

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.06.019

轴压铆接加筋板局部屈曲弹性支持分析方法

陈金睿¹, 孔斌^{1,2}, 陈普会², 杨军¹, 甘学东¹

(1. 中国航空工业集团公司成都飞机设计研究所, 成都, 610091; 2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京, 210016)

摘要: 考虑铆钉连接对筋条扭转弹性支持作用的影响, 利用三角函数构造筋条在铆钉连接情况下的扭转支持刚度, 采用里兹能量法建立轴压铆接加筋平板蒙皮局部屈曲问题的弹性支持理论分析模型及分析方法。分别采用试验方法、有限元方法、工程简化分析方法和本文分析方法对典型轴压金属 Z 形铆接加筋平板的蒙皮局部屈曲临界应力进行算例分析, 验证了本文分析方法的合理性。在此基础上进一步研究了不同的铆钉间距和铆钉连接方式对加筋板蒙皮局部屈曲临界应力的影响。结果表明: 在 Z 形加筋板结构形式、尺寸、铆钉间距皆为工程常用范围的前提下, 若铆钉连接方式不变, 改变铆钉间距对屈曲临界应力影响不足 1%; 若铆钉间距不变, 单排连接改为双排或者交错排可以提高屈曲临界应力约 11%。

关键词: 铆钉连接; 加筋壁板; 弹性支持; 局部屈曲; 里兹法

中图分类号: V214.8 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2020)06-0989-08

Local Buckling Analysis Method of Elastically Restrained Riveted Stiffened Panels Under Uniaxial Compression

CHEN Jinrui¹, KONG Bin^{1,2}, CHEN Puhui², YANG Jun¹, GAN Xuedong¹

(1. AVIC Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu, 610091, China; 2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Given the influence of riveted joints on elastically rotational restraint of stiffeners, the trigonometric function was used to simulate rotational restraining rigidity of stiffener, and Ritz method was used to establish an analytical model for local skin buckling problem of riveted stiffened panels under uniaxial compression. Critical local skin buckling stresses of typical metal riveted stiffened panels with Z-shaped stiffeners were calculated and analyzed by the experimental method, the finite element method (FEM), the engineering simplified analytical method and the proposed analytical method. The reasonableness of the proposed analytical method was verified. Furthermore, the influences of rivet spacing and rivet attachment form on critical local skin buckling stresses were studied. Results showed that the variation of rivet spacing had less than 1% effects on critical local skin buckling stresses, while rivet attachment form stayed unchanged; and that double-row and interleaving-row rivet attachments could increase critical local skin buckling stresses about 11% compared with single-row rivet attachment, while rivet spacing stayed unchanged on conditions that configurations, dimensions and rivet spacing of Z-shaped stiffened panels were in common range of aerospace engineering use.

Key words: riveting; stiffened panels; elastical restraint; local buckling; Ritz method

基金项目: 民机科研(MJ-2015-F-038)资助项目。

收稿日期: 2019-02-22; 修订日期: 2020-09-07

通信作者: 陈金睿, 男, 硕士, 工程师, E-mail: chenjinrui666@126.com。

引用格式: 陈金睿, 孔斌, 陈普会, 等. 轴压铆接加筋板局部屈曲弹性支持分析方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(6): 989-996. CHEN Jinrui, KONG Bin, CHEN Puhui, et al. Local buckling analysis method of elastically restrained riveted stiffened panels under uniaxial compression[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(6): 989-996.

加筋板结构是现代飞机常用的一种结构形式。精确分析该类结构的屈曲强度并加以设计,将有助于发掘该类结构的后屈曲承载潜力,对于减轻结构本身和飞行器的质量、改进结构设计具有重要的经济和工程意义^[1-2]。

