

变刚度复合材料层压板的轴压稳定性优化研究



赵占文, 苏雁飞, 崔勇江

航空工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘 要: 为了得到变刚度复合材料层压板结构的纤维最优变化角度, 采用参数化建模和遗传算法对变刚度复合材料层压板进行了纤维角度变化的优化分析, 得到了不同长宽比平板受压缩载荷下的最优纤维变化角度, 并提出了一种三段直线式变角度纤维。研究表明, 变刚度复合材料能显著提高结构的稳定性, 三段直线式变角度纤维可替代连续变角度纤维, 能显著降低变刚度复合材料结构的制造难度, 较好地改善变刚度复合材料结构铺叠过程中出现的重叠或间隙问题, 具有良好的应用前景。

关键词: 复合材料; 变刚度; 层压板; 稳定性; 优化

中图分类号: V2

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2021.08.009

传统的复合材料层压板基本都是由直纤维复合材料单向带或者织物通过不同的铺叠角度制造而成的, 且工程上主要采用 0° 、 90° 和 $\pm 45^\circ$ 的铺层角, 通过使用不同比例的铺层角实现复合材料层压板的模量和强度变化, 通过调整铺层顺序和铺层角改变层压板的弯曲刚度。虽然传统的直纤维复合材料可以设计不同模量和不同弯曲刚度的结构, 具有很大的设计空间, 但是无法在同一块层压板结构上实现面内同一个方向刚度的变化。变刚度复合材料通过单个铺层中纤维角度的变化实现层压板结构的面内刚度改变, 也称为变角度纤维^[1], 或称为裁剪纤维^[2]。Hyer等^[3]通过弯曲纤维改进了带孔复合材料层压板的稳定性; Shahriar等^[4]推导了变刚度层压板失稳载荷的理论解, 并通过有限元方法进行了验证; Wu等^[5]比较了变刚度复合材料和传统复合材料的后屈曲性能, 通过瑞利-里茨法进行了后屈曲分析, 并应用遗传算法确定了最优的失稳载荷; Hossein等^[6]讨论了变刚度复合材料优化方法的优缺点; Falcó等^[6]研究了变刚度复合材料的生产和破坏性能; Gürdal等^[7-8]提出了一种线性变角度纤维, 仅需要三个参数就可以描述纤维面内的角度变化, 这种纤维在理论分析、设计、生产和试验中应用很广泛; 秦永利^[9-10]对纤维变角度的生产工艺进行了研究。相较于传统的复合材料层压板, 变刚度复合材料层压板具有

极其优越的抗失稳特性, 仅仅通过改变面内纤维的角度, 就有可能显著地提高复合材料结构的稳定性, 得到最佳的纤维变化角度, 这是进一步发挥变刚度复合材料优越性的前提。

本文通过遗传算法研究了变刚度复合材料纤维的最优变化角度及其优越的稳定性能。

1 变刚度复合材料结构

直纤维铺层是传统的复合材料铺层, 也是目前复合材料结构大量使用的铺层, 工程上主要采用 0° 、 90° 和 $\pm 45^\circ$ 的铺层进行结构设计, 如图1(a)所示; 变刚度复合材料铺层是一种新型的复合材料铺层, 它通过铺层面内纤维角度的变化实现复合材料结构面内刚度的改变, 如图1(b)所示。理论上, 变刚度铺层的纤维角度可以任意变化, 因此可以设计面内刚度任意变化的复合材料结构。目前, 变刚度复合材料由细条状的变角度纤维铺层铺叠而成, 必然会导致条状铺层间存在间隙区和重叠区。但是, 如果在制作预浸料时, 首先将纤维按照预设角度进行铺设, 然后再进行树脂浸润, 制成类似直纤维的预浸料, 将改善目前制作变刚度复合材料存在间隙和重叠区的问题, 降低变刚度复合材料结构制造难度, 提高变刚度复合材料在工程上应用的可行性。

收稿日期: 2021-05-26; 退修日期: 2021-06-20; 录用日期: 2021-07-03

引用格式: Zhao Zhanwen, Su Yanfei, Cui Yongjiang. Buckling optimization study on variable stiffness composite laminate under compression load[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(08): 57-61. 赵占文, 苏雁飞, 崔勇江. 变刚度复合材料层压板的轴压稳定性优化研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(08): 57-61.

