

胶膜对复合材料加筋结构胶接面应力的影响分析

Effect of Adhesive on Interlaminar Stress of Composite Stiffened Structure

北京航空制造工程研究所

石庆华 戴 霖 曹正华

[摘要] 研究了胶膜对复合材料加筋结构胶接面应力的影响。通过采用将复合材料加筋结构在界面附近按照单层,在界面附近以外的区域处理为均质各向异性材料的手段,建立了含胶膜复合材料加筋结构胶接面应力分析的三维模型。

关键词: 复合材料 加筋结构 胶膜 胶接面应力

[ABSTRACT] The effect of adhesive on interlaminar stress of composite stiffened structures is investigated. A 3-D finite element model is established for interlaminar stress of composite stiffened structures by dealing near interface composite with laminar and out of near interface composite with homogeneous orthotropic material.

Keywords: Composite material Stiffened structure Adhesive Interlaminar stress

采用筋条结构是提高飞机构件等复合材料薄壁结构的承载能力,减轻结构重量的重要手段。比较典型的加筋结构有T型、J型、L型、帽型等结构形式。这些加筋结构一般由蒙皮、缘条和腹板构成。加筋结构通常存在结构突变和自由边,在结构突变和自由边处不可避免地存在着应力集中和胶接面应力($\tau_{13}\tau_{23}\sigma_{33}$)分布,而胶接面应力往往是引起加筋结构发生分层破坏的重要因素。实践证明,在蒙皮和缘条之间增加一层胶膜材料,对于抑制复合材料加筋结构的分层和扩展^[1-5],提高加筋结构的承载能力有着重要作用。

经典层合板理论假设截面上的正应力与其他应力相比很小,可以忽略不计,因此无法得出加筋结构的胶接面应力。要得出复合材料加筋结构的胶接面应力,比较易于操作的方法是采用三维模型。将层合板等效为一个各向异性均质体,即用一个等效的各向异性均质材料代替复合材料层合板。本文将以蒙皮和筋条结合界面上带胶膜复合材料T型加筋结构的胶接面应力为研究对象,采用在胶膜附近上下表面建立一定数量单层铺层,在胶膜附近上下表面以外区域对层合板做等效处理,建立含胶膜材料加筋结构的三维模

型,分析复合材料加筋结构的胶接面应力。采用这种方法,在界面附近区域可以采用较小的单元网格,在等效区域可以采用较大的单元网格。这样,既减少了单元数量,保证了计算精度,同时又能够得出加筋结构胶接面应力。分析了胶膜界面上胶接面应力的分布状态,比较了T型加筋结构含胶膜和不含胶膜对胶接面应力、不同胶膜厚度对胶接面应力的影响变化。

1 层合板的等效

在建立有限元分析公式时,复合材料和金属材料相比,其最大的不同在于弹性矩阵不同。复合材料在偏轴坐标系中的弹性矩阵为:

$$D = TCT', \quad (1)$$

其中,

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix},$$

$$[T] = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & 0 & 2C & 0 & 0 \\ S^2 & C^2 & 0 & -2CS & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -CS & CS & 0 & C^2 - S^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C & -S \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S & C \end{bmatrix}.$$

C_{ij} 可以按照单层材料的材料常数进行计算。 $S = \sin\theta$, $C = \cos\theta$, θ 为材料坐标系和局部坐标系 X 轴的夹角。这是按照单个铺层计算刚度矩阵的方法。当一个单元内含有多个铺层时,

$$[\bar{D}] = \left(\sum_{j=1}^{j_m} D_j t_j \right) / h, \quad (2)$$

式中, n 为单元的铺层数目, D_j 由公式(1)计算得出, t_j

为第 j 铺层的厚度, $h = \sum t_j$ 。柔度矩阵为:

$$[\bar{S}] = [\bar{D}]^{-1}, \quad (3)$$

则等效模量可以通过下式计算得到:

