

基于三维有限元模型的弹翼胶接结构 胶层应力分析

陈涛, 郝建滨

(中国人民解放军91851部队, 葫芦岛125001)

摘要: 目前对复合材料胶接修理结构中胶层的模拟多采用二维平面单元, 不能有效模拟胶层在外载荷作用下的真实应力状态。考虑某飞行器弹翼修理时形成的复合材料双面胶接结构承受载荷后处于三维应力状态的情况, 建立了该修理结构的三维有限元模型, 计算出单向拉伸条件下胶层的剪应力, 并与Hart-Smith解析解进行对比。分析结果表明三维有限元模型正确、合理。利用所建立的模型分析胶层的剪应力和剥离应力的分布特点, 得出胶层破坏的失效顺序, 为胶接修理结构的承载能力分析以及结构改进提供参考依据。

关键词: 复合材料修理结构; 三维有限元模型; 胶层剪应力; 剥离应力; 失效机理

中图分类号: TB125; O242.21

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2018)03-0228-05

DOI: [10.12126/see.2018.03.005](https://doi.org/10.12126/see.2018.03.005)

Stress analysis of composite repair structure of aircraft wing based on three-dimensional finite element model

CHEN Tao, HAO Jianbin

(Unit 91851, PLA, Huludao 125001, China)

Abstract: At present, the simulation of the adhesive layer in the composite adhesive repair structure mostly adopts a two-dimensional planar element, which cannot effectively simulate the true stress state of the adhesive layer under the action of the external load. A three-dimensional finite element model is established for analyzing the three-dimensional stress state of adhesively bonded composite repair structures. The adhesive shear stress is calculated under uniaxial tensile loading condition, and compared with the Hart-Smith analytical solutions to validate the effectiveness of the present model. It is indicated that the finite element computation results correlate very well with those of the analytical solutions. The distributions of the adhesive shear stress and the peel stress, as well as the mechanism of the failure mode of the adhesive, are analyzed based on the finite element model. The present model and the analytical approaches may help the investigation of the load-bearing capacity of the patched structure and improve the design accordingly.

Key words: composite repair structure; three-dimensional finite element model; adhesive shear stress; peel stress; failure mechanism

收稿日期: 2018-01-30; 修回日期: 2018-06-06

引用格式: 陈涛, 郝建滨. 基于三维有限元模型的弹翼胶接结构胶层应力分析[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(3): 228-232

CHEN T, HAO J B. Stress analysis of composite repair structure of aircraft wing based on three-dimensional finite element model[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(3): 228-232

0 引言

随着某型飞行器使用年限的延长,材料的结构性能不断退化,如果不及时修理,将严重影响飞行器的飞行安全^[1]。考虑到复合材料具有比强度高、比模量大、抗疲劳的优异特点,决定利用复合材料胶接修理受损的金属结构,不仅能显著提高结构强度,还能避免机械连接或焊接导致的应力集中^[2-3]。在复合材料胶接修理结构中,胶层起着传递载荷的作用。为分析类似结构的受力情况, Jones^[4]、Sun^[5]、Nabouli^[6]、孙洪涛^[7]等人采用二维有限元模型模拟胶层中的横向剪切效应和破坏方式;杨孚标^[8]提出了“板-体-板”模型,将金属板和复合材料补片用 Mindlin 板来模拟,而胶粘剂则选择用三维体单元来模拟,但该模型仍然属于二维有限元模型。

然而,在外载荷作用下,复合材料胶接修理结构呈现出的是一种三维应力状态,简单地以二维平面单元模拟修理结构中的各组成部分已不能满足工程实际应用的要求。而且,随着计算机计算能力的不断提高以及大型通用商业有限元软件不断发展,修理结构的三维有限元建模分析已成为可能。因此,本文首先建立三维有限元模型,得出复合材料胶接结构中胶层的应力分布,并通过与理论解进行对比,验证所建立模型的准确性。以该三维模型为基础,进一步分析胶层中的三维应力状态,为下一步分析胶层的失效形式提供理论支撑。

