

文章编号 :1001 - 2486(2005)06 - 0021 - 05

双向受载裂纹板的碳纤维复合材料补片的胶接修补分析*

杨孚标,肖加余,曾竟成,江大志,邢素丽,王遵

(国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:建立了碳纤维复合材料补片胶接修补双向受载裂纹板的 3D 有限元模型,分析了补片的单面胶接修补效果,探讨了补片材料、铺层顺序、补片长度及载荷比等对裂纹应力强度因子的影响规律。结果表明:复合材料补片的存在使裂纹板垂直裂纹方向载荷和平行裂纹板方向载荷发生耦合作用,从而影响补片修补效果。平行裂纹方向的压应力可降低裂纹尖端的应力集中因子,而拉应力可提高裂纹尖端的应力集中因子。

关键词:复合材料补片;有限元;应力强度因子

中图分类号: TB323 **文献标识码:** A

Study of the Bonded Repairing Efficiency of the Cracked Plate with Biaxial Loading

YANG Fu-biao, XIAO Jia-yu, ZENG Jing-cheng, JIANG Da-zhi, XING Su-li, WANG Zun

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A 3D FE model of the cracked aluminum plate bonded by carbon fiber composite is proposed and validated when the plate is with biaxial loading. The efficiency of composite repair is investigated too. The effect of composite patch, ply sequence, length of patch and the ratio of loading on the stress intensifying factor (SIF) of the cracked plate is studied. It is shown that there exists coupling effect between the two applied loading and the efficiency of the composite repair is affected by the ratio of loading. The SIF of plate is reduced when the tensile loading is applied parallel to the crack while the SIF is increased when the compressive loading is applied perpendicularly to the crack.

Key words: composite patch; finite element method; stress intensify factor (SIF)

飞机铝合金构件在使用过程中由于应力腐蚀和环境腐蚀容易产生裂纹损伤。为恢复结构的完整性,需要对受损的构件进行换件或修理等处理。复合材料补片胶接修理与传统的修理方法相比具有明显优势,在航空工程中得到了广泛的应用,是一种先进的结构修理技术^[1]。人们对铝合金裂纹板的碳纤维/环氧树脂复合材料补片胶接修理进行了较详细的分析。与碳纤维/环氧树脂复合材料补片相比,石墨纤维、碳纤维/环氧树脂复合材料补片虽然具有较低的刚度和强度,但价格便宜、铺敷性好等优点,同样具有较好的修理效果,具有巨大的优势,在我国引起了广泛的关注^[2]。用碳纤维复合材料对单向受载裂纹板的胶接修补研究较多,但对双向受载裂纹板的复合材料补片胶接修补研究相对较少^[3]。

本文利用 ANSYS 分析软件包,建立了碳纤维复合材料补片胶接修理双向受载铝合金裂纹板的 3D 有限元分析模型,并对模型的正确性进行了验证,利用建立的 3D 分析模型分析了碳纤维复合材料补片单面修理双向受载的裂纹板的修补效果,探讨了补片材料、几何尺寸、铺层顺序和双向载荷的比例等因素对修补后的裂纹板尖端应力强度因子的影响。

1 分析模型

1.1 有限元模型

利用 ANSYS 有限元分析软件包,建立了碳纤维复合材料补片胶接修理双向受载铝合金裂纹板的

* 收稿日期:2005-04-15

基金项目:武器装备预研基金资助项目(51489040105KG0101)

作者简介:杨孚标(1967—),男,讲师,硕士。

3D 有限元模型。假设复合材料补片、铝合金板和胶粘剂层均是线弹性,并认为其粘接界面不存在脱粘现象。铝合金板和胶粘剂采用各向同性体元,而复合材料补片采用层状体元。图 1 为复合材料补片胶接修补裂纹板结构示意图。由于修补结构的对称性,只需对结构的 1/4 部分建立相关的有限元模型,如图 2 所示。

