

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.09.047

单向 GLARE 层板受轴向拉伸载荷的应力分析

赵占文*, 苏雁飞, 陈军

航空工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘要: 针对单向 GLARE 层板受轴向拉伸载荷问题, 采用经典层合板理论, 建立了 GLARE 层板的简化模型, 推导出该模型的应力解析表达式, 同时给出了屈服强度的解析表达式和简化表达式。对比发现, 简化表达式可以达到相当高的精度, 能够满足工程设计要求。

关键词: GLARE 层板; 屈服强度; 应力分析

中图分类号: V235.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2017) 09-0047-04

GLARE 层板是由高强铝合金薄板与经热固性或热塑性胶粘剂浸透的高强度玻璃纤维层交叠铺层, 在一定温度和压力下层压形成的一种新型混杂复合材料。它将金属与复合材料的优异性能结合起来, 不仅腐蚀及疲劳性能更好, 破坏强度更高, 而且同等体积的重量也比铝合金轻 25%^[1]。GLARE 层板克服了芳纶增强复合材料层板对缺口断裂敏感、抗拉—压疲劳性能不理想等缺点, 因而得到重视和广泛应用。目前, 超大型客机 A380 的机身蒙皮就采用 GLARE 层板制成, 每架飞机使用 GLARE 层板面积达 470m²^[2]。现在金属增强复合材料层板的研发已成为高性能低成本复合材料研究的重要课题^[3], 科研人员从力学性能、疲劳性能^[4]和冲击性能^[5]等多方面对其开展研究, 而受简单载荷的结构静强度分析是研究的基础。

1 单向 GLARE 层板的轴向拉伸

GLARE 层板结构如图 1 所示。GLARE 层板有各种不同参数的组合, 如铝合金种类、金属板厚度、铺层数量、纤维种类和方向、有无后拉伸等。本文 GLARE 层板模型中玻璃纤维方向为 0° 方向, 玻璃纤维和铝合金板交叠铺设, GLARE 层板承受 0° 方向的拉伸载荷。

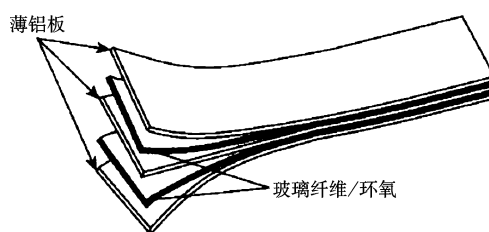


图 1 GLARE 层板
Fig.1 GLARE laminate

假设铝合金的弹性模量为 E , 弹性泊松比为 μ , 拉伸强度为 $\sigma_{0.2}$, 玻璃纤维单层板沿纤维方向的弹性模量为 E_{11} , 垂直于纤维方向的弹性模量为 E_{22} , 泊松比为 μ_1 , 面内切变模量为 G_{12} , 纤维方向拉伸极限为 X_t , 垂直于纤维方向的拉伸极限为 Y_t 。依据经典层合板理论, 对于玻璃纤维/环氧单层板, 其平面应力状态模量矩阵 Q_f 为:

$$Q_f = \begin{bmatrix} \frac{E_{11}}{1-\mu_1\cdot\mu_2} & \frac{\mu_1\cdot E_{11}}{1-\mu_1\cdot\mu_2} & 0 \\ \frac{\mu_2\cdot E_{11}}{1-\mu_1\cdot\mu_2} & \frac{E_{22}}{1-\mu_1\cdot\mu_2} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

收稿日期: 2017-04-01; 退修日期: 2017-05-25; 录用日期: 2017-07-17

* 通信作者. Tel.: 029-86832536 E-mail: zzwen6617198@126.com

引用格式: ZHAO Zhanwen, SU Yanfei, CHEN Jun. Stress analysis of GLARE laminates under axial tension[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (09): 47-50. 赵占文, 苏雁飞, 陈军. 单向 GLARE 层板受轴向拉伸载荷的应力分析[J]. 航空科学技术, 2017, 28 (09): 47-50.