加筋板结构在轴向压缩载荷作用下的筋条间蒙皮局部屈曲是加筋板结构最主要的失稳模式。当采用工程方法分析加筋板的蒙皮局部屈曲时,筋条支持通常被简化为简支或者固支^[3]。这种简化虽然提高了计算效率,但是计算精度不高。考虑筋条对蒙皮的弹性支持作用(介于简支和固支之间)可以提高计算精度,但在这种情况下采用解析方法很难精确求解控制方程。里兹能量法作为一种强有力的替代方法,使储存在系统和结构内的能量最小化,生成可用的、近似的、精度合理的解^[4],其优点是计算效率高、精度合理,适合初步设计。采用里兹能量法分析平板/加筋平板结构的稳定性,这方面国内外业已进行了数量可观的研究。Qiao和Shan采用里兹能量法建立特征值方程,对受到均匀面内压缩载荷作用下的矩形正交各向异性平板在两加载边简支、两非加载边扭转弹性约束或者一侧自由一侧扭转弹性约束下进行了局部屈曲分析,给出了与扭转支持刚度 k 有关的平板局部屈曲应力封闭解,并讨论了侧边为板约束时候扭转支持刚度 k 的计算方法^[5]。Kollar总结了以往长板和一般各向异性矩形层合板在各种边界条件下的轴压以及剪切屈曲公式,并将之运用到复合材料开剖面/闭剖面型材的局部屈曲分析上,提出扭转杆和扭转弹簧两种模拟扭转弹性支持的方法^[6]。Stamatelos等考虑筋条对于蒙皮的弹性支持,将筋条等效成变剪切刚度系数和变扭转刚度系数的弹簧,采用里兹能量法求解轴压各向同性/各向异性加筋板蒙皮局部屈曲问题^[7]。Bisagni和Vescovini将轴压加筋板结构中的筋条简化为圣维南扭转杆(De Saint Venant torsion bar),采用Kantorovich法和里兹能量法分别建立加筋板蒙皮局部屈曲应力公式,最重要的贡献是利用里兹法得到了屈曲应力的显式解^[8]。陈金睿等考虑筋条缘条对于蒙皮屈曲的影响,改进了复合材料加筋板蒙皮屈曲问题的能量法模型,提高了能量法的计算精度^[9]。Wittenberg等采用里兹能量法研究了正交各向异性加筋平板的剪切屈曲,并对不同筋条形式的Glare加筋板进行算例分析,计算结果与有限元仿真结果吻合较好^[10]。在铆接加筋板屈曲问题研究方面,刘常东基于有限元素法,分析了筋条与蒙皮的铆钉连接及其简化假设,改进了铆接加筋板的计算模型^[11]。万志奇等则采用有限元法对铆接加筋板进行精细模拟,屈曲计算与试验结果

具有良好的一致性^[12]。试验方面,Hickman等对Z形铆接铝合金加筋板、Schuette等对帽形铆接铝合金加筋板分别进行了压缩试验,积累了大量的铆接加筋板屈曲试验数据^[13-14]。

以往的研究者们致力于采用能量法构建加筋板结构屈曲问题的一般模型,对特定类型结构适用性不高,特别是未对航空中常用的金属铆接加筋板进行基于能量法的分析研究。本文针对金属铆接加筋板这一特定结构,在考虑筋条的扭转弹性支持作用基础上,进一步考虑铆钉连接方式的影响,建立适用于轴压铆接加筋板蒙皮局部屈曲分析的能量法计算模型,该模型与一般模型相比计算精度大大提高,对加筋板铆接结构的屈曲分析与设计具有指导意义。

1 模型以及分析方法

1.1 分析模型

本文主要讨论加筋平板筋条间的蒙皮局部屈曲问题。图1(a)为加筋蒙皮结构示意图。加筋板总宽度为 B ,总长度为 a 。对加筋板的研究通常简化为对宽度为 b_s (筋条腹板之间的距离)的蒙皮板元以及蒙皮板元两侧的筋条(图中灰色部分)所组成的部分研究。考虑筋条对蒙皮的扭转弹性支持,将筋条简化为圣维南扭转杆。文献[9]指出对于复合材料胶接加筋板结构,筋条整体起到分隔屈曲波形的作用,因此筋条下缘条对于蒙皮局部屈曲有一定影响,反映在理论模型中即蒙皮板元宽度应为 b 而不是 b_s , b 值与加筋板的横截面特性有关。本文进一步认为,对于铆接加筋板结构, b 值除与加筋板横截面特性有关之外,还与铆钉排列位置有关。对于开剖面加筋板,由于铆钉连接时筋条下缘条不能紧贴在蒙皮上,削弱了整体筋条对屈曲波形的分隔作用,因此铆钉排列位置是影响 b 值的主要因素, b 可取为筋条最外侧一排铆钉之间的距离,如图2所示。轴压铆接加筋板蒙皮局部屈曲分析模型最终简化为长度为 a ,宽度为 b ,两加载边受到均匀轴压且支持条件为简支,两侧边弹性支持的平板屈曲分析模型,如图1(b)所示。

