

纤维曲线铺放的变刚度复合材料层合板的失效分析

杜宇^{1,2} 杨涛^{1,2} 李志猛² 戴维蓉²

(1 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

(2 天津工业大学机械工程学院, 天津 300387)

文 摘 介绍了一种纤维曲线铺放的变刚度复合材料层合板有限元建模方法。按照曲线铺放规律定义每一个单元的实常数,并对这种纤维曲线铺放层合板进行建模。在此基础上讨论了在弯曲和压缩失效两种不同边界条件下,采用 Tsai-Wu 失效准则,对其进行失效分析,验证其面内受力情况,计算最大的 Tsai-Wu 强度比倒数 $1/R$ 。当 $1/R=1$ 时,所施加的载荷为失效的临界载荷。对比两组纤维直线和纤维曲线的铺层算例,弯曲失效条件下临界失效载荷提高 16% 和 21%,压缩失效条件下临界失效载荷提高 51% 和 19%。纤维曲线铺放层合板有效提高了失效性能。

关键词 纤维曲线铺放,变刚度复合材料, $1/R$,失效载荷

Failure Analysis of Variable-Stiffness Composite Laminates With Curvilinear Fiber Placement

Du Yu^{1,2} Yang Tao^{1,2} Li Zhimeng² Dai Weirong²

(1 Advanced Mechatronics Equipment Technology Tianjin Area Major Laboratory, Tianjin 300387)

(2 School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387)

Abstract This paper presents the variable-stiffness composite laminates with curvilinear fiber placement finite element modeling method. According to the curvilinear placement rule definition of every unit of the real constant, the variable-stiffness composite laminates with curvilinear fiber placement modeling was established. Bending and compression failure of two kinds of different boundary conditions was discussed, through the Tsai-Wu failure criterion, the maximum inverse strength ratio index $1/R$ was calculated. Taking $1/R=1$ as the critical load of failure, bending condition of critical failure load is increased by 16% and 21%, compression condition of failure load is increased by 51% and 19%. The results show that variable stiffness composite can improve failure properties.

Key words Fiber placement, Variable-stiffness composite, Inverse strength ratio, Failure load

0 引言

变刚度复合材料层合板早已在国外引起重视,目前已有许多这方面的研究。传统的制备复合材料层合板的方法是采用纤维直线铺放形成的,复合材料每一层的纤维角度是一定的。随后,提出了一种非传统的制备复合材料层合板的方法,纤维曲线铺放,每一层的纤维角度是连续变化的,在力学性能方面,强度和刚度是沿着纤维方向的,因此用这种方法制备的复合材料层合板被定义为变刚度层合板(VSP)。Gürdal 和 Olmedo^[1]运用迭代的数值计算方法,得出其轴向刚度提高 50%。Ijsselmuiden 等人^[2]开发了一个优化的框架,其中包括热载荷的影响,并且优化设计了变刚度层

合板热力学方面的最大屈曲荷载因子。Waldhart^[3]介绍了平移法比平行法在提高复合材料层合板屈曲载荷方面表现更为优异,且平移法便于制备。Lopes 等人^[4-5]证实了层合板在压缩屈曲和首层失效载荷方面,曲线纤维比直线纤维铺放的层合板更加有优势。最近,变刚度的概念已经应用到了圆柱和圆锥等结构上,Blom 等人^[6]优化了圆柱壳体在纯弯曲作用下的最大承载力,并且也开始对圆锥壳体进行研究。

国内,马永前等人^[7]用 ABAQUS 有限元软件对纤维曲线铺放的复合材料层合板进行了建模计算,验证其面内受力情况下,屈曲荷载显著提高,幅度达 14% 左右。随后,秦永利等人^[8]对纤维曲线铺放的变刚度复

收稿日期:2013-01-08

基金项目:天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目(11JCZDJC23000)

