

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.01.012

民机衬套修理技术对金属结构 疲劳性能的影响研究

Influence of Repairing Technique by Bushing on Fatigue Performance of Metal Structure for Civil Aircraft

邹建胜 朱 杰 / ZOU Jiansheng ZHU Jie

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘 要:

首先研究了民机衬套修理技术对金属结构疲劳性能的理论影响, 得出了主要影响参数, 包括衬套孔径和衬套初始干涉量; 然后通过数值模拟手段, 建立了关于典型连接结构的有限元模型, 分析了在不同衬套孔径和初始干涉量条件下, 连接结构衬套孔边的最大径向压应力变化趋势; 最后设计了若干组试片级疲劳试验, 研究了衬套孔径和衬套干涉量对细节疲劳额定值 (DFR) 的影响, 得出了当前工艺水平下的定量疲劳影响结论。

关键词: 民机; 衬套; 疲劳; 细节疲劳额定值 (DFR)

中图分类号: V215.5

文献标识码: A

[Abstract] Firstly, the theoretical influences of repairing technique by bushing on metal structure of civil aircraft are studied, and the predominant bushing factors, including bushing diameter and bushing initial interference fit level were obtained. Secondly, the numerical simulation is adopted to build the FE model of the typical structure and the radial stress variation along the R-direction at the critical point of the bushing hole was analyzed under the conditions of different bushing diameters and different bushing interference fit levels. Finally, several groups of fatigue tests are designed to study the effects of bushing factors on the detail fatigue ratio (DFR) of typical structure, and the qualitative fatigue conclusion was obtained under the process level at present.

[Keywords] civil aircraft; bushing; fatigue; detail fatigue ratio (DFR)

0 引言

随着国内航空制造业的不断发展和深入, 机体结构制造过程中会出现各种各样的制造偏离情况, 其中孔径偏离最为典型, 呈现出数量多、范围广、频次高的特点, 针对此类制造偏离, 采用衬套修理技术将不可避免, 因此非常有必要开展此类分析研究工作。

目前, 衬套修理技术虽早已在国外民机行业成熟运用^[1], 但相关技术资料极少, 国内也仅开展了少量技术研究。1997 年, 陈昌荣等人研究了

衬套与孔的干涉配合工艺^[2]。2016 年, 曹增强等人研究了飞机机械连接疲劳强化技术机理及数值模拟方法^[3]。本文主要对衬套修理技术进行了理论、数值分析及疲劳试验, 研究当前国内工艺水平下修理衬套对金属结构疲劳性能的定量影响。

1 理论与数值分析

民用飞机金属结构典型衬套修理方案如图 1 所示, 左侧为典型单剪连接结构, 右侧为连接结构在

紧固件处的剖面示意图。根据疲劳理论分析,疲劳部位应力严重程度主要由旁路载荷和钉传载荷引起的应力集中、表面质量及孔装配情况共同影响。

通过分析判断,修理衬套的不同参数对连接结构疲劳强度的影响不同,包括衬套孔径 D , 衬套干涉量 F 等。

有利于结构疲劳强度的方面包括:

1) 衬套孔径 D 增大会降低衬套孔边的挤压应力,即降低钉传载荷引起的应力集中。

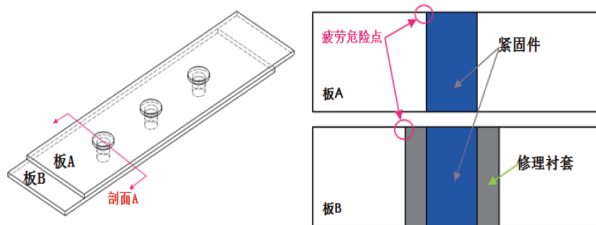
2) 衬套安装普遍采用冷冻安装方式,可以避免衬套孔壁损伤,即提高了孔表面质量。

3) 衬套孔径 D 增大会降低结构板厚 T 与衬套孔径 D 的比值,从而降低紧固件局部弯曲引起的孔边附加应力,即降低了钉传载荷引起的应力集中。

不利于结构疲劳强度的方面包括:

1) 衬套孔径 D 增大会降低衬套孔边距,即提高了旁路载荷的应力集中。

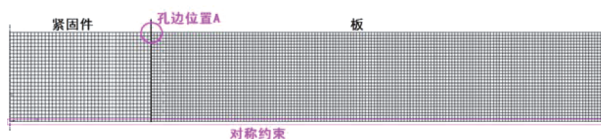
2) 随着衬套孔径 D 增大,若衬套孔初始干涉量较小,紧固件安装后,将使衬套孔干涉量较紧固件孔干涉量显著降低,即降低了紧固件孔的初始配合效果。



