

金属和复合材料紧固件 连接柔度解析计算研究

Research on Flexibility Occount of Metal and Composite Fasteners Joint

朱闯锋 / Zhu Chuangfeng

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

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

摘要:

针对现代大型客机结构典型的紧固件连接形式,利用解析算法计算金属与复合材料单钉单剪搭接和单钉双剪搭接连接件的载荷-变形特性(P- δ 曲线)和单钉连接柔度,并与试验结果对比,验证解析算法的可行性,作为多钉连接件钉载分配、细节应力分析和飞机结构强度计算的基础。

关键词:连接件;紧固件;变形协调;有限元;柔度系数

中图分类号:V222

文献标识码:A

[Abstract] This paper research the occount method of the typical single connection structure of metal and composite fasteners. Contrast with the test data, confirm feasibility of flexibility occount data aboat the metal and composite fasteners joint. Turn into the base of multi-bolt joints and aircraft structure strength occount.

[Key words] joint; fasteners; flexibility;

0 引言

本文以金属和复合材料紧固件单钉连接的柔度测试试验及相应数据为基础,进行连接柔度解析法计算分析。

1 试验件

金属和复合材料连接试验件采用单钉单剪(单搭接)试验件和单钉双剪(双搭接)试验件,组成材料为 TC4 钛合金板和 CCF300/QY8911 层压板,按板厚分有薄板(2.0mm)和中厚度板(4.0mm),按螺栓分则有进口航空钛合金高锁螺栓连接和普通航空钛合金螺栓连接。层压板有两种铺层形式。

(1) 准备各向同性铺层:

[45/0/-45/90]2s(薄)

[45/0/-45/90]4s(中厚)

(2) 对称均衡铺层:

[45/0/-45/90/45/0/-45/0]s(薄)

[45/0/-45/90/45/0/-45/0]2s(中厚)

试验件连接形式如图 1 和图 2 所示。

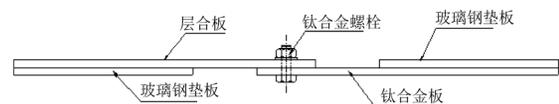


图 1 单剪试验件连接

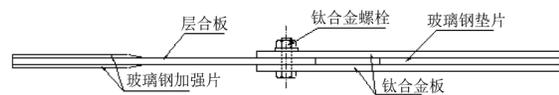


图 2 双剪试验件连接

试验件按形式、板厚、铺层和连接方式区分为 8 组,如表 1 所示。每组试验件将给出实测柔度的平均值。

2 连接柔度的解析计算方法

2.1 ESDU 方法

2.1.1 基本原理

螺栓受力变形如图 3 所示。

2.1.2 基本关系

螺栓截面转角:

表 1 试验件分组情况

试验项目	组号	板厚	连接方式	铺层
单钉单剪搭接	DDDJ-1	薄板	2mm M5 高锁螺栓	准各向同性
	DDDJ-2	薄板	2mm M5 高锁螺栓	对称均衡
	DDDJ-3	中厚	4mm M6 普通螺栓	准各向同性
	DDDJ-4	中厚	4mm M6 普通螺栓	对称均衡
单钉双剪搭接	DDSJ-1	薄板	2mm M5 普通螺栓	准各向同性
	DDSJ-2	薄板	2mm M5 普通螺栓	对称均衡
	DDSJ-3	中厚	4mm M6 普通螺栓	准各向同性
	DDSJ-4	中厚	4mm M6 普通螺栓	对称均衡

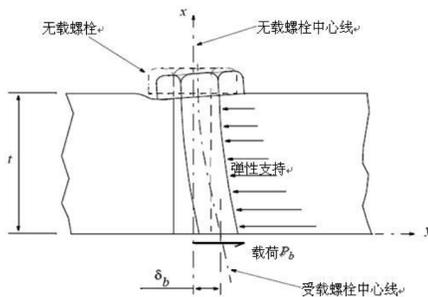


图 3 螺栓受力变形图

$$\frac{dy}{dx} = \beta + \psi_b \quad (1)$$

ψ_b 为纯弯曲引起的螺栓轴线转角; β 为受剪产生的螺栓轴线转角。

$$\beta = \frac{Q_{bx}}{\mu G_b A_b} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{6(1+\nu_b)}{7+6\nu_b} \quad (3)$$