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_x &= \frac{1}{\bar{S}_{11}}, \bar{E}_y = \frac{1}{\bar{S}_{22}}, \bar{E}_z = \frac{1}{\bar{S}_{33}} \\ \bar{\mu}_{yz} &= \frac{\bar{S}_{23}}{\bar{S}_{22}}, \bar{\mu}_{xz} = \frac{\bar{S}_{31}}{\bar{S}_{11}}, \bar{\mu}_{xy} = \frac{\bar{S}_{21}}{\bar{S}_{11}} \\ \bar{G}_{yz} &= \frac{1}{\bar{S}_{44}}, \bar{G}_{xz} = \frac{1}{\bar{S}_{55}}, \bar{G}_{xy} = \frac{1}{\bar{S}_{66}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由此可以得出采用等效后均质正交各向异性体材料常数。

2 有限元模型

2.1 有限元建模

由于以蒙皮和筋条结合胶接面应力为研究对象,建立有限元模型的总体思路是在胶膜附近上下表面建立一定数量的单层铺层,在胶膜附近上下表面以外区域对层合板做等效处理,建立含胶膜材料加筋结构的三维模型。实际 T 型加筋结构,在缘条与腹板连接处有圆弧过渡,在蒙皮与缘条、腹板交接处有填充区,缘条一般采用梯形过渡的结构形式,为了避免加载和边界条件及其它因素对胶接面应力的影响,这里建立一个简化的 T 型加筋结构。其胶膜厚度为 0.1mm,截面结构参数如图 1 所示,长度为 $L=60\text{mm}$ 。研究在 0.5L 处蒙皮与缘条结合处胶膜下表面(以下简称为界面)上的胶接面应力分布状况。

为了便于有限元剖分和应用层合板等效材料性能,将 T 型加筋结构分成 10 个区域,其中区域 1 为腹板,区域 2、3、4、5 为缘条,6 为胶膜,区域 7、8、9、10 为蒙皮,如图 2 所示。除胶膜以外采用某复合材料,其

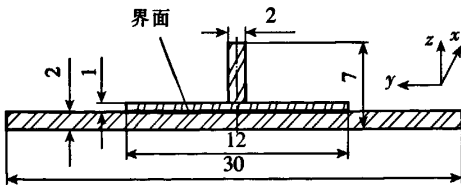


图 1 T 型加筋结构的截面尺寸

Fig.1 Section dimension of T-stiffened structure

相应的材料性能见表 1 所示。等效后复合材料加筋结构的材料常数见表 2 所示。为了研究胶膜上下表面上的不同铺层方式对胶接面应力的影响,这里采用 3 个分析模型,各模型之间的区别是在区域 3、4、5 上采用不同的铺层角度。T 型筋条一端蒙皮固定,一端蒙皮上作用均匀拉力 $p=1\text{MPa}$ 。这里通过对 Abaqus 有限元软件做二次开发,将材料常数等数据自动写入到 Abaqus 的输入文件中,实现复合材料加筋结构胶接面应力的有限元分析。

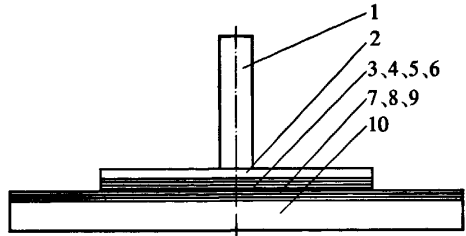


图 2 T 型加筋结构的分区

Fig.2 Different subareas of T-stiffened structure

2.2 胶接面应力影响

这里蒙皮和缘条结合处胶接面应力采用在 0.5L 处胶膜下表面上节点的非面内应力来表征。图 4~6 分别是模型 1~3 中胶接面应力 $\tau_{13}, \tau_{23}, \sigma_{33}$ 的变化情况;图 7~9 分别为胶接面应力 $\tau_{13}, \tau_{23}, \sigma_{33}$, 在胶膜上下表面有不同铺层方式(即模型 1~3)时的比较;图 10~12 分别为在模型 1 中含胶膜和不含胶膜加筋结构胶接面应力的比较,图中 x/w 表示正则化 0.5L 处界面上 X 轴向位置坐标。