1 有限元分析模型

1.1 结构模型

为了便于分析计算,根据双面胶接修理结构的实际情况,对结构模型做以下基本假设:初始胶接质量完好,没有任何形式的损伤;金属板和胶层是均匀的、各向同性的线弹性材料。铝板、胶粘剂和补片 3 类结构的性能参数如表 1 所示。

表 1 铝板、胶粘剂和补片材料参数

Table 1 Material properties of aluminum plate, adhesive and patch

材料代号	杨氏模量/GPa			切变模量/GPa			泊松比		
	E_1	E_2	E_3	G_{12}	G_{13}	G_{23}	γ_{12}	γ_{13}	γ_{23}
LY12CZ	73.8	—	—	—	—	—	0.33	—	—
J150	2.9	—	—	—	—	—	0.33	—	—
T300/E51	134	10.3	10.3	5.5	5.5	3.2	0.33	0.33	0.33

修理结构尺寸如图 1 所示,矩形铝板为 180 mm(L)×80 mm(W)×10 mm(T),补片为 80 mm(L)×

80 mm(W)。根据等刚度修理的要求,将补片厚度选定为 1.6 mm,铺层顺序设计为[0/45/-45/90]₄,胶层厚度为 0.15 mm。修理结构受单向拉伸载荷,应力 $\sigma=150$ MPa。结构的中心穿透裂纹长度为 $2a=20$ mm,金属板厚度为 t_p 。修理结构是对称的,因此对修理结构的 1/4 进行建模得到双面胶接修理金属板的结构模型如图 2 所示。

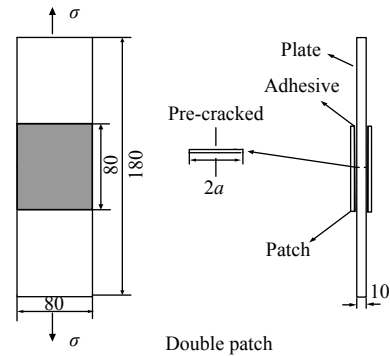


图 1 修理结构的外形尺寸

Fig. 1 The geometry of patched specimen



图 2 双面胶接修理金属板的结构模型

Fig. 2 Structural model of metallic plate with double-sided composite patch repair

1.2 网格划分与有限元模型

ABAQUS 软件提供了多种模拟单元,不同的单元代表了不同的几何类型^[9]。本文建模时,金属板采用 C3D20R 三维实体单元;胶层采用对位移求解结果较精确的 C3D8R 三维实体单元;补片采用 SC8R 单元模拟。布局全局种子大小为 1 mm,并设置裂纹处网格密度大小为 0.1 mm,得到胶接修理结构的有限元模型,如图 3 所示。在线弹性条件下,裂纹尖端的几何不连续性导致裂纹尖端的应力场存在奇异性。

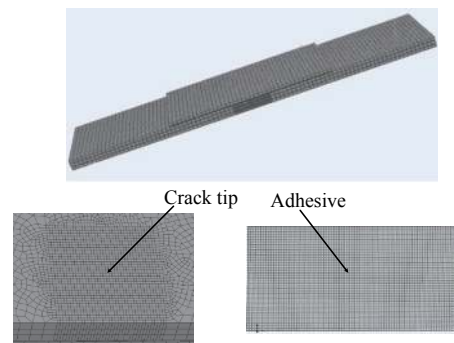


图 3 胶接修理结构的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the patched plate

1.3 加载方式

在模型上定义边界属性, 由于建立的模型是 1/4 模型, 所以建立对称边界。采用一端固定, 另一端施加载荷的约束形式对修理结构进行加载, 载荷大小设置为 $\sigma=150\text{ MPa}$, 修理结构的边界约束条件如图 4 所示。

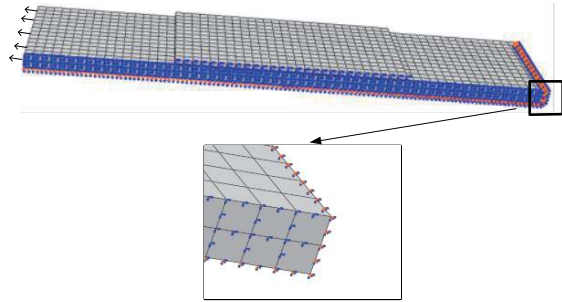


图 4 双面胶接修理结构的边界约束

Fig. 4 Boundary constraints of cracked metallic structure with double-sided adhesively bonded composite repair