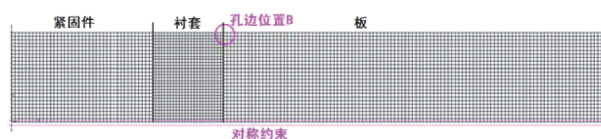
a) 典型单剪连接结构 b) 连接结构在紧固件处的剖面示意图

图 1 典型衬套修理示意图

本节将采用数值模拟方法计算紧固件孔和衬套孔边的径向最大应力,分析位置即图 1 所示的疲劳危险点,仿真计算采用商用有限分析计算软件 ABAQUS 求解。计算模型采用轴对称高阶单元 CAX8R,同时为降低计算成本,取 1/4 模型进行分析,对称面施加对称约束,衬套与连接结构和紧固件之间采用接触设置,分析时假设衬套孔边距满足设计要求。有限元模型参数详见表 1,关于衬套修理的有限元模型如图 2 所示。



a) 无衬套模型



b) 带衬套模型

图 2 衬套修理有限元模型

表 1 有限元模型参数

连接结构和衬套材料	2024-T351
紧固件材料	铝铆钉
	$E = 71 \text{ GPa}$, $\nu = 0.33$
紧固件干涉量	2%
摩擦系数	0
紧固件直径	4.76 mm
衬套外径 D	7.14 mm ~ 9.52 mm
衬套初始干涉量 F	4‰
连接结构板厚	1.6 mm

根据前述关于衬套修理结构疲劳强度影响分析,在保证衬套孔足够边距的前提下,只需分析衬套孔径 D 和衬套初始干涉量 F 的参数组合能否满足修理前原紧固件孔配合干涉效果即可。

分析模型 1: 现假设衬套初始干涉量为零,不同衬套孔径 D 与衬套孔边径向压应力的变化关系如图 3 所示,从图中可知,随着衬套孔径 D 不断增大,衬套孔边的径向压应力逐渐减小。当衬套孔径为 7.14 mm,即 1.5 倍原紧固件孔径时,衬套孔边的径向压应力为 -243.8 MPa ,而修理前紧固件孔边径向压应力为 -450 MPa ,前者仅为后者的 54.1% 左右,说明衬套修理后孔配合效果已经远远低于修理前原紧固件孔配合效果,因此需要适当增加衬套初始干涉量。

分析模型 2: 由前述分析可知,衬套初始干涉量 F 需满足一定要求,才能保证修理前后孔配合效果不降低,但干涉量应避免过大引起结构应力腐蚀。现衬套外径分别取 7.14 mm, 8.34 mm, 9.52 mm, 衬套初始干涉量取 4‰,不同衬套孔径下,衬套孔边径

向压应力的变化关系如图 3 所示,从图中可知,同样的衬套孔径下衬套初始干涉量大大提高了衬套孔边的径向压应力,虽尚未达到修理前紧固件孔配合效果,但疲劳效果明显增强,说明衬套孔径 D 越小,衬套初始干涉量越大,衬套孔的配合效果越接近修理前的水平。

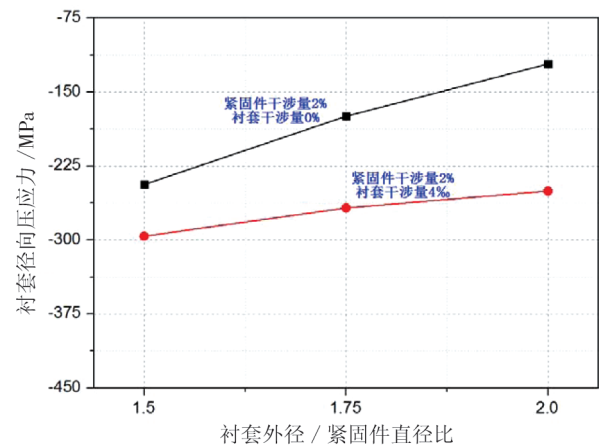


图 3 不同衬套孔径下的衬套孔边径向压应力分布

2 试验件和试验方法

关于衬套修理方法对金属结构疲劳强度的理论和数值影响分析已在上文描述,本节将设计若干组试片级试验,用于获取当前工艺水平下,衬套修理方法对于典型金属连接结构的定量影响结论。