作者简介:杜宇,1988 年出生,硕士研究生,研究方向为复合材料成型技术与装备。E-mail:duyu2219@163.com

合材料层合板的研究进展进行了具体介绍。

变刚度复合材料在某些特定载荷下表现出更加优越的力学性能,研究复合材料的失效强度具有重要意义。目前,国内缺少先进的纤维铺设设备,相关技术尚不完善,对曲线铺设成型的变刚度复合材料失效性能研究较少。本文以纤维曲线铺设成型的变刚度层合板为研究对象,利用 ANSYS 对其失效性能进行研究,得到其 Tsai-Wu 的 $1/R$ 系数,计算出复合材料的失效载荷,进而探索变刚度复合材料层合板的失效性能和力学性能。

1 纤维曲线铺设的变刚度复合材料有限元建模

重点研究利用平移法进行纤维曲线铺设成型的变刚度复合材料层合板,复合材料的每一层纤维角度是连续变化的,在具有相同 x 坐标的单元沿着 y 方向具有相同的属性,具有相同 x 坐标的单元称为一单元组。即在 ANSYS 建模中,定义实常数时,每一单元组具有相同的铺层角度。

变刚度复合材料是对连续的曲线纤维进行铺设来设计的,参考路径如图 1 实线所示,纤维上任意点和 x 方向的夹角表达式为(1)式。有限元建模时,要将连续的曲线纤维进行离散化,纤维是分段连续的,离散成若干个有限元单元,每一个单元组所具有的铺层角度如(2)式所示。

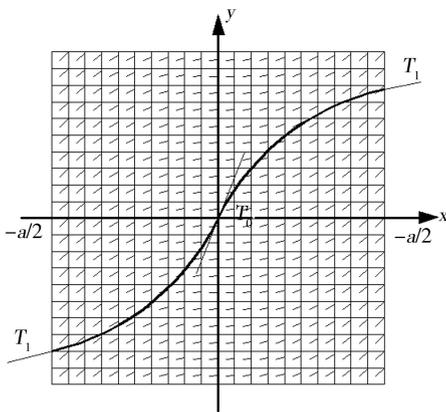


图 1 参考路径及<0/45>层有限元网格模型

Fig. 1 Reference path and finite element model for <0/45> layers

$$\theta(x) = \frac{2(T_1 - T_0)}{a} |x| + T_0 - \frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2} \quad (1)$$

$$\theta(i) = \frac{2i}{n}(T_1 - T_0) + T_0 \quad i = 1, \dots, \frac{n}{2} \quad (2)$$

式中, a 为层合板宽度, n 为复合材料在 x 轴方向网格划分的个数,即每一层具有 n 个单元组; i 为从原点起 x 轴正负方向上单元组的个数编号; T_0 为曲线铺设的纤维在板中心处的角度; T_1 为曲线铺设的纤维在距离板中心 $a/2$ 处的角度。图 1 为<0/45>层曲线铺设的有限元网格模型。

复合材料层合板几何尺寸为 400 mm×400 mm×3 mm,每层厚度为 0.5 mm,材料参数^[9]如表 1 所示。铺层顺序为 [<15/30>/<30/45>/<45/60>]。变刚度复合材料层合板的有限元模型如图 2 所示。模型中总共有 2 400 个单元,每个单元都有特定的铺层角度。

由于是对称铺设,单元较多,选取上面的三层,列举第一层 1、4、7、10 号单元;第二层 401、404、407、410 号单元;第三层 801、804、807、810 号单元进行说明,这些单元的铺层角度如图 3 所示。

表 1 材料常数

Tab. 1 Material parameters

E_1/GPa	E_2/GPa	G_{12}/GPa	V_{21}/GPa	V_{32}/GPa
141.6	10.7	3.88	0.27	0.5
X/MPa	X_c/MPa	Y_c/MPa	Y_c/MPa	S_{12}/MPa
1314	-1220	43	-168	48

