

复合材料层合板斜接式挖补修理稳定性分析

卢俊文¹ 王倩莹² 朱新宇¹ 张成雷¹

(1 中国民用航空飞行学院, 广汉 618307)

(2 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

文 摘 对复合材料层合板挖补修理模型进行了参数化的有限元计算, 分析了挖补修理结构失稳载荷与挖补角、胶层厚度以及铺层方式之间的关系, 得到了最优挖补修理模型。结果表明, 异种材料补片会显著提高挖补修理结构的稳定性, 在一定范围内, 减小胶层也会改善挖补修理结构的稳定性。当胶层厚度在 0.15 ~ 0.25 mm 变化时, 随着胶层厚度减小, 挖补修理结构的稳定性增强; 当铺层方式为 $[0_3/\pm 45/\pm 45/90]_s$ 时, 挖补修理结构稳定性最强。

关键词 挖补修理, 线性屈曲, 异种材料补片, 有限元分析

Analysis on Buckling Behavior of Composite Laminates With Scarf Repair Joint

Lu Junwen¹ Wang Qianying² Zhu Xinyu¹ Zhang Chenglei¹

(1 Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307)

(2 School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract In this paper, a parametric finite element (FE) model has been developed to allow a broad study into the effect of various parameters on the performance of a scarf joint. The buckling load of scarf repair composite structure has been investigated and determined with respect to changes in scarf angle, adhesive thickness and lay-up sequence. Furthermore, the best scarf repair model was developed. Dissimilar material joint improves the stability of scarf repair composite structure extraordinarily. The adhesive thickness varying between 0.15 mm and 0.25 mm, reducing the adhesive thickness also improves the stability of scarf repair composite structure. The scarf repair model with $[0_3/\pm 45/\pm 45/90]_s$ has the best stability. The results of this investigation provide further insight into the failure that develops in scarf repairs of composite structures under compressive load.

Key words Scarf repair, Linearity buckling, Dissimilar material joint, Finite element analysis

0 引言

目前, 复合材料薄板结构在航空、机械以及建筑工程领域得到了广泛的应用, 研究人员为了保证结构的可靠性, 近几十年来对由于轴向拉伸、压缩以及剪切引起薄板结构的屈曲进行了大量研究^[1-7]。然而对斜接式挖补修理的薄板屈曲问题研究较少, 尤其在全复合材料结构的轻型飞机(如西锐 SR20)上, 机翼或起落架承受很大的轴向或法向载荷, 有可能造成屈

曲或失稳。为了保证飞机的可靠性、获得良好的气动性能以及节约成本, 挖补修理广泛应用到复合材料薄板修理中, 对修理后的结构进行屈曲分析也显得尤为重要。

用解析方法来求解薄板的稳定性问题比较困难, 但是使用有限元方法能够方便处理复杂应力状态下的屈曲问题。本文使用有限元软件 ANSYS 对挖补后的复合材料薄板进行了屈曲分析, 假设该薄板无初始几

收稿日期: 2013-06-26; 修回日期: 2013-09-23

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金重点项目(U1233202); 中国民用航空飞行学院青年基金项目(Q2012-003)

作者简介: 卢俊文, 1985 年出生, 硕士, 主要研究方向: 复合材料结构计算与设计, 航空器故障诊断与预测。E-mail: junwen686@sohu.com

通讯作者: 朱新宇, 1969 年出生, 硕士, 教授, 主要研究方向: 飞行器故障诊断与预测, 复合材料结构健康管理。E-mail: xyzyhu@cafuc.edu.cn

何缺陷,不考虑层间剥离现象,不考虑温度、湿度效应,则这类壳体的失稳类型为弹性分支屈曲,最终归结为特征值问题。文中分析了挖补角、胶层厚度、铺层角、补片材料与薄板屈曲(失稳)载荷的关系,为复合材料薄板挖补修理技术提供了相关的理论依据。

1 挖补修理有限元模型建立

1.1 屈曲分析的有限元理论

根据弹性力学理论可知,一个单元的应变能 U_e 与应力 $\{\sigma\}$ 和应变 $\{\epsilon\}$ 有如下关系^[8]

$$U_e = \frac{1}{2} \int \{\epsilon\}^T \{\sigma\} dv \quad (1)$$

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_L\} + \{\epsilon_{NL}\} \quad (2)$$

