

机翼壁板斜搭接钉载分配的数值研究

元 辛 闫五柱 刘 军 岳珠峰

(西北工业大学,西安 710129)

摘 要 利用 ABAQUS 软件对壁板斜搭接件各钉承载比例进行了三维有限元分析。在分析过程中采用静态接触算法模拟钉与板的连接、板与板的搭接,并综合考虑搭接片之间的摩擦和接触、沉头铆钉上的预紧力、铆钉干涉量以及整个模拟试验件的边界约束条件。分析计算结果与试验结果基本一致,说明采用该软件和静态接触算法来模拟计算钉载分配是可行的。研究表明,在一定的使用范围内,对于机翼壁板斜搭接结构,减少搭接片最小厚度,一、四排钉传载率下降,二、三排钉传载率上升,钉载分配趋于均匀,且孔周局部应力集中也有所降低。

关键词 斜搭接 钉载分配 应力集中 有限元

中图法分类号 TH131.1; **文献标志码** A

在任何飞行器结构中,不可避免地存在着元件与元件、元件与结构之间的连接,铆钉连接是工程结构中经常采用的一种连接形式;它有着传递载荷大,连接可靠,工艺简单,可拆卸等诸多优点^[1]。铆钉连接时,孔周应力较为复杂,既有孔边挤压区又有拉伸区。金属材料破坏形式主要表现为孔边由于应力集中出现高的拉伸载荷使之出现屈服断裂^[2]。对于多钉连接,计算各钉的载荷分配是分析多钉连接强度的关键^[3]。研究人员很早就发现,连接件由于材料、尺寸等参数的不对称会导致在多钉连接时各钉的载荷分配不均匀,这样很容易造成孔周局部出现过大的应力集中,而使结构件破坏^[4]。工程中也采用很多方法来研究影响钉载分配的结构参数,以提高连接强度^[5]。

某型机翼壁板采用斜搭接的连接方式,即搭接面切削一定的角度,来减轻结构件的重量,以及用来改善各铆钉的承载比例,且这种搭接方式的疲劳寿命要比平搭接试件的寿命长。

本文采用商用有限元软件 ABAQUS 对壁板斜

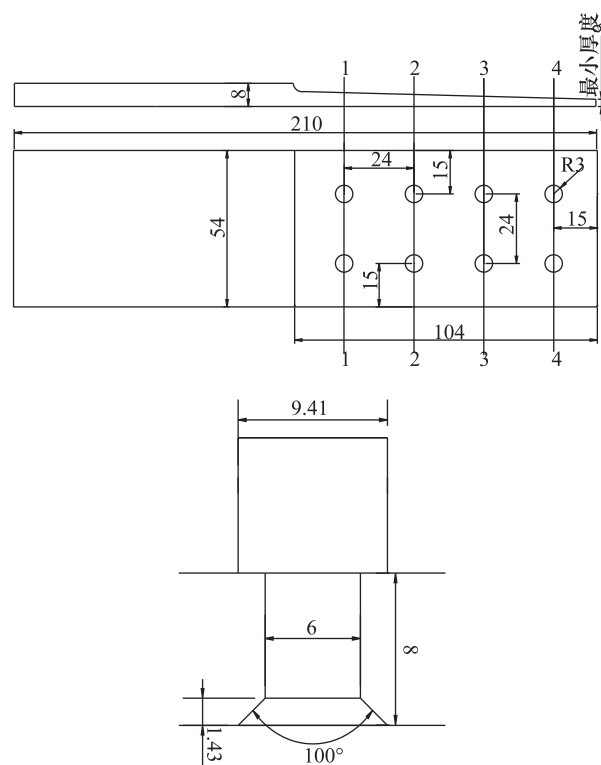


图1 斜搭接试验件上下板和铆钉尺寸(mm)

搭接件各钉承载比例进行了三维有限元模拟,综合考虑搭接片之间的摩擦和接触、沉头铆钉上的预紧力以及整个模拟试验件的边界约束条件。分析计

算结果与试验结果基本一致,说明采用该软件和静态接触算法来模拟计算斜搭接钉载分配是可行的。处理方法和计算结果在设计与应用中可供参考。

1 材料和有限元模型

1.1 材料性能

斜搭接板材料为 2024—T351,弹性模量 $E = 69 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.3$;紧固件为钛合金抗剪型 100°沉头轻型高锁螺栓,弹性模量 $E = 110 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.33$,采用 3% 的标准干涉配合装配。

