

考虑可制造性的变刚度复合材料加筋壁板的优化设计



潘杰¹, 原崇新¹, 李志远², 董青海¹, 党磊¹, 谭源²

1. 中国商用飞机有限责任公司 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211

2. 上海飞机制造有限公司, 上海 201324

摘要: 由于变刚度复合材料具有更大的设计空间, 能更充分发挥复合材料各向异性的优势, 研究其优化设计方法越来越重要。本文首先考虑了工形长桁加筋壁板变刚度复合材料的可制造性, 并通过自动铺丝工艺试验获得了纤维的变角度极限范围。研究了壁板面板的铺放角度对加筋结构屈曲强度的影响, 然后利用 Python 编程, 结合 Abaqus 有限元软件通过遗传算法对工形长桁加筋壁板的面板铺层设计进行了优化。研究发现, 纤维角度变化宜控制在 20° 范围内, 当面板与筋条同时承受压缩载荷时, 面板为纯 0° 铺层的加筋结构的屈曲强度比纯 90° 铺层时要低; 遗传算法稳定且收敛性好, 通过优化后的结果发现, 纤维角度集中在 $60^\circ \sim 65^\circ$ 时, 加筋结构的屈曲强度最高。变刚度复合材料可提高加筋壁板屈曲性能, 应用前景广阔。

关键词: 变刚度; 复合材料; 自动铺丝; 加筋壁板; 遗传算法; 屈曲

中图分类号: TB332

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.03.009

相比金属材料, 树脂基复合材料在设计参数上有更多的选择性, 如纤维带宽、每层纤维角度、铺层层数、各层的铺放顺序等。随着自动铺丝技术的发展, 纤维铺放增加了更多的可能, 纤维可不沿直线铺放, 而是根据应力变化的取向曲线铺放。这种设计可更有效地发挥复合材料的各向异性的优势, 让载荷更多地通过纤维轴向去承载^[1-2]。

在曲线纤维研究方面, 围绕着曲线纤维的有限元模拟以及屈曲分析, 国内外诸多学者做了相关研究。Gurdal 等^[3]建立了变刚度复合材料概念, 并定义了曲线纤维线性数学表达方程。吴尘瑾等^[4]研究了一种尺寸为 $80\text{mm} \times 80\text{mm}$ 的 8 层平板的屈曲, 对比了 5 种铺层 (按纤维变化规律分为抛物线、线性变化、下抛物线、三次函数及四次函数) 的一阶屈曲载荷, 发现线性变化的屈曲载荷提高最明显。李清原等^[5-6]基于 Hyper Mesh/Opti Struct 平台, 使用 tcl/tk 语言对变刚度层合板有限元建模工具 “VS Laminate Define Tool” 和优化工具 “VS Laminate Optimization Tool” 进行了二次开发。刘亚津等^[7]以单层板为例, 研究了重叠制造缺陷对力学性能的影响, 结果发现当重叠面积在 4.98% 的情况下, 其

屈曲载荷提高 13.1%, 极限载荷提高 3%。但重叠缺陷的存在导致缺陷处出现应力集中。冯卫东等^[8]研究了在考虑铺层角度的曲率约束和平行度约束的情况下, 利用最小二乘法流函数反求纤维轨迹。Ribeiro 等^[9]对变刚度复合材料的力学特征进行了综述性分析, 主要包括其屈曲、失效和振动特性, 并对比了采用 h-version 有限元方法和三阶剪切变形理论计算出的变刚度复材层板的自然频率。

赵占文等^[10]采用遗传算法和 Patran 参数化模型相结合的优化方法, 对层合板的压缩稳定性进行了优化。优化目标为屈曲因子, 设计变量为铺层角度。吴双华等^[11]以 Matlab 为设计优化平台, 通过修改 Python 脚本对 Abaqus 进行有限元计算, 研究了变刚度复合材料的面内刚度、弯曲挠度等优化设计问题。Alhajahmad 等^[12]将带梁和长桁的复材机身简化成二维平板, 在承受面外压力和面内载荷下, 利用 Python 脚本在 Abaqus 中进行变刚度复材板的线性和几何非线性有限元分析, 并采用退火算法对变刚度复材板的最大承载进行优化。邓同强等^[13]利用序列响应面建模方法, 选择二次函数生成响应面, 再通过遗传算法来优化纤维的

