

相对刚度对复合材料加筋板后屈曲 承载效率影响研究

李 伟, 邢华璐, 高维健

(沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035)

摘 要: 对复合材料加筋壁板后屈曲承载特性进行了研究,建立了复合材料加筋壁板后屈曲非线性分析模型,并引入改进的弧长法模拟加筋壁板后屈曲承载历程,典型加筋壁板轴压试验证明模型分析误差不大于10%。通过筋条和蒙皮变参设计,建立数值分析矩阵,分析结果表明筋条与蒙皮的相对刚度对加筋壁板的后屈曲承载能力及结构效率具有明显影响。筋条相对刚度越大,蒙皮失稳临界点越高,加筋壁板的承载能力和结构效率增高,但当筋条相对刚度超过一定值时,承载能力和结构效率均降低,这在飞机设计中是不能接受的。因此,利用复合材料加筋壁板后屈曲承载能力降低结构重量必须合理确定筋条相对刚度,在保证安全的前提下提高结构效率。

关键词: 复合材料;加筋板;相对刚度;后屈曲;结构效率

中图分类号: V214.8

文献标识码: A

Effect of Relative Stiffness on Post Buckling Load-Carrying Efficiency of Composite Stiffened Panels

LI Wei, XING Hualu, GAO Weijian

(Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: The post buckling behavior of composite stiffened panels is studied. Post buckling nonlinear analysis model of composite stiffened panels and an improved arc length method are introduced into the nonlinear simulation of post buckling loading process of stiffened panels. Axial compression test of typical stiffened panels show that analysis error is less than 10%. Based on the parametric design of stiffeners and skin, the numerical analysis matrix is established. Results show that relative stiffness of stiffeners have obvious effects on post buckling capacity and structural efficiency of stiffened panels. With the increase of relative stiffness of stiffeners, critical point of skin instability become higher, and bearing capacity and structural efficiency of stiffened panels increase. However, when relative stiffness exceeds critical value, bearing capacity and structural efficiency decrease, which is unacceptable and dangerous in aircraft design. Therefore, it is necessary to determine relative stiffness of stiffeners reasonably to reduce the weight of structure by using post buckling capacity of the composite stiffened panels, so as to improve the structural efficiency on the premise of ensuring the structural safety.

Key words: composite; stiffened panels; relative stiffness; post-buckling; structural efficiency

收稿日期: 2022-07-21; 修订日期: 2023-11-13

作者简介: 李伟(1979—),男,高级工程师,硕士

引用格式: 李伟, 邢华璐, 高维健. 相对刚度对复合材料加筋板后屈曲承载效率影响研究[J]. 飞机设计, 2024, 44(1): 45-49, 55. LI Wei, XING Hualu, GAO Weijian. Effect of Relative Stiffness on Post Buckling Load-Carrying Efficiency of Composite Stiffened Panels[J]. Aircraft Design, 2024, 44(1): 45-49, 55.

复合材料结构以其高比强度、高比刚度、可设计性强、疲劳性能好以及优异的耐腐蚀性能等特点,在现代军用飞机和民用飞机结构设计中获得越来越多的应用,大型商用运输机波音 787 和空客 A350 的复材用量均超过了 50%,复合材料结构几乎覆盖整个飞机外表面。加筋壁板是目前飞机结构中复合材料的主要结构形式,广泛应用于机身及机翼蒙皮中。随着工艺的进步和飞机性能要求的提高,壁板厚度越来越小,工作应力/应变水平逐渐提高,在剪切、压缩等载荷作用时,蒙皮壁板失稳为其主要失效模式^[1]。载荷作用下加筋壁板稳定性问题为非线性问题,较为复杂,受计算能力限制和研制经验的欠缺,大部分设计部门一般偏保守地以结构的初始屈曲载荷作为设计许用载荷。但研究表明加筋壁板的屈曲并不等于破坏,其结构承载能力高于屈曲载荷,甚至后屈曲承载能力大大高于初始屈曲载荷^[2]。合理利用加筋壁板后屈曲承载能力能够进一步提高其结构效率,降低结构重量。