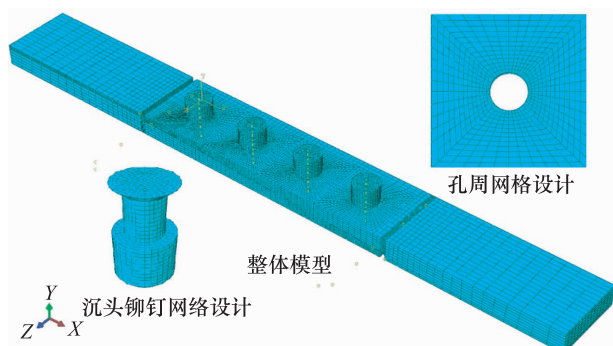


图2 有限元模型网格设计

1.2 有限元模型

本文考虑斜搭接试验件基本厚度为 8 mm,试验件上下搭接板和沉头铆钉几何尺寸如图 1 所示。8 mm 厚度斜搭接试验件所对应的孔径 d 为 6 mm,相应的孔间距和孔边距均取 $4d$ 和 $2.5d$,铤窝深度分别为 1.43 mm,铤窝斜面夹角均为 100° 。为了节约计算成本,采用对称有限元模型,沿纵向中心线取其一半计算。如图 2 所示,每个整体模型划分为约 7 万个 C3D8R 单元,沉头铆钉划分为约 4 千个 C3D8R 单元,对孔周应力集中处的网格进行了细化,细化约为 1 万个 C3D8R 单元。经试算,计算结果随网格密度的变化不大,表明网格划分是可靠的。

1.3 接触与钉载输出

为了准确模拟斜搭接试验件的拉伸受力过程,本文将整个有限元分析过程分解成 3 个载荷步,其中铆钉预紧力由载荷步 1 来完成,标准干涉配合由载荷步 2 来,载荷步 3 用来施加外载荷。

铆钉杆侧面与孔周侧面之间,铤窝斜面以及螺帽下表面和搭接件表面之间均定义无摩擦接触属性,法向接触采用增广拉格朗日算法,选用小滑动的滑动方程。两搭接面切向定义为库伦摩擦的接触属性(摩擦系数为 0.15),法向定义为硬接触。

为了输出每排铆钉所承受的载荷以及两搭接板之间的摩擦力,接触面分别定义为 Bolt1、Bolt2、Bolt3、Bolt4 和 Friction,在 ABAQUS 历史输出中输出铆钉接触力 CFN1 (Total force due to contact pressure), Friction 接触面输出变量值 CFS1 (Total force due to frictional stress)。

试件一端固定,另一端施加 69.4 MPa 的远场应力,夹持面上约束其 y 方向和沿 z 方向转动的约束(参照坐标系)。

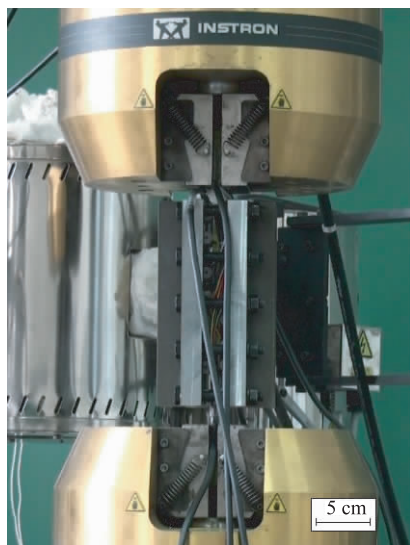


图3 试件夹具和装夹

2 试验

本次试验所采用的疲劳试验机为 INSTRON8801,为减少单搭接所造成的面外弯曲,在试件工作段安装防弯夹具。并在试件工作段的两侧,粘贴应变片,用于监控试件的对称性以及测量计算各钉的传载率。试件夹具和装夹如图 3 所示,应变片的黏贴位置见图 4。

试验分两次加载,分别为:

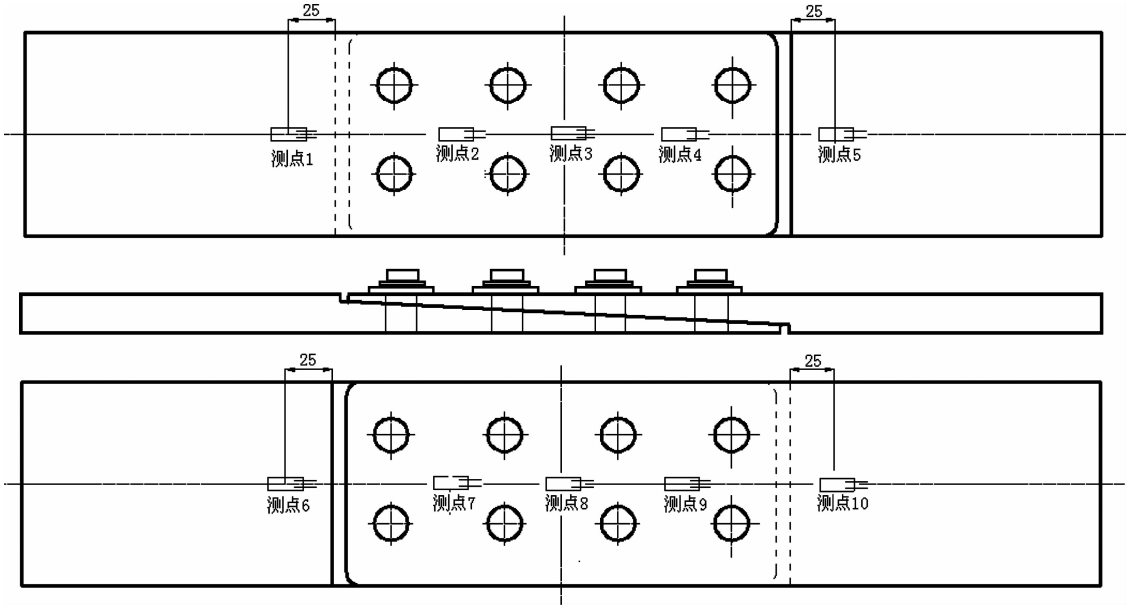


图4 应变片的粘贴位置

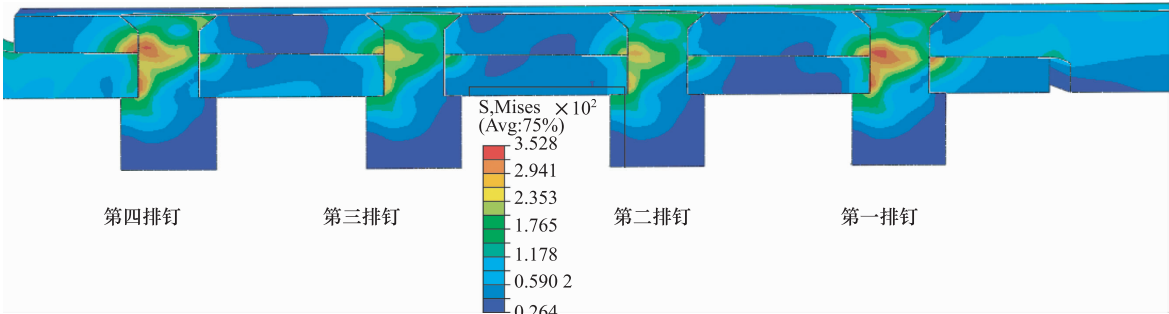


图5 模型整体应力分布

1) 加载至 45 kN,加载速率 1 mm/min,测得各应变测试点应变值。

2) 加载至 试验件破坏为止,加载速率 0.5 mm/min,测试各应变测试点应变值,记录最大破坏载荷以及最大破坏位移。

假设 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 、 ε_4 分别表示图 4 中测点 1 和 6、测点 2 和 9、测点 3 和 8、测点 4 和 7 的平均应变,可由以下公式^[7-8]计算出各排钉的承载比例:

$$\eta_1 = \frac{(h_1\varepsilon_1 - h_2\varepsilon_2)}{h_1\varepsilon_1}$$

(1)

$$\eta_2 = \frac{(h_2\varepsilon_2 - h_3\varepsilon_3)}{h_1\varepsilon_1}$$

(2)

$$\eta_3 = \frac{(h_2\varepsilon_2 - h_3\varepsilon_3)}{h_1\varepsilon_1}$$

(3)