收稿日期: 2022-11-22; 退修日期: 2023-01-06; 录用日期: 2023-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(51875159)

引用格式: Pan Jie, Yuan Chongxin, Li Zhiyuan, et al. Optimization design of variable stiffness stiffened composites considering manufacturability[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(03): 64-70. 潘杰, 原崇新, 李志远等. 考虑可制造性的变刚度复合材料加筋壁板的优化设计[J]. 航空科学技术, 2023, 34(03): 64-70.

铺层角度, 优化目标为变刚度层合板的屈曲特性。Ijsselmuiden 等^[14]采用三个步骤对带孔的变刚度复合材料进行了优化:(1)在考虑强度、屈曲以及重量(质量)的情况下, 对带孔平板的设计灵敏度进行分析, 得出大概的厚度和刚度分布。(2)在考虑制造可行性条件下, 对纤维角度进一步优化, 得到每个点的纤维角度和铺层。(3)考虑实际的铺放路径, 将纤维角度分布转换成自动铺丝机的铺放代码信息。在变刚度复合材料的多目标优化方面, Honda 等^[15]利用带精英策略的非支配排序遗传算法对带孔平板的面内强度进行了优化。

以上研究多集中于复合材料平板, 但在实际工程应用中, 复合材料一般以加筋壁板的结构形式存在, 并且在设计加筋壁板时将其屈曲强度作为重要的设计指标。同时, 鉴于复合材料设计制造一体化的特点, 在优化过程中需要考虑实际铺放工艺对纤维角度的限制。本研究结合实际铺放过程中的工艺经验, 借助 Python 编程与有限元建模, 利用遗传算法对带工形长桁的单筋壁板进行优化, 对比分析不同面板铺层形式下的加筋壁板的屈曲行为, 获得了最高的屈曲强度, 为后续有加筋壁板设计提供了应用基础。

1 层合板纤维角度路径设计

在纤维角度路径设计中, 假设一个平板中心的铺放角度为 T_0 , 两侧为 T_1 (见图1), 且从两侧到中心, 铺放角度沿 x 方向呈线性变化, 则平板上每点的铺放角度可表达为

$$\theta(x) = \begin{cases} \frac{2(T_1 - T_0)}{a}x + T_0, & 0 < x < \frac{a}{2} \\ \frac{2(T_1 - T_0)}{a}x + T_0, & -\frac{a}{2} < x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

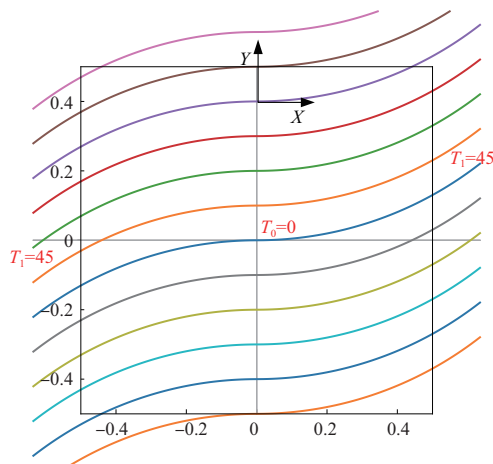


图1 纤维布置示意图

Fig.1 Diagram of fiber arrangement

式(1)将用于变刚度复合材料的铺放路径生成, 以及后续的有限元分析中纤维方向的定义。

2 曲线纤维平板试验件制造

2.1 材料及设备

本研究采用 T800 碳纤维增强热固性树脂自动铺丝材料制备变刚度平板, 预浸料名义丝束宽度为 6.35mm, 固化后单层名义厚度为 0.185mm。

自动铺放设备采用 4 丝束机器人铺丝机, 铺放过程中采用红外灯加热。考虑热固性预浸料首层与模具粘贴困难且易滑移, 选择在平台模具上先制作聚酰亚胺膜, 如图2所示。



