

复合材料蒙皮-加筋大开口 结构优化设计

Optimized Design of Composite Skin-stiffened
Structure with Large Cut out

罗楚养^{1,2}, 熊峻江¹, 益小苏², 张子龙², 刘 刚²

(1 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191;

2 北京航空材料研究院 先进复合材料重点实验室, 北京 100095)

LU O Chur yang^{1,2}, XIONG Jur jiang¹, YI Xiao su²,

ZHANG Zi-long², LIU Gang²

(1 School of Transportation Science and Engineering, Beihang University,

Beijing 100191, China; 2 Science and Technology on Advanced Composites

Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 采用有限元法对复合材料蒙皮-加筋大开口结构进行了优化设计, 研究孔边补强和加筋补强对大开口结构屈曲特性的影响。结果表明: 孔边翻边补强可使应力集中远离孔的自由边, 增加翻边深度和宽度皆能提高屈曲载荷; 采用共固化加筋要比整体加筋效果明显, 同等条件下, 优先考虑低而密的筋条布置, 同时增加横向筋的数量。

关键词: 复合材料; 大开口; 翻边补强; 屈曲; 数值模拟; 优化设计

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2011)04-0009-05

Abstract: The optimized design of composite skin-stiffened structure with large cutout was conducted by finite element method. The effect of cutout reinforcement and stiffened reinforcement to the buckling load was investigated. The results show that stress concentration is far away from the free edge of hole after flanged reinforcement. The buckling load enhances with increasing both flanged depth and width. The co-cure stiffened is better than integral stiffened. At coordinative condition, the low and dense stiffener is recommended, as well as increasing transverse stiffeners.

Key words: composite; large cutout; flanged reinforcement; buckle; numerical simulation; optimized design

由于具有优异的比强度、比刚度以及结构、性能可设计性, 复合材料已广泛应用于航空航天结构中, 大量使用先进复合材料是未来飞机机体结构设计的突出特点^[1]。为了满足使用性和维修性要求, 在飞机机身蒙皮、机翼壁板、中央翼展向梁等结构中, 通常要设计各种开口。开口会引起构件局部的应力集中, 同时会切断纤维的连续性, 大幅度削减复合材料结构的承载能力, 直接影响到结构的使用寿命和安全裕度。因此, 对复合材料开口补强进行研究, 一直是国内外相关研究人员关注的重点之一。Kumar 等^[2]研究了复合材料开口结构的振动、屈曲和动态失稳问题。姜云鹏等^[3]研究了复合材料开口翻边补强的压缩性能, 发现破坏首先在翻边补强过渡区圆角处发生, 采用非线性有限元法预测了损伤扩展, 与实验结果吻合很好。Liu

等^[4]基于 Tsai-Hill 强度准则, 采用固定网格有限元法, 对复合材料结构多个开口进行了优化。王毅等^[5], 朱西平等^[6]和韩小平等^[7,8]研究了复合材料开口缝合补强的静拉伸性能, 发现缝纫对单拉伸载荷状态下构件强度的提高没有明显作用, 缝纫导致孔边应力集中增大, 产生“缺口强化”现象。Guo^[9]采用实验与有限元法结合, 研究了不同增强方式对复合材料开口在承受面内剪切载荷下的孔边应力集中和屈曲响应的影响, 发现对于小开口结构, 双面加厚增强最有效。

以上复合材料开口补强研究大多只涉及小开口或中等开口的补强问题。对于飞机机翼、机身、中央翼等的复合材料大开口结构, 不仅要开口处进行补强处理, 同时, 还要进行加筋补强。对于加筋补强后的大开口结构, 不仅传力路线会重新分布, 而且其

屈曲模态和破坏方式也同样与非加筋结构差别很大。为此,本工作采用有限元法,研究承受剪切载荷下的复合材料大开口结构优化设计,首先对孔边增强方式及其参数优化进行讨论,然后对加筋方式及其参数优化设计。