其中: $\mu_2 = \frac{\mu_1 E_{22}}{E_{11}}$ 。

对于铝合金单层板,其平面应力状态模量矩阵 $\mathbf{Q}_{Al}$ 为:

$$\mathbf{Q}_{Al} = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\mu^2} & \frac{\mu E}{1-\mu^2} & 0 \\ \frac{\mu E}{1-\mu^2} & \frac{E}{1-\mu^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\mu)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

假设玻璃纤维共铺设 n 层,单层厚度为 t_1 ,铝合金板共铺设 m 层,单层厚度为 t_2 ,则 GLARE 层板的面内刚度矩阵 $\mathbf{A}$ 为:

$$\mathbf{A} = \mathbf{Q}_f \cdot n \cdot t_1 + \mathbf{Q}_{Al} \cdot m \cdot t_2 = \begin{bmatrix} \frac{nt_1 E_{11}}{1-\mu_1 \mu_2} + \frac{mt_2 E}{1-\mu^2} & \frac{nt_1 \mu_1 E_{22}}{1-\mu_1 \mu_2} + \frac{mt_2 \mu E}{1-\mu^2} & 0 \\ \frac{nt_1 \mu_1 E_{22}}{1-\mu_1 \mu_2} + \frac{mt_2 \mu E}{1-\mu^2} & \frac{nt_1 E_{22}}{1-\mu_1 \mu_2} + \frac{mt_2 E}{1-\mu^2} & 0 \\ 0 & 0 & nt_1 G_{12} + \frac{mt_2 E}{2(1+\mu)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \quad (3)$$

又层板所受外载为: $\mathbf{N} = [N_x \ 0 \ 0]^T$

得层板应变为:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{N} = \frac{1}{|\mathbf{A}|} \begin{bmatrix} A_{22} A_{66} & -A_{12} A_{66} & 0 \\ -A_{12} A_{66} & A_{11} A_{66} & 0 \\ 0 & 0 & A_{11} A_{22} - A_{12}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A_{22} A_{66}}{|\mathbf{A}|} N_x \\ -\frac{A_{12} A_{66}}{|\mathbf{A}|} N_x \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

则玻璃纤维的应力为:

$$\boldsymbol{\sigma}_f = \mathbf{Q}_f \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{A_{66}}{|\mathbf{A}|} \begin{bmatrix} Q_{11}^f A_{22} - Q_{12}^f A_{12} \\ Q_{21}^f A_{22} - Q_{22}^f A_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot N_x \quad (5)$$

玻璃纤维的应力分量分别为:

$$\sigma_{f1} = \frac{1}{1-\mu_1 \mu_2} \left[nt_1 \frac{E_{22}}{1-\mu_1 \mu_2} (E_{11} - \mu_1^2 E_{22}) + \frac{mt_2 E}{1-\mu^2} (E_{11} - \mu_1 \mu E_{22}) \right] \cdot N_x \quad (6)$$

$$\sigma_{f2} = \frac{1}{1-\mu_1 \mu_2} \left[\frac{mt_2 E}{1-\mu^2} (\mu_2 E_{11} - \mu E_{22}) \right] \cdot N_x \quad (7)$$

$$\sigma_{f3} = 0 \quad (8)$$

铝合金板的应力为:

$$\boldsymbol{\sigma}_{Al} = \mathbf{Q}_{Al} \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{A_{66}}{|\mathbf{A}|} \begin{bmatrix} Q_{11}^{Al} A_{22} - Q_{12}^{Al} A_{12} \\ Q_{21}^{Al} A_{22} - Q_{22}^{Al} A_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot N_x \quad (9)$$

铝合金板的应力分量为:

$$\sigma_{Al1} = \frac{E}{1-\mu^2} \left[nt_1 \frac{E_{22}}{1-\mu_1 \mu_2} (1-\mu \mu_1) + \frac{mt_2 E}{1-\mu^2} (1-\mu^2) \right] \cdot N_x \quad (10)$$

$$\sigma_{Al2} = \frac{E}{1-\mu^2} \left[nt_1 \frac{E_{22}}{1-\mu_1 \mu_2} (\mu - \mu_1) \right] \cdot N_x \quad (11)$$

$$\sigma_{Al3} = 0 \quad (12)$$

2 模型简化

由以上的计算可以发现,单向 GLARE 层板受轴向拉伸载荷的应力表达式是比较复杂的,尤其在初步设计阶段,将给设计师对 GLARE 层板的承载能力估算带来困难,有必要对其进行简化,以方便使用。

由于玻璃纤维/环氧单层板 μ_1 的取值在 0.3 左右,和铝合金 μ 的取值相当,假设 $\mu_1 = \mu$,则单向 GLARE 层板受轴向拉伸载荷的应力表达式将简化为:

$$\boldsymbol{\sigma}_f = \begin{bmatrix} \frac{E_{11}}{nt_1 E_{11} + mt_2 E} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot N_x \quad (13)$$

$$\sigma_{Al} = \begin{bmatrix} \frac{E}{nt_1 E_{11} + mt_2 E} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot N_x \quad (14)$$