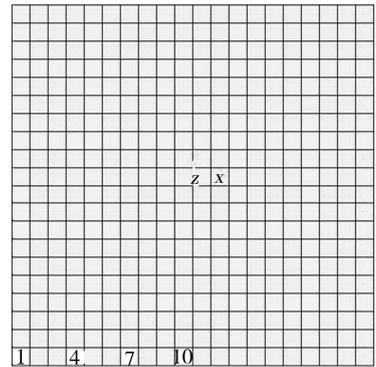


图 2 变刚度复合材料有限元模型

Fig. 2 Variable-stiffness composite finite element model

	铺层角度30°	铺层角度25.5°	铺层角度21°	铺层角度16.5°
第一层	1号单元	4号单元	7号单元	10号单元
	铺层角度45°	铺层角度40.5°	铺层角度36°	铺层角度31.5°
第二层	401号单元	404号单元	407号单元	410号单元

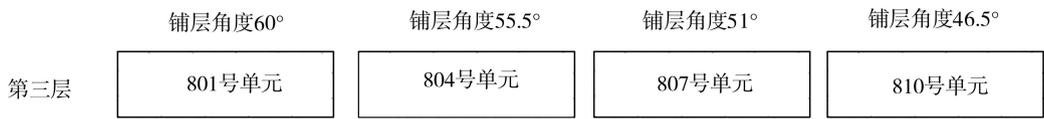


图3 单元的铺层角度
Fig. 3 Layer angle of finite element

2 复合材料失效准则

强度理论的失效准则是很好的复合材料失效依据。失效载荷定义为当复合材料发生首层失效时的载荷。采用 Tsai-Wu 的失效准则^[10]：

$$(F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2)R^2 + (F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2)R - 1 = 0 \quad (3)$$

F_1 、 F_2 和 F_{11} 、 F_{12} 、 F_{22} 、 F_{66} 分别是二阶和四阶强度系数张量； σ_i 是主方向的应力。

$$F_{11} = 1/X_t X_c, F_{22} = 1/Y_t Y_c, F_{66} = 1/S^2,$$

$$F_1 = 1/X_t - 1/X_c, F_2 = 1/Y_t - 1/Y_c,$$

$$F_{12} = \sqrt{F_{11}F_{22}}/2, \sigma_6 = \sigma_{12}$$

式中： X_t 、 X_c 分别是纤维纵向拉伸和压缩强度； Y_t 、 Y_c 分别是纤维横向拉伸和压缩强度； S 是剪切强度。

基于式(3)，计算出强度比 R ：

$$R = -B/2A + \sqrt{(B/2A)^2 + 1/A}$$

其中

$$A = F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_{12}^2$$

$$B = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2$$

当 Tsai-Wu 的强度比倒数 $\frac{1}{R} \geq 1$ 时，复合材料发生失效。

3 数值算例失效载荷计算及讨论

3.1 复合材料层合板弯曲失效

在图2有限元模型中， $x = 200$ mm， $x = -200$ mm 处施加 y 、 z 方向位移约束； $y = 200$ mm， $y = -200$ mm 处施加 x 、 z 方向位移约束； $z = 1.5$ mm 面上施加均布的 10 kPa 压力荷载。复合材料铺层顺序分两组情况考虑，每组分别包括纤维直线铺放和纤维曲线铺放的情况为：

(A) $[45/30/15]_s$ 和 $[\langle 15/30 \rangle / \langle 30/45 \rangle / \langle 45/60 \rangle]_s$

(B) $[45/30/45]_s$ 和 $[\langle 15/30 \rangle / \langle 45/60 \rangle / \langle 30/45 \rangle]_s$

为了得到复合材料层合板的失效载荷，需要利用 ANSYS 对不同载荷情况下进行多次有限元分析，以得到最大的 Tsai-Wu 强度比倒数 $1/R$ 与载荷之间的关系。因此本文将 10 kPa 外加均布荷载依次分 10 次施加，查看面内的受力情况，根据 Tsai-Wu 失效准则，模拟计算出最大的强度比倒数 $1/R$ 随外加载荷的变化关系如图4所示。

从图4中可以看出 Tsai-Wu 的最大强度比倒数 $1/R$ 与外加载荷是呈线性变化的，直线铺放的算例结果在曲线铺放的上方，当 $1/R = 1$ 时，所施加载荷为失效的临界载荷值。