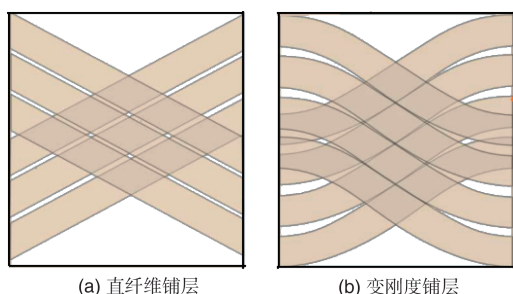


图1 直纤维铺层和变刚度铺层

Fig.1 Unidirectional-fiber layers and variable-stiffness layers

2 变刚度平板的优化

复合材料由于其优越的高强度比、高刚度比和疲劳性能,在航空结构中大量使用,但是当其承受压缩载荷时,可能发生屈曲甚至破坏。通过优化分析,对于传统的直纤维复合材料,可以通过布局优化、调整铺层顺序和角度提高其稳定性^[11-13]。变刚度复合材料通过改变面内纤维的角度可以实现结构面内刚度的变化,从而可以通过改变受压载荷的分布来提高结构的稳定性。因此,在受压缩载荷下,确定最优的纤维铺设角是亟待解决的问题之一。

本文以某平板为例,研究其受压缩载荷时最优的纤维铺设角。假定该平板宽度 a 为200mm,长度 b 为890mm,厚度 t 为4.0mm,材料为UTS/977-2,材料性能见表1。

表1 UTS/977-2的材料性能

Table 1 Material properties of UTS/977-2

E_{11}/GPa	E_{22}/GPa	G_{12}/GPa	G_{13}/GPa	G_{23}/GPa	ν_{12}	t/mm	$\rho/(\text{kg/m}^3)$
117	17	4.6	4.6	2.3	0.3	0.25	1584

将该平板在宽度方向(受压缩载荷边)划分为36等份的长条,按照第 i 长条与第 $37-i$ 长条的角度相同,设置18个铺层角度变量,第 i 个长条的铺层角度变量为 θ_i ($i=1,2,\dots,18$),如图2所示。铺层角度变量 θ_i 互相独立,变化范围为 $[0^\circ, 90^\circ]$,变化步长为 5° 。

平板的第 i 条与第 $37-i$ 条的铺层顺序设定为 $[\theta_i/-\theta_i]_{4s}$ 。以平板的水平对称轴为 x 轴,沿左边宽度方向为 y 轴,建立



图2 变刚度平板的变量

Fig. 2 Variables of variable stiffness plate

分析坐标系,采用MSC.PATRAN软件,选用CQUAD4进行网格划分,模型共计6673个节点,2160个单元,在模型宽度的左右两侧用RBE3单元施加60kN的集中载荷,设定四边简支约束。优化目标是结构的失稳因子 λ 最大,即 $\min(1/\lambda)$ 。

采用遗传算法和参数化模型相结合的优化方法^[12]进行优化分析,优化流程如图3所示。遗传算法采用整数编码,每一个变量 θ_i 的值即为一个条带的铺层角,不再需要进行编码和解码的转换。遗传算法设定的种群数为100,精英保留率为0.2,交叉率为0.8,变异率为0.1,遗传代数数为200。