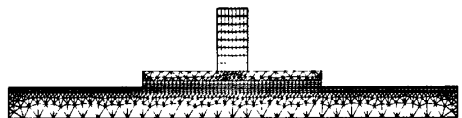


图 3 T 型加筋结构的单元网格

Fig.3 Element mesh of T-stiffened structure

表 1 某复合材料和胶膜材料的材料常数

某 复 合 材 料								胶 膜 材 料		
E_1/MPa	E_2/MPa	E_3/MPa	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}	G_1/MPa	G_2/MPa	G_3/MPa	E_f/MPa	ν_{1f}/MPa
135 000	8 800	8 800	0.33	0.48	0.15	4 470	3 200	4 470	2 450	0.38

表 2 T 型加筋结构的材料常数

区域编号	铺层方式			等效模量
	模型 1	模型 2	模型 3	
1	-45/-45/0/45/0/0/45/0/-45/-45/90/0/45]	同前	同前	$E_x=1.185E+004\text{MPa}, E_y=1.067E+004\text{MPa}, E_z=9.256E+003\text{MPa}, \nu_{xy}=2.694E-001, \nu_{xz}=3.369E-001, \nu_{yz}=3.978E-001, G_x=4.492E+003/\text{MPa}, G_y=3.994E+003/\text{MPa}, G_z=3.676E+003\text{MPa}$
2	-45/-45/0/45/0/0/45/0/-45/-45/90/0/45]	同前	同前	$E_x=1.103E+004\text{MPa}, E_y=1.103E+004\text{MPa}, E_z=8.800E+003\text{MPa}, \nu_{xy}=2.342E-001, \nu_{xz}=3.949E-001, \nu_{yz}=3.949E-001\text{MPa}, G_x=4.227E+003\text{MPa}, G_y=3.730E+003\text{MPa}, G_z=3.730E+003\text{MPa}$
3	[45]	[0]	[90]	不用转换
4	[0]	[45]	[45]	不用转换
5	[90]	[90]	[0]	不用转换
7	[45]	同前	同前	不用转换
8	[0]	同前	同前	不用转换
9	[90]	同前	同前	不用转换
10	-45/-45/0/45/0/0/45/0/-45/-45/90/0/45]	同前	同前	$E_x=1.185E+004\text{MPa}, E_y=1.067E+004\text{MPa}, E_z=9.256E+003\text{MPa}, \nu_{xy}=2.694E-001, \nu_{xz}=3.369E-001, \nu_{yz}=3.978E-001, G_x=4.492E+003\text{MPa}, G_y=3.994E+003\text{MPa}, G_z=3.676E+003\text{MPa}$