图2 自动铺丝过程

Fig.2 Process of AFP

2.2 可制造性分析

铺放尺寸设计为 500mm×500mm, 4 条 6.35mm 宽的预浸料丝束组成一组料带, 料带中线为机器人运动参考线, 料带间隙设置为 1mm。纤维路径规划在自动铺丝软件中进行, 选择曲线沿 y 轴平行移动的策略进行铺丝轨迹的生成, 铺丝轨迹如图3所示。

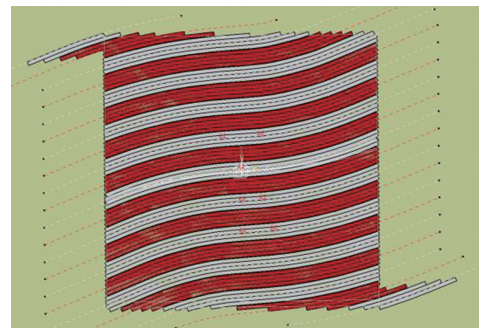
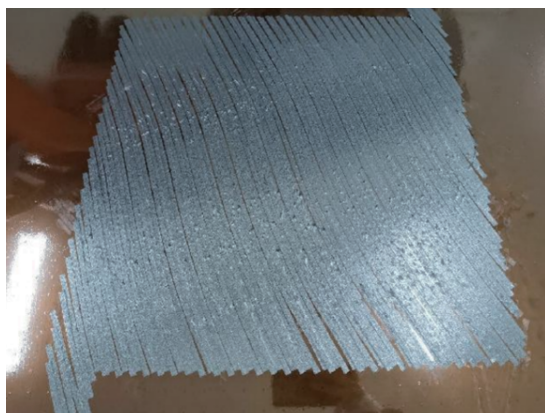


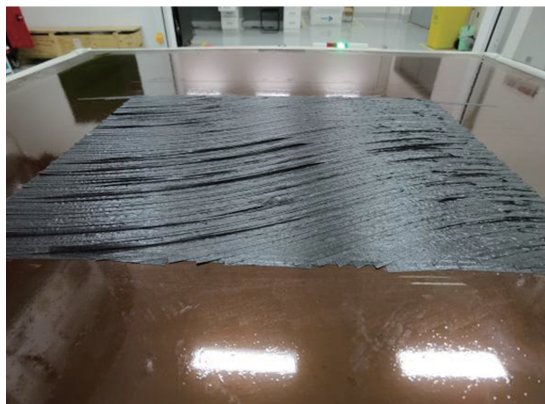
图3 铺丝轨迹示意图

Fig.3 Diagram of laying track

选取 T_0 、 T_1 角度变化为 $\langle 0|5 \rangle$ 、 $\langle 0|10 \rangle$ 、 $\langle 0|12 \rangle$ 、 $\langle 3|19 \rangle$ 、 $\langle 2|21 \rangle$ 、 $\langle 0|30 \rangle$ 的铺层开展可制造性分析。部分铺放效果如图 4 所示。观察图 4(a) 发现, 铺层中间位置料带间隙与程序设置值相近, 起始端间隙最大处达到 2.5mm。曲线起始端间隙较大, 是由铺放策略(沿 y 轴平移)造成的。



(a) $\langle 0|10 \rangle$ 铺层



(b) $\langle 0|30 \rangle$ 铺层

图 4 变刚度铺放结果

Fig.4 Results of variable stiffness placement

当 T_0 、 T_1 角度之差小于 20° 时, 纤维丝束内侧外侧黏结较好。当 T_0 、 T_1 角度变化为 30° 时, 预浸料丝束外侧纤维翘起, 无法粘贴, 如图 4(b) 所示。

经过分析, 曲线铺放 6.35mm 丝束内侧和外侧受力不同, 料带内侧会产生褶皱, 外侧会形成大的张力。转弯半径越小, 料带外侧张力越大, 料带压实难度越大。当 T_0 、 T_1 角度变化达到 30° 时, 纤维不能很好地贴合在铺放模具上, 为此实际铺放中将角度变化限定在 20° 。