1 计算模型

研究对象是大开口复合材料蒙皮-加筋结构,其几何模型和尺寸如图 1 所示,蒙皮厚 3.34mm,加强筋高 46.6mm,厚 6mm。材料为 HT 700/6421 碳纤维复合材料,单层厚度为 0.167mm,其纵向拉伸模量 $E_1=119.00\text{GPa}$,横向拉伸模量 $E_2=9.89\text{GPa}$,泊松比 $\nu_{12}=$

0.30,纵横剪切模量 $G_{12}=4.84\text{GPa}$ 。蒙皮铺层为[45/90/-45/45/-45/90/45/0/-45/0]s,腹板铺层为[45/90/-45/45/-45/90/45/0/-45/0/0/45/0/0/-45/0]s。采用 ABAQUS 有限元软件的 8 节点减缩积分壳单元 S8R 模拟复合材料板,B32 梁单元模拟相框剪切实验中的刚性夹具。梁与复合材料板采用“Tie”约束,梁与梁的连接采用“Hinge”约束。图 2 为其载荷与约束条件,固支约束其中一个对角点,然后,在沿对角线在另一个对角点加上拉伸载荷,同时,约束板四边的 Z 向位移,模拟复合材料大开口结构承受剪切载荷下的力学响应。

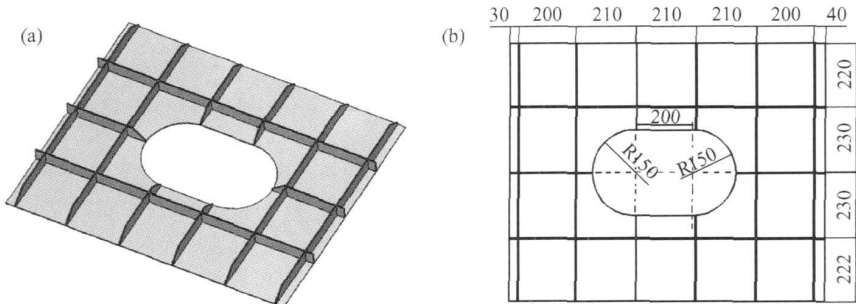


图 1 复合材料大开口结构几何模型(a)和尺寸(b)

Fig. 1 The geometry model of composite large cutout structure (a) and dimensions (b)

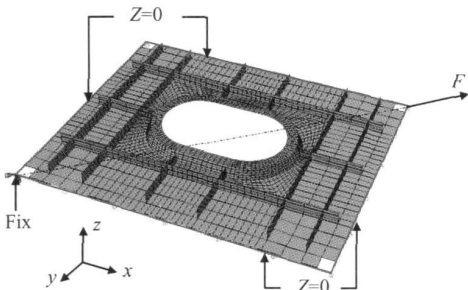


图 2 载荷与约束条件

Fig. 2 Load and constraints conditions

2 孔边增强及其参数优化

2.1 孔边增强方式优化

选择孔边单面加厚、双面加厚和翻边 3 种补强方式,孔边加厚区域的宽度为 20mm,单面补强时,补片厚度为 5mm,铺层为[0/-45/90/45/0/45/90/-45/45/-45/90/45/0/-45/0]s,双面补强时,补片厚度为 2.5mm,铺层为[0/-45/90/45/0/45/90/-45/45/-45/90/45/0/-45/0]。翻边补强如图 3 所示,其中翻边外径 $D=190\text{mm}$,翻边深度 $h=20\text{mm}$,翻边宽度

$b=20\text{mm}$ 。首先考察其补强与非补强的孔边应力分布情况(见图 4),从图 4 可以发现,孔边增厚补强可有效降低孔边的应力集中,但不改变应力分布,双面增厚补强效果比单面增厚补强明显;而翻边补强不仅降低了孔边应力集中,还使应力集中远离孔的自由边,而出现在翻边的第一个台阶处,从而有效避免孔边的分层破坏。表 1 为补强与不补强的屈曲载荷质量比和应力,由此可知,孔边增强能有效提高屈曲载荷,翻边增强提高效果最明显。由此,选定翻边作为孔边补强,并对翻边参数进行优化。