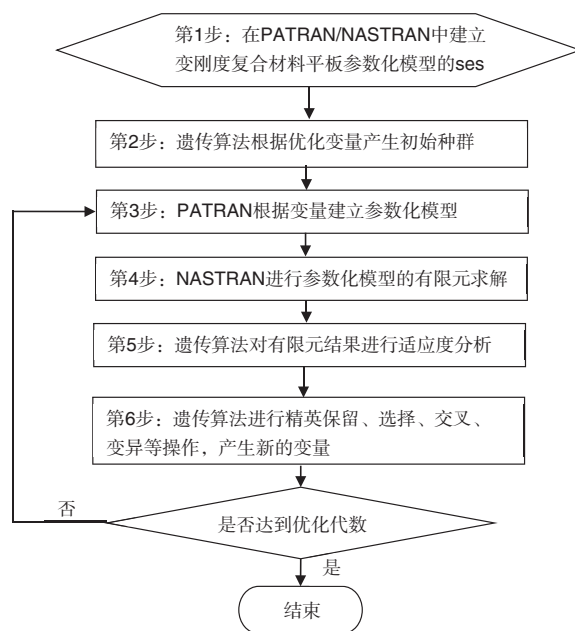


图3 优化流程图

Fig.3 Optimization flowchart

优化目标的变化历程如图4所示。可以看出,整个优化分析是收敛的。由优化分析得到的最优的变刚度复合材料平板的失稳模态如图5所示,失稳因子为1.4467。

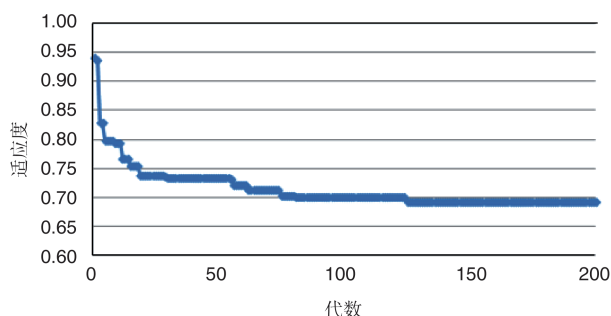


图4 变刚度复合材料平板的优化历程

Fig.4 Optimization history of variable stiffness flat plate

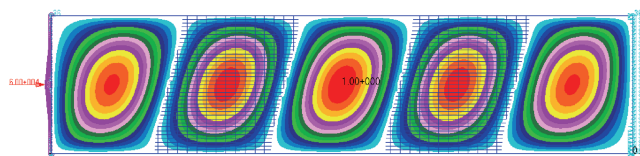


图5 变刚度平板的失稳模态

Fig.5 Buckling mode of variable stiffness flat plate

优化得到的最优纤维铺设角度如图6所示。图6中,纵坐标为 $2y/a$, 表示某一长条 y 坐标相对平板宽度一半的相对值, 横坐标 x 仅表示水平方向, 第 i 个长条相邻两点的连线与横坐标线之间的夹角用 θ_i 表示, 从图6可以看出, $\theta_1 = 5^\circ$, $\theta_{18} = 60^\circ$ 。

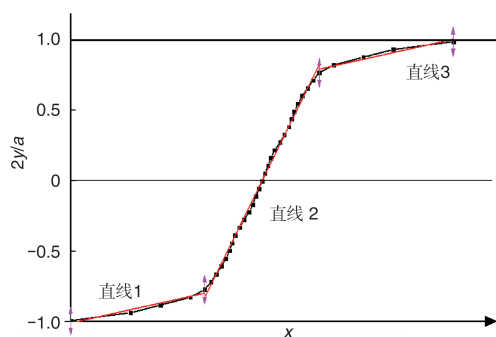


图6 最优的纤维铺设角

Fig.6 Optimal fiber laying angle

通过优化后得到的铺层角度方向变化可以看出, 优化后的纤维铺设形式可近似用三条直线来拟合, 这样可以显著地减少纤维铺设的难度。通过分段线性拟合, 可以将优化后的纤维铺设形式用三条直线表示为:

$$y = \begin{cases} -0.70503 + 0.1512x & -1 \leq y \leq -0.75 \\ 1.38035x & -0.75 < y < 0.75 \\ 0.70503 + 0.1512x & 0.75 \leq y \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可以求得三条直线的斜率分别为 0.1512、1.38035 和 0.1512, 直线的斜率即表示为简化后的纤维铺设角度, 分别对应 8.6° 、 54.1° 和 8.6° 。以三条直线确定的纤维角度作为变刚度复合材料平板有限元模型的铺层, 其他参数不变, 计算得到简化后的三段直线式变刚度复合材料平板失稳因子为 1.4495, 与 18 个变量优化分析得到的结果 1.4467 基本相同。所以可以认为, 采用三段直线式的变角度纤维可以替代原有的优化纤维铺设角。