2 解析解验证

为了验证所建立三维有限元模型的有效性, 利用 Hart-Smith 力学模型得到胶层的剪应力, 与有限元模型输出结果进行对比分析。

2.1 Hart-Smith 解析解

Hart-Smith^[10]在 Volkersen、Golond 和 Reissner 等人分析搭接接头的基础上建立了复合材料胶接修理损伤金属结构胶层应力的解析模型, 能准确分析胶接结构的承载能力和破坏模式。

复合材料双面胶接修理结构如图 5 所示, 由 Hart-Smith 解析模型^[8, 11-13]可知, 经复合材料双面胶接修理, 胶层在 $y=0$ 处, 沿 x 方向上的剪应力分布可以表示为

$$\tau = A \cosh(2\beta_A x) + B \sinh(2\beta_A x), \quad (1)$$

式中:

$$A = \frac{1}{\frac{t_a}{G_a} + t_p/3G_p + t_s/3G_s} \cdot \frac{-N}{\beta_A E_s t_s} - B \cosh(\beta_A l); \quad (2)$$

$$B = \frac{1}{\frac{t_a}{G_a} + t_p/3G_p + t_s/3G_s} \cdot \frac{-N}{\beta_A E_s t_s} + N\beta_A; \quad (3)$$

$$\beta_A = \sqrt{\frac{1/E_s t_s' + 1/E_p t_p}{t_a/G_a + t_p/3G_p + t_s/3G_s}}. \quad (4)$$

式 (2)~(4) 中: E 、 t 、 G 分别代表材料的弹性模量、厚度和切变模量, 下标 s 、 p 、 a 分别代表裂纹板、补片

和胶层, 其中 $t_s'=t_s/2$; N 代表施加在结构单位宽度上的拉伸载荷, $N=\sigma t_s$; $2l$ 和 $2a$ 分别代表补片和裂纹的长度(参见图 5)。 A 、 B 、 β_A 代表剪切力余切系数、剪切力正切系数和剪切力模量系数。

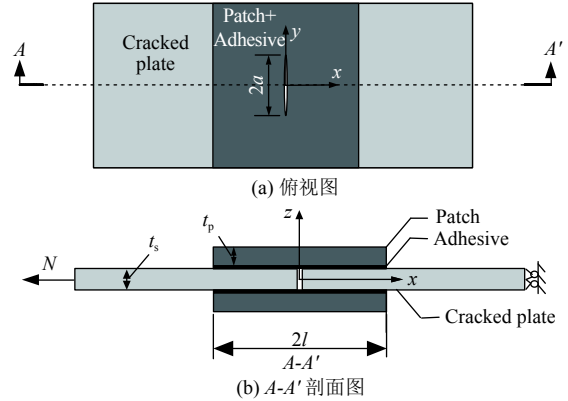


图 5 修理结构示意图及局部坐标系

Fig. 5 Geometry of cracked metallic structure with double-sided adhesively bonded composite repair and the local coordinate system

2.2 分析结果

根据 Hart-Smith 模型, 利用本文提供的结构参数和材料性能参数, 对复合材料双面胶接修理结构中的胶层剪应力进行分析。

图 6 为通过本文建立的有限元模型和 Hart-Smith 模型求得的胶层在 $y=0$ 处沿 $+x$ 方向上的剪应力分布对比图。从图中可以看出, 除了理论解析解的应力峰值出现在 $x=0$ 位置, 有限元解的应力峰值出现在 $x=1.5$ 位置(距 $x=0$ 处约 1 倍胶层厚度)外, 在其他位置的有限元解与理论解析解吻合较好。这和文献[13]的结论是一致的。出现这种现象的原因是: 在求解理论解析解的过程中, 为了便于得到显示解, 在不影响其他位置胶层应力分布的情况下忽略了胶层自由端为应力自由边界条件。从以上分析可以判断, 本文所建立的有限元模型是有效的。