式中 G_b 和 A_b 分别为螺栓的剪切模量和横截面积, Q_{bx} 为距离 x 处的螺栓剪力。

梁平衡:

$$\frac{dM_{bx}}{dx} + Q_{bx} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dQ_{px}}{dx} + q_{px} = 0 \quad (5)$$

$$q_{px} = -ky + G_p A_{px} \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (6)$$

$$M_{bx} = E_b I_b \frac{d\psi_b}{dx} \quad (7)$$

式中 M_{bx} 为距离 x 处的螺栓弯矩, k 为基础刚度, G_p 为板材厚度横向的剪切刚度, A_{px} 为受剪切的板的有效面积。

2.1.3 控制方程

由式(1)~式(7)导出:

$$\left[1 + \frac{G_p A_{px}}{\mu G_b A_b} \right] \frac{d^4 y}{dx^4} - \left[\frac{k}{\mu G_b A_b} + \frac{G_p A_{px}}{E_b I_b} \right] \frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{k}{E_b I_b} y = 0 \quad (8)$$

通解:

$$y = A_a e^{\eta a x} \quad (9)$$

式中 a 为 1, 2, 3 或 4; η 是方程(8)中系数的函数。

2.1.4 边界条件

在 $x=0$ 处:

$$Q_{bx} = P_b - G_p A_{px} \frac{dy}{dx} \quad (10)$$

假设两块板厚度和刚度均相同,且螺栓中有一个反弯曲线,从而使得:

$$M_{bx} = 0 \quad (11)$$

在 $x=t$ 处,有:

$$Q_{bx} = -G_p A_{px} \frac{dy}{dx} \quad (12)$$

$$M_{bx} = -\lambda \psi_b \quad (13)$$

式(11)将螺栓头处的剪力和挠曲线斜率 dy/dx 及板的剪切刚度相联系。因为在式(1)中, dy/dx 包含螺栓弯矩引起的转角 ψ_b , 所以式(12)只有当 ψ_b 可以忽略时才严格成立, 这只有当螺栓头的约束系数 λ 很大时才可以做到。

利用式(1)~式(7)和式(10)~式(13), 可以解出式(9)中的系数 A_a , 而这些系数正是计算 $x=0$ 处挠度所需要的数, 因为在式(9)中, 当 $x=0$ 时, 指数函数 e^x 的值为 1。

2.1.4 参数选择

算法中出现了 k 、 A_{px} 和 λ 三个参数, 这三个参数的选择对计算结果有不同程度的影响。

(1) 基础系数 k

对于金属板材料为钛合金, 采用 ESDU 中建议的 k 值:

$$k = 0.32 E_p \frac{D_b}{D_{ref}} \quad (14)$$

对于复合材料层压板的 k 值, 依据试验结果试探得出:

$$k = 1.08 E_p \frac{D_b}{D_{ref}} \quad (15)$$

式中 E_p 为平板加载方向的弹性模量, D_b 为钉的直径, D_{ref} 为参考值, 本次计算定为 6 (即为 M6 螺栓直径)。

(2) 有效面积 A_{px}

考虑到弹性基础内的相互剪切的作用, 对早期

弹性梁理论修正得出:

$$q_{px} = -ky + G_p A_{px} \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (16)$$

式中 G_p 为板的剪切模量, A_{px} 为板的有效面积。ESDU 方法认为 A_{px} 与螺栓直径有关。

$$A_{px} = 0.1 \times D_b^2 \quad (17)$$

(3) 螺栓头约束系数 λ

螺栓头约束系数 λ , 表示的是螺栓两端的约束(螺栓头或螺母)对连接变形的影响程度。 λ 越大, 端头转动越小。在一般情况下, λ 值很大。图 4 显示了不同厚度情况下不同的 λ 值对单钉柔度的影响, 该计算中, 采用了 DDDJ-1 组试验件(准各向同性)的材料参数。

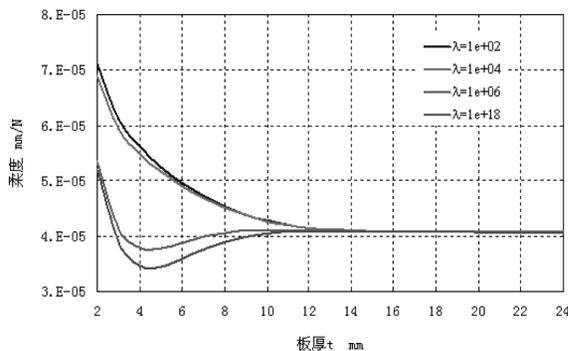


图 4 不同 λ 值对柔度的影响

从图中可以看出, 随着板厚度 t 的增加, λ 对柔度的影响减少。在连接板较薄的时候, λ 值越大柔度值越小。值在 $10^4 \sim 10^6$ 之间时, 柔度变化很明显。