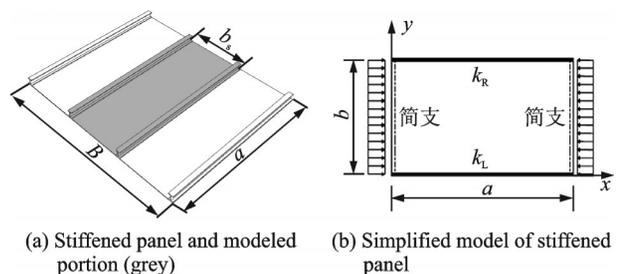


图1 轴压铆接加筋板蒙皮稳定性分析模型

Fig.1 Buckling-analysis model of riveted stiffened panel

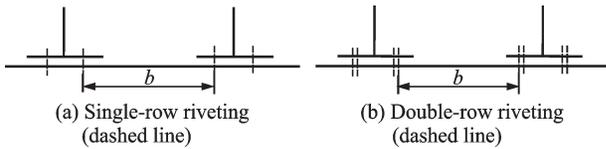


图 2 开剖面铆接加筋板蒙皮板元宽度

Fig.2 Plate width for skin of open-shaped riveted stiffened panel

1.2 边界条件与面外位移函数

里兹能量法要求面外位移函数应精确满足位移边界条件而近似满足力边界条件。蒙皮板元两加载边为简支边界,满足里兹能量法假设的位移边界条件和力边界条件为

$$\begin{cases} w(0,y)=0, M_x(0,y) \approx -D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \\ w(a,y)=0, M_x(a,y) \approx -D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: w 为蒙皮面外位移函数; M_x 为绕 y 轴的力矩; D 为板元弯曲刚度系数。该式所用坐标系见图1(b),下同。

蒙皮板元两侧边为弹性支持边界条件,抗弯矩由筋条提供。由于假设筋条为圣维南扭转杆,因此筋条只有扭转变形而无挠曲变形。

对于铆接结构,蒙皮板元两侧边力的边界条件为

$$\begin{cases} M_y(x,0) \approx -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)_{y=0} = \partial \left(k_L \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) / \partial x \Big|_{y=0} \\ M_y(x,b) \approx -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)_{y=b} = -\partial \left(k_R \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) / \partial x \Big|_{y=b} \end{cases} \quad (2)$$

式中: M_y 为绕 x 轴的力矩; k_L 和 k_R 分别定义为 $y=0$ 和 $y=b$ 两侧边扭转杆的扭转支持刚度,见图1(b)。扭转支持刚度除了与筋条截面自由扭转刚度有关之外,还与筋条受压、筋条限制扭转等因素有关。本文对加筋板做出以下假设:(1)筋条数量很多、构型相同、铆钉连接方式相同且筋条等距分布;(2)筋条相对蒙皮刚硬。满足以上假设的情况下,扭转支持刚度只与筋条截面自由扭转刚度和铆钉连接方式有关。

蒙皮板元两侧边的位移边界条件为

$$\begin{cases} w(x,0)=0 \\ w(x,b)=0 \end{cases} \quad (3)$$

综上所述,式(2)和(3)构成了铆接加筋板蒙皮板元侧边的边界条件,式(1)构成了加载边的边界条件。

面外位移函数应满足侧边边界条件并且需要

满足介于简支和固支之间的任意弹性支持刚度。另外为得到应力的显示解,避免不定方程,加载边只考虑简支情况。综上所述,选择多项式和三角函数组合的面外位移函数形式^[5,8]

$$w = (A_1 y + A_2 y^2 + A_3 y^3 + A_4 y^4) \sin \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \quad (4)$$

式中: A_1 到 A_4 为未知系数; m 为板元沿着长轴方向的屈曲半波数。将面外位移函数代入边界条件中,可消去未知数 A_2 到 A_4 ,仅 A_1 未知。此时位移函数精确满足位移边界条件,近似满足力的边界条件,满足里兹法要求。

1.3 扭转支持刚度

对于铆接结构,本文认为沿着长轴方向打钉处附近的筋条对于蒙皮产生完全的抵抗扭转的作用,而在两个打钉处之间的筋条这种抵抗扭转的能力会被削弱。因此,沿着长轴方向,筋条的自由截面扭转刚度 GJ 虽然不变,但是筋条对于蒙皮的扭转支持刚度 k_L 和 k_R 是变化的,即 k_L 和 k_R 是 x 的函数。忽略铆钉的大小,仅仅考虑铆钉沿着长轴方向的列数以及沿着宽度方向的排数,则铆接筋条的扭转支持刚度可以由三角函数模拟,如图3所示。筋条的扭转支持刚度可以表示为

$$k_L = k_R = \frac{GJ}{4} \left(1 + \cos \left(\frac{2n\pi \left(x + \frac{a}{2n} \right)}{a} \right) \right) \quad (5)$$

