

复合材料加筋板多失效模式可靠性分析

李蓝天,赵恂

(国防科技大学 航天科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:复合材料加筋板在轴向压缩的屈曲过程中,存在多种失效模式,对整体的可靠度有不同影响.本研究利用 ABAQUS 软件,建立由 shell-solid 单元组合的复合材料加筋板渐进失效模型,并基于 Quads 和 Hanish 失效判据,用 Cohesive 单元来模拟胶层,通过对模型轴向加位移的弯曲情况,确定刚心位置后,进行轴向加载仿真实验.通过有限元模拟方法,用均次一值二矩法计算可靠度,分析屈曲失效过程,影响可靠度的主要因素为静力.通过灵敏度分析,归一化计算,得到材料不同弹性模量对复合材料加筋板模型的基体失效、纤维失效、界面层失效和静力失效的贡献率.由失效判断指标可知,纤维失效是造成复合材料加筋板结构整体失效的主要因素,由灵敏度分析结果可知是影响基体失效、纤维失效、界面层失效的主要因素.

关键词:复合材料;加筋板;多失效模式;可靠性分析;敏度分析

中图分类号:TK513.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2017)02-0052-06

Reliability Analysis of stiffened composite plates with multiple failure modes

Li Lantian, Zhao Xun

(Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, ChangSha 410073, China)

Abstract: Composite stiffened plates under axial compression of a tortuous process, have many failure modes, and there are different impact on its entire reliability. By using Abaqus software to establish stiffened composite plates progressive failure model, the shell-solid elements to simulate the stiffened plates and beams, solid elements to simulate the layer, and cohesive unit to simulate the situation debonding layer. Through finite element simulation method using application of MFOSM to calculate reliability analysis under tortuous process, main factors influencing the reliability is static force. Through the sensitivity analysis, the normalized calculation, the rate of contribution was gotten, with different elastic moduli of composite material model, that of substrate failure, fiber failure, interface layer failure and static of failure rate of contribution. The failure judgment index showed that fiber failure are the main factors causing failure of stiffened composite plates structure. The sensitivity analysis results show that the substrate failure, fibers failure, interface Layer failure, are the main factors.

Keywords: composite materials; stiffened plates; multiple failure mode; reliability analysis; sensitive analyze

复合材料加筋板近年来较为热门,具有制造简单,价格低,强度高的特点,工程中大量应用.同时国内大型项目的开展,如 C919,运 20,国产航母等,对于结构承载和性能要求的直线上升.20 世纪 60 年代,Chang 等^[1-2]为了研究复合材料层合板的后屈曲强度特性,采用渐进损伤模型来仿真模拟,通过结构材料内部场的状态变量来为了描述层合板累计损伤.Stevens 等^[3]用试验分析了工字型筋条复合材料加筋壁板

轴向加载破坏过程,他们用有限元方法计算所得极限强度值较为准确.Kong 等^[4]用实验方法研究了倒 T 型、工字型及帽型复合材料加筋壁板极限承载能力.同时将非线性与最大应力准则采用有限元方法分析中,对加筋壁板轴向压载试验进行了仿真分析,但对后屈曲之前界面层脱粘情况的模拟有所欠缺.Dudgale 和 Barenblatt 综合考虑强度准则和断裂力学方法提出了基于 Cohesive Zone 理论的界面单元法,可用于模拟界面处脱胶的产生和扩展过程;Liu 等^[5]利用界面单元法分析了混合模态下复合材料层合板分层情况.本文根据复合材料加筋板的力学特性,并结合有限元理论和已有研究成果,建立了使用界面单元的加筋壁板有限元模型.使用 Quads 准则判断界面单元的脱粘情况,使用 Hashin 准则判断加筋板的失效情况.为了研究加筋板的多种失效情况,本文使用了基于 ABAQUS 的有限元方法,将计算结果与实验结果进行对比,显示本文方法具有较好计算精度.

1 计算理论

由于复合材料设计的复杂性和复合材料的多样性,全部依靠实验来确定不同受力情况下复合材料层合板强度并不现实,因此学者们建立了多种复合材料强度失效准则.其中应用较多的失效准则主要有:最大应力失效准则、最大应变失效准则、霍夫曼(Hoffman)^[6]失效准则、蔡一希尔(Tsar Hill)^[7]失效准则、蔡一吴(Tsar Wu)^[7]失效准则、Hashin^[8]失效准则等.

