Detail Fatigue Rating of Structure

PENG Qiankun¹, ZHOU Yan², ZHANG Yanjun², ZENG Jianjiang¹, SUN Yanxiang¹

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710072, China)

Abstract: The fatigue failure of aircraft fuselage skin is a focus needing to be attended to. To evaluate the influence of connection mode (countersunk head and flat head) on its fatigue performance, typical double-shear lap structures were selected for experimental study. The fatigue life of the structure was determined by test to obtain the DFR value of the structure. It is found that the countersunk head reduces the DFR value of the structure by about 22%. The comparison between the DFR value of the structure calculated by theoretical method and the test data shows that the average error of the two methods is 2.10%, which verifies the reliability of the theoretical method and provides a reference for the study of the fatigue performance of the fuselage skin structure. The DFR value of the structure with different skin thickness was calculated finding that the DFR value of the flat head structure decreases gradually with the increase of skin thickness. For the structure with countersunk head, excessive large or small skin thickness will reduce the DFR value of the structure, and 1.5 mm and 1.8 mm skin thickness will be better choices.

Keywords: fatigue; double-shear lap; Chauvenet criterion; detail fatigue rating; fatigue life

0 引言

飞机结构疲劳破坏一直是一个广受关注的问题,20 世纪 70—80 年代,基于民用运输类飞机机体结构的主要受力特征,美国波音公司提出了一种称为细节疲劳额定值的疲劳及耐久性分析评定方法^[1-4]。细节疲劳额定值是结构细节本身固有的一种疲劳特性值的表征,是指当应力比 $R=0.06$ 时,结构细节寿命具有 95%置信度、95%可靠度,能够承受 10^5 次载荷循环所对应的最大应力值。

铆接是国内外飞机机体制造的传统工艺。近年来,许多新方法,如焊接、胶结等工艺逐渐在飞机制造中兴起,但铆接仍然是一个主要的连接形式^[5-6]。飞机机身、机翼、尾翼蒙皮表面需要保证平滑,不允许铆钉凸出,所以需要用到沉头铆钉,但沉头铆钉会导致结构的疲劳性能降低,且具体降低多少缺少相关试验数据。

本文针对典型双剪搭接结构进行疲劳试验研究,设计

了 4 组 48 件试验件。首先利用试验测定结构的 DFR 值,再利用 ABAQUS 仿真分析计算钉载,通过理论方法计算结构 DFR 值^[7-9],为飞机蒙皮结构疲劳性能计算提供参考依据。

1 试验内容

1.1 试验概述

本试验选取典型双剪搭接结构进行试验研究,试验件分为连接带板考核段和基板加持段两部分。试验件分为铆接沉头、铆接平头两种连接方式。试验件示意图见图 1。

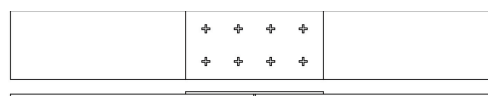


图 1 试验件示意图

试验件具体类型和数量如表1所示。

表1 试验件明细表

带板厚度/mm	紧固件	编号	试验件数量/件
1.5	平锥头铆钉	1-1	12
	100°小沉头铆钉	1-2	12
1.8	平锥头铆钉	1-3	12
	100°小沉头铆钉	1-4	12

试验件连接带板和基板材料均为2A12,紧固件材料为2A10。材料属性如表2所示。

表2 材料属性

材料	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	抗拉强度 σ_b/MPa
2A12	70 000	0.33	405
2A10	69 000	0.31	392

1.2 试验装置与载荷

为计算得到试验件 DFR 值,本试验在 MTS 液压伺服疲劳试验机上进行。试验载荷谱为应力等幅谱,应力比为 0.06,正弦波加载,频率为 10 Hz。最大应力按照疲劳调试结果确定,试验件初步估计最大应力值(连接带板应力)为 100 MPa。为满足疲劳特征寿命 β 在 15~40 万之间,需要每一组选择一个应力水平,保证有效试验件不小于 5 件。所以在每一组开始试验前,选取 2 或 3 件试验件来寻找合适的应力水平。

1.3 试验结果

试验共 4 组,每组 12 件试验件,破坏形式包括带板孔边断裂、基板断裂。其中基板断裂和为寻找合适应力水平损失的试验件视为无效试验件。有效试验件断裂方式均为带板孔边首先产生裂纹,进而扩展至断裂。如图 2 所示。