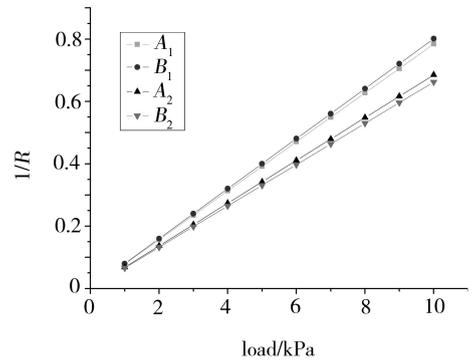


图4 $1/R$ 随外加载荷的变化关系

Fig. 4 Relationship of inverse strength ratio to load

由图4计算出本算例复合材料层合板的失效载荷，如表2所示。

从表2中可以看出，纤维曲线铺放的变刚度复合材料层合板的失效载荷有较大幅度的提高，其面内刚度、强度有较大幅度的提高。说明复合材料层合板在承受沿厚度方向的弯曲载荷时，纤维曲线铺放的复合材料层合板可以提高失效性能。

表2 纤维直线铺放和曲线铺放的复合材料层合板失效载荷值

Tab. 2 Failure load of the laminated composite with curvilinear fiber

算例	层合板	失效载荷 /kPa	提高率 /%
A ₁	$[45/30/15]_s$	12.6	-
A ₂	$[\langle 15/30 \rangle / \langle 30/45 \rangle / \langle 45/60 \rangle]_s$	14.6	16
B ₁	$[45/30/45]_s$	12.5	-
B ₂	$[\langle 15/30 \rangle / \langle 45/60 \rangle / \langle 30/45 \rangle]_s$	15.1	21

3.2 复合材料层合板压缩失效

在图2有限元模型中， $x = -200$ mm 处施加 x 、 y 、 z 方向的位移约束； $x = 200$ mm、 $y = 200$ mm、 $y = -200$ mm 处施加 z 方向的位移约束； $x = 200$ mm 面上施加均布的 1 MPa 压力荷载。复合材料铺层顺序分两组情况考虑，每组分别包括纤维直线铺放和纤维曲线铺放的情况为：

(C) $[45/30/45]_s$ 和 $[\langle 30/45 \rangle / \langle 45/60 \rangle / \langle 15/30 \rangle]_s$

(D) $[45/30/60]_s$ 和 $[\langle 15/30 \rangle / \langle 45/60 \rangle / \langle 30/45 \rangle]_s$

根据 Tsai-Wu 的最大强度比倒数 $1/R$ 与外加载荷的关系，计算出本算例的复合材料层合板的失效载荷如表3所示。

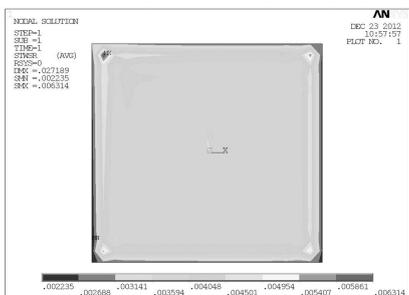
表3 纤维直线铺放和曲线铺放的
复合材料层合板失效载荷值

Tab.3 Failure load of the laminated composite
with curvilinear fiber

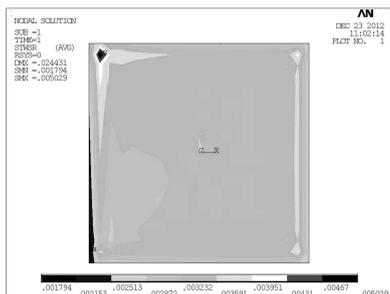
算例	层合板	失效载荷 /MPa	提高率 /%
C_1	$[45/30/45]_s$	112.36	-
C_2	$[\langle 30/45 \rangle / \langle 45/60 \rangle / \langle 15/30 \rangle]_s$	169.49	51
D_1	$[45/30/60]_s$	158.73	-
D_2	$[\langle 15/30 \rangle / \langle 45/60 \rangle / \langle 30/45 \rangle]_s$	188.67	19