目前,针对复合材料加筋板的屈曲和后屈曲问题,国内外都进行了大量研究。Orifici 等^[3]对飞机机身复合材料加筋壁板的后屈曲行为进行调查和研究。欧盟的科研框架计划对复合材料加筋结构后屈曲设计技术研究给予了持续支持^[4]。霍世慧等^[5]利用工程及有限元方法分析了加筋壁板整体和局部稳定性,分析了不同边界条件和不同桁条设计下的加筋壁板稳定性。李乐坤等^[2]通过稳定性试验及有限元分析研究了复合材料加筋壁板压缩屈曲与后屈曲特性。王维阳等^[6]利用拟协调元模拟了帽形加筋壁板后屈曲承载历程,并进行了试验验证。考虑复合材料结构的低能量冲击敏感性,李刚^[7]、李婷^[8]等对低能量冲击损伤对复合材料加筋板后屈曲承载性能开展了试验研究,合理地设计情况下,具有良好的损伤容限特性。使将局部屈曲临界点设计在 100% 限制载荷之前成为可能。

在已有的复合材料加筋板后屈曲研究基础上,以筋条蒙皮相对刚度为研究对象,利用改进的弧长法 (Riks),引入相应的失效准则建立有限元模型,对复合材料加筋变屈曲和后屈曲以及破坏过程进行模拟和分析,通过典型加筋壁板轴压试验证明了模型分析结果有效性。通过改变铺层信息,结构厚度实现相对刚度的变化,对比了不同刚度比加筋板结构效率。研究表明,复合材料加筋

壁板后屈曲承载效率与筋条相对刚度存在非线性关系,设计过程中应合理选择相关参数在保证设计结果安全性的前提下获取最高的结构效率,降低结构重量。

1 复合材料加筋板后屈曲承载能力研究

1.1 工程分析方法

复合材料加筋板后屈曲承载能力由于其材料各向异性,计算难度大于金属加筋壁板结构。但学者们对于复合材料加筋壁板后屈曲承载失效模式及工程计算方法进行了广泛研究。王菲菲等^[9]指出,复合材料加筋板破坏模式与金属加筋板相当,并结合 J 型复合材料加筋壁板工程计算方法进行了验证。

针对复合材料加筋壁板,主要失效模式包括蒙皮局部失稳、筋条局部失稳、加筋板总体失稳以及筋条与蒙皮胶接失效,主要设计点在于以下方面:

加筋壁板应变控制,100% 限制载荷下,应变控制公式

$$\varepsilon \leq [\varepsilon] \quad (1)$$

式中, ε 为复合材料结构应变, $[\varepsilon]$ 为复合材料结构设计许用应变。

筋条与筋条间蒙皮局部屈曲,控制公式

$$N_x = \frac{2\pi^2 D_{22}}{b^2} \left[\frac{D_{11}}{D_{22}} \left(\frac{b}{a} \right)^2 m^2 + 2 \left(\frac{D_{12} + 2D_{66}}{D_{22}} \right) \left(\frac{a}{b} \right)^2 \frac{1}{m^2} \right] \left(\frac{a}{b} < 4 \right)$$

$$N_x = \frac{2\pi^2 D_{22}}{b^2} \left(\sqrt{\frac{D_{11}}{D_{22}}} + \frac{D_{12} + 2D_{66}}{D_{22}} \right) \left(\frac{a}{b} > 4 \right) \quad (2)$$

式中: a 为蒙皮非受压端的宽度; b 为蒙皮受压端的宽度; D_{ij} 为弯曲刚度系数; m 为沿板长度方向的屈曲半波数, $m=1,2,3,\dots$,计算对应的一组 N_x ,取最小的 N_x 为板的屈曲载荷 N_x 。

筋条腹板局部屈曲,控制公式

$$N_x = \frac{2\pi^2 D_{22}}{b_r^2} \left(\sqrt{\frac{D_{11}}{D_{22}}} + \frac{D_{12} + 2D_{66}}{D_{22}} \right) \quad (3)$$

式中, b_r 为筋条腹板受压端的宽度。

加筋壁板总体屈曲,控制公式

$$P_{cr} = \frac{P_e}{1 + \lambda P_e / (GA)}, P_e = \frac{c\pi^2 (EI)_x}{L^2} \quad (4)$$