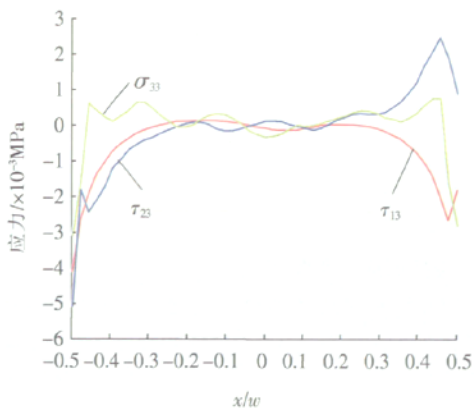


图 4 模型 1 中胶接面应力分布

Fig.4 Interlaminar stress distribution of model 1

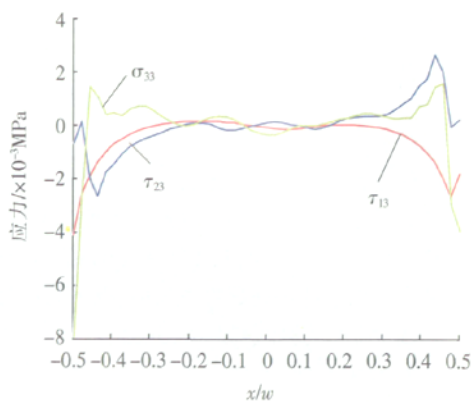


图 5 模型 2 中胶接面应力分布

Fig.5 Interlaminar stress distribution of model 2

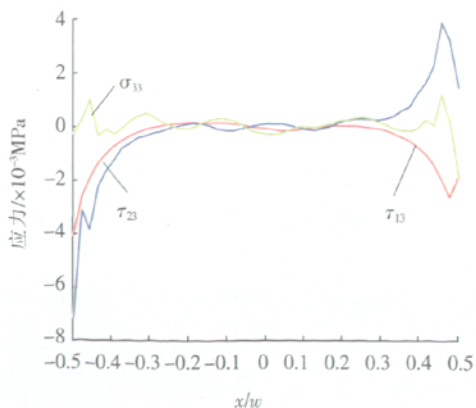


图 6 模型 3 中胶接面应力分布

Fig.6 Interlaminar stress distribution of model 3

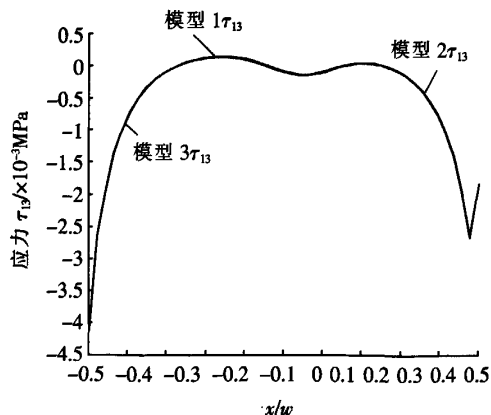


图 7 3 个模型中胶接面应力 τ_{13} 比较

Fig.7 Comparison of interlaminar stress τ_{13} among 3 models

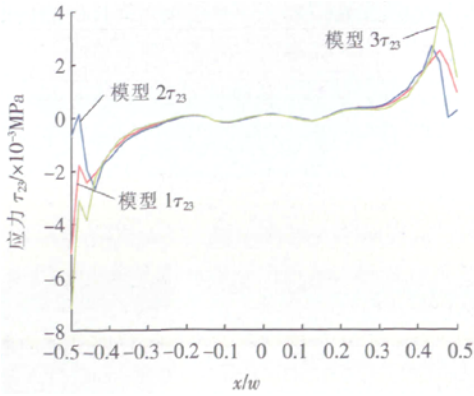


图 8 3个模型中胶接面应力 τ_{23} 比较
Fig.8 Comparison of interlaminar stress τ_{23} among 3 models

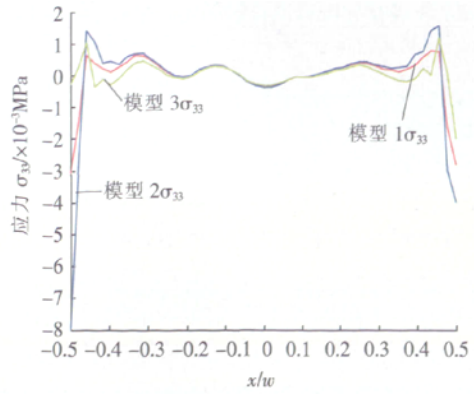


图 9 3个模型中胶接面应力 σ_{33} 比较
Fig.9 Comparison of interlaminar stress σ_{33} among 3 models