式中, $\{\epsilon_L\}$ 为线性项, $\{\epsilon_{NL}\}$ 为非线性项, v 为单元的体积。

利用线弹性应力与应变的关系 $\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\}$, $[D]$ 为对称矩阵,忽略二阶非线性应变项,可得

$$U_e = \frac{1}{2} \{\delta\}_e^T \int \{B_L\} [C] \{B_L\}^T dv \{\delta\}_e + \frac{1}{2} \{\delta\}_e^T \int \{G\}^T [S] \{G\} dv \{\delta\}_e \quad (6)$$

式中, $\{B_L\}$ 为常规线性应变的唯一矩阵, $\{G\}$ 为与节点自由度相关的位移倒数矩阵

$$F_e = \int \{B_L\}^T [C] \{B_L\} dv \{\delta\}_e + \int \{G\}^T [S] \{G\} dv \{\delta\}_e = ([K_e] + [K_g]_e) \{\delta\}_e \quad (7)$$

式中, $[K_e]$ 为常规线性结构刚度矩阵, $[K_g]_e$ 为初始应力刚度矩阵(几何刚度矩阵), F_e 为单元节点载荷向量, $[S]$ 为转换矩阵。

对整个结构来说,整合所有单元后得到

$$([K_e] + [K_g]_e) \{\delta\} = \{p\} \quad (8)$$

式中, $\{p\}$ 为对整个结构施加的载荷, $[K_g]_e$ 取决于线性应力 $\{\sigma_L\}$, 而该线性应力决定于已经施加的载荷。

在分析具体结构的时候,应力刚度矩阵可以改变结构的刚度,这主要取决于结构的受力情况,受拉情况与受压情况,二者截然不同。

当结构受压时,随着外力 F 的不断增大,在应力刚度矩阵作用下,结构的固有刚度将不断地减小,当 F 达到某个数值时,结构净刚度就会变为 0,结构位移无限扩大下去,最终导致结构发生屈曲。

ANSYS 的线性屈曲分析的实现就是基于以上理论的,通过求解特征值的方法来计算结构发生负刚度时对应于应力刚度矩阵的比例因子:

$$([K] + \lambda([S])) \{\psi\} = 0 \quad (9)$$

式中, $[K]$ 为刚度矩阵, $[S]$ 为初始应力刚度矩阵, $\{\psi\}$ 为位移特征值矢量, λ 为特征值。

1.2 挖补修理结构有限元模型建立

因结构对称,为节约计算资源,建立挖补修理结构的 1/4 模型并施加载荷(图 1),其网格划分见图 2。母板与补片通过斜接粘接在一起,母板为 T300/NY9200G,宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2013 年 第 6 期

$$U_e = \frac{1}{2} \int \{\epsilon_L\}^T [C] \{\epsilon_L\} dv + \int \{\epsilon_{NL}\}^T \{\sigma_L\} dv \quad (3)$$

式中, $[C]$ 为刚度矩阵。

第二项表示作用在非线应变上的线性应变所产生的应变能,有

$$\int \{\epsilon_{NL}\}^T \{\sigma_L\} dv = \int \{g\}^T [S] \{g\} dv \quad (4)$$

式中, $\{g\}$ 表示与节点自由度相关的位移倒数矩阵, $[S]$ 为应力刚度矩阵。

假设在一个单元的节点位移量 $\{\epsilon\}_e$ 决定其位移变化,即

$$\{uvw\}^T = [N] \{\delta\}_e \quad (5)$$

式中, $[N]$ 表示形函数矩阵, u, v, w 分别表示在三个方向上的位移向量,将 $\{\epsilon_L\} = \{B_L\} \{\delta\}$ 和 $\{g\} = \{G\} \{\delta\}$ 。代入式(3)可得

补片有碳纤维等层合板,胶层为 SY-14 胶黏剂^[9-10],所有材料性能参数见表 1。层合板的补片所使用的铺层方式见表 2,单层预浸料的厚度为 0.125 mm。