图2 试验件破坏图

疲劳破坏断口有裂纹源、疲劳裂纹扩展区、裂纹瞬断区 3 个部分。不同试验件的断裂形态相似,图 3 所示为铆接沉头试验件断口形态,图 4 为铆接平头断口形态。

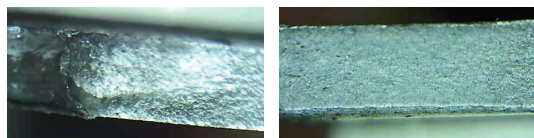


图3 铆接沉头连接试件断口形态

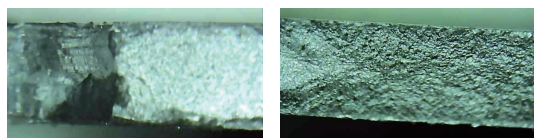


图4 铆接平头连接试件断口形态

各组试验件的疲劳寿命见表 3。

表3 试验件疲劳寿命

编号	最大应力/MPa	基板断裂数量/件	带板断裂数量/件	有效试件数量/件	循环寿命/次
1-1	125	3	9	6	164 145, 168 511, 424 687, 262 465, 307 466, 213 524
1-2	110	1	11	8	290 160, 172 416, 124 278, 175 554, 125 705, 27 897, 160 556, 88 506
1-3	120	2	10	8	346 950, 366 151, 259 663, 260 464, 227 851, 107 279, 303 224, 389 826
1-4	115	0	12	8	153 302, 234 163, 117 540, 62 527, 93 439, 146 231, 65 924, 75 996

2 DFR 值试验测定

2.1 试验 DFR 值测定方法

试验测定结构 DFR 值的步骤一般如下^[10-14]。

1) 大量试验和资料总结得出,结构疲劳寿命 N 是服从双参数威布尔(Weibull)分布的,其数学表达式为

$$F(N) = 1 - \exp[-(N/\beta)^\alpha] \quad (1)$$

式中: β 为特征寿命; α 为双参数威布尔分布的形状参数; N 为结构的疲劳寿命。

2) 计算特征寿命 β

为了保证试验的可靠性,一般应不少于 5 件试验件,假设有 n 件有效试验件,则特征寿命可由表达式(2)得出:

$$\hat{\beta} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i^\alpha \right)^{1/\alpha} \quad (2)$$

式中: n 为有效试件个数; α 为 Weibull 分布函数的形状参

数,对于铝合金材料,美国波音公司在统计了大量试验数据后,得出 $\alpha=4$; N_i 是第 i 件试验件的疲劳寿命。

3) 计算结构可靠性寿命

结构可靠性寿命 $N_{95/95}$ 表示在规定的可靠度(95%)和置信度(95%)下,修正了试件和实际结构差异之后的寿命值。

$$N_{95/95} = \frac{\hat{\beta}}{S_T S_R S_C} \quad (3)$$

$$S_R = [\ln(1/R)]^{-1/\alpha} \quad (4)$$

式中: S_T 表示试样系数,等幅载荷下试件 $S_T=1.3$; S_R 表示可靠度系数, R 表示 95%的可靠度, α 为形状系数取 4,计算得 $S_R=2.1$; S_C 表示置信度系数,与有效试件数量 n 有关。

4) 单点法求解细节额定强度 DFR 值

$$D_{FR} = \frac{\sigma_{m0}(1-r)}{0.94\sigma_{m0}X/\sigma_{max} - (0.47X-0.53) - r(0.47X+0.53)} \quad (5)$$

式中: $X = S^{(5 - \lg N_{95/95})}$, S 为 $S-N$ 曲线的斜度参数; σ_{m0} 为等寿命曲线中应力幅为 0 时对应的破坏应力。对于铝合金材料 $S=2$, $\sigma_{m0} = 310 \text{ MPa}$ 。

2.2 试验 DFR 值结果

根据上述方法计算得到试验 DFR 值见表 4。

表 4 试验 DFR 值结果

带板厚度/mm	连接方式	特征寿命	可靠性寿命	D_{FR}/MPa
1.5	铆接平头	301 870	96 109	123.83
1.5	铆接沉头	200 131	64 745	98.79
1.8	铆接平头	312 185	100 997	120.28
1.8	铆接沉头	152 711	49 404	96.64

根据表 4 可以得出: 铆接平头连接方式结构特征寿命、可靠性寿命和 DFR 值均较大。铆接沉头试验件由于沉头划窝导致孔边应力集中现象较严重, 其结构疲劳性能下降了约 22%。

3 DFR 值理论计算

3.1 理论 DFR 值计算方法

理论计算结构 DFR 值一般步骤如下^[1]。

1) 计算载荷传递系数 ψ , 对于铆接双剪结构 (被插入件)

$$\psi = 0.655 - 0.525 \lg \left(\frac{R_1}{P} \cdot \frac{S'}{d} \cdot \frac{t}{d} \right) \quad (\psi > 1 \text{ 时取 } 1) \quad (6)$$