复合材料加筋板结构在加载过程中会有多种的破坏失效形式,本文复合材料加筋板是在不考虑结构初始缺陷情况下,研究复合材料加筋板在轴向压缩载荷作用下的多种失效^[9],分析主要的 3 种失效情况,基体断裂、纤维断裂和脱粘,失效判断公式如下.

Quads 失效准则公式:

$$F_c = \left[\frac{[\sigma_{33}]}{X_t} \right]^2 + \left[\frac{\tau_{13}}{S} \right]^2 + \left[\frac{\tau_{23}}{S} \right]^2 \geq 1. \quad (1)$$

式中: X_t, S 分别为界面拉伸、剪切强度; $\sigma_{33}, \tau_{13}, \tau_{23}$ 为有效应力使界面脱粘 σ 的分量.由于法向的压应力不会使界面脱粘.所以在计算时引入下列运算符:

$$\langle \sigma_{33} \rangle = \begin{cases} 0, & \sigma_{33} \leq 0; \\ \sigma_{33}, & \sigma_{33} \geq 0. \end{cases} \quad (2)$$

Hashin 失效准则公式:

纤维拉伸断裂 ($\sigma_{11} \geq 0$):

$$F_f^t = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2. \quad (3)$$

纤维压缩破坏 ($\sigma_{11} < 0$):

$$F_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2. \quad (4)$$

基体拉伸断裂 ($\sigma_{22} \geq 0$):

$$F_m^t = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2. \quad (5)$$

基体压溃 ($\sigma_{22} \leq 0$):

$$F_m^c = \left(\frac{\sigma}{2S_{23}} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_{23}} \right)^2 - 1 \right] \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_c} \right) + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2. \quad (6)$$

式中: X_t 轴向拉伸强度; X_c 轴向压缩强度; Y_T 横向拉伸强度; Y_c 横向压缩强度; S_{12} 横向剪切强度和 S_{23} 轴向剪切强度. $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \tau_{12}$ 为有效应力 σ 的分量. S_{12} 分别为横向剪切强度与纵向剪切强度. F_f^t, F_f^c, F_m^t 及 F_m^c 分别为单向带失效准则表达式的值,当该值大于 1 时^[10],认为复合材料在对应方向上出现损伤.

2 复合材料加筋板有限元仿真模拟

考虑到计算效率问题,并未建立体单元加筋板模型,使用 Abaqus 建立模型引入 Cohesive 单元的分析

模型.采用工字型筋条加筋壁板模型^[11],研究复合材料加筋壁板的渐进破坏过程^[12],该模型均有具体的试验数据结果,便于验证所建模型的合理性.

2.1 模型的尺寸

如图1所示为加筋板结构图.其具体几何参数为:长:865 mm;宽:610 mm;筋条间距:17.8 mm;单层板厚度:0.125 mm;胶层厚度:0.02 mm.复合材料加筋壁板模型由4条工字型加强筋和一块蒙皮组成,铺层顺序如表1所示.

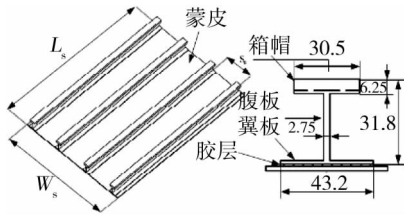


图1 复合材料加筋板结构

表1 材料铺层

组成成分	材料铺层方向
加强筋的帽	[45/-45/0 ₂ /90/0/90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂]s
腹板	[45/-45/0/45/-45/0 ₂ /45/-45/0 ₂]s
翼板	[45/-45/0/45/-45/0 ₂ /45/-45/0 ₂]s
蒙皮	[45/-45/0 ₂ /-45/45/90 ₂]s

2.2 材料基本参数

材料为 T300/914C,胶层性能与胶 BSL332 相同.加筋板和界面材料的基本性能如表2和表3.