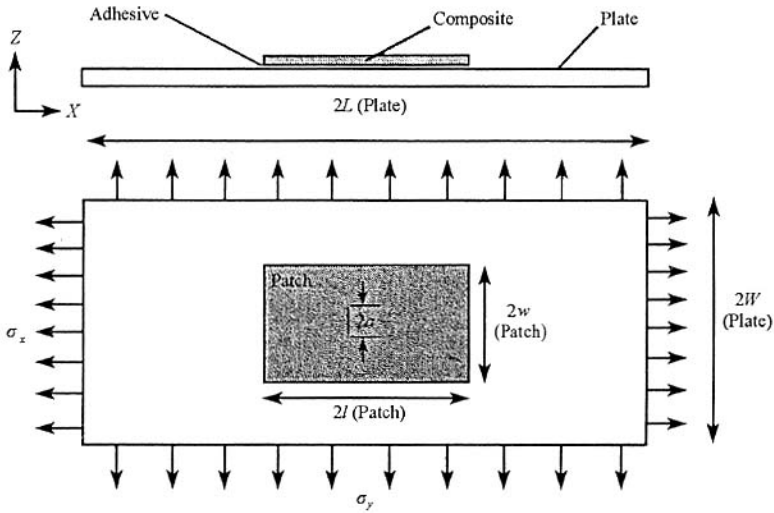


图 1 补片胶接修补裂纹板示意图

Fig.1 Configuration of the repaired composite patch under investigation

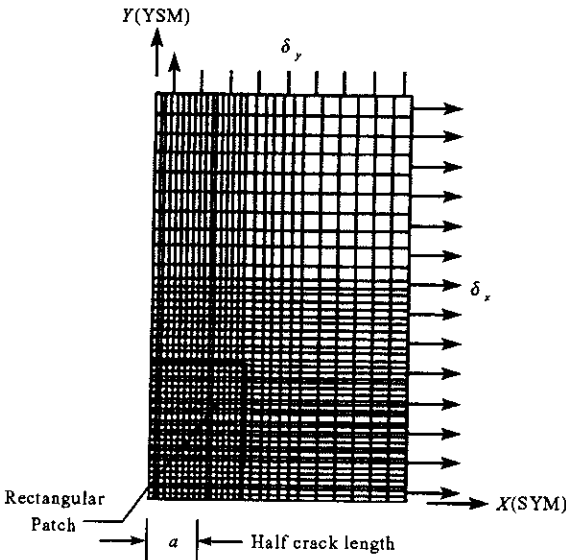


图 2 双向受载修补结构的有限元模型

Fig.2 FE model for the repaired composite patch

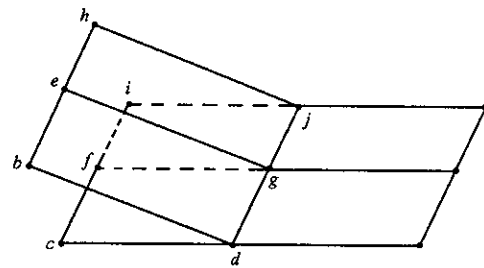


图 3 修正裂纹闭合方法(MCCM)

Fig.3 Modified crack closure method

1.2 应力强度因子的计算

采用归一化的应力强度因子表征复合材料补片的胶接修补效果。裂纹尖端的应力强度因子可以采用修正裂纹闭合方法计算^[4],见图 3。根据有限元分析结果可以得到裂纹尖端各节点力和节点位移,计算裂纹尖端的应变能释放率

$$G = \frac{1}{2l_p \Delta a} [F_{dy}(v_b - v_c) + F_{gy}(v_e - v_f) + F_{jy}(v_h - v_i)]$$