式中 n 为铆钉沿着长轴方向的列数。打钉处附近的截面的扭转支持刚度 $k=GJ/2$,即筋条对两侧蒙皮起到弹性支持作用且弹性支持作用相同;远离打钉处的截面的扭转支持刚度 $k=0$,即筋条对两侧蒙皮弹性支持作用很小,近似为简支。

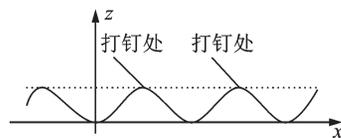


图 3 铆接筋条扭转支持刚度随长轴变化

Fig.3 Rotational restraining rigidity of riveted stiffener along with x axis

1.4 最小势能原理及其封闭解

图1(b)所示的平板系统的总势能(Π)包含3个部分:蒙皮板元的弹性应变能(U_p)、筋条的扭转应变能(U_s)和外力所做的功(W),并且总势能有如下表达式

$$\Pi = U_p + U_s - W \quad (6)$$

蒙皮板元应变能有如下表达式

$$U_p = \frac{D}{2} \iint_{\Omega} \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1 - \nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right] dx dy \quad (7)$$

式中： Ω 为蒙皮中面的面积； ν 为泊松比。

筋条的扭转应变能表达式如下

$$U_s = \frac{1}{2} \int_0^a k_L \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y \partial x} \right)^2 dx \Big|_{y=0} + \frac{1}{2} \int_0^a k_R \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y \partial x} \right)^2 dx \Big|_{y=b} \quad (8)$$

外力功仅包含轴力做的功,有如下表达式

$$W = -\frac{1}{2} \iint_{\Omega} \left[\bar{N}_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] dx dy \quad (9)$$

式中 \bar{N}_x 为沿着 x 方向单位宽度的轴力,压力为负,拉力为正。

根据最小势能原理,在满足位移边界条件的所有容许位移中,真实位移应使总势能有驻值。系统的平衡方程等价于系统总势能一阶变分为0,即

$$\delta \Pi = \delta U_p + \delta U_s - \delta W = 0 \quad (10)$$

将位移函数式(4)代入边界条件式(1)、式(2)、式(3)中,并将结果代入式(10)中,可得平衡方程

$$\frac{\partial \Pi}{\partial A_1} \delta A_1 = 0 \quad (11)$$

解平衡方程(11),即得平板压缩屈曲载荷 $\bar{N}_{x,c}$ 。式(11)中包含未知量 x 和 m ,可令 $m=1,2,3,\dots$ 在每个 m 值下令 $x=0,1,2,\dots,a$,取其中极小值(不含符号)作为该 m 值下的载荷极小值。通过比较各个 m 值下的载荷极小值,其中的最小值(不含符号)即为板的压缩屈曲临界载荷 $\bar{N}_{x,c}$,相应的 m 即为屈曲半波数。

2 算例验证

2.1 试验方法概述

对金属Z形铆接加筋板开展屈曲试验,试验数据来自文献[13]。试验件为铆接75S-T6铝合金Z形加筋板。筋条与蒙皮通过Al7S-T4平头铆钉单排连接,铆钉直径4.76 mm,铆钉间距11.88 mm。铝合金材料模量70 000 MPa,泊松比0.33。试验件两侧边为自由边界,试验件两端无罐封浇注端头,通过打磨端面保证试验件的垂直度以及与试验机底面、压头的接触状态,固定端约束轴向位移,加载端施加均匀轴向压力。试验件

及加持条件如图4所示。试验在最大载荷为120万磅轴压试验机上完成。加筋板横截面示意图如图5所示。



图4 Z形加筋板试验件

Fig.4 Z-shaped stiffened panel for testing

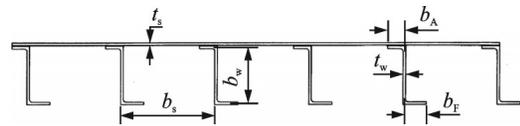


图5 Z形加筋板横截面示意图

Fig.5 Cross section of Z-shaped stiffened panel

2.2 有限元方法概述

从文献[13]中选择3块Z形加筋板采用ABAQUS有限元软件进行仿真,加筋板尺寸见表1,其中 L 为加筋板长度,其余尺寸定义见图5。加筋板采用S4R常规壳单元建模。为方便与弹性支持分析方法直接比较,加载边支持条件设为简支。采用Fasten单元模拟铆钉连接^[15]。采用buckle分析步对模型进行线性特征值屈曲分析。考虑网格尺度对计算结果的影响,对3块加筋板分别采用10 mm×10 mm、5 mm×5 mm和2 mm×2 mm这3种网格尺度进行收敛性分析,如图6所示(以Z-3加筋板为例)。综合考虑计算成本和工程精度,当某次计算结果与上次计算结果误差小于5%时,认为网格尺度满足精度要求。根据计算结果(表2),确定网格尺度为2 mm×2 mm。