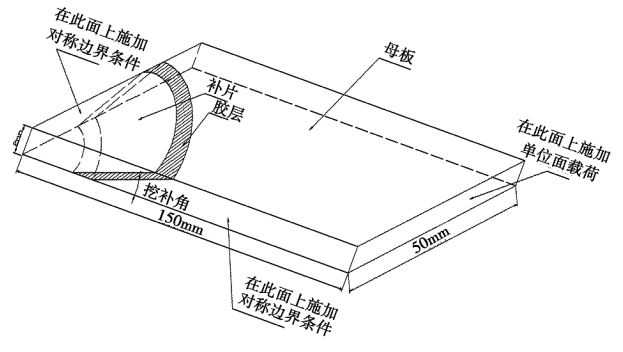


图 1 1/4 挖补修理模型示意图

Fig. 1 Schematic drawing of scarf repair model

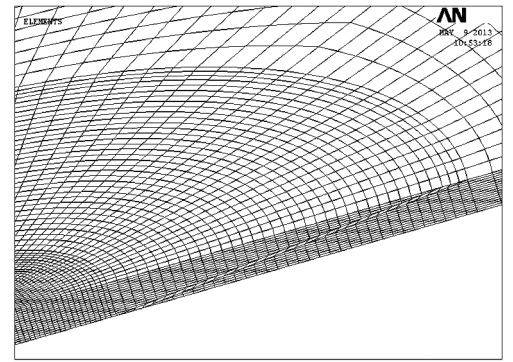


图 2 挖补修理区域的网格划分图

Fig. 2 Mesh of scarf repair zone

表 1 材料性能参数

Tab. 1 Properties of material

材料	弹性模量/MPa	剪切模量/GPa	泊松比
碳纤维	$E_{11} = 143000$	$G_{12} = G_{13} = 4.9$	$\mu_{12} = \mu_{13} = 0.306$
层合板	$E_{22} = E_{33} = 9300$	$G_{23} = 4.0$	$\mu_{23} = 0.32$
玻璃纤维	$E_{11} = 548000$	$G_{12} = G_{13} = 9.1$	$\mu_{12} = \mu_{13} = 0.25$
层合板	$E_{22} = E_{33} = 18300$	$G_{23} = 9.1$	$\mu_{23} = 0.25$
石墨纤维	$E_{11} = 211000$	$G_{12} = G_{13} = 2.6$	$\mu_{12} = \mu_{13} = 0.3$
层合板	$E_{22} = E_{33} = 5300$	$G_{23} = 2.6$	$\mu_{23} = 0.3$
硼纤维	$E_{11} = 211000$	$G_{12} = G_{13} = 7.0$	$\mu_{12} = \mu_{13} = 0.3$
层合板	$E_{22} = E_{33} = 21100$	$G_{23} = 7.0$	$\mu_{23} = 0.3$
SY-14 黏接剂	$E = 2.3$		$\mu = 0.35$

表 2 铺层方式

Tab. 2 Parameters of lay-up sequence

编号	铺层方式
1#	$[0_2/\pm 45/90/\pm 45/0]_s$
2#	$[0_3/\pm 45/90/\pm 45]_s$
3#	$[0_3/\pm 45/\pm 45/90]_s$
4#	$[0_3/90/\pm 45/\pm 45]_s$
5#	$[90/0_3/\pm 45/\pm 45]_s$
6#	$[90/\pm 45/\pm 45/0_3]_s$
7#	$[\pm 45/90/0_2/\pm 45/0]_s$
8#	$[\pm 45/\pm 45/0_2/90/0]_s$
9#	$[\pm 45/\pm 45/90/0_3]_s$

2 计算结果分析

通过对挖补修理结构的屈曲分析,得出了结构在 4 种补片材料下,结构失稳载荷随着挖补角、铺层、胶层厚度的变化情况,并做了比较,如图 3 所示,其中,母板材料均为碳纤维层合板,只是补片材料发生了变化。