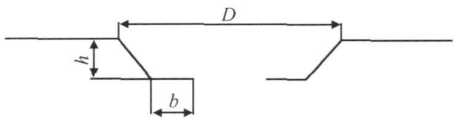


图 3 孔边翻边增强

Fig. 3 Flanged reinforcement

2.2 翻边参数优化

翻边参数研究包括翻边深度 h 、翻边外径 D 和翻边宽度 b (见图 3),讨论 3 个参数对复合材料大开口结构屈曲载荷的影响,以屈曲载荷与质量之比作为标准

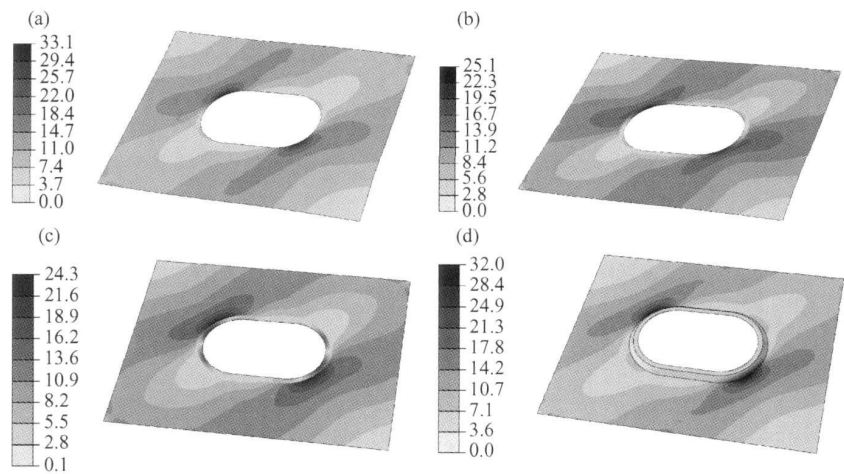


图4 补强与非补强的孔边应力分布情况

(a) 不补强; (b) 单面增厚补强; (c) 双面增厚补强; (d) 翻边补强

Fig. 4 Stress distributions around the hole with or without repaired reinforcement

(a) no reinforcement; (b) single reinforcement; (c) double reinforcement; (d) flanged reinforcement

表 1 孔边补强与不补强屈曲载荷质量比与应力比较

Table 1 Comparison of the load carrying efficiency and stress with and without repaired reinforcement

	Load carrying efficiency/ ($\text{N} \cdot \text{g}^{-1}$)	σ_{eq} / MPa
Noir reinforcement	2.333	33.1
Single reinforcement	3.440	25.1
Double reinforcement	3.737	24.3
Flanged reinforcement	4.104	32.0

对其进行评价。保持 $b=20\text{mm}$, $D=190\text{mm}$ 不变, 改变 h , 考查 h 对屈曲载荷的影响。分别取 $h=20, 30, 40\text{mm}$, 结果如图5(a)所示, 由图5(a)可知, 屈曲载

荷质量比随着翻边深度 h 的增大而增大。保持 $b=20\text{mm}$, $h=40\text{mm}$ 不变, 考查 D 对屈曲载荷的影响。分别取 $D=190, 200, 210\text{mm}$, 计算结果如图5(b)所示, 图5(b)显示, 随着翻边宽度 D 的增大, 屈曲载荷质量比先减小后增大, 整个变化幅度很小。保持 $D=210\text{mm}$, $h=40\text{mm}$ 不变, 考查 b 对屈曲载荷的影响。分别取 $b=20, 30, 40\text{mm}$, 计算结果如图5(c)所示, 图5(c)显示, 屈曲载荷质量比随着翻边宽度 b 的增大而增大。图6(b)为翻边补强后的一阶屈曲模态, 图6显示, 与非补强大开口结构一样, 翻边增强大开口结构表现为整体的屈曲。