式中: R_1 为端部一排危险紧固件载荷之和; S' 为端部一排危险紧固件的间距; d 为端部一排紧固件的平均直径; t 为端部一排危险紧固件处的板厚度; P 为总载荷。

2) 确定结构 DFR 基准值, 对于铝合金

$$D_{FR, \text{base}} = 121 \times 1 \times \psi \quad (7)$$

3) 确定各理论修正系数

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 、细节额定系数 R_C , 以上参数均只与结构本身有关。

4) 计算结构 DFR 许用值

$$D_{FR} = D_{FR, \text{base}} \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot U \cdot R_C \quad (8)$$

3.2 钉转载荷计算

为了得到双剪搭接结构中载荷钉转载荷的大小, 本文利用 ABAQUS 软件建立模型如图 5 所示。

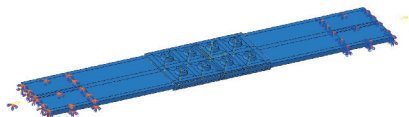


图 5 有限元模型

为模拟试验加载边界条件, 在一边固支约束, 另一边放开载荷方向位移并施加 10 000 N 载荷进行静力计算。试验件各结构均采用 8 节点六面体线性减缩积分单元 (C3D8R) 进行网格划分, 网格无关性验证较好, 网格模型如图 6 所示。

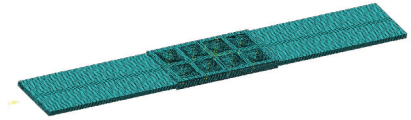


图 6 网格模型

分别计算两种带板厚度下紧固件载荷的结果见表 5。

表 5 一排危险紧固件载荷

带板厚度/mm	钉载 (中间一排)/N
1.5	5 010
1.8	5 052

3.3 结果分析

1) 结构 DFR 许用值计算

a) 根据仿真计算钉转载荷, 计算载荷传递系数进而得到结构 DFR 基准值, 计算结果: 载荷传递系数分别为 0.771 和 0.728, DFR 基准值分别为 93.29 MPa 和 88.03 MPa。

b) 确定各理论修正系数并计算结构 DFR 许用值

对于 2A12 铝合金板材修正系数见表 6, 其中沉头结构埋头深度系数对应两种板厚。

表 6 修正系数

系数	平头结构	沉头结构带板厚度/mm	
		1.5	1.8
孔填充系数 A	1.00	0.95	0.95
合金表面处理系数 B	0.95	0.95	0.95
埋头深度系数 C	1.00	0.781	0.836
材料叠层系数 D	1.00	1.00	1.00
螺栓夹紧系数 E	1.00	1.00	1.00
凸台有效系数 U	1.00	1.00	1.00
细节额定系数 R_C	1.44	1.44	1.44

结构 DFR 许用值如表 7。

表 7 理论 DFR 值结果

连接形式	带板厚度/mm	D_{FR}/MPa
平头结构	1.5	127.62
	1.8	120.43
沉头结构	1.5	94.69
	1.8	95.65

2) 试验与仿真对比分析

试验和仿真计算 DFR 值结果见表 8。

表 8 试验 DFR 与理论 DFR 值对比

编号	试验 D_{FR}/MPa	理论 D_{FR}/MPa	相对偏差/%
1-1	123.83	127.62	-3.01
1-2	98.79	94.69	4.24
1-3	120.28	120.43	-0.12
1-4	96.64	95.65	1.03

将理论结果与试验结果进行对比,从表 8 可以发现最大相对偏差为 4.24%,平均相对偏差为 2.10%,这个结果可以接受,验证了理论计算方法的可靠性,为双剪搭接结构 DFR 值测定提供了参考。

3.4 带板厚度对两种连接方式疲劳性能影响

根据上述理论与试验数据对比,可以得知有限元结合理论方法误差小,所以计算其他板厚下结构 DFR 值,进而研究板厚对两种连接方式疲劳性能的影响。

计算得到了以下 5 个厚度下两种连接方式结构 DFR 值,如表 9 所示。

表 9 不同带板厚度 DFR 值

带板厚度/mm	平头结构 D_{FR}/MPa	沉头结构 D_{FR}/MPa
1.2	135.47	88.03
1.5	127.62	94.69
1.8	120.43	95.65
2.0	116.53	95.20
2.5	108.05	92.77

从表 9 中可以得出,对于平头结构,带板厚度增加,结构 DFR 值有所下降;对于沉头结构,在带板厚度和埋头深度与带板厚度比值同时作用下,沉头结构 DFR 值在 1.5~2.0 mm 板厚下相对较大,带板厚度太大或太小均会降低结构 DFR 值。此数据为进一步工作提供了参考依据。