2.1 挖补角对挖补修理结构稳定性影响

母板与补片的铺层方式均为 $[\pm 45/90/0_2/\pm 45/0]_s$,胶层厚度为 0.15 mm。在图 3(a)中,当补片材料为碳纤维层合板时,挖补后的临界失稳载荷随着挖补角的增大而明显增大,在实际修理中应该采用大的挖补角;采用玻璃纤维层合板进行修理,结构稳定性随着挖补角增大有明显增强;采用石墨纤维、硼纤维层合板进行修补时,挖补角对结构的稳定性影响不大,但是用异种材料修理碳纤维层合板的失稳载荷高于同种材料修理的,说明提高了结构的稳定性。

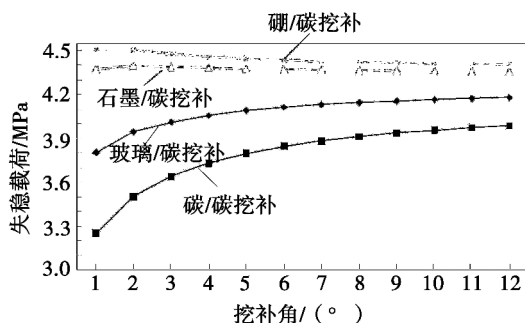
2.2 胶层厚度对挖补修理结构稳定性影响

母板与补片的铺层方式均为 $[\pm 45/90/0_2/\pm 45/0]_s$,挖补角均为 6° 。从图 3(b)中看出,胶层厚度对结构稳定性影响不明显。但是采用异种材料进行挖补修理,结构的稳定性仍然得到了改善,尤其是石墨/

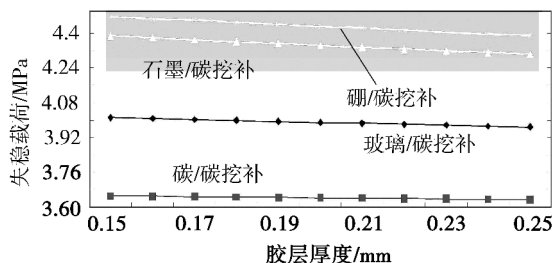
碳挖补修理和硼/碳挖补修理。在铺层和胶层厚度相同的情况下,用硼纤维层合板对碳纤维层合板进行挖补修理,结构稳定性最强。

2.3 铺层方式对挖补修理结构稳定性影响

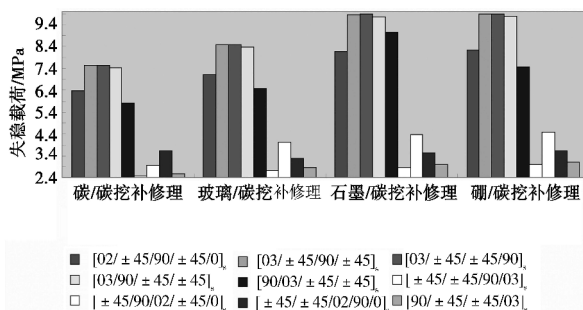
母板的铺层方式为 $[\pm 45/90/0_2/\pm 45/0]_s$,挖补角均为 6° ,胶层厚度为 0.15 mm,4 种挖补修理结构在不同铺层方式下的屈曲分析结果如图 3(c)所示,得出在相同铺层方式下,石墨/碳挖补修理与硼/碳挖补修理的稳定性是最强的,玻璃/碳挖补修理结构稳定性次之,碳/碳挖补修理的稳定性最差。当补片铺层方式为 $[\pm 45/\pm 45/90/0_3]_s$ 时,所有的挖补修理结构稳定性均表现为最差,验证了当 0° 铺层在铺层中面时会引起层合板的稳定性明显降低的结论。当铺层方式为 $[0_3/\pm 45/\pm 45/90]_s$ 时,此时 0° 铺层均在层合板最外层,挖补修理结构的稳定性最强。



(a) 随挖补角的变化



(b) 随胶层厚度的变化



(c) 随铺层的变化

图 3 4 种挖补修理失稳载荷随挖补角、胶层厚度及铺层的变化
Fig. 3 Buckling loads for different scarf angles repair, adhesive thicknesses and lay-up sequences

(下转第 30 页)