表2 加筋板单层板材料性能

单层板性能/GPa						基本强度/MPa					
E_1	E_2	μ_{12}	G_{12}	G_{13}	G_{23}	X_T	X_C	Y_T	Y_C	S_{12}	S_{23}
127.5	9	0.31	4.85	4.85	3.62	1 993	1 051	51	141	61	61

表3 加筋板界面材料性能

界面材料性能/GPa		基本强度/MPa	
E	μ	X_T	S
4.85	0.3	51	61

3 加筋板屈曲分析

轴向加载之前,通过不断垂直水平面移动加载基准点,施加 10 mm 位移,多次微调加力基准点,进行线性运算,当板基本不弯曲时视作找到刚心位置.在轴向刚心水平面上加载,由于模型的位移将与受力呈线性关系,求解方式可以采用线性计算的模式.屈曲载荷为 115.67 kN,相比文献实验数据 114 kN,误差为 1.456%,离实验结果^[13]较近.

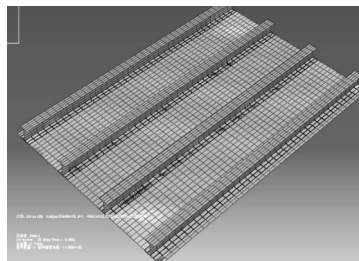


图2 复合材料加筋板屈曲下的应力云图

4 静力失效分析

静力作用下的失效指标提取.模拟屈曲前加载模型内部的失效情况,选用 95.2 kN 加载.此时应力分布状态如下,应力分布均匀,少数几个部位开始出现应力集中.将蒙皮和界面层分别设定为显示体,从查询处选择结点数据查询各项应力指标,绘制成文本形式输出,找出 95.2 kN 下对应最大的 S, mise 的点,查出其他应力指标.此时模型内结点受最大应力情况为:s11 为-63.73;s22 为-3.17;s12 为-3.94;s33 为-0.12;

s13 为 0.95; s23 为 -0.84(排除应力数值异常点,保留 2 位有效数字)。

只模拟轴压情况,故只分析压缩载荷下的指标 $F_c, F_f^c, F_m^c, P_{cr}$ 和 P , 提取 $P=95.2$ kN 时得各项应力指标分别为 $F_c:0.002\ 704\ 435; F_f^c:0.006\ 365\ 599; F_m^c:0.040\ 583\ 14$ 。

5 可靠度与灵敏度分析计算

5.1 可靠度计算

带入各项基本参数的均值来进行计算,涉及公式中的偏微分部分采用近似方法,需要对应的变化参量的比值来求偏微分,其中 E_1, E_2, G_{12}, P 4 个参量的变化值由下面公式确定,表 4 给出基本概率特性。

$$\sigma_{x_i} = C_i * \mu_{x_i}, x_i = E_1, E_2, G_{12}, P. \tag{7}$$

表 4 基本变量概率特性

基本变量	工型梁加筋板	变异系数 (C_i)	分布类型
P /kN	95.2	0.2	Normal
E_1 /GPa	127.5	0.1	Lognormal
E_2 /GPa	9.0	0.1	Lognormal
G_{12} /GPa	4.9	0.1	Lognormal

变化系数均为 0.01,故可计算 $\Delta E_1 = 12\ 750, \Delta E_2 = 9\ 000, \Delta G_{12} = 490, \Delta P \approx 0.2$ 。

$$M_1(x) = 1 - F_c, M_2(x) = 1 - F_f^c, M_3(x) = 1 - F_m^c, M_4(x) = P_{cr} - P. \tag{8}$$

$$\sigma_m^2 = \sum_i^n \left[\left(\frac{\partial M}{\partial x_i} \right) \mu_{\sigma_{x_i}} \right]^2. \tag{9}$$

求偏微分的方式可以采用如下近似的方法

$$\frac{\partial M_i}{\partial x_i} = - \frac{\partial F_c}{\partial x_i} = - \left[\frac{F_c(x_i + \Delta x_i) - F_c(x_i)}{\Delta x_i} \right], \frac{\partial M_4}{\partial x_i} = \frac{\partial P_{cr}}{\partial x_i}, \Delta x_i = 0.01 \sigma_{x_i}. \tag{10}$$

根据式(9)和式(10)可以求得可靠度公式为

$$\beta = \frac{\mu_m(x_i)}{\sigma_m(x_i)}. \tag{11}$$

根据上单元提取应力的方法,得到不同变参数下的各项应力指标如表 5 所示。

表 5 基本变量对应的各项应力指标

	s11	s22	s12	s33	s13	s23
$P=95.2$ kN	-63.73	-3.17	-3.94	-0.12	0.95	-0.84
$E_1 = 127\ 627.5$ GPa	-63.79	-3.17	-3.94	-0.11	0.95	-0.84
$E_2 = 9\ 009$ GPa	-63.73	-3.17	-3.94	-0.12	0.95	-0.84
$G_{12} = 490.49$ GPa	-63.73	-3.17	-3.95	-0.12	0.95	-0.84
$P = 95.4$ kN	-63.85	-3.18	-3.95	-0.12	0.95	-0.84