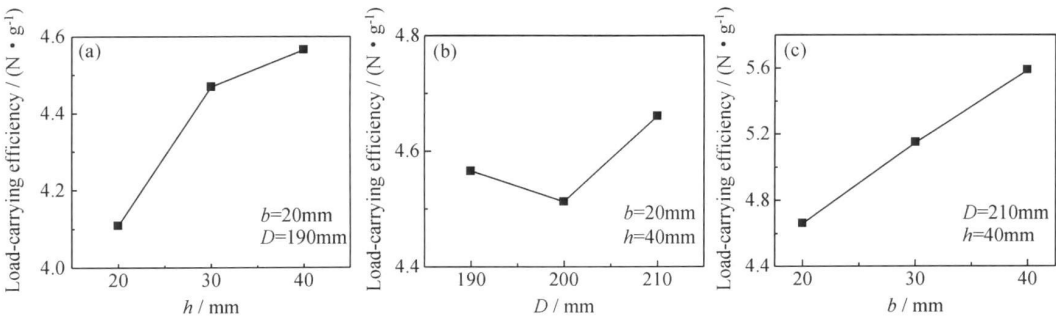


图5 翻边参数 h (a), D (b), b (c) 对屈曲载荷质量比的影响

Fig. 5 The effect of flanged parameters h (a), D (b), b (c) to load carrying efficiency of buckling

3 加筋增强及其参数优化

3.1 加筋方式优化

对于蒙皮-加筋的大开口结构, 在承受剪切载荷时通常表现为屈曲破坏, 加筋方式对其屈曲载荷及模态

影响很大, 本工作考察整体加筋与共固化加筋、纵横加筋与单向加筋的比较(如图7所示)。整体加筋时筋与蒙皮整体铺覆, 筋的腹板厚度通过中间插层来控制。共固化加筋时蒙皮和加强筋分别成型, 然后, 通过共固化或者胶接成型。图8为加筋方式对屈曲载荷的影

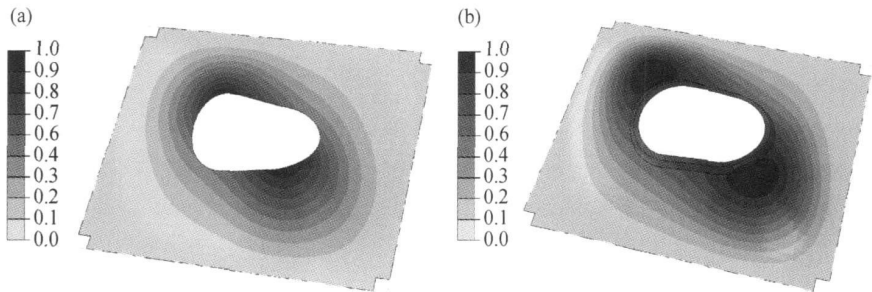


图 6 一阶屈曲模态 (a)不补强;(b)翻边补强
Fig. 6 The first buckling mode (a) non-reinforcement;(b) flanged reinforcement

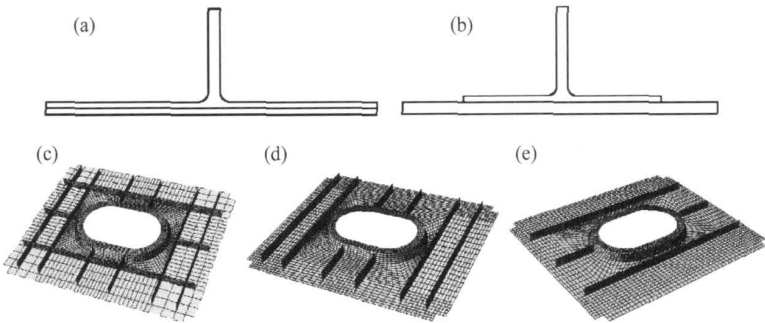


图 7 加筋方式 (a)整体加筋;(b)共固化加筋;(c)纵横加筋;
(d)单向纵向加筋;(e)单向横向加筋
Fig. 7 Stiffened patterns (a) integral stiffened;
(b) co-cure stiffened;(c) cross stiffened;(d) longitudinal stiffened;(e) transverse stiffened