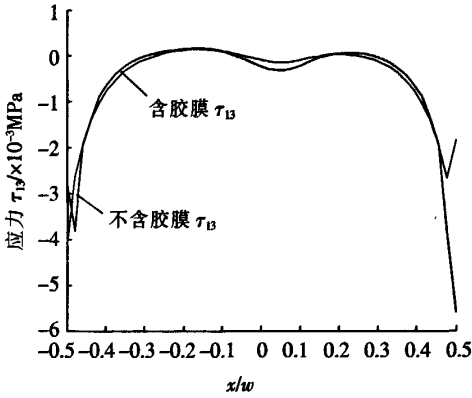


图 10 (含胶膜和不含胶膜)模型 1 τ_{13} 比较
Fig.10 Comparison of τ_{13} between model 1 with and without adhesive

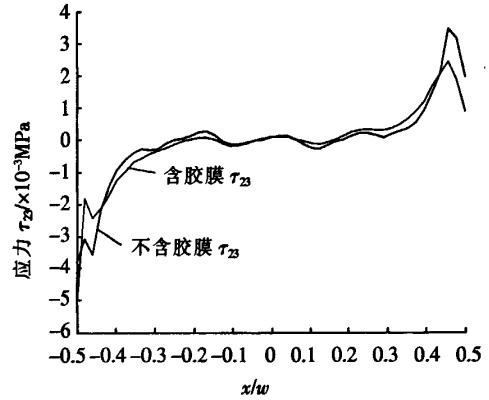


图 11 (含胶膜和不含胶膜)模型 1 τ_{23} 比较
Fig.11 Comparison of τ_{23} between model 1 with and without adhesive

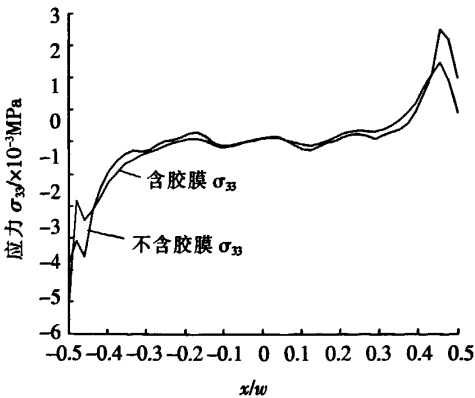


图 12 (含胶膜和不含胶膜)模型 1 σ_{33} 比较
Fig.12 Comparison of σ_{33} between model 1 with and without adhesive

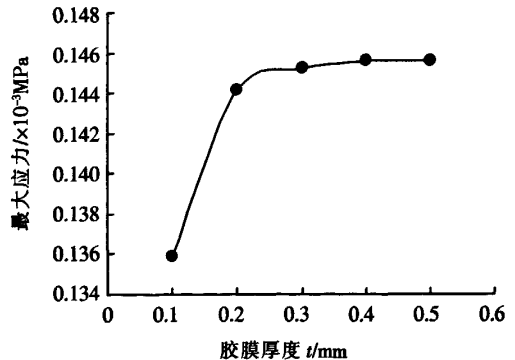


图 13 胶膜厚度和最大应力的影响
Fig.13 Influence of adhesive thickness on maximum stress

从图 4~6 可以看出,胶接面应力 $\tau_{13}, \tau_{23}, \sigma_{33}$, 都在 T 形桁条凸缘的处明显变大,产生应力集中,在远离 T 形桁条凸缘之处,在端部作用轴向拉力的作用下,胶接面应力变化不大,并且数值较小。胶接面应力在远离中间位置约 80% 位置处开始出现明显的应力集中,且大小都在同一个数量级上。可以推断,即使是在轴向拉力(面内载荷)的作用下,分层破坏将从自由边开始。

从图 7~9 看出,无论界面间采用什么样的铺层形式,对 τ_{13} 的影响都非常小。而界面间不同铺层形式对 τ_{23}, σ_{33} 的影响较为明显,这种影响仍然主要发生在 T 形桁条凸缘的处,在远离 T 形桁条凸缘的地方,界面间不同铺层形式对应力的影响同样非常小。当胶膜上下表面分别采用同样的铺层形式时,其应力集中系数比采用不同铺层形式时小。