变刚度复合材料平板最优解的节点支反力沿平板宽度方向的分布如图7所示。由图7可见, 节点支反力变化剧烈, 其分布类似一个“盆”型, 盆沿处的支反力是盆底的 9

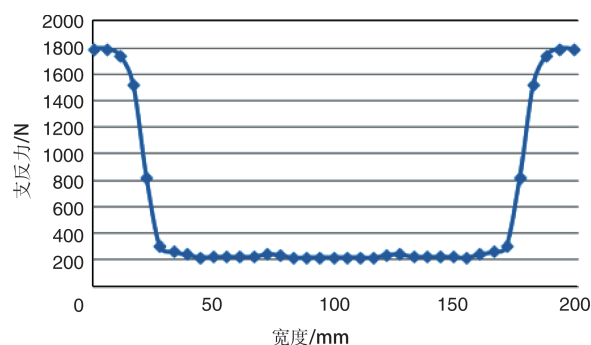
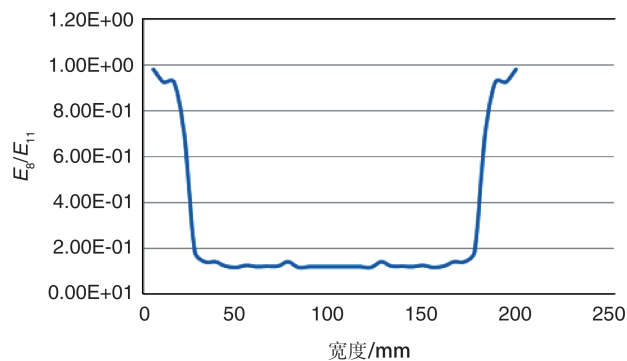


图7 沿平板宽度方向的支反力分布

Fig.7 Grid load distribution along flat plate width

倍, 越靠近支持边, 其支反力越大。

变刚度复合材料平板每一条带沿长度方向的等效弹性模量和纤维方向的模量比值为 E_x/E_{11} , 它沿宽度方向的变化如图8所示。由图8可见, 模量变化分布中存在一些很小的波动, 可以忽略不计, 总体来看, 模量的变化分布同支反力的分布形态很相似, 也呈现“盆”形, 具有较高弹性模量的条带宽度仅占平板宽度的 15% 左右, 表明支反力的分布与板弹性模量的大小相关, 模量大的地方支反力大, 反之较小。

图8 E_x/E_{11} 比值随平板宽度的变化曲线Fig.8 E_x/E_{11} ratio variation along flat plate widths

3 不同长宽比平板的优化

采用同样的基于遗传算法和参数化模型的优化方法, 设定平板长度 $a=890\text{mm}$ 不变, 分别对 $b=300\text{mm}$ 、 $b=445\text{mm}$ 和 $b=890\text{mm}$ 的不同长宽比的变刚度复合材料平板的纤维铺设角进行了优化分析, 分析结果如图9所示。

由最优的纤维铺设角可以看出, 同样可以用三条直线进行拟合, 应用拟合后的三段直线式变角度纤维重新建立有限元模型进行稳定性分析, 计算结果见表2。由表2可以看出, 三段直线式变角度纤维计算的失稳因子和优化分析