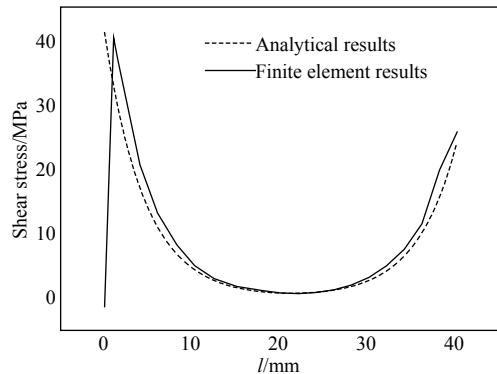


图 6 胶层在 $y=0$ 处沿 $+x$ 方向上的剪应力分布
Fig. 6 Shear stress distribution in the adhesive along $+x$ axis at $y=0$

3 胶层应力分析

复合材料修理结构的破坏通常发生在胶层或胶接界面,减少胶层的受力对于提高修理结构的寿命具有直接的意义。胶层在载荷作用下,受到剪切、法向拉伸、剥离和劈开等形式力的作用。一般认为,胶层受力的理想情形是只有剪切力、法向力或者二者同时作用。因此,下面主要利用三维有限元模型分析单向拉伸条件下胶层的受力状态。

3.1 胶层剪应力的分析

在三维结构中,某一点处的应力状态由6个独立应力分量组成:3个正应力分量(S_{xx} 、 S_{yy} 、 S_{zz})和3个剪应力分量(S_{xy} 、 S_{xz} 、 S_{yz})。在修理结构端部施加沿y方向的面载荷,胶层所承受的剪应力主要为 S_{yz} 。

图7给出了胶层剪应力 S_{yz} 沿x轴方向和y轴方向的分布。从图中可以看出,在平行于载荷方向的胶层两端以及裂纹边缘处,胶层的剪应力较大;其他大部分区域的剪应力较小。这说明双面胶接修理结构中胶层的剪应力主要靠胶层端部和裂纹边缘区域进行传递,而其他区域所承担的载荷较小。因此可以判断,单向拉伸载荷条件下,胶层的剪切破坏首先在平行于载荷方向的胶层端部和裂纹处发生。另外,对于其他大部分低应力区域来说,由于所承担的载荷较小,如果存在空隙或发生脱粘现象,并不会即刻造成修理结构的破坏,也可以说在某种意义上低应力区域改进了修理结构的损伤容限,这也是大多数修理结构具有较长搭接长度的原因。

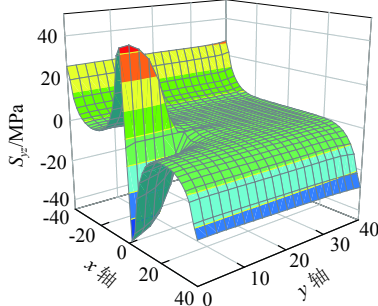


图7 胶层剪应力 S_{yz} 在x-y平面内的分布
Fig. 7 Distribution of adhesive shear stress S_{yz} in x-y plane

3.2 胶层剥离应力的分布

剥离应力就是沿着z方向(胶层法线方向)的正应力 S_{zz} 。图8给出了胶层正应力 S_{zz} 沿x方向和

y方向的分布。从图中可以看出,对修理效果不利(沿z轴方向为正值)的剥离应力 S_{zz} 在平行于载荷方向的胶层两端取得最大值;裂纹边缘处存在剥离应力,但其值很小;除上述区域外,其他部位的剥离应力几乎为0。因此可以推断,单向拉伸载荷条件下,胶层的剥离破坏会首先在平行于载荷方向的胶层端部发生。同时从图中还可看出,与剪应力的分布情况相比,剥离应力在端部区域的分布更加集中。

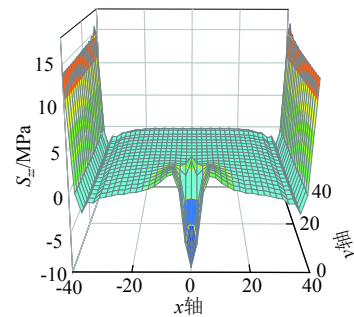


图8 胶层剥离应力 S_{zz} 沿x轴方向和y轴方向的分布
Fig. 8 Distribution of adhesive peel stress S_{zz} along x and y axes