表1 Z形铆接加筋板尺寸

Table 1 Dimensions of Z-shaped riveted stiffened panels

编号	t_w	t_s	b_s	b_w	b_F	b_A	L
Z-1	2.58	2.62	104.28	78.13	30.79	16.65	1 109.45
Z-2	2.53	2.62	102.97	52.06	20.47	17.44	708.02
Z-3	2.51	2.64	103.49	31.4	12.36	17.08	386.22

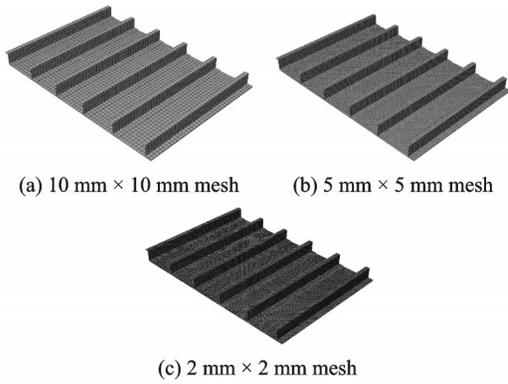


图 6 Z-3加筋板 3种网格划分

Fig.6 Three finite element meshes of Z-3 stiffened panels

表 2 Z形铆接加筋板不同网格划分下的蒙皮局部屈曲临界应力

Table 2 Critical local skin buckling stresses of different meshes of Z-shaped riveted stiffened panels MPa

编号	10 mm×10 mm 网格	5 mm×5 mm 网格	2 mm×2 mm 网格
Z-1	268.27	207.43	201.81
Z-2	270.73	212.73	205.28
Z-3	254.43	209.25	201.20

2.3 弹性支持分析方法和工程方法概述

首先,采用本文建立的弹性支持分析方法对上述加筋板进行屈曲分析。 b 值按照 1.1 节方法选取:对于 Z形加筋板, b 取筋条最外侧一排铆钉之间的距离。Z形筋条的自由截面扭转刚度可按材料力学方法计算。

其次,采用工程简化分析方法对上述加筋板进行对比屈曲分析。筋条分别简化为简支和固支,加载边支持为简支。轴压屈曲公式按照下式计算^[16]

$$\sigma_{cr} = \frac{k_c \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (12)$$

式中: σ_{cr} 为加筋板蒙皮屈曲临界应力; k_c 为压缩屈曲系数,按照图 7 查取^[16]; t 为蒙皮厚度; b 取筋条间距 b_s 。

2.4 对比结果分析

加筋板试验分析、有限元分析、弹性支持分析、工程简化分析方法得到的屈曲模式皆为蒙皮局部屈曲,图 8 给出了有限元方法做出的 Z形加筋板的屈曲模式图,变形放大系数 10。图 9 给出了 3 块加筋板屈曲时的筋条变形,变形放大系数 10。表 3 给出了铆接加筋板试验、有限元、工程简化分析方法以及本文方法计算得到的蒙皮局部屈曲临界应力结果,括号中数字表示屈曲半波数。对比结果分析如下:

(1) 文献[13]未见关于加筋板屈曲半波数的报道,从屈曲应力的数据对比上看,有限元值普遍

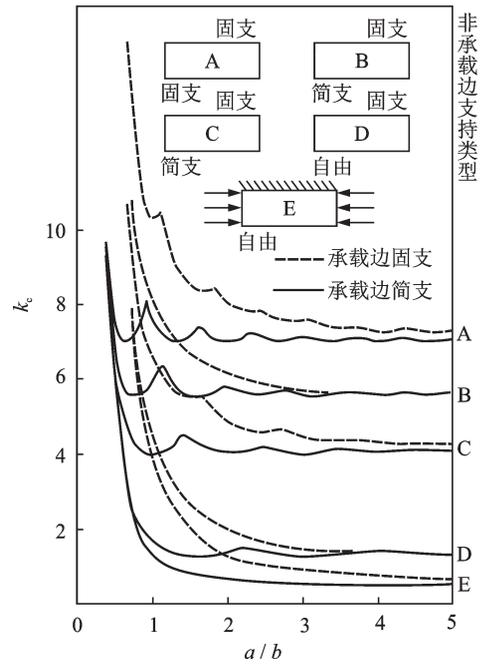


图 7 矩形平板压缩屈曲系数 k_c

Fig.7 Compressive buckling coefficient k_c of rectangle plate

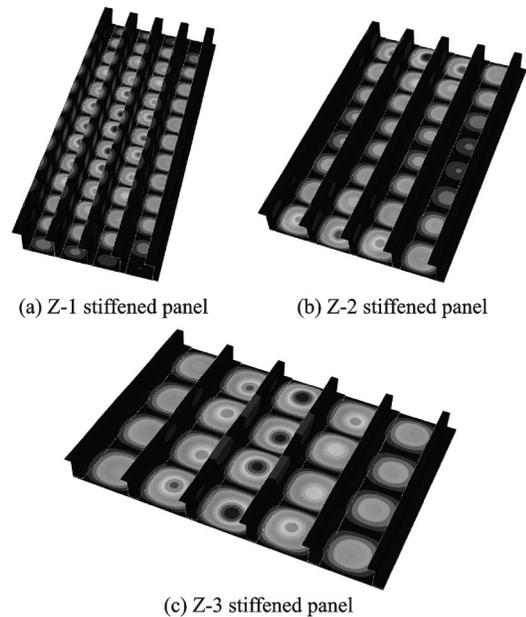


图 8 Z形加筋板有限元屈曲模式

Fig.8 FEM buckling mode of Z-shaped stiffened panels

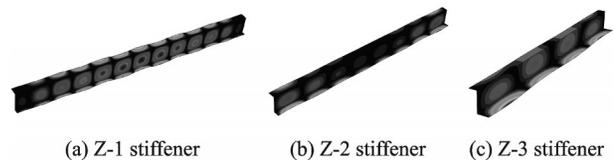


图 9 Z形加筋板筋条变形

Fig.9 Stiffener deformations of Z-shaped stiffened panels

低于试验值,该误差主要是由于有限元模型与试验的加持条件不一致所致。有限元模型的有效性和结果的准确性通过成熟的建模方法和网格的收敛性分析得以保证^[1,9,15]。

表3 铆接加筋板试验、有限元、工程简化分析方法以及本文方法蒙皮局部屈曲临界应力对比

Table 3 Comparison of critical local skin buckling stresses of riveted stiffened panels between experimental method, FEM method, engineering simplified analytical method and the proposed analytical method

编号	试验值/ MPa	有限元值/ MPa	本文方法/ MPa	本文方法 与有限元 误差/%	工程方法 简支解/MPa	工程方法 固支解/MPa	工程方法简 支解与有限 元误差/%	工程方法固 支解与有限 元误差/%
Z-1	212.36	201.81(13)	216.83(13)	6.00	163.38(11)	284.71(16)	-19.04	41.08
Z-2	224.08	205.28(8)	209.45(8)	-3.57	167.44(7)	292.5(10)	-18.43	42.49
Z-3	216.50	201.20(4)	196.95(4)	-2.11	169.05(4)	295.07(6)	-15.98	46.66

注:括号中数字为屈曲半波数。

(2) 按照工程简化分析方法,开剖面筋条应简化为简支。由表3可知,Z形加筋板屈曲应力简支解与有限元值偏差分别为-19.04%、-18.43%和-15.98%,表明按照工程简化分析方法,屈曲分析偏于保守且偏差较大,原因在于Z形筋条尺寸较大且较厚,其对蒙皮的扭转弹性支持作用不应忽略。

(3) 从屈曲应力和屈曲半波数看,在相同屈曲半波数下,本文弹性支持方法结果与有限元值误差在6%以内。从筋条变形上看,筋条均为扭转变形而无明显的弯曲变形,并且分别计算3块加筋板筋条截面绕筋条腹板垂直方向中性轴的弯曲刚度和自由截面扭转刚度,其弯曲刚度与扭转刚度的比值分别为1 056、519、203,表明筋条的抗弯能力远大于抗扭能力,符合本文弹性支持理论模型中将筋条简化为圣维南扭转杆的假设。以上两点验证了本文方法的合理性。对Z形加筋板,本文方法较工程简化分析方法能够明显提高计算精度并满足工程精度要求,其原因在于Z形筋条的真实支持介于简支和固支之间,本文方法较好地模拟了这种支持。