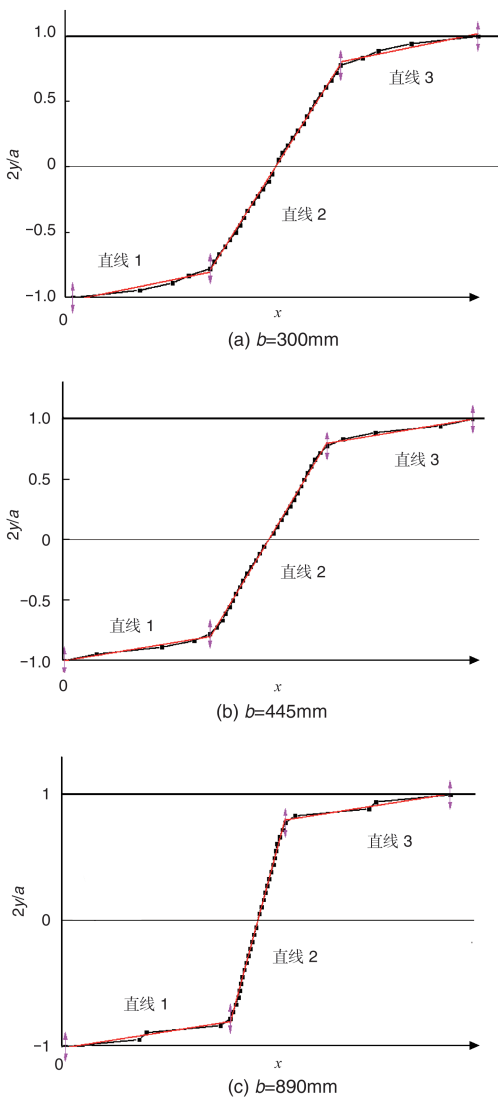


图9 不同长宽比平板的最优纤维铺设角
Fig.9 Optimal fiber laying angle for flat plates with different aspect ratios

得到的失稳因子偏差不大。

4 直纤维平板的优化

采用和变刚度复合材料平板一样的材料、尺寸和载荷，采用同样的优化算法对一块直纤维平板进行纤维最优角度的优化分析，设定其铺层为 $[\theta_l - \theta]_{4s}$ ，优化变量为 θ ，变化范围为 $[0^\circ, 90^\circ]$ ，变化步长为 2.5° ，优化后得到不同 a/b 的平板，其最优角度约为 $40^\circ \sim 45^\circ$ ，角度偏差主要是由变化步长引起的计算误差。计算得到其优化结果和变刚度平板的结果对比见表3。由表3可见，与直纤维平板相比，变刚度复

合材料平板的稳定性能提高60%以上。

表2 优化结果和拟合结果对比
Table 2 Optimum and fitting results comparison

b/mm	优化分析	三段直线式 变角度纤维	偏差/%
200	1.4467	1.4495	0.19
300	1.3169	1.3408	1.81
445	1.6912	1.6926	0.08
890	1.2644	1.3301	5.20

表3 变刚度平板和直纤维平板的结果对比
Table 3 Comparison of variable stiffness plates with unidirectional fibre plates

a/b	载荷/ kN	厚度/ mm	三段直线式变角度纤维平板			直纤维平板		$\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_2} \times 100\%$
			失稳因子 λ_1	$\theta_l / (^\circ)$	$\theta_l / (^\circ)$	失稳因子 λ_2	$\theta / (^\circ)$	
4.45	60.0	4.0	1.4495	8.6	54.1	0.869	42.5	$\uparrow 66.8\%$
2.96	90.0	5.0	1.3408	9.35	51.7	0.777	40.0	$\uparrow 72.6\%$
2.0	133.5	7.0	1.6926	8.0	54.8	0.975	42.5	$\uparrow 73.6\%$
1.0	267.0	10.0	1.3301	3.35	54.0	0.744	45.0	$\uparrow 78.8\%$

5 结束语

与常规的直纤维复合材料相比，变刚度复合材料具有更大的设计空间，可以根据受载情况，通过改变纤维在面内的铺设方向，大大提高结构的稳定性。本文的计算结果显示，在 $[\theta_l - \theta]_{ns}$ 铺层形式下，受轴压的四边简支变刚度复合材料层压板，比直纤维复合材料层压板的稳定性提高60%以上。同时，本文提出的三段直线式变角度纤维的变刚度复合材料可以较好地替代连续变角度纤维，来提高受轴压载荷矩形平板的失稳载荷。作为一种新型的复合材料，变刚度复合材料还需要解决应力集中、层间性能差等诸多问题。但是，可以预见，随着复合材料加工技术的发展，变刚度复合材料具有广阔的应用前景。

AST

参考文献

[1] Wu Zhangming, Paul M W, Gangadharan R. Postbuckling optimization of variable angle tow composite plates[J]. Composite Structures, 2013, 103:34-42.