注:上表为保留 2 位小数后结果。

根据这些应力指标同理可得如下不同变参数下对应的失效指标如表 6。当各失效指标得出来之后,根据式 7 和式 9 来计算偏微分,得到表 7。然后由上表值,根据式 8 和式 10 和表 7 计算可得表 8 的可靠度指标。

表 6 实验变化参数对应的失效指标和屈曲载荷

	$P = 95.2$	$\Delta E_1 = 12\ 750$	$\Delta E_2 = 9$	$\Delta G_{12} = 0.49$	$\Delta P \approx 0.2$
F_c	2.70e-3	2.71e-3	2.72e-3	2.70e-3	2.71e-3
F_f^c	6.37e-3	6.37e-3	6.37e-3	6.37e-3	6.39e-3
F_m^c	4.06e-2	4.06e-2	4.06e-2	4.06e-2	4.07e-2
P_{cr}	115.67	115.85	115.77	115.77	115.67

表7 各基本量一阶偏导值

	E_1	E_2	G_{12}	P
$\frac{\partial M_1(x)}{\partial x_i}$	-3.27e-08	-2.83e-06	1.39e-07	-5.36e-5
$\frac{\partial M_2(x)}{\partial x_i}$	-3.53e-08	-2.73e-08	-1.65e-06	-1.34e-4
$\frac{\partial M_3(x)}{\partial x_i}$	1.45e-08	-3.89e-06	-2.40e-06	-5.04e-4
$\frac{\partial M_4(x)}{\partial x_i}$	1.41e-3	1.11e-2	2.01e-2	-1

注:上表数据为保留2位小数后的结果, $\frac{\partial M_1(x)}{\partial x_i}$, $\frac{\partial M_2(x)}{\partial x_i}$, $\frac{\partial M_3(x)}{\partial x_i}$ 和 $\frac{\partial M_4(x)}{\partial x_i}$ 表示 $M_i(x)$ 对应不同基本变量的偏导。

经过不同变参数对应失效指标与表7中的偏微分组合计算,得到不同失效模式的可靠度指标 $\beta_1 = 47.75$, $\beta_2 = 365.63$, $\beta_3 = 933.02$, $\beta_4 = 1.07$. 可以看到 E_1, E_2, G_{12}, P 这些指标对应的结构可靠度中, E_1, E_2, G_{12} 的可靠度指标相当稳定,结构强度很高,主要影响的指标为 P 载荷,说明在受力情况 95.2 kN 的情况下,对失效影响最大的参数加载的力,其次为 E_2 .

$$P_r = \varphi(\beta) = \int_{-\infty}^{\frac{\mu_m}{\sigma_m}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \tag{12}$$

$\beta = 1.07$, 查附录标准正态分布表有可靠概率为 $P_r = 0.8577$, 说明结构有 85.77% 是可靠的。

5.2 灵敏度计算

灵敏度计算公式如下:

$$\alpha_i = \frac{-\frac{\partial M(x)}{\partial x_i} |_{\mu} \sigma_{x_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial M(x)}{\partial x_i} |_{\mu} \sigma_{x_i}\right)^2}}. \tag{13}$$

式中: $\sigma_{x_i} = C_i \mu_{x_i}$.

由表8数据可知,灵敏度因子越大,说明该项指标对指定参数越重要,对结构可靠性起主要作用.其中 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 所对应分别是以 E_1, E_2, G_{12}, P 为变化量的灵敏度对失效类型的影响.参数 $M_1(x), M_2(x), M_3(x), M_4(x)$ 分别对应界面失效、基体失效、纤维失效,静力失效,每一行对应的 α_i 表示 i 参量对失效的影响程度.由上表分析来看,对界面层可靠性起主要作用的是 E_2 参数,对纤维失效其主要作用的是 P 参数,对基体失效起主要作用的是 E_2 参数,对 P 载荷失效起主要作用的是 E_2 .