2.3 试板制备

将铺放温度设置为 55°C , 铺放速度为 0.1m/s , 压力为 200N , 完成 6 层变刚度试板的铺放, 铺层为 $[\langle 5|0 \rangle / \langle -5|0 \rangle / \langle 10|0 \rangle / \langle -10|0 \rangle / \langle 20|0 \rangle / \langle -20|0 \rangle]$, 放置于热压罐中, 按照材料

固化制度进行加热加压成形试板。成形后的面板如图 5 所示, 可以看出, 当在 20° 范围内进行变角度铺放时, 试板质量较好。

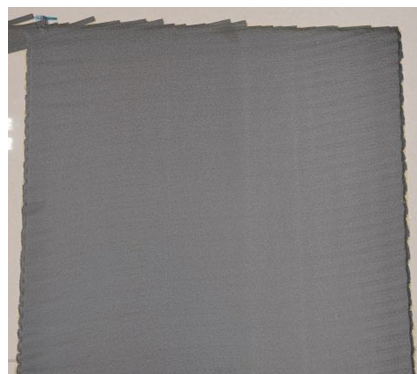


图 5 固化后的变刚度试板

Fig.5 Cured variable stiffness panel

3 加筋壁板的有限元分析

3.1 结构及铺层

工形长桁加筋壁板为常用的航空复合材料结构, 以典型的尺寸特征为研究对象, 其中长桁上缘条宽为 26mm , 高为 30mm (在建模时考虑上下缘条的厚度, 偏移为 32.59mm), 下缘条宽为 46mm , 底面面板宽为 100mm , 整个加筋壁板的长度为 200mm 。单向 T800 碳纤维复合材料的性能参数见表 1。

表 1 单向 T800 碳纤维复合材料的性能参数

Table 1 Properties of unidirectional T800 carbon fiber composites

材料性能	E_{10}/MPa	E_2/MPa	ν_{12}	G_{12}/MPa	G_{13}/MPa
数值	155000	9900	0.317	4140	4140
材料性能	G_{23}/MPa	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	X_1/MPa	X_c/MPa	Y_t/MPa
数值	4140	1576	2920	1430	68.6
材料性能	Y_c/MPa	S_{12}	S_{13}		
数值	278	172	172		

加筋壁板铺层顺序见表 2, 长桁上缘条厚度为 3.33mm , 共 18 层; 腹板厚度为 2.96mm , 共 16 层; 下缘条厚度为 1.85mm , 共 10 层; 底面面板厚度为 1.11mm , 共 6 层。

3.2 有限元建模

利用 Abaqus 软件进行有限元建模, 采用 S4R 壳单元, 网格尺寸为 4mm 。长桁与面板之间界面采用捆绑连接, 即两者的平动和转动一致。长桁加筋壁板一端为固支, 即三个平动和三个转动都被约束, 另一端通过 MPC Beam 的多

表2 加筋壁板铺层顺序
Table 2 Sequence of stiffened skin

序号	部位	铺层	层数
1	长桁上缘条	[45/-45/0/0/-45/0/0/45/45/-45/0/0/-45/0/0/45]	18
2	长桁腹板	[45/-45/0/0/-45/0/0/45]s	16
3	长桁下缘条	[45/-45/0/0/-45/0/0/45/45/-45]	10
4	底面板	[0/45/0/-45/90/0]	6

点约束将位移载荷分散到每个节点上,如图6所示。多点约束的参考点(Rp)在加筋壁板剖面的形心处,并与其端面相距10mm,在x方向上对Rp点施加100kN的压缩载荷,并对Rp点施加了除x方向(与图1的x方向一致)外的位移约束。

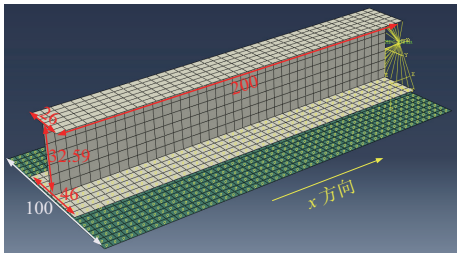


图6 有限元模型(单位:mm)

Fig.6 Finite element model(Unit:mm)