式中, F_{dy} 、 v_b 、 v_c 分别为图 3 对应节点在 Y 方向的节点力和节点位移, Δa 为裂纹前沿单元的长度。裂纹尖端的应力强度因子

$$K_p = \sqrt{EG}$$

E 为裂纹板的弹性模量。归一化的应力强度因子

$$K = \frac{K_p}{\sigma \sqrt{\pi a}}$$

σ 为裂纹板所受应力, a 为半裂纹长度。

1.3 模型验证

通过采用与文献[4]相同的补片材料和相同的几何尺寸,利用本文建立的3D修补模型,分析了碳纤维/环氧复合材料补片修补裂纹铝板的修补效果,从而验证本文建立的3D模型的可行性和可靠性。分析所用的材料性能和结构参数见文献[5],分析结果见表1。从分析结果可知,本模型的分析结果的变化趋势与Sun等分析结果变化趋势相同,计算结果小于Sun^[6]的有限元分析结果,大部分介于Sun和Cheu的3D模型分析结果之间,因而认为建立的3D有限元模型能够反映实际结构的真实情况,满足计算精度的要求。

表1 模型分析结果比较

Tab.1 Validation of FE model

R	S. Naboulsi et al. Three layer model	Sun et al. Three-dimensional model	Cheu et al. Three-dimensional model	Sun et al. Two-dimensional model	本文模型
-2	0.552	0.565	0.392	0.493	0.478
0	0.570	0.612	0.481	0.536	0.505
2	0.609	0.660	0.571	0.579	0.534

2 修补效果分析

2.1 修补结构的几何尺寸和材料性能

利用建立的3D复合材料补片修补裂纹板模型,对碳纤维复合材料补片胶接修补双向受载的裂纹板的修补效果进行分析。模型中铝合金裂纹板的尺寸为120mm×70mm×2.29mm,中心裂纹长度为20mm,材料常数为 $E = 71.02\text{GPa}$ 、 $\nu = 0.32$ 。修补胶层厚度为0.1016mm,其材料常数为 $G = 0.956\text{GPa}$ 、 $\nu = 0.32$ 。补片材料为碳纤维/环氧复合材料层合板,其宽度为20mm,其单层材料常数为 $E_1 = 181\text{GPa}$ 、 $E_2 = 10.3\text{GPa}$ 、 $E_3 = 10.3\text{GPa}$ 、 $G_{12} = 7.24\text{GPa}$ 、 $G_{23} = 4.94\text{GPa}$ 、 $G_{13} = 7.24\text{GPa}$ 、 $\nu_{12} = 0.1677$ 、 $\nu_{13} = 0.1677$ 、 $\nu_{23} = 0.035$ 。

2.2 补片尺寸对 K 的影响

假设裂纹板在垂直裂纹方向承受拉伸载荷,平行裂纹方向承受拉伸或压缩载荷,并且拉伸载荷值为正值,压缩为负值。复合材料补片胶接修补后裂纹板的应力强度因子 K 随补片长度(采用归一化的数值 l_p/a ,即用补片长度和裂纹长度的比值表示)和应力比($R = \sigma_x/\sigma_y$)的变化关系见图4。其中补片为单向碳纤维复合材料,补片厚度为1.0mm,胶粘剂厚度为0.1016mm。从图4可知,裂纹板不论承受单向或双向载荷,修补时补片长度存在一临界值,即最佳补片长度。修补后裂纹板的应力强度因子随着补片长度的增大出现先降后升的现象,即在一定的范围内增加复合材料补片的长度,应力强度因子减少,当补片尺寸增加到一定程度后继续加大,应力强度因子变大。加大补片长度,有利于载荷的传递,充分发挥补片的作用,从而降低裂纹尖端的应力集中因子;当补片长度继续增大时,容易导致结构中的局部刚度硬化,产生较大的横向变形,恶化裂纹尖端的受力状况,增大裂纹尖端的应力强度因子。

图5为最佳补片长度与应力比之间的关系。双向受载裂纹板经过复合材料补片修理时,其最佳补片尺寸与应力比相关。在补片宽度一定的情况下($\omega_p/a = 2$),最佳补片长度随平行裂纹方向的压应力的增大而降低,随拉应力的增大而增大,即平行裂纹方向的载荷与垂直裂纹方向的载荷发生耦合作用,平行裂纹方向的压应力可改善裂纹尖端的受力状况,可适当减小复合材料补片的长度,而平行裂纹方向