式中: P_e 为加筋板的欧拉屈曲载荷; L 为加筋壁板长度; c 为加筋板的端部支持系数; EI 为加筋板剖面的弯曲刚度; G 为筋条中竖直腹板的等效剪切模

量; λ 为形状系数,对于剖面形状不同的筋条,选取不同的 λ 值,对于帽形筋条, $\lambda = 1$, A 为筋条中竖直腹板的剖面积。

1.2 数值分析方法

李乐坤^[2]和张国凡^[10]等对复合材料加筋壁板进行了压缩稳定性试验和有限元分析研究,弧长法 (Riks) 克服了传统增量迭代法跨越结构非线性平衡路径极值点的困难,在迭代求解过程中自动调节步长,跟踪非线性平衡路径全过程,能较好的模拟结构的后屈曲行为。

首先,进行特征值屈曲分析,此分析为线性屈曲分析,在小变形的情况进行,用于预测一个理想弹性结构的屈曲载荷,但是它只能得到各阶模式的特征值,获得各阶屈曲模态下相应的节点位移,作为后屈曲分析的初始缺陷。其次,就是后屈曲分析,此步为非线性分析,原因在于后屈曲过程加筋板呈现大变形特点,采用位移控制的修正弧长法 (Riks 法),将线性屈曲获得的屈曲模态下节点位移乘以扰动系数作为结构的初始缺陷,再使用改进的 Riks 弧长法进行非线性屈曲分析,得到加筋壁板屈曲历程中位移、载荷、应变、应力等数据,为特征载荷评估提供依据。

数值分析过程中,复合材料加筋板的壁板、筋条等均使用壳单元模拟,筋条与壁板之间的胶层使用内聚力单元模拟,胶层失效由二次名义应力准则进行计算判断,复合材料结构失效则引入哈辛准则 (Hashin 准则)。

2 非线性分析模型建立及试验验证

采用具有强大非线性有限元分析功能的软件 ABAQUS 进行计算分析,采用其自带的弧长法作为求解复合材料加筋壁板屈曲前后平衡路径的方法。加筋壁板的壁板、筋条凸缘和腹板等均使用 S4R 壳单元模拟,筋条与壁板之间的胶层使用内聚力单元 COH3D8 进行模拟,壁板与胶层的连接、筋条凸缘与胶层的连接采用钛 (Tie) 连接绑定。胶层失效由二次名义应力准则进行判断,复合材料加筋壁板的损伤累积及失效则通过 Hashin 强度准则进行判定。

为验证分析方法的准确性,设计帽形加筋板轴压试验。试验件纤维树脂体系为 T300/BA9913,固化后单层厚度 0.125 mm,材料性能如表 1 所示。壁板厚度为 1.75 mm,铺层次序为[45/

-45/0/-45/45/0/90]S,帽形长桁厚度为 1.5 mm,铺层次序为[45/0/-45/0/0/90]S。根据分析结果确定特征点进行应变及位移监控,如图 1 所示。

表 1 T300/BA9913 材料性能

特征参数	数值
纵向压缩模量 E_{11} /GPa	121.6
横向压缩模量 E_{22} /GPa	8.44
剪切模量 G_{12} /GPa	4.21
泊松比 ν_{12}	0.305
纵向拉伸强度 X_T /MPa	1 828.2
纵向压缩强度 X_C /MPa	1 298
横向拉伸强度 Y_T /MPa	85.86
横向压缩强度 Y_C /MPa	251



图 1 帽形加筋壁板轴压试验

通过对比特征点应变-位移曲线,见图 2,非线性数值分析结果加筋板模态转换形式与试验一致:

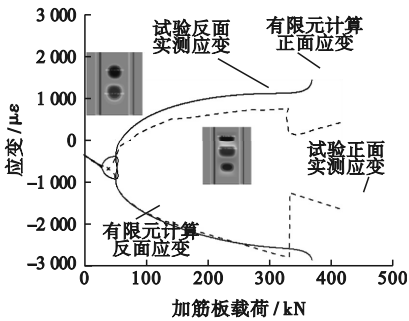


图 2 应变-载荷曲线

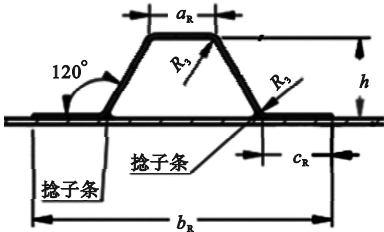
- (1) 初始屈曲状态,两筋条之间壁板 Y 向 (垂直壁板方向) 挠度较大,呈现为一凸一凹 2 个屈曲半波。
 - (2) 随着载荷增加,屈曲模态发生变化,由 2 个半波变为 3 个半波,模态开始转变时,轴向压缩载荷会下降,然后再逐渐上升,直至试验件破坏。
- 通过对比,修正的弧长法很好地模拟了复合