3.3 纤维变角度参数设定

假设每层的纤维角度沿着x方向进行线性变化,按照每个单元的4个节点x坐标值进行计算,然后求其平均值,将计算出的角度赋于每个单元。利用Python语言对这些值进行自动计算,并通过Python程序修改Abaqus的输入文件(.inp)。

4 优化设计

由于工形长桁难以通过自动铺丝来制造,需要借助人手工成形,即先利用自动铺带制造平板,然后热模压预成形(C形),最后手工合模成形(工形),因此本研究中仅以底面的6层面板为设计变量,长桁仍采用传统的固定角铺层。利用Python的遗传算法代码进行优化,设计目标为加筋壁板的一阶屈曲因子,设计参数为每层的纤维起始和终点角度。如前所述,考虑到在工艺试验中纤维的变形限制,约束条件为纤维起始和终点角度差值小于20°。

$$\begin{aligned} \text{Objective: } & \text{Min}(-\lambda) \\ \text{variables: } & [T_{i0}, T_{i1}] \\ \text{constraints: } & |T_{i1} - T_{i0}| < 20 \end{aligned} \quad (2)$$

优化设计的思路为:(1)定义遗传算法中种群大小以及优化的代数,定义筛选、变异和交叉算法。(2)在Python中定

义自变量函数为纤维取向角度,根据角度修改Abaqus的输入文件“.inp”。(3)在Python中编程,调用Abaqus进行输入文件的计算,并输出“.dat”文件。(4)通过Python编程,对输出文件进行搜索,找到一阶的屈曲因子 λ ,并将此值作为函数的输出返回。(5)遗传算法会根据返回的屈曲因子,筛选出每一代的最佳值,通过交叉、变异等生成下一代的参数。(6)将下一代的参数(纤维角度)输入“.inp”文件,重新计算。最后通过循环迭代找到最佳的铺层比例,设计流程如图7所示。

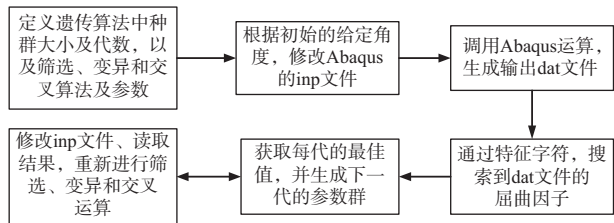


图7 设计流程示意图

Fig.7 Diagram of design process

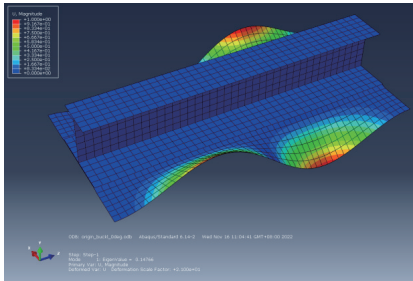
5 结果分析

5.1 直线纤维与曲线纤维的对比分析

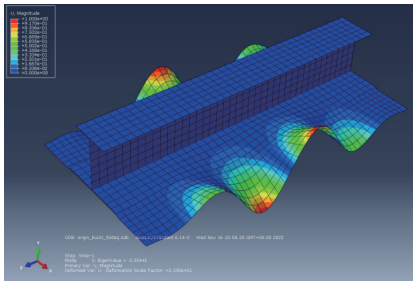
首先对比纤维方向对加筋壁板的屈曲因子的影响,分别计算了底面6层全部为0°和全部为90°的屈曲模式及因子,由表3和图8可以看出,与[90]₆铺层相比,[0]₆铺层的屈曲因子较低,这是由于单向复合材料的轴向模量远大于其横向模量,0°铺层时,面板在受载方向上的刚度较高而承担更多的载荷,因此面板更容易发生屈曲。相比之下,[90]₆铺层在受到压缩时,因面板在受载方向刚度极低,主要的压缩载荷由工形长桁承担,因此其屈曲因子较高。为了对比两者之间的整体刚度差异,计算在同样受到100kN的力作用下两者的轴向位移,[90]₆铺层的位移为0.82mm,而[0]₆铺层的位移为0.51mm,验证了当面板为[0]₆铺层时,加筋壁板的轴向刚度较大。在此基础上,计算了传统均衡铺层的加筋壁板,其铺层为[0/45/0/-45/90/0],计算出的屈曲因子为0.26,比[0]₆铺层要高,但低于[90]₆铺层,这是由于0°铺层占比为50%。为了进一步提高屈曲因子,针对变角度铺层<5|0>/<-5|0>/<0|10>/<0|-10>/<30|0>/<-30|0>进行了屈曲分析,其屈曲因子为1.12,比[90]₆铺层直线纤维要高,初步说明变刚度铺层可以提高复合材料加筋壁板的屈曲强度。通过面内纤维的变角度优化,可以优化单层的面内刚度,从而更好地抑制受压底面板的屈曲。