考虑到高锁螺栓的约束力比普通螺栓要小, 所以高锁螺栓(对应试件组 DDDJ-1, DDDJ-2)使用的 λ 值为 10^5 , 普通螺栓(对应试件组 DDDJ-3, DDDJ-4, DDSJ-1, DDSJ-2, DDSJ-3, DDSJ-4)使用的 λ 值为 10^6 。

2.2 Nelson 经验公式

2.2.1 双剪柔度计算公式

方程适用于板横截面上的应力分布是均匀的情况。

$$f_b = \frac{2t_{sp} + t_{sk}}{3G_b A_b} + \frac{8t_{sp}^3 + 16t_{sp}^2 t_{sk} + 8t_{sp} t_{sk}^2 + t_{sk}^3}{192E_b I_b} + \frac{2t_{sp} + t_{sk}}{t_{sp} t_{sk} E_b} + \frac{1}{t_{sp}(\sqrt{E_L E_T})_{sp}} + \frac{2}{t_{sk}(\sqrt{E_L E_T})_{sk}} \quad (18)$$

式中, 下标 b, sp 和 sk 分别表示螺栓、搭接板和蒙皮。 t 表示厚度, E 、 G 分别表示杨氏模量和剪切模量, A 、 I 分别表示横截面积和惯性矩。 E_L 和 E_T 分别表示材料沿着加载方向和垂直加载方向的杨氏

模量。方程中第一项表示钉的剪切变形影响, 第二项表示钉的弯曲, 第三项表示由挤压力引起的钉表面变形, 最后两项表示板的挤压变形。

2.2.2 单剪柔度计算公式

$$f_b = \frac{2t_{sp} + t_{sk}}{3G_b A_b} + \left(\frac{2t_{sp} + t_{sk}}{t_{sp} t_{sk} E_b} + \frac{1}{t_{sp}(\sqrt{E_L E_T})_{sp}} + \frac{2}{t_{sk}(\sqrt{E_L E_T})_{sk}} \right) \quad (19)$$

式中因子 β 表示螺栓受到的弯矩中被层压板的挤压应力所平衡的比例, β 值将在钉受纯剪时的 1.0 到沉头紧固件的大约 0.5 之间变化。对凸头螺栓将变得更小; 如果还有直径—厚度比很大的大垫圈, β 值将变得非常小。

3 连接柔度计算结果

表 2 给出金属—复合材料单剪试件柔度计算有关参数, 表中 t 为板厚, D_b 为钉径, E_m 为金属板弹性模量, E_c 为层压板加载方向模量, E_b 为螺栓弹性模量, ν_m 为金属板泊松比, ν_c 为层压板泊松比, ν_b 为螺栓泊松比。层压板参数根据实测得出。

表 2 单剪连接参数

组号	ν mm	D_b / mm	E_m / GPa	E_c / GPa	E_b / GPa	ν_m	ν_c	ν_b
DDDJ-1	2.0	4.14	122	38.14	110	0.3	0.241	0.3
DDDJ-2	2.0	4.14	122	53.10	110	0.3	0.31	0.3
DDDJ-3	4.0	6.0	108.1	38.14	110	0.3	0.241	0.3
DDDJ-4	4.0	6.0	108.1	53.10	110	0.3	0.31	0.3

按 ESDU 方法计算时, 对单剪连接件的两块板均按图 4 的形式进行分析, 载荷 P_b 就等于施加的拉伸载荷。分别算出层压板和金属板的挠度 $\delta_{b,c}$ 和 $\delta_{b,m}$, 叠加起来就是紧固件连接的总变形 δ_b , $\delta_b = \delta_{b,c}$ 和 $\delta_{b,m}$, 所以连接柔度为

$$f_b = \frac{\delta_b}{P_b} \quad (20)$$

Nelson 方法直接根据式(19)计算柔度。

表 3 为柔度计算结果及与实测结果的统计。

从表 3 可以看到, 两种方法对柔度预测精度相当, 均有一组误差较大(20%左右), 其它三组结果与试验结果比较贴近(误差小于 10%)。ESDU 方法中, 参数 k 是根据 DDDJ-3 组试验结果试凑选取的, 因而对该组计算误差很小, 应用于其它三组计算时产生了一定误差。

(下转第 57 页)

[J]. 民用飞机设计与研究, 2012(S1): 182-184.
 [3]施灿涛, 杨国俊, 李铁克. 钢铁企业 APS 优化引擎的软件模型研究及应用[J]. 计算机应用研究, 2011(2): 606-608.
 [4]白德平, 袁斌, 刘建权. B/S 与 C/S 混合体系结构开发应用程序[J]. 微计算机信息, 2010(21): 151-153.
 [5]罗军, 陈静. 关于 C/S 客户/服务器技术的综述[J]. 自动化技术与应用, 2000(2): 53-55.
 [6]王波兴, 王波, 陈立平. 构筑以 Windchill 为基础的 PDM 平台[J]. 机械科学与技术, 2004(8): 969-972.
 [7]许四平. 基于 MFC 的 OpenGL 图形开发[J]. 硅谷, 2009(23): 87+71.
 [8]王鹏, 孟丹, 詹剑锋, 涂碧波. 数据密集型计算编程模型研