表 1 有限元与试验结果对比

试件 编号	最小厚 度 a/mm	结果分类	第 1 排	第 2 排	第 3 排	第 4 排
A	2.5	有限元/%	29.3	23.6	22.0	25.2
		试验/%	30.2	23.4	20.3	26.1
B	3	有限元/%	29.6	22.4	21.5	27.3
		试验/%	30.9	21.4	19.9	27.8
C	3.5	有限元/%	29.8	21.2	21.0	28.0
		试验/%	31.8	20.3	19.7	28.2
D	4	有限元/%	30.0	20.5	20.5	29.0
		试验/%	32.1	19.8	19.4	28.7

式(1)~式(4)中 h_1, h_2, h_3, h_4 分别表示测点1,2,3,4处搭接片的厚度。

3 有限元计算结果与试验结果对比

通过有限元计算,获得各排钉上的所承受的载荷值,图5给出了沿纵向中心线剖面的 Mises 应力分布。

各排铆钉的传载率按下式计算:

$$c_1 = p_1/p; c_2 = p_2/p; c_3 = p_3/p; c_4 = p_4/p \tag{5}$$

式(5)中 p_1, p_2, p_3, p_4 分别为各排铆钉承担的载荷值, p 为铆钉承担的总载荷。试验结果与有限元结果见表1,可见,有限元计算与试验所得钉传载率数值上很接近,说明了采用该有限元模型计算钉载分配是可行性的。

由图6可以看出,有限元结果与试验结果不但在数值上接近,而且钉载分配规律上具有一致性,都是两端的铆钉(一、四排)承担了较大的载荷,且随着最小厚度 a 的减小,一、四排钉传载率下降,二、三排钉传载率上升,钉载分配趋于均匀。

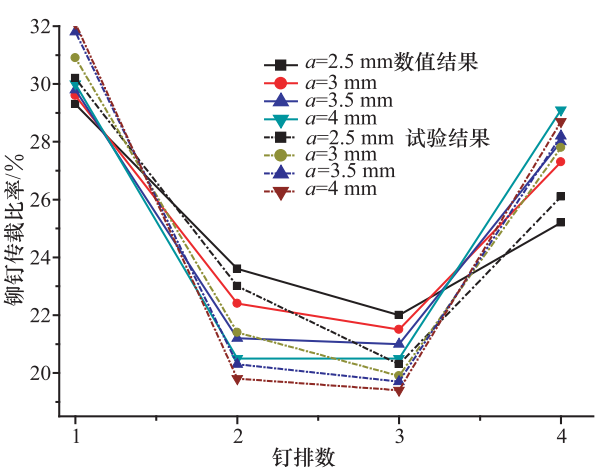


图6 两种计算结果下铆钉传载率变化图

铆钉连接时,孔周边的应力是较为复杂的,既有孔边挤压区又有拉伸区。金属材料破坏形式主要表现为孔边由于应力集中出现高的拉伸载荷使之出现屈服断裂。斜搭接方式不仅能够改善铆钉载荷分配,而且可以降低孔周的应力集中。如图7所示,随着搭接试件的最小厚度的减小,第一排孔周的最大主应力有降低的趋势。