分别对比式 (6)、式 (7) 和式 (13), 式 (10)、式 (11) 和式 (14), 不难发现, 玻璃纤维 / 环氧层板和铝合金层板横向的应力是由于两者的泊松比不匹配引起的。由此, 单向 GLARE 层板受轴向拉伸载荷的计算模型可简化为玻璃纤维 / 环氧层板和铝合金层板的并联模型, 如图 2 所示。

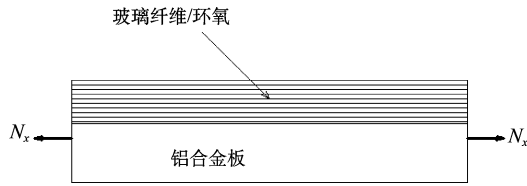


图 2 单向 GLARE 层板简化模型

Fig.2 The simple model of unidirectional GLARE laminate

由图 2 可得,

$$\begin{cases} N_x = \sigma_{Al1} \cdot m \cdot t_2 + \sigma_{f1} \cdot n \cdot t_1 \\ = E \varepsilon_1 m t_2 + E_{11} \varepsilon_1 n t_1 \\ \varepsilon_1 = \frac{N_x}{E m t_2 + E_{11} n t_1} \end{cases} \quad (15)$$

忽略层板横向的应力, 得简化模型计算的应力表达式同式 (13) 和式 (14) 一样。

3 μ_1 对层板应力的影响

虽然 $\mu_1 = \mu$ 后层板的应力表达式和计算模型都将大大简化, 但是有必要分析 μ_1 不同取值时对层板应力的影响。

假设某一典型 GLARE 层板模型承受轴向单位拉伸载荷, 它由三层铝合金和两层玻璃纤维增强层 (FRP) 交替组成, 玻璃纤维为 0° 铺设, 玻璃纤维的单层厚度为 0.2mm, 铝合金的单层厚度为 0.3mm, 铝合金 $E=70\text{GPa}$, $\mu=0.3$, 纤维增强复合材料 $E_{11}=54\text{GPa}$, $E_{22}=9.4\text{GPa}$, $G_{12}=5.5\text{GPa}$ ^[4]。设 μ_1 的取值范围为 0.1~0.5。对于不同的 μ_1 取值, 得层板应力的解析解和简化模型的计算值见表 1。

表 1 精确解和简化解对比

Table 1 The comparison of exact and simplified solution

μ_1	玻璃纤维					铝合金				
	σ_{f1}			σ_{f2}		σ_{Al1}			σ_{Al2}	
	精确	简化	误差 %	精确	简化	精确	简化	误差 %	精确	简化
0.10	0.635	0.638	0.504	-0.021	0	0.829	0.827	-0.169	0.009	0
0.15	0.635	0.638	0.472	-0.016	0	0.829	0.827	-0.157	0.007	0
0.20	0.636	0.638	0.377	-0.011	0	0.829	0.827	-0.133	0.005	0
0.25	0.637	0.638	0.220	-0.005	0	0.828	0.827	-0.072	0.002	0
0.30	0.638	0.638	0	0	0	0.827	0.827	0	0	0
0.35	0.640	0.638	-0.281	0.005	0	0.827	0.827	0.097	-0.002	0
0.40	0.642	0.638	-0.623	0.011	0	0.826	0.827	0.218	-0.005	0
0.45	0.645	0.638	-1.039	0.016	0	0.824	0.827	0.364	-0.007	0
0.50	0.648	0.638	-1.527	0.022	0	0.823	0.827	0.535	-0.010	0

由表 1 可以看出, μ_1 在 0.1~0.5 范围内变化时, 玻璃纤维和铝合金 σ_1 的精确解和简化解的误差都非常小。 σ_2 与 σ_1 相比, 始终是一个小量, 在工程许可的范围内完全可以舍去。同时还可以发现, 随着 μ_1 的增加, σ_{f1} 不断变大, σ_{Al1} 不断变小。由此可以得出结论: μ_1 的变化对 GLARE 层板的应力影响微乎其微, 简化模型可以达到相当高的精度, 能够满足工程计算要求。

4 屈服强度计算

对于玻璃纤维铺层, 可用 Hill- 蔡强度理论表达式计算其屈服载荷:

$$\frac{\sigma_1^2}{X_t^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X_t^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t^2} = 1 \quad (16)$$

对于铝合金板, 可用 Mises 强度准则计算其屈服载荷:

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_{0.2} \quad (17)$$

利用受轴向拉伸载荷的单向 GLARE 层板简化模型, 可以得出玻璃纤维铺层的屈服载荷为:

$$N_{sf} = \frac{X_t}{E_{11}} (nt_1 E_{11} + mt_2 E) \quad (18)$$

铝合金板的屈服载荷为:

$$N_{sAl} = \frac{\sigma_{0.2}}{E} (nt_1 E_{11} + mt_2 E) \quad (19)$$

一般情况下, $\frac{X_f}{E_{11}} > \frac{\sigma_{0.2}}{E}$, 所以单向 GLARE 层板受轴向

拉伸载荷的屈服载荷为:

$$N_x = \frac{\sigma_{0.2}}{E} (nt_1 E_{11} + mt_2 E) \quad (20)$$

单向 GLARE 层板受轴向拉伸载荷的屈服强度为:

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \frac{N_x}{nt_1 + mt_2} = \\ &= \frac{\sigma_{0.2}}{E} \left(\frac{nt_1 E_{11} + mt_2 E}{nt_1 + mt_2} \right) = \\ &= \sigma_{0.2} \left(V_f \frac{E_{11}}{E} + 1 - V_f \right) = \\ &= \sigma_{0.2} + V_f \sigma_{0.2} \left(\frac{E_{11}}{E} - 1 \right) \end{aligned} \quad (21)$$

式中: V_f 为玻璃纤维 / 环氧的体积百分数, $V_f = \frac{nt_1}{nt_1 + mt_2}$ 。

由式 (21) 可以看出, 一般情况下, 由于玻璃纤维 / 环氧单层板纤维方向的弹性模量 E_{11} 比铝合金板的弹性模量 E 小, 所以 GLARE 层板的屈服强度略小于铝合金的屈服强度。如果纤维增强材料的弹性模量 E_{11} 大于铝合金的弹性模量 E , 则纤维增强金属层板的屈服强度将大于铝合金的屈服强度。

5 结论

通过分析, 可以得出如下结论:

(1) 推导出单向 GLARE 层板受轴向拉伸载荷的应力解析表达式。

(2) 单向 GLARE 层板受轴向拉伸载荷的简化模型和应力表达式简单、精确度高, 可满足工程需要。

(3) 推导出单向 GLARE 层板受轴向拉伸载荷的屈服强度表达式。

本文的分析虽具有一定的特殊性, 对工程中常见的一些超混杂复合材料层合板分析具有一定的适用性。

AST

参考文献

- [1] Krishnakumar S. Fibre metal laminates: the synthesis of metal and composite[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2007, 9 (2): 295-354.
- [2] 廖建, 曹增强, 代瑛, 等. GLARE 层板偏轴拉伸性能 [J]. 塑性工程学报, 2007, 14 (5): 67-70.
LIAO Jian, CAO Zengqiang, DAI Ying, et al. The off-axis properties of GLARE plates[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14 (5): 67-70. (in Chinese)
- [3] 梁中全, 薛元德, 陈绍杰, 等. GLARE 层板的力学性能及其在 A380 客机上的应用 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2005 (4): 49-50.
LIANG Zhongquan, XUE Yuande, CHEN Shaojie, et al. Performance and application of GLARE laminates in A380 airliner[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2005 (4): 49-50. (in Chinese)
- [4] Huang Y, Liu J Z, Huang X. Development of fatigue crack growth behaviors and prediction methods for fiber metal laminates[J]. Journal of Aerospace Science and Technology, 2015, 3 (1): 1-12.
- [5] Taheri-Behrooz F, Shokrieh M M, Yahyapour I. Effect of stacking sequence on failure mode of fiber metal laminates under low-velocity impact[J]. Iranian Polymer Journal, 2014, 23 (2): 147-152.

(责任编辑 马昊圻)

作者简介

赵占文 (1982—) 男, 高级工程师。主要研究方向: 机翼翼强度设计。

Tel: 029-86832536

E-mail: zzwen6617198@126.com

Stress Analysis of GLARE Laminates under Axial Tension

ZHAO Zhanwen*, SU Yanfei, CHEN Jun

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: A model to solve the unidirectional GLARE laminate under axial tension load was introduced and the theoretical formula and simplified formula to calculate the yield strength were deduced based on the classical laminate theory. It is found that the simplified formula can obtain the precise results which satisfy the engineering requirement.

Key Words: GLARE laminate; yield strength; stress analysis

Received: 2017-04-01; Revised: 2017-05-25; Accepted: 2017-07-17

*Corresponding author. Tel.: 029-86832536 E-mail: zzwen6617198@126.com