表3 三种铺层屈曲因子
Table 3 Buckling factor

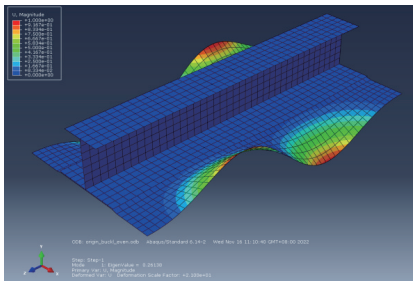
序号	铺层	屈曲因子	模态
1	$[0]_6$	0.15	(2,2)
2	$[90]_6$	0.95	(4,2)
3	$[0/45/0/-45/90/0]$	0.26	(2,2)
4	$[<5 0>/<-5 0>/<0 10>/<-0 10>/<30 0>/<-30 0>]$	1.12	(5,2)



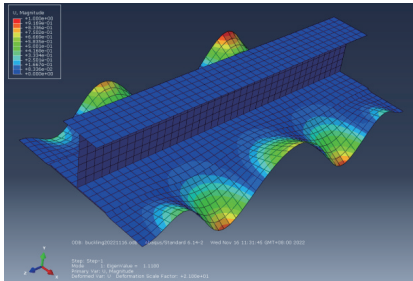
(a) $[0]_6$ 单向铺层($\lambda=0.15$)



(b) $[90]_6$ 单向铺层($\lambda=0.95$)



(c) 均衡铺层($\lambda=0.26$)



(d) 变角度铺层($\lambda=1.12$)

图8 屈曲载荷分析示意图

Fig.8 Diagram of buckling load analysis

5.2 曲线纤维的迭代优化

为了进一步探索最佳的铺层方式,以获得最高的屈曲强度,利用前述的优化算法和流程,将加筋壁板的6层底面板进行了角度优化,其中每两层之间采用对称的方式,因此有三对设计变量,铺层为 $[<A1|A2>/<-A1|-A2>/<B1|B2>/<-B1|-B2>/<C1|C2>/<-C1|-C2>]$ 。在优化过程中,每次优化参数的设置都参考前面优化结果的情况进行更新。三次优化的结果如表4和图9所示。第一次优化中,种群大小为80,但发现平均值与最大值相差很大,说明种群之间差异较大,在同等计算条件下,代际次数较少,因此在第二次、第三代的种群数从80降至40,代际数由7提高至15。在第二代中平均值与最佳值基本同步上升,在第14—15代时基本达到平衡。在第三次优化中将交叉概率由0.7提高到0.8,变异概率由0.5降为0.1,可以看出其最佳值变动不大,可以看出变异概率降低可以更好地保持原有的最佳值。由表4可以看出,三次优化的最终结果基本一致,这表明遗传算法的收敛稳定性较好。表明交叉、变异概率对最终结果影响不大。

表4 优化参数

Table 4 Optimized parameters

序号	种群大小	遗传代数	筛选算子	交叉算子	变异算子	交叉概率	变异概率	最优结果
1	80	7	锦标赛	两点交叉	二进制	0.7	0.5	1.39
2	40	15	锦标赛	两点交叉	二进制	0.7	0.5	1.38
3	40	15	锦标赛	两点交叉	二进制	0.8	0.1	1.39