响。可以看出, 共固化加筋结构的屈曲载荷比整体加筋结构有大幅度的提高。由于加筋平板剪切屈曲应力与筋条弯曲刚度成正比^[10], 整体加筋后筋的翻边成为蒙皮的一部分, 而共固化加筋时筋的翻边与蒙皮并非一个整体, 这比整体加筋多了两边的凸缘, 而且筋条形心整体沿面外平移, 从而有效提高筋条的弯曲刚度和蒙皮-加筋结构的屈曲载荷。图 8 还显示, 纵横加筋的屈曲载荷远大于单向加筋的屈曲载荷; 单向加筋时, 横向加筋比纵向加筋的屈曲载荷大。图 9 为纵横加筋与单向加筋的屈曲模态对比, 可以看出, 整体加筋表现为蒙皮局部失稳, 单向加筋则在开口处出现了整体失稳。

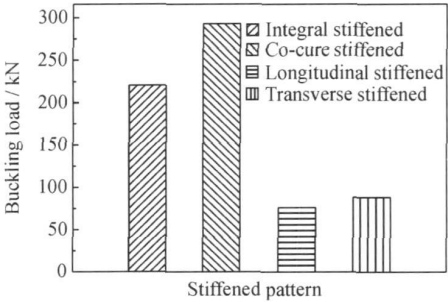


图 8 加筋方式对屈曲载荷的影响
Fig. 8 The effect of stiffened patterns to buckling load

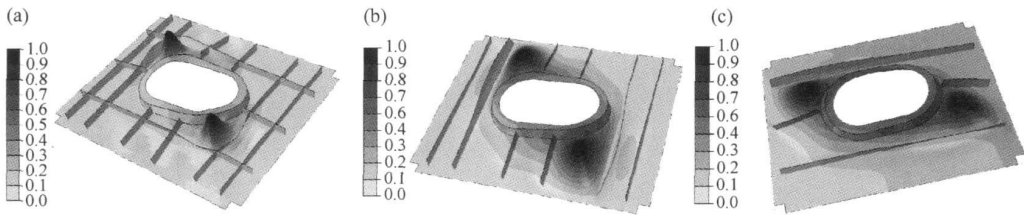


图 9 加筋方式的屈曲模态对比 (a)整体纵横加筋;(b)纵向加筋;(c)横向加筋
Fig. 9 Comparison of buckling mode with different stiffened patterns (a) integral cross stiffened;
(b) longitudinal stiffened;(c) transverse stiffened

3.2 筋条参数优化

保持加强筋的厚度不变, 将加强筋的高由 46 mm 减为 30mm, 多余部分变为同等高度的筋加在板上, 从而纵向筋增加了 3 根, 横向筋增加了 2 根, 对筋进行了重新布置, 如图 10 所示。图 11 为整体纵横加筋筋条加密与非加密下的屈曲载荷比较, 采用较

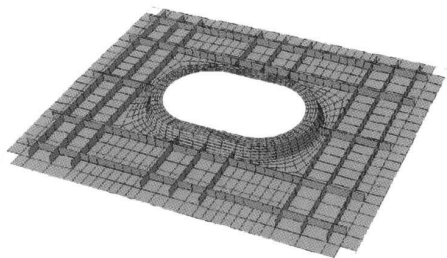


图 10 筋条加密后的布置

Fig. 10 Stiffener arrangement with dense stiffener

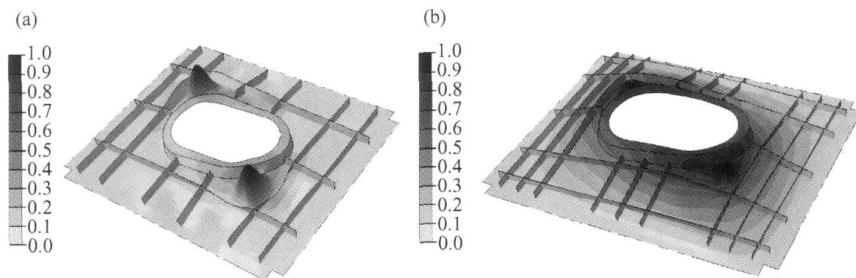


图 12 屈曲模态 (a) 疏筋条, (b) 密筋条

Fig. 12 Buckling mode of sparse stiffener (a) and dense stiffener (b)