材料加筋壁板后屈曲承载过程。计算失稳临界载荷为 34 kN,试验确定失稳临界载荷为 36.3 kN,计算误差为 6%。以此方法分析筋条相对刚度对复合材料加筋板后屈曲承载结构效率能够保证结果的有效性。

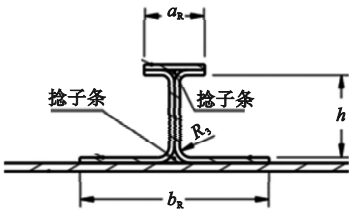
3 典型加筋板筋条相对刚度影响研究

3.1 数值试验设计

筋条相对刚度对结构后屈曲承载效率影响研究,主要以帽形筋条和工型筋条 2 种形式的加筋板轴压载荷为研究对象。筋条与蒙皮均为正交对称铺层,两侧边固支,为减小边界条件的影响,试验件采用 4 根筋条的结构形式。帽形筋条 (H 型) 加筋板结构参数:壁板长 844 mm,宽 760 mm;筋条 $a_R = 25$ mm, $b_R = 111.64$ mm, $h = 30$ mm, $c_R = 26$ mm;筋条间距 216.12 mm。工形筋条 (I 型) 加筋板结构参数:壁板长 844 mm,宽 540 mm;筋条 $a_R = 20$ mm, $b_R = 60$ mm, $h = 30$ mm;筋条间距 160 mm; R_3 为圆角半径。筋条尺寸如图 3 所示。



(a) 帽形筋条 (H型)



(b) 工形筋条 (I型)

图3 筋条参数定义

通过改变壁板及筋条铺层比例及层数实现筋条与壁板相对刚度的变化,蒙皮和筋条各 6 种铺层,铺层信息如表 2 和表 3 所示。

表2 蒙皮铺层信息

编号	铺层顺序	层数	厚度/mm	弯曲刚度/(kN·mm ²)
1	[45/-45/0/90/45/-45/90/0/-45/45]	10	1.5	5 168
2	[45/-45/0/0/90/45/0]s	14	2.1	20 255
3	[45/-45/0/0/90/90/0/0/-45/45]	10	1.5	5 758
4	[45/-45/0/-45/90/45/0]s	14	2.1	15 511
5	[45/-45/90/0/0/0/90/-45/45]	10	1.5	4 124
6	[45/-45/90/0/90/45/0]s	14	2.1	13 649

表3 筋条铺层信息

编号	铺层顺序	层数	厚度/mm
A	[45/0/0/-45/90/-45/0/0/45]	9	1.35
B	[45/-45/0/0/-45/90/-45/0/0/-45/45]	11	1.65
C	[45/-45/0/0/0/-45/90/-45/0/0/0/-45/45]	13	1.95
D	[45/-45/0/0/90/0/-45/90/-45/0/90/0/0/-45/45]	15	2.25
E	[45/-45/0/0/90/0/0/-45/90/-45/0/0/90/0/0/-45/45]	17	2.55
F	[45/-45/90/0/0/90/0/0/-45/90/-45/0/0/90/0/0/90/-45/45]	19	2.85