从表2和表3中可以看出,纤维曲线铺放的复合材料层合板在受到弯曲和压缩载荷时,其失效载荷有较大幅度的提高。原因是在外界载荷的作用下,纤维曲线铺放的复合材料层合板的应力分布相对于直线铺放的复合材料层合板进行了重新分布,使主要的载荷转移到刚度较高的区域。弯曲失效载荷明显比压缩失效载荷小很多,是由于复合材料沿纤维方向力学性能较高,而垂直于纤维方向的力学性能较低,所以复合材料沿纤维方向承受载荷时失效性能明显强于复合材料沿厚度方向上承受载荷时失效性能。

从图5可以看出:在单位压缩载荷作用下,算例 D_1 和 D_2 的最大Tsai-Wu强度比倒数 $1/R$ 均产生在模型的左上角,其中算例 D_1 的是0.006,算例 D_2 的是0.005。



算例 D_1



算例 D_2

图5 直线铺放算例(D_1)和曲线铺放算例(D_2)
Tsai-Wu的 $1/R$ 的分布云图

Fig.5 Inverse of Tsai-Wu strength ratio index with
straight fiber (D_1) and curvilinear fiber (D_2)

从整体云图来看,算例 D_2 的比算例 D_1 的小。由此可以证明:纤维曲线铺放的复合材料能够更有效的分散载荷在其内部产生的集中应力,调整面内载荷的

分布,使主要载荷转移到强度、刚度较高的区域。从而提高其力学性能,失效载荷显著提高。

4 结论

(1)利用 ANSYS 有限元软件,将连续的曲线纤维进行离散化,纤维是分段连续的,离散成若干个有限元单元,必须按照曲线铺放规律来定义每一个单元的材料常数,对这种纤维曲线铺放的复合材料进行建模。

(2)通过对弯曲和压缩失效两种不同算例数值模拟,计算出复合材料的失效载荷。对比两组纤维直线和纤维曲线铺层,弯曲失效条件下临界失效载荷值提高16%和21%,压缩失效条件下临界失效载荷值提高51%和19%。纤维曲线铺放层合板失效载荷比直线铺放的显著提高,说明纤维曲线铺放变刚度层合板可以有效提高失效性能。

(3)通过纤维曲线铺放的方法成型变刚度复合材料层合板可以调整面内载荷的分布,使主要载荷转移到强度、刚度较高的区域。

参考文献

- [1] Olmedo R, Gürdal Z. Composite laminates with spatially varying fibre orientations: Variable stiffness panel concept [C]. Proceedings of the 33th AIAA/ASME/ASCE/AHS/A-SC structures, structural dynamics and materials (SDM) conference, AIAA, 1992:207-284
- [2] Ijsselmuiden S, Abdalla M M, Gürdal Z. Thermomechanical design optimization of variable stiffness composite panels for buckling [J]. Therm. Stress, 2010, 33(10):997-92
- [3] Waldhart C. Analysis of tow-placed, variable-stiffness laminates [D]. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996
- [4] Lopes C S, Camanho P P, Gürdal Z, et al. Progressive failure analysis of tow-placed, variable-stiffness composite panels [J]. Int. J. Solids Struct., 2007, 44(25-26):516-571
- [5] Lopes C S, Gürdal Z, Camanho P P. Variable-stiffness composite panels: buckling and first-ply failure improvements over straight fibre laminates [J]. Comput. Struct., 2008, 86: 897-907
- [6] Blom A W, Stickler P B, Gürdal Z. Optimization of a composite cylinder under bending by tailoring stiffness properties in circumferential direction [J]. Compos. Part B, 2010, 41(2): 65-157
- [7] 马永前. 纤维曲线铺放的变刚度复合材料层合板的屈曲 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(5):31-35
- [8] 秦永利. 纤维曲线铺放制备变刚度复合材料层合板的研究进展 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(1):61-66
- [9] Liu K S, Tsai S W. A progressive quadratic failure criterion for a laminate [J]. Composite Science and Technology, 1998, 58(7):1023-1032
- [10] Van Paeppegem W, Degrieck J. Calculation of damage-dependent directional failure indices from the Tsai-Wu static failure criterion [J]. Composite Science and Technology, 2003, 63(2):305-310

(编辑 李洪泉)