4 结语

1) 针对机身蒙皮双剪搭接结构,分别进行了不同厚度下连接方式的疲劳试验,可以得知,沉头导致结构 DFR 值降低了约 22%。

2) 针对机身蒙皮双剪搭接结构,分别采用试验测定和理论计算两种方法确定结构 DFR 值,两种方法测定 DFR 值结果平均误差为 2.10%,误差较小,验证了理论计算的可靠性,为蒙皮双剪搭接结构 DFR 测定提供了参考依据。

3) 带板厚度增加,平头结构 DFR 值逐渐下降;对于沉头结构,带板厚度在 1.5~2.0 mm 时,DFR 值较大,带板厚度太大或太小均会降低结构 DFR 值。

参考文献:

- [1] 郑晓玲. 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]. 航空工业出版社,2003:1-15.
- [2] 张增焕,陶汪,张溪龙,等. 机身壁板 LBW 结构 DFR 值试验测定及理论计算[J]. 哈尔滨工业大学学报,2018,50(11):17-22.
- [3] 宋欣,沈华,陈龙宝,等. Weibull 分布参数估计值对细节疲劳额定强度的影响[J]. 航空学报,2021,42(3):224759.
- [4] 鲍蕊,张建宇,陈勃,等. 试验测定 DFR 的升降法方法[J]. 北京航空航天大学学报,2004,30(1):47-50.
- [5] 飞机设计手册总编委会. 飞机设计手册:第 2 册 标准与标准件(上)[M]. 北京:航空工业出版社,2005.
- [6] 李鹏,薛应举. 连接板厚度对沉头铆钉连接强度的影响分析[J]. 航空科学技术,2019,30(8):35-40.
- [7] 陶雪菲,王瑞,高玉魁,等. 基于 DFR 法的螺栓连接件疲劳性能研究[J]. 民用飞机设计与研究,2021(4):28-36.
- [8] 张志楠,王新波,谭申刚. 机翼壁板斜搭接结构 DFR 值试验测定及理论计算[J]. 工程力学,2016,33(6):230-233.
- [9] 陈滨琦,曾建江,王一丁,等. DFR 法在结构疲劳优化设计中的应用[J]. 航空学报,2013,34(5):1122-1128.
- [10] HUANG W, WANG T J, GARBATOV Y, et al. Fatigue reliability assessment of riveted lap joint of aircraft structures [J]. International Journal of Fatigue,2012,43:54-61.
- [11] DI - CICCIO F, FANELLI P, VIVIO F. Fatigue reliability evaluation of riveted lap joints using a new rivet element and DFR[J]. International Journal of Fatigue,2017,101:430-438.
- [12] 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.
- [13] 郭翔,刘建中,胡本润,等. 细节疲劳额定强度形状参数取值[J]. 航空材料学报,2014,34(2):77-83.
- [14] 董彦民,刘文琰. 典型壁板连接件 DFR 值试验测定[J]. 工程力学,2012,29(11):355-359.

收稿日期:2022-07-01

(上接第 14 页)

- [7] LIU X H, PENG J Q, SI L, et al. A novel approach for NURBS interpolation through the integration of acc-jerk-continuous-based control method and look-ahead algorithm [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017,88(1):961-969.
- [8] XU R Z, XIE L, LI C X, et al. Adaptive parametric interpolation scheme with limited acceleration and jerk values for NC machining [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008,36(3):343-354.
- [9] JI S J, LEI L G, ZHAO J, et al. An adaptive real-time NURBS curve interpolation for 4-axis polishing machine tool [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 67:102025.
- [10] YEH S S, HSU P L. Adaptive-feedrate interpolation for parametric curves with a confined chord error[J]. Computer-Aided Design,2002,34(3):229-237.

- [11] JIA Z Y, SONG D N, MA J W, et al. A NURBS interpolator with constant speed at feedrate-sensitive regions under drive and contour-error constraints[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2017,116:1-17.
- [12] 林峰,张正红,陈胜. 基于进给速度敏感点识别的 NURBS 曲线平滑插补算法研究[J]. 中国机械工程,2012,23(9):1060-1064.
- [13] SEKAR M, NARAYANAN V N, YAMG S H. Design of jerk bounded feedrate with ripple effect for adaptive NURBS interpolator [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008,37(5/6):545-552.
- [14] 邢富冲. 一元三次方程求解新探[J]. 中央民族大学学报(自然科学版),2003,12(3):207-218.
- [15] 贾庆祥,徐知行,刘新山. 基于阿当姆斯算法的 NURBS 曲线插补[J]. 吉林大学学报(工学版),2009,39(增刊 1):215-218.

收稿日期:2022-05-18