[2] Brian F T, Gürdal Z. Design and manufacture of elastically tailored tow placed plates[R]. NASA/CA-2002-211919, 2012.

[3] Hyer M W, Lee H H. The use of curvilinear fiber format to improve buckling resistance of composite plates with central

- circular holes[J]. *Composite Structures*, 1991, 18:239-261.
- [4] Shahriar S, Mostafa M A, Samuel T I, et al. Design of variable-stiffness composite panels for maximum buckling load [J]. *Composite Structures*, 2009, 87: 109-117.
- [5] Hossein G, Kazem F, Damiano P, et al. Optimum stacking sequence design of composite materials Part II: Variable stiffness design[J]. *Composite Structures*, 2010, 93(1):1-13.
- [6] Falcó O, Mayugo J A, Lopes C S, et al. Variable-stiffness composite panels: As-manufactured modelling and its influence on the failure behaviour[J]. *Composites Part B*, 2014, 56: 660-669.
- [7] Gürdal Z, Tatting B F, Wu C K. Variable stiffness composite panels: effects of stiffness variation on the in-plane and buckling response[J]. *Composites*, 2008, 39:911-922.
- [8] Lopes C S, Gürdal Z, Camanho P P. Variable-stiffness composite panels: Buckling and first-ply failure improvements over straight-fibre laminates[J]. *Computers & Structures*, 2008, 86:897-907.
- [9] 秦永利, 祝颖丹, 范欣愉, 等. 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.
- Qin Yongli, Zhu Yingdan, Fan Xinyu, et al. Research and development on variable-stiffness composite laminates manufactured by variable angle tow placement[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2012(1):61-66. (in Chinese)
- [10] 秦永利, 祝颖丹, 蔡晶, 等. 纤维变角度牵引铺缝技术用基材的研究[C]//第17届全国复合材料学术会议, 2012.
- Qin Yongli, Zhu Yingdan, Cai Jing, et al. Research on base materials used in variable angle tow placement[C]//17th National Conference on Composite Material, 2012. (in Chinese)
- [11] 朱江, 李刚, 李云鹏. 复合材料加筋壁板结构布局快速优化设计方法[J]. *航空科学技术*, 2017, 28(12):38-42.
- Zhu Jiang, Li Gang, Li Yunpeng. Rapid optimization method of composite stiffened panel structure layout[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2017, 28(12):38-42. (in Chinese)
- [12] 赵占文, 苏雁飞, 陈军. 基于参数化模型和遗传算法的复合材料加筋壁板结构选型优化研究[J]. *航空科学技术*, 2015, 26(6):22-26.
- Zhao Zhanwen, Su Yanfei, Chen Jun. Study on the configuration optimizing of composite stiffened panel based on parametric modeling and genetic algorithm[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2015, 26(6):22-26. (in Chinese)
- [13] 赵占文, Liu W, 苏雁飞, 等. 复合材料加筋壁板的两步优化法[J]. *航空计算技术*, 2015, 45(2):79-83.
- Zhao Zhanwen, Liu W, Su Yanfei, et al. Bilevel optimization strategy of composite stiffened panel[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2015, 45(2):79-83. (in Chinese)

Buckling Optimization Study on Variable Stiffness Composite Laminate Under Compression Load

Zhao Zhanwen, Su Yanfei, Cui Yongjiang

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

Abstract: The parametric modeling method and genetic algorithm were applied to optimize the fiber orientation path of variable stiffness composite laminate with different ratio of length to width under compression load, and a new fiber named three line variable-angle fiber was introduced. The result shows that the variable stiffness composite structure possesses excellent stability, and the three line variable-angle fiber can replace the continuous variable-angle fiber to solve the overlap and gap problems.

Key Words: composite; variable stiffness; laminate; stability; optimization