低较密的筋对提高屈曲载荷更有效。图 12 为其屈曲模态, 筋条加密后, 结构在开口处出现整体失稳, 而采用高而疏的加筋方式补强时, 屈曲则表现为孔边蒙皮的局部失稳。

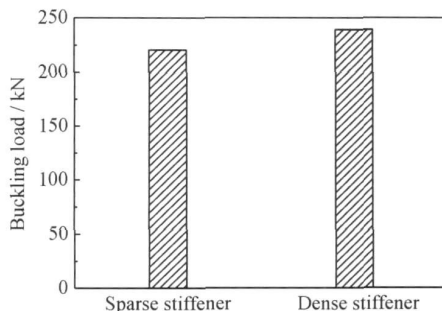


图 11 疏筋条与密筋条的屈曲载荷比较

Fig. 11 Comparison of buckling load between sparse stiffener and dense stiffener

4 结论

(1) 孔边增强能有效提高屈曲载荷, 孔边翻边增强比孔边加厚增强效果明显。

(2) 翻边后最大应力出现在翻边的第一个台阶处, 避开了大开口的自由边, 有效改善了孔边应力集中; 增加翻边深度和宽度皆能提高屈曲载荷。

(3) 共固化加筋结构的屈曲载荷比整体加筋结构有明显的提高; 横向加筋比纵向加筋要好。

(4) 同等质量下, 采用较低较密的筋对提高屈曲载荷更有效。

参考文献

[1] 杨乃宾. 新一代大型客机复合材料结构[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 596- 609.

[2] KUMAR L R, DATTA P K, PRABHAKARA D L. Vibration and stability behavior of laminated composite curved panels with cut out under partial in plane loads [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2005, 5(1): 75- 94.

[3] 姜云鹏, 张庆茂, 王毅. 等. 复合材料层合板开口翻边补强试验和数值模拟[J]. 复合材料学报, 2005, 22(5): 190- 196.

[4] LIU Y, JIN F, LI Q. A strength based multiple cutout optimiza-

tion in composite plates using fixed grid finite element method [J]. Composite Structures, 2006, 73(4): 403- 412.

[5] 王毅, 孙新, 岳珠峰. 等. 复合材料开口缝合补强试验及模拟[J]. 材料科学与工程学报, 2007, 25(3): 444- 448.

[6] 韩小平, 曹效昂, 朱西平. 等. 孔口缝合补强对含孔层合板应变集中影响的实验研究[J]. 复合材料学报, 2006, 23(4): 170- 174.

[7] 朱西平, 韩小平, 岳珠峰. 复合材料开口缝合补强结构力学性能的实验研究[J]. 航空材料学报, 2008, 28(1): 87- 92.

[8] 韩小平, 曹效昂, 朱西平. 等. 复合材料开口缝合补强结构力学性能实验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(1): 122- 126.

[9] GUO S J. Stress concentration and buckling behaviour of shear loaded composite panels with reinforced cutouts [J]. Composite Structures, 2007, 80(1): 1- 9.

[10] 崔德刚. 结构稳定性设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1996. 108- 110.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(E050603); 航空科学基金资助项目(20095251024)

收稿日期: 2010-08-25; 修订日期: 2011-01-28

作者简介: 罗楚养(1984-), 男, 博士研究生, 从事复合材料结构设计与分析方面研究, 联系地址: 北京航空航天大学飞机系(100191), E-mail: clyluo@ase.buaa.edu.cn