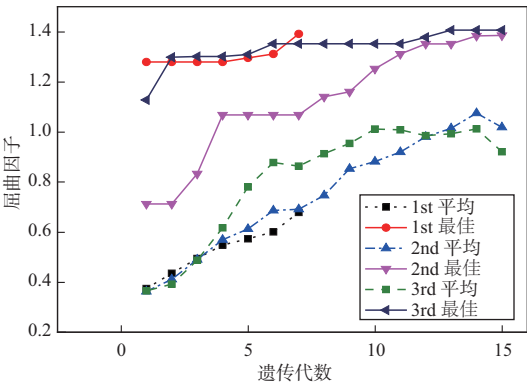


图9 三次优化的结果

Fig.9 Results of three times optimization

表5中列出了三次优化计算中最高屈曲因子的角度输入参数。从表5中可以看出,对于本研究中的构型,最佳的纤维角度多数处在 $60^\circ\sim 65^\circ$ 。为了验证此结果,计算了底面板铺层为 $[64/-64/61/-61/62/-62]$ 的屈曲,其屈曲因子为1.22,比 $[90]_6$ 铺层的0.95要高,但仍比变刚度复合材料的

最佳屈曲因子1.39要低。这也说明采用固定角度铺放的加筋结构的抗屈曲能力仍不如变角度铺放的加筋结构。

表5 最高屈曲因子对应的角度参数

Table 5 Angle parameters corresponding to the highest buckling factor

次数	A1	A2	B1	B2	C1	C2
1	-60.35	-63.88	-49.06	-58.94	-50.47	-65.88
2	61.76	76.59	-65.29	-63.17	63.88	44.21
3	62.32	44.54	-61.41	-52.36	-52.53	-64.47

6 结论

本文通过遗传算法对工形长桁加筋壁板进行了优化设计,通过对纤维变角度铺层参数的不断迭代,得到最大的压缩屈曲载荷,并研究了纤维实际铺放工艺的参数限制、不同铺放角度对屈曲强度的影响机制等,得出以下结论:

(1)在变角度铺层优化设计之前,需要对纤维的变形能力进行工艺试验,纤维角度变化范围与试验件的尺寸有关,在本研究中,其角度变化不宜超过20°。

(2)经过多次不同参数下的优化结果进行对比,遗传算法结合有限元是一种收敛性较好的优化工具,且优化结果基本一致,利用Python编程工具可方便实现两者的融合。

(3)尽管碳纤维在轴向上可以最大发挥其性能,但当面板为0°单向铺层时,因其在轴向压缩方向上刚度较高,承载更多的压缩载荷,更易发生屈曲,本研究中0°单向铺层的屈曲因子为0.15,而90°单向铺层的屈曲因子为0.95。

(4)与纤维直线铺放相比,曲线纤维铺放可以提高加筋壁板的屈曲强度。即使在最佳的角度范围60°~65°内,直线纤维的屈曲因子为1.22,而曲线纤维的屈曲因子可达到1.39。

变刚度设计复合材料是提高加筋壁板屈曲性能的手段之一,通过合理的优化,可以在满足工艺性的基础上实现力学性能的提高。

AST

参考文献

[1] 程健男,徐福泉,张体磊. 树脂基复合材料在直升机的应用及其制造技术[J]. 航空科学技术,2021,32(1): 109-114.
Cheng Jiannan, Xu Fuquan, Zhang Tilei. Application and manufacturing technology of composites in helicopter[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(1): 109-114. (in Chinese)