4 结束语

本文考虑复合材料双面胶接修理结构胶层处于复杂的三维应力状态,采用三维体单元模拟金属板、复合材料补片、胶粘剂建立三维有限元模型。对T300/E51复合材料双面胶接修理铝合金LY12CZ裂纹板结构进行Hart-Smith解析解计算,证明了三维有限元模型正确、合理。应用三维模型分析得到了修理结构胶层的剪应力和剥离应力的分布方式。

由应力分析可知:由于补片与金属板在材料属性和结构形式上存在差异,在单向拉伸条件下,补片自由端和裂纹处胶层产生应力集中,剥离应力在平行于载荷方向的胶层两端取得最大值,胶层剪应力在裂纹附近取得最大值,对于胶层主导的破坏模式最先失效的位置是胶层端部和裂纹处。分析结果可为胶接修理结构的承载能力分析以及结构改进提供参考依据。

参考文献 (References)

- [1] 苏维国,穆志韬,朱做涛,等.金属裂纹板复合材料单面胶接修理结构应力分析[J].复合材料学报,2014,31(3):772-780
SU W G, MU Z T, ZHU Z T, et al. Stress analysis of one-

- side adhesively bonded composite repair of cracked metallic plate[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(3): 772-780
- [2] 郝建滨, 穆志韬, 李旭东. 基于 TOM 理论的金属裂纹板复合材料胶接修理胶层应力分析[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2014(10): 27-31
HAO J B, MU Z T, LI X D. Stress analysis in bondline of center-cracked metal plate bonded with composite patches based on TOM theory[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2014(10): 27-31
- [3] 赵波. 考虑弯曲效应的混元胶接单搭接头应力模型[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(10): 129-137
ZHAO B. Theoretical stress model of mixed-modulus single-lap adhesive bonded joints considering the bending effect[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(10): 129-137
- [4] JONES R, CALLIAN R J, AGGARWAL K C. Analysis of bonded repair to damaged fiber composite structure[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1983, 17(1): 37-46
- [5] SUN C T, KLUG J, ARENDT C. Analysis of cracked aluminium plates repaired with bonded composite patches[J]. *AIAA Journal*, 1996, 34(2): 3143-3151
- [6] NABOULI S, MALL S. Modeling of cracked metallic structure with bonded composite patch using three layer technique[J]. *Composite Structure*, 1996, 35(3): 295-308
- [7] 孙洪涛, 刘元铺. 改进的金属裂纹板复合材料胶接修理的有限元模型[J]. *西北工业大学学报*, 2000, 18(3): 446-451
SUN H T, LIU Y Y. The improved finite element model of cracked metal plates repaired with bonded composite patches[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2000, 18(3): 446-451
- [8] 杨孚标. 复合材料修理含中心裂纹铝合金板的静态与疲劳特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006: 45-53
- [9] WEN S W, XIAO J Y, WANG Y R. Accelerated ageing behavior of aluminum plate with composite patches under salt fog effect[J]. *Composite: Part B*, 2014, 44: 266-273
- [10] BENYAHIA F, ALBEDAH A. Analysis of the adhesive damage for different patch shapes and size in bonded composite repair of aircraft structures[J]. *Materials and Design*, 2014, 54: 18-24
- [11] 苗学周, 李成. 补片形状和尺寸对复合材料胶接修理的影响[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(20): 63-69
MIAO X Z, LI C. Influence of patch shape and size on adhesively bonded composite repair[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(20): 63-69
- [12] BENYAHIA F, AMINALLAH L, ALBEDA H. Experimental and numerical analysis of bonded composite patch repair in aluminum alloy 7075 T6[J]. *Materials & Design*, 2015, 73: 67-73
- [13] ERGUN E, TASGETIREN S, TOPCU M. Stress intensity factor estimation of repaired aluminum plate with bonded composite patch by combined genetic algorithms and FEM under temperature effects[J]. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 2015, 19: 17-23

(编辑: 闫德葵)