的拉应力可恶化裂纹尖端的受力状况,需要增加复合材料补片的尺寸。

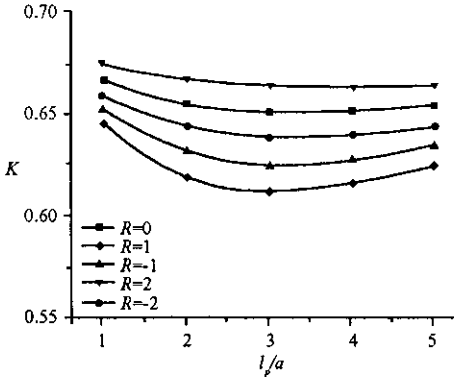


图4 不同应力比和补片长度对 K 的影响

Fig.4 The effect of stress ratio and length of patch on K

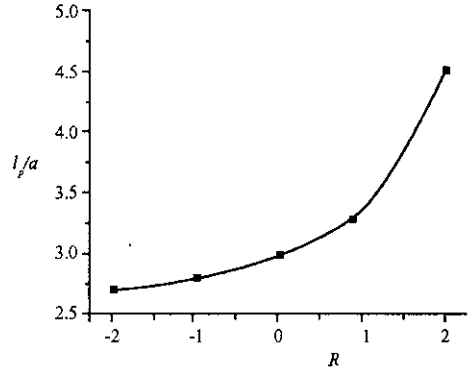


图5 最佳补片长度与应力 R 的关系

Fig.5 The best length of patch for different R

2.3 补片材料对 K 的影响

图6为不同碳纤维复合材料补片对双向受载裂纹板胶接修补效果的影响,其中复合材料补片分别为单向板、正交板和准各向同性板,补片的几何尺寸相同。分析结果表明,不同的复合材料补片对受载裂纹板的修补效果是不同的。裂纹板双向受拉时,宜采用单向复合材料补片进行修补,且纤维方向垂直裂纹,与裂纹板的最大主应力方向一致。裂纹板承受拉压载荷作用,并且压缩载荷作用较大时,补片材料宜采用正交铺层复合材料板。对双向受载的裂纹板进行复合材料补片修补时,需要根据裂纹板的不同受载情况,选择不同的补片进行修补,即通过改变补片预浸料的铺设角度而改变复合材料板的性能,改变修补后裂纹板尖端的应力强度因子。