从图 10~12 采用模型 1 含胶膜和不含胶膜胶接面应力的比较可以看出,总体来说,胶膜不能改变胶接面应力的分布状态,但能够有效地降低 T 形桁条凸缘处的胶接面应力大小,这对于抑制分层破坏有非常重要的作用。算例表明采用其他模型也能得到同样的结论。综合比较图 7~12 还可以发现,在既含胶膜、又在胶膜上下表面采用同样铺层形式的 T 型加筋结构中,胶接面应力将达到最小值。

这里以模型 3 为例,通过改变厚度参数来研究不同胶膜厚度对胶接面应力的影响。图 13 给出了这种影响的变化规律,图中横坐标为胶膜的厚度,纵坐标为界面上所有节点 Mises 应力的最大值。从图 13 可以看出,在胶层厚度超过 0.3mm 时,胶层截面上最大 Mises 应力改变不明显。

3 结论

(1) 采用在界面附近按照单层,在远离界面以外的区域等效方法建立复合材料加筋结构的三维有限元模型分析胶接面应力的方法是可行的。采用这种方法既能方便建模,节约计算时间,又能够揭示出胶接面应力的分布状态。

(2) 含胶膜加筋结构,自由边上的应力集中发生在远离界面中间位置长度大约 80% 以外的区域。

(3) 含胶膜加筋结构,在界面上下采用同样的铺层形式,有利于降低界面上自由边附近的应力集中。

(4) 胶膜不能改变胶接面应力的分布状态,但能够有效地降低 T 形桁条凸缘的处胶接面应力的大小。

在既含胶膜,又在胶膜上下表面采用同样的铺层形式的 T 型加筋结构,胶接面应力将达到最小值。

(5) 胶层厚度超过 0.3mm 时,胶层截面上最大应力改变不明显。

参 考 文 献

[1] Sela N. The effect of adhesive thickness interlaminar toughness of interleaved CFRP specimens. *Composites*. 1989, 20 (3): 88-93.
 [2] Odagiri N. T800/3900-2 toughened epoxy prepreg system: toughening concept and mechanisms. *Proceeding of the American Society for Composites 6th Technical Conference*. Lancaster, 1991.
 [3] Lin C C, Tseng C K. Adhesive interface element for bonding of laminated plates. *Composite Structures*, 1993 (25): 217-225.
 [4] 叶天麟,周天孝. 航空结构有限元分析指南,北京:航空工业出版社,1996.
 [5] 矫桂琼,杨宝宁,许家瑶. 层间加胶膜层压板的层间应力与孔边应力分析,2002,20(1):6-8.

(责编 洪盖)

—————
 (上接第 77 页)

[3] 吴泉源,刘江宁. 人工智能与专家系统. 长沙:国防科技大学出版社,1995.
 [4] Agnar Aamodt, Enric Plaza. Case Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches, <http://www.iiaa.csic.es>.
 [5] Maher M L, Andres Gomez de Silva. Case-based reasoning in design. *IEEE Expert*, 1997, 12(2): 34-41.
 [6] 周娜,沈建新,廖文和. 基于 Internet 的 CAD/CAPP/CAM/ERP 信息集成系统的研究. *机械科学与技术*, 2004, 23 (3): 365-369.
 [7] Sun Zhaohao, Finnie Gavin, Weber Klaus. Abductive case-based reasoning. *International Journal of Intelligent Systems*, September, 2005, 20(9): 957-983.
 [8] Cheng Y I. Case-based approaches for preliminary design of steel building frames. *Microcomputers in Civil Engineering*, 1997, 12(5): 327-337.
 [9] Dutta Soumitra, Wierenga Berend, Dalebout Arco. Case-based reasoning systems: From automation to decision-aiding and stimulation. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 1997, 9(6): 911-922.
 [10] Marling C R, Petot. G J, Sterling L S. Integrating case-based and rule-based reasoning to meet multiple design constraints. *Computational Intelligence*, 1999, 15(3): 308-332.

(责编 钟元)