究进展[J]. 计算机研究与发展, 2010(11): 1993-2002.
 [9]刘爽, 史国友, 张远强. 基于 TCP/IP 协议和多线程的通信软件的设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2010(7): 1417-1420+1522.
 [10]曾斌, 彭长根, 杨辉, 曾凯, 姜小丽. 基于 J2EE 技术的企业异步通信解决方案[J]. 计算机工程, 2006(5): 252-254.
 [11]赵鹏飞, 李先国, 叶敏. 基于网络存储的等待队列调度模型的设计[J]. 计算机工程与科学, 2006(1): 95-97.
 [12]于勇, 范玉青. 飞机构型管理研究与应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2005(3): 278-283.

(上接第 50 页)

表 3 单剪结果统计

组号	柔度 f_b (mm/N)			ESDU 误差%	Nelson 误差%
	试验	ESDU	Nelson		
DDDJ-1	4.455E-05	4.701E-05	4.438E-05	5.522	0.382
DDDJ-2	3.837E-05	4.121E-05	4.200E-05	7.402	9.461
DDDJ-3	2.048E-05	2.055E-05	2.410E-05	0.342	17.676
DDDJ-4	2.351E-05	1.838E-05	2.291E-05	21.821	2.552

同样方法, 得出双剪连接柔度计算结果统计, 如表 4 所示。

表 4 双剪结果统计

组号	柔度 f_b (mm/N)			ESDU 误差%	Nelson 误差%
	试验	ESDU	Nelson		
DDSJ-1	1.820E-05	2.325E-05	3.755E-05	27.747	106.319
DDSJ-2	1.837E-05	1.914E-05	3.556E-05	4.192	93.576
DDSJ-3	1.022E-05	1.163E-05	2.123E-05	13.796	107.730
DDSJ-4	1.337E-05	0.992E-05	2.024E-05	25.841	51.384

从表 4 可以看出, ESDU 方法计算结果与试验结果偏差比单剪时大(最大接近 30%), 其主要原因可能是, 将双搭接件沿其厚度对称面分为两个单搭接件, 取其中任意一个单搭接件计算双剪柔度, 由于两块板厚度不同带来的误差。Nelson 公式的预测误差甚至为 100%, 大到无法接受的程度。

4 分析和总结

根据单剪和双剪试件连接柔度计算分析结果可见, 以实测结果为参照, 单剪试验件柔度的计算结果相对较好, 两种算法(ESDU 法和 Nelson 法)误差水平相当, 且可以接受; 双剪试验件柔度计算结

果偏差较大, 其中 ESDU 方法结果稍好, Nelson 法的结果不可接受。

ESDU 法原来是为金属接头分析开发的, 将其近似用于金属和复合材料混合连接问题分析, 不可避免带来一些误差, 对单剪连接来说主要是相互搭接板材料性质不同带来的误差, 对双剪连接来说更主要的是考虑了对称性、只取一半厚度后层压板和金属板厚度不一致带来的误差。

参数 k 、 A_{px} 和 λ 对 ESDU 法计算结果有一定影响, 而这三个参数的选取有一定随意性, 这是今后分析中需要进一步探究的另一个问题。

Nelson 方法适用于层压板和搭接板材料不同的情况, 但是针对其在双剪应用中的较大误差尚需进一步研究探讨。

参考文献:

[1]李令芳主编. 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. 6.
 [2]航空结构连接件疲劳分析手册[M]. 北京: 飞机结构强度研究所, 1985. 5.
 [3]飞机结构耐久性及损伤容限设计手册(JNS 第二册)[M]. 北京: 航空航天工业部科学技术研究院, 1989. 1.
 [4]牛春匀. 实用飞机结构工程设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2008. 10.
 [5] Flexibility of, and load distribution in, multi-bolt lap joints subject to in-plane axial loads. Engineering Sciences Data Unit, ESDU 98012, ESDU International plc, 2002.
 [6] M. A. McCarthy, C. T. McCarthy, G. S. Padhi. A simple method for determining the effects of bolt-hole clearance on load distribution in single-column multi-bolt composite joints, Composite Structures, 2006, Vol. 73, Issue. 1: 78-87.