3 铆接形式分析

由于Z-3加筋板构型、尺寸以及铆接方式皆为工程常用形式,具有代表性,因此本节只以Z-3加筋板为例进行铆接形式分析。采用本文建立的弹性支持分析方法对Z-3构型加筋板进行铆钉连接变间距分析以及变连接方式分析。加筋板加载边简支,侧边自由。加筋板尺寸、铆钉类型不变,分别改变单根筋条上单排铆钉间距以及铆钉连接方式(单排、双排、交错排),以此考察铆钉连接方式不变的情况下铆钉间距对屈曲临界应力的影响以及铆钉间距不变的情况下铆钉连接方式对屈曲临界应力的影响。单排铆接加筋板单根筋条上铆钉数量以及铆钉间距变化如表4所示,间距变化范围控制在工程常用铆钉间距范围,即 $3d$ 至 $6d$ 之间(d 为铆钉直径)。双排以及交错排铆接排距按照筋条下缘条宽度均匀布置,铆钉间距与单排相同,如图10所

示。表5给出了4种不同铆钉间距以及在该铆钉间距下不同铆钉连接方式的Z形加筋板蒙皮局部屈曲临界应力的计算结果。

表4 Z-3构形加筋板单筋条铆钉数量与铆钉排距变化

Table 4 Variations of rivet spacing and quantity of Z-3 shaped stiffened panels

编号	铆钉数量	铆钉间距/mm
Z-3-14	27	14
Z-3-19	20	19
Z-3-24	16	24
Z-3-28	14	28

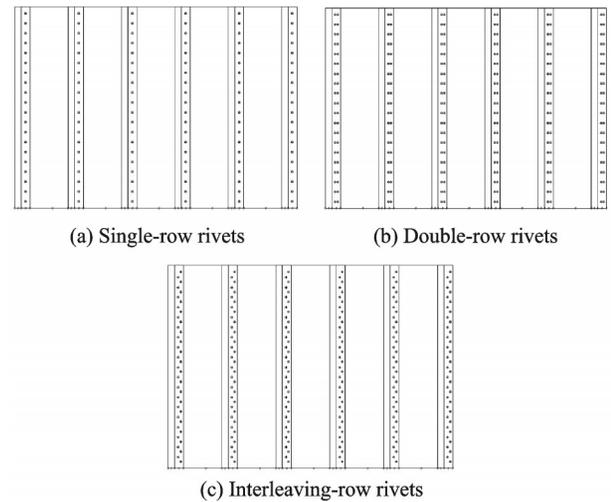


图10 不同铆钉连接形式的Z形加筋板示意图

Fig.10 Different kinds of rivet attachment of Z-shaped panels

表5 Z-3构形加筋板蒙皮局部屈曲临界应力随铆钉间距和铆钉连接形式的变化

Table 5 Critical local skin buckling stresses of Z-3 shaped stiffened panels with different rivet spacing and different rivet attachment forms

编号	铆钉间距/mm	铆钉连接形式		
		单排/MPa	双排/MPa	交错排/MPa
Z-3-14	14	196.99	218.44	218.44
Z-3-19	19	197.03	218.50	218.50
Z-3-24	24	196.99	218.45	218.45
Z-3-28	28	196.98	218.43	218.43

3.1 变间距分析

对于铆钉直径为4.76 mm的平头铆钉连接Z形加筋板,随着铆钉间距变大,单排连接屈曲应力变化不超过0.5 MPa,双排连接和交错排连接屈曲应力变化不超过0.07 MPa,即屈曲应力的变化不足1%,表明铆钉间距的变化几乎不会影响蒙皮局部屈曲临界应力。究其原因,对于同一种铆接方式,蒙皮板元宽度 b 值不变,在一定范围内增加或减少铆钉间距对扭转支持刚度影响很小,因此屈曲应力变化很小。上述铆钉连接变间距分析表明,在加筋板构型、尺寸以及铆钉连接方式不变的情况下,在工程常用铆钉间距范围内改变铆钉间距对开剖面铆接加筋板蒙皮局部屈曲临界应力的影响很小,可以忽略。

3.2 变连接方式分析

对于铆钉直径为4.76 mm的平头铆钉连接Z形加筋板,铆钉间距从14 mm变化到28 mm,双排/交错排连接比单排连接屈曲应力提高约11%。究其原因,根据式(12),蒙皮板元宽度 b 是影响屈曲应力的因素, b 越小,屈曲应力越大。根据1.1节可知,对于开剖面加筋板,由于铆钉连接时筋条下缘条不能紧贴在蒙皮上,削弱了整体筋条对屈曲波形的分隔作用,因此铆钉排列位置是影响 b 值的主要因素, b 可取筋条最外侧一排铆钉之间的距离。而在本节中,双排/交错排最外侧铆钉之间间距相比单排铆钉减小,因此屈曲应力相比单排铆接有所提高。上述变连接形式分析表明,若加筋板构型、尺寸不变,在工程常用铆钉间距范围内双排铆接和交错排铆接相比单排铆接可以明显提高开剖面铆接加筋板蒙皮局部屈曲临界应力,提高幅度在11%左右。