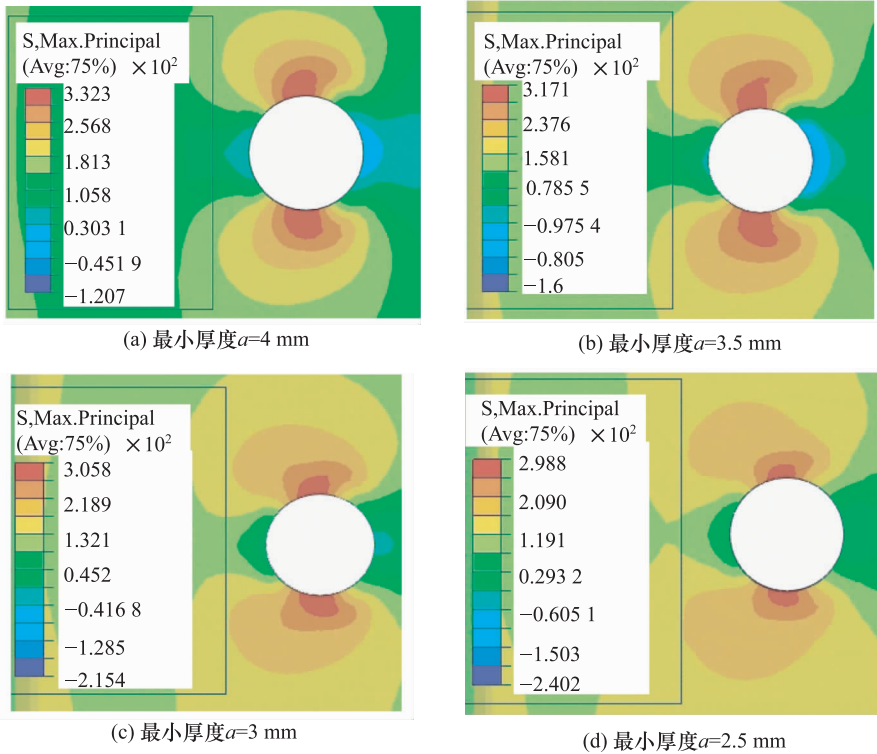


图7 孔周最大主应力云图

4 结 论

通过有限元分析和试验结果可以得到以下结论:

- 1) 采用 ABAQUS 三维有限元分析软件和静态接触算法来模拟计算斜搭接钉载分配是可行的,计算结果与试验结果在数值上接近,且钉载分配规律上具有一致性。
- 2) 对于斜搭接结构,钉载分配规律是两端的铆钉(一、四排)承担了较大的载荷,且随着最小厚度 a 的减小,一、四排钉传载率下降,二、三排钉传载率上升,钉载分配趋于均匀。
- 3) 与平搭接相比,斜搭接结构可以降低孔周的应力集中。随着搭接试件的最小厚度的减小,第一排孔周的最大主应力有降低的趋势。

参 考 文 献

1 Park C Y, Grand Jr A F. Effect of load transfer on the cracking be-

havior at a countersunk fastener hole . International Journal of Fa-
tigue, 2007;29:146—157

2 Moreira P M G P, de Matos P F P, Camanho P P. Stress intensity
factor and load transfer analysis of a cracked riveted lap joint . Mate-
rial and Design, 2007;28:1263—1270

3 Turvey G J. Bolted connections in PFRP structures struct. Engng Ma-
ter,2000;2: 146—156

4 Ekh J, Schon J. Load transfer in multirow, single shear, composite-
to-aluminium lap joints. Composites Science and Technology, 2006;
66:875—885

5 Sathiya S Naarayan D V T G, Kumar P, *et al.* Implication of unequal
rivet load distribution in the failures and damage tolerant design of
metal and composite civil aircraft riveted lap joints, Engineering Fail-
ure Analysis, 2009;16:2255—2273

6 黄豪杰. 复合材料多钉连接载荷分配均匀化方法. 西安:西北工
业大学,2007

7 蒋持平,张 行. 多钉连接件钉传载荷计算的一个解析方法. 航
空学报,1994;15(3): 310—317

8 舒文军,何宇廷,刘仁宇,等,板间摩擦对航空连接件疲劳性能的
影响,2010;42(3):347—350

Numerical Study on Pin Load Distribution of Scarfed Lap Joint of Airfoil

YUAN Xin, YAN Wu-zhu, LIU Jun, YUE Zhu-feng
(Northwesfern Polytechnical University, Xián 710129, P. R. China)

[Abstract] The pin load distribution of scarfed lap joint was studied using ABAQUS software. The connects be-
tween countersunk rivet and sheet, upper and lower sheets were simulated by introducing the static state contact
arithmetic. The friction between jointed sheets, the clamping force of the countersunk rivet, interference-fit as well
as the boundary conditions of the whole modes were considered comprehensively in the analysis. The calculated re-
sults agree well with experiment data. It is proved that using static state contact arithmetic with ABAQUS software to
simulate the pin load distribution is feasible. The study shows that reducing the minimum thickness of jointed sheet
can average. Meanwhile, the local stress concentration is reduced remarkably.

[Key words] scarfed lap joint pin load distribution stress concentration finite element