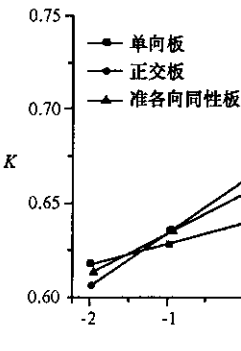


图6 不同补片材料对 K 的影响

Fig.6 The effect of the type of patch on K

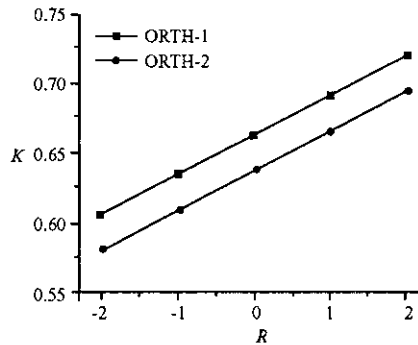


图7 正交补片的铺层顺序对 K 的影响

Fig.7 The effect of patch ply sequence on K

2.4 补片铺层顺序对 K 的影响

图7对比分析了对称正交铺层的复合材料补片在补片与裂纹板的铺设方向不同时对其修补效果的影响。碳纤维补片的铺层顺序为[90/0/0/90],第一种补片的铺设方向为其表面层碳纤维方向平行裂纹方向,代号为 ORTH-1;第二种补片的铺设方向为其表面层碳纤维方向垂直裂纹方向,代号为 ORTH-2。结果表明,虽然同为正交铺层补片,其宏观性能相同,但当补片表层纤维与裂纹间的铺设方向不同时,其修补效果不同。与裂纹板接触的表层纤维方向垂直于裂纹方向时,其胶接修补效果相对较好,而与裂纹板接触的表层纤维方向平行裂纹方向时,修补效果较差。复合材料补片对裂纹板的修补,主要是通过补片的“架桥”作用来实现的,当与裂纹板接触的补片表层性能较好,即具有较高的强度和弹性模量时,能够有效地传递和承担载荷,抑制裂纹张开,充分发挥补片的“止裂”作用,提高补片的修补效果。采用复合材料补片对裂纹板进行胶接修补时,应注意其与裂纹板接触的补片表层的纤维方向,修补时第一层宜采用具有较高性能的单向预浸料片材,并且纤维垂直裂纹。

图8对比分析了铺设方向不同的准各向同性复合材料补片的胶接修补效果。修补时一种补片的表层纤维方向垂直裂纹,其代号为ANSI-1,另一种补片的表层纤维方向平行裂纹方向,其代号为ANSI-2。从结果可知,补片的第一层的铺层方向对修补效果具有决定性的作用,即当与裂纹板接触的补片表层纤维方向垂直裂纹方向时,能较好地发挥补片的“架桥”作用和“止裂”作用,复合材料补片具有较好的修补效果。但当裂纹板在裂纹方向承受较大的压缩载荷时,表层纤维平行裂纹方向的补片具有较好的修补效果。

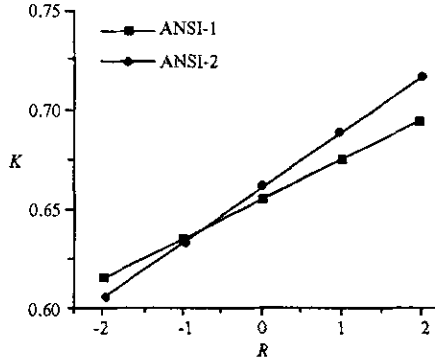


图8 准备各向同性补片的铺层顺序对 K 的影响

Fig.8 The effect of ply sequence of the patch on K

3 结 论

(1) 复合材料补片能有效降低裂纹板的裂纹尖端应力强度因子。胶接的复合材料补片使裂纹板上垂直裂纹方向载荷和平行裂纹板方向载荷发生耦合作用,平行裂纹方向拉应力恶化裂纹尖端的受力状况,压应力可部分改善裂纹板裂纹尖端的受力状况。

(2) 采用单向复合材料修补时,最佳补片长度随平行裂纹方向的压应力的增大而降低,随拉应力的增大而增大。

(3) 裂纹板进行复合材料胶接修补时,与裂纹板直接接触的补片表层纤维方向至关重要。

参 考 文 献 :

- [1] Baker A A. Repair of Cracked or Defective Metallic Aircraft Components with Advanced Fiber Composites : An Overview of Australian Work[J]. Composite Structure, 1984 (2) :153 - 181.
- [2] 陈绍杰. 用复合材料技术修理金属飞机结构[J]. 航空制造工程, 1996 (9) :33 - 34.
- [3] 徐建新,等. 双向受载裂纹板的胶接修补效果分析[J]. 航空学报, 1999 (4) :15 - 22.
- [4] Chau W T. Bonded Repair of a Center-cracked Panel with Composite Patches[D]. Hong Kong : The Hong Kong University of Science and Technology, 2000.
- [5] Naboulsi S, et al. Modeling of a Cracked Metallic Structure with Bonded Composite Patch Using the Three Layer Technique[J]. Composite Structure, 1995, 35 :153 - 181.
- [6] Sun C T, et al. Analysis of Cracked Aluminum Plates Repaired with Bonded Composite Patches[J]. AIAA Journal 1996, 34 :369 - 374.