将不同变化的基本量对应的灵敏度因子进行归一化计算,敏度因子对所在失效模式的影响贡献如图3所示.4种失效模式中,纤维失效对载荷很敏感,可说明纤维是主要承力结构.同时 E_2 影响结构的强度,材料的铺层方向和整体加筋条方向对材料性能也有很大影响.

表8 对各项失效模式影响的基本变量的敏度

	α_1	α_2	α_3	α_4
$M_1(x)$	0.176 455 14	8.811 177 15	-0.029 251 9	0.446 043 292
$M_2(x)$	0.165 807 472	0.090 520 704	0.296 657 70	0.940 436 339
$M_3(x)$	-0.017 991 291	3.400 841 604	0.114 463 55	0.933 228 951
$M_4(x)$	-0.604 543 999	-3.358 576 73	-0.335 857 7	0.639 473 074

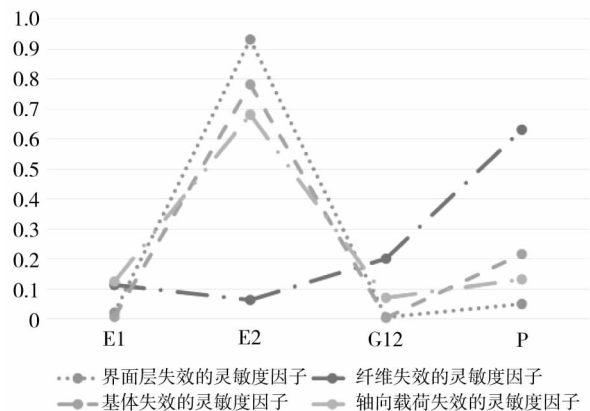


图3 各基本变量对不同失效模式的贡献率

6 结论

- 1) 纤维失效模式受载荷变化影响较大,说明纤维在结构中是主要承力部分.
- 2) 由归一化失效贡献曲线图可知,载荷和轴向强度模量是影响结构可靠性的关键性指标,对界面层失效,纤维失效,基体失效影响较大,符合实际情况.
- 3) 在材料设计中应当重点考虑纤维的改良,调整铺层方向增加受力方向弹性模量.
- 4) 复合材料层合板还存在铺层开裂的失效情况,本文模型没有进行分析,通过实验模拟铺层之间的接触关系,便于得到较好的分析结果.

参考文献:

- [1] Chang F K, Scott R A, Springer G S. Failure strength of nonlinearly elastic composite laminates containing a pin loaded hole[J]. *Journal of Composite Materials*, 1984, 18(5): 464-477.
- [2] Chang F K, Chang K Y. A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations[J]. *Journal of Composite Materials*, 1987, 21(9): 834-855.
- [3] Stevens K A, Ricci R, Davies G A O. Buckling and post buckling of composite structures[J]. *Composites*, 1995, 26(3): 189-199.
- [4] Kong C W, Lee I C, Kim C G, et al. Post buckling and failure of stiffened composite panels under axial compression[J]. *Composite structures*, 1998, 42(1): 13-21.
- [5] Liu P F, Islam M M. A nonlinear cohesive model for mixed-mode delamination of composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2013, 106(2013): 47-56.
- [6] 矫桂琼,贾普荣. 复合材料力学[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2008.
- [7] Debski H, Teter A. Numerical and experimental studies on the limit state of fibre-reinforced composite columns with a lipped channel section under quasi-static compression[J]. *Composite Structures*, 2015(133): 1-7.
- [8] Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47(2): 329-334.
- [9] 刘从玉. 复合材料加筋板的屈曲后屈曲分析及承载能力研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008.
- [10] 徐荣章, 关志东, 刘璐, 等. 屈曲模态对含缺陷复材加筋板后屈曲的影响[J]. *北京:北京航空航天大学学报*, 2014, 40(9): 1299-1304.
- [11] Camanho P P, Davila C G. Mixed-mode cohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials[R]. Washington: NASA, 2002.
- [12] 孙立, 许希武, 徐焜. 含脱粘损伤的复合材料加筋板压缩破坏渐进损伤数值分析[J]. *材料科学与工程学报*, 2009, 27(5): 740-744.
- [13] Stevens K A, Ricci R, Davies G A O. Buckling and post buckling of composite structures[J]. *Composites*, 1995, 26(3): 189-199.
- [14] 赵维涛, 刘炜华, 杨其蛟. 复合材料加筋板极限承载能力分析[J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2015, 32(4): 37-43.