3.2 筋条相对刚度对特征载荷的影响

帽形筋条加筋壁板两侧边固支情况筋条厚度对壁板初始屈曲载荷及加筋板破坏载荷对比

如图 4 所示,工型筋条对比如图 5 所示,图例以厚度-刚度-特征值的格式给出。

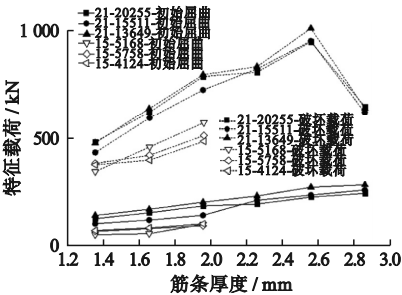


图4 帽形筋条参数对特征载荷影响

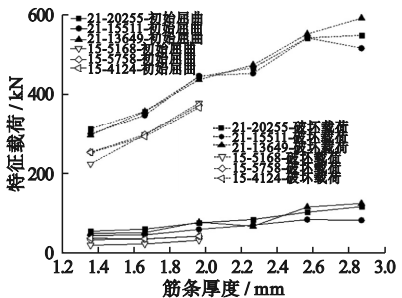


图5 工型筋条参数对特征载荷影响

对比可见,随着筋条厚度增加,蒙皮初始屈曲载荷增加,主要由于筋条截面参数的增加降低工作应力的同时,相对蒙皮刚度增加,提高了蒙皮边界支持刚度,增加了临界应力。加筋板破坏载荷和承载能力随着筋条厚度增加,但当筋条与蒙皮相对刚度超过一定值时,随着筋条刚度增加壁板承载能力下降。

3.3 筋条相对刚度对结构效率的影响

为获得更直观的筋条刚度对结构效率及承载能力的影响,定义后屈曲承载比和结构效率为无量纲参数:

- (1) 结构效率为加筋板承载能力/加筋板质量,单位 kN/kg。
- (2) 后屈曲承载比为 (加筋板承载能力-初始屈曲载荷) /加筋板承载能力。

第2种蒙皮构型不同筋条厚度对结构效率及后屈曲承载能力的影响如图6所示。第4种蒙皮

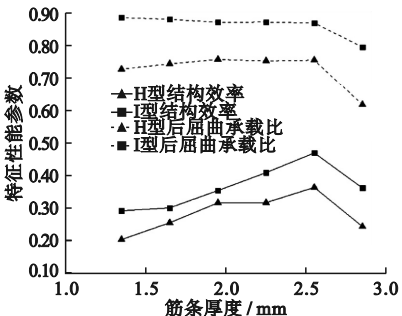


图6 筋条厚度对第2组蒙皮后屈曲承载效率影响

构型不同筋条厚度对结构效率及后屈曲承载能力的影响如图7所示。通过合理设计复合材料加筋板后屈曲承载比可达60%~70%,即实际承载能力为线性屈曲载荷的2~3倍。

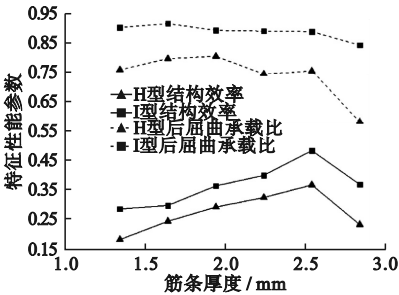


图7 筋条厚度对第4组蒙皮后屈曲承载效率影响

随着筋条/蒙皮相对刚度增加,加筋板结构效率及后屈曲承载能力有所提高,这与常规认识是相符的,但随着相对刚度达到一定比值,结构效率及后屈曲承载能力均下降。

为更充分地说明筋条相对刚度对结构效率的影响,根据筋条厚度绘制其对所有构型加筋板结构效率的影响,工型筋条厚度影响如图8所示,帽形筋条厚度影响如图9所示,图例中给出了蒙皮厚度及面外刚度。

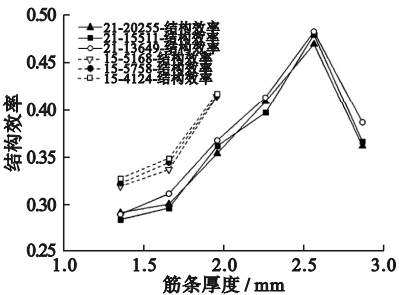


图8 工型筋条厚度对加筋板结构效率影响

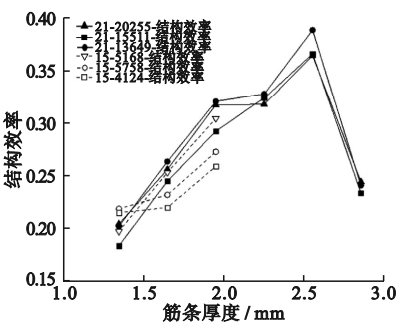


图9 帽型筋条厚度对加筋板结构效率影响

通过对比,进一步证明了随着筋条/蒙皮相对刚度增加,加筋板结构效率及后屈曲承载能力有所提高,但随着相对刚度比值大于1.2,结构效率