4 结 论

(1) 本文提出了一种针对轴压铆接加筋板蒙皮局部屈曲的准确高效分析方法,相较于工程简化分析方法,可有效提高铆接加筋板蒙皮局部屈曲临界应力的计算精度;与有限元法准确性相当(误差在6%以内),且计算效率更高,分析速度更快。

(2) 在加筋板结构形式、尺寸、铆钉连接方式皆为工程常用范围的前提之下,加筋板尺寸以及铆钉连接方式不变,在工程常用铆钉间距范围内($3d$ 至 $6d$),改变铆钉间距对开剖面加筋板蒙皮局部屈曲临界应力的影响可忽略不计,不宜采用铆钉加密来提高开剖面加筋板屈曲临界应力。

(3) 在加筋板结构形式、尺寸、铆钉间距皆为工程常用范围的前提之下,双排铆接和交错排铆接

相比单排铆接可以明显提高开剖面铆接加筋板蒙皮局部屈曲临界应力,提高幅度在11%左右。建议通过单排改为双排、交错排连接来提高开剖面加筋板屈曲临界应力。

参考文献:

- [1] 孔斌,陈普会,陈炎. 复合材料整体加筋板后屈曲失效评估方法[J]. 复合材料学报, 2014, 31(3): 765-771.
KONG Bin, CHEN Puhui, CHEN Yan. Post buckling failure evaluation method of integrated composite stiffened panels under uniaxial compression[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3): 765-771.
- [2] 王菲菲,崔德刚,熊强,等. 复合材料加筋板后屈曲承载能力工程分析方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(4): 494-497.
WANG Feifei, CUI Degang, XIONG Qiang, et al. Engineering analysis of post-buckling loading capability for composite stiffened panels[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(4): 494-497.
- [3] 中国航空研究院. 复合材料稳定性分析指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- [4] CHRISTOS K. 飞机复合材料结构设计与分析[M]. 颜万亿,译. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.
- [5] QIAO P, SHAN L. Explicit local buckling analysis and design of fiber-reinforced plastic composite structural shapes[J]. Composite Structures, 2005, 70(4): 468-483.
- [6] KOLLAR L P. Local buckling of fiber reinforced plastic composite structural members with open and closed cross sections[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(11): 1503-1513.
- [7] STAMATELOS D G, LABEAS G N, TSERPES K I. Analytical calculation of local buckling and post-buckling behavior of isotropic and orthotropic stiffened panels[J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49(3): 422-430.
- [8] BISAGNI C, VESCOVINI R. Analytical formulation for local buckling and post-buckling analysis of stiffened laminated panels[J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(3): 318-334.
- [9] 陈金睿,陈普会,孔斌,等. 考虑筋条扭转弹性支持的轴压复合材料加筋板局部屈曲分析方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(1): 76-82.
CHEN Jinrui, CHEN Puhui, KONG Bin, et al. Local buckling analysis of axially compressed stiffened laminated panels considering rotational restraint of stiffeners[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics

- and Astronautics, 2017, 49(1): 76-82.
- [10] WITTENBERG T, BATEN T V, HOL J. Shear buckling of flat orthotropic stiffened panels with application to glare material[J]. AIAA Journal, 2006, 44(10): 2179-2188.
- [11] 刘东常. 有限元素法解轴压加筋板局部稳定性问题的研究[J]. 航空学报, 1981(1): 38-48.
LIU Dongchang. A finite element method for local buckling of a stiffened panel in axial compression[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1981(1): 38-48.
- [12] 万志奇, 李三平, 刘汉旭. 铆接加筋板有限元分析[J]. 江苏科技信息, 2015(13): 55-56.
WANG Zhiqi, LI Sanping, LIU Hanxu. Finite element analysis on aircraft rivet-bond stiffened panels[J]. Jiangsu Science and Technology Information, 2015(13): 55-56.
- [13] HICKMAN W A, DOW N F. Data on the compressive strength of 75S-T6 aluminum-alloy flat panels with longitudinal extruded Z-section stiffeners[M]. Washington DC: National Advisory Committee for Aeronautics, 1949.
- [14] SCHUETTE E H, BARAB S, MCCRACKEN H L. Compressive strength of 24S-T aluminum-alloy flat panels with longitudinal formed hat-section stiffeners[M]. Washington DC: National Advisory Committee for Aeronautics, 1946.
- [15] 殷之平, 谢伟. 航空结构有限元分析——基于ABAQUS的有限元分析[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2017.
- [16] 崔德刚. 结构稳定性设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1996.

(编辑: 胥橙庭)