[2] 任毅如,邓亚斌. 基于非线性铺设角复合材料层合板的抗低速冲击性能研究[J]. 航空科学技术,2021,32(12): 84-90.
Ren Yiru, Deng Yabin. Research on low-velocity impact resistance of composite laminates with non-linear angle based layups[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(12): 84-90. (in Chinese)
[3] Brian F T, Gurdal Z. Design and manufacture of elastically tailored tow placed plates[R]. NASA/CA-2002-211919, 2012.
[4] 吴尘瑾,祖磊,李书欣,等. 变刚度复合材料层合板的纤维铺放路径设计及屈曲分析[J]. 玻璃钢/复合材料,2018(4): 5-10.
Wu Chenjin, Zu Lei, Li Shuxin, et al. Design of fiber placement path and buckling analysis of variable-stiffness composite laminates[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018(4): 5-10. (in Chinese)
[5] 李清原. 变刚度层合板力学性能研究及纤维角度优化 [D]. 吉林:吉林大学,2019.
Li Qingyuan. Study on mechanical behavior and fiber angle optimization of variable stiffness laminates[D]. Jilin: Jilin University, 2019. (in Chinese)
[6] 叶辉,李清原,闫康康. 变刚度复合材料层合板的力学性能 [J]. 吉林大学学报(工学版),2020,50(3): 920-928.
Ye Hui, Li Qingyuan, Yan Kangkang. Mechanical properties of variable-stiffness carbon fiber composite laminates[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2020, 50(3): 920-928. (in Chinese)
[7] 刘亚沅,郑重,吴德财. 考虑曲线铺丝制造缺陷的单层板力学性能分析[J]. 机械设计与制造工程,2021,50(6): 71-74.
Liu Yafeng, Zheng Zhong, Wu Decai. Mechanical analysis of monolayer plate considering manufacturing defects in curved fiber placement[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2021, 50(6): 71-74. (in Chinese)
[8] 冯卫东. 层合板变刚度设计中纤维铺放轨迹规划方法 [D]. 武汉:华中科技大学,2020.
Feng Weidong. Path planning method of fiber placement in variable stiffness design of laminated plates[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
[9] Ribeiro P, Akhavan H, Teter A. A review on the mechanical behaviour of curvilinear fibre composite laminated panels[J]. Journal of Composite Materials, 2014, 48(22): 2761-2777.

- [10] 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(8): 57-61.
Zhao Zhanwen, Su Yanfei, Cui Yongjiang. Buckling optimization study on variable stiffness composite laminate under compression load[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(8): 57-61. (in Chinese)
- [11] 吴双华. 变刚度复合材料结构的优化设计方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
Wu Shuanghua. Research on optimal design method of variable rigidity composite structure[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese)
- [12] Alhajahmad A, Abdalla M M, Gürdal Z. Optimal design of tow-placed fuselage panels for maximum strength with buckling considerations [J]. Aircraft, 2010, 47: 775-782.
- [13] 邓同强. 变刚度复合材料层合板壳的分析与优化 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.
Deng Tongqiang. Analysis and optimization of laminated composite shells with variable stiffness[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017. (in Chinese)
- [14] Ijsselmuiden S T. Optimal design of variable stiffness composite structures using lamination parameters[D]. The Netherlands: Delft University of Technology, 2011.
- [15] Honda H, Igarashi T, Narita Y. Multi-objective optimization of curvilinear fiber shapes for laminated composite plates by using NSGA-II[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45 (1): 1071-1078.

Optimization Design of Variable Stiffness Stiffened Composites Considering Manufacturability

Pan Jie¹, Yuan Chongxin¹, Li Zhiyuan², Dong Qinghai¹, Dang Lei¹, Tan Yuan²

1. COMAC Beijing Aircraft Technology Research Institute, Beijing 102211, China

2. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd, Shanghai 201324, China

Abstract: As the variable stiffness composites have more design space and can give full play to the advantages of composite material anisotropy, it is increasingly important to study their optimization design methods. The manufacturability of variable stiffness composites was first considered in this paper, and the variable angle limit range of the fibers is obtained through automated fiber placement(AFP) experiments. The effect of the layup orientation on the buckling of stiffened panel is also investigated, then, using Python programming, combined with Abaqus finite element commercial software, the layup design of the I-stringer stiffened panel is optimized by genetic algorithm. It is found that the angle change should be less than 20°; When the panel and the rib are under compression load at the same time, the buckling strength of layup of 0° is lower than that of layup of 90°; The optimization algorithm is stable and has good convergence, and the buckling strength is the largest when the fiber angle is concentrated between 60° and 65°. Variable stiffness composites can improve the buckling performance of stiffened panels and have a broad application prospect.

Key Words: variable stiffness; composites; AFP; stiffened panel; genetic algorithm; buckling

Received: 2022-11-22; Revised: 2023-01-06; Accepted: 2023-02-10

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(51875159)