试验件设计为典型单搭接连接结构,采用单排 NAS1097AD6 紧固件,试验件材料 7075-T6,厚度 1.6 mm,在头钉位置安装修理衬套,MTS 疲劳试验机如图 4 所示,试验件形式如图 5 所示。试验件种类和数量如表 2 所示。

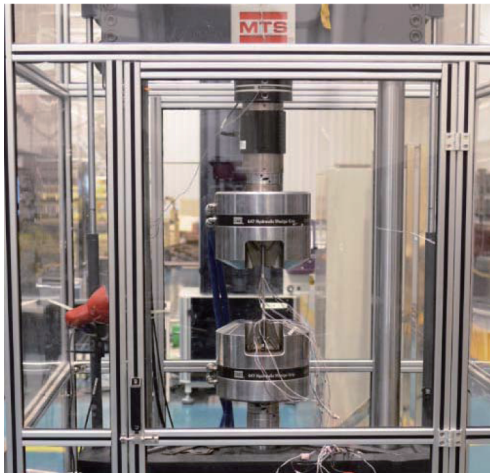


图 4 试验设备

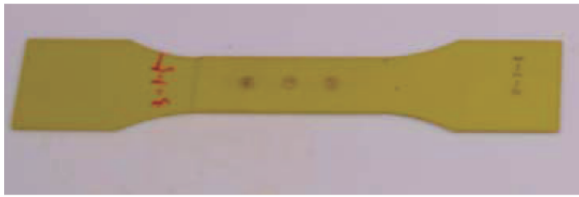


图 5 试验件

表 2 试验件种类和数量

序号	衬套初始干涉量 / inch	衬套孔径 / mm	数量
1	无衬套修理		10
2	0.000 5 ~ 0.001	6.284	10
3	0.001 5 ~ 0.002	6.284	10

本试验参照《金属材料细节疲劳额定强度截止值(DFRcutoff)试验方法》进行,试验频率为 15 HZ 左右,试验载荷谱为应力比为 0.06 的等幅正弦波。试验数据采用单点法处理,根据试验数据求得特征寿命,然后再根据试件系数、置信度系数和可靠性系数求得双 95% 的试验寿命,最终根据标准 S-N 曲线计算出疲劳品质值。

3 试验结果

根据 2 节介绍的试验件和试验方法,得出试验结果,如表 3 所示。从表中可知,衬套修理前,该典型连接结构的细节疲劳额定值(DFR)为 74.8 MPa。当衬套初始干涉量在 0.001 in 以内时,衬套修理前后,DFR 值降低 10%,当衬套干涉量提高至 0.002 in,DFR 值已经接近修理前的疲劳水平,该趋势对实际结构修理具有指导意义。

表 3 试验结果

序号	衬套初始干涉量 / inch	衬套孔径 / mm	DFR / MPa
1	无衬套修理		74.8
2	0.000 5 ~ 0.001	6.284	67.7
3	0.001 5 ~ 0.002	6.284	72.5

4 结论

- 1) 通过理论分析得出衬套修理时影响结构疲劳强度的主要参数,为衬套孔径 D 和衬套初始干涉量 F 。
- 2) 建立了衬套仿真分析模型,得出不同衬套孔

径 D 和衬套初始干涉量 F 条件下,衬套孔边径向压应力的变化趋势,侧面反映出两参数对结构疲劳强度的影响程度。

3)通过衬套修理结构疲劳试验研究,对比了衬套修理前后的结构疲劳品质差异,在典型结构设计构型,衬套初始干涉量在 0.001 in 内时,DFR 值降低 10%,衬套初始干涉量提高至 0.002 in 时,可基本保证原结构的疲劳强度水平。

参考文献:

- [1] 陈昌荣,黄维扬. 用冷挤压法实现衬套与孔的干涉配合[J]. 制造工艺技术,1997 (01): 43-44.
- [2] CHAMPOUX R L, LANDY M A. Fatigue Life Enhancement and High Interference Bushing Installation Using the ForceMate Bushing Installation Technique: ASTM STP 927[M]. 1986, 39-52.
- [3] 曹增强,张岐良. 飞机结构干涉配合强化理论及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2016.

作者简介

邹建胜 男,硕士,工程师。主要研究方向:民机结构制造偏离强度评估;E-mail:zoujiansheng@comac.cc

朱 杰 男,硕士,工程师。主要研究方向:民机结构制造偏离强度评估;E-mail:zhujie1@comac.cc