

轴压下玻/碳纤维混杂复合材料薄壁圆筒屈曲分析

王强强 孙双双 张 哲

(青岛科技大学机电工程学院, 青岛 266061)

文 摘 轴向压缩作用下薄壁圆筒结构容易发生屈曲,本文以玻/碳纤维混杂复合材料(G/CFHC)薄壁圆筒为研究对象,设计六种铺层顺序,借助ABAQUS有限元分析软件,讨论了单层碳纤维复合材料板位置、铺层厚度、玻/碳纤维混杂比对G/CFHC薄壁圆筒屈曲载荷的影响。研究发现:在相同的铺层角度下,单层碳纤维板位置的改变将会导致结构屈曲载荷的变化,且对于单向铺设的G/CFHC薄壁圆筒,对屈曲载荷的影响规律一致,最大屈曲载荷均出现在单层碳纤维板位于最外层时,多向铺设中增加单层碳板甚至会使得结构的屈曲载荷降低;对于不同铺层顺序的薄壁圆筒,随着铺层厚度的增加对应的屈曲载荷均逐渐增大;在结构的厚度和层数一定时,增加单层碳纤维复合材料、合理改变玻/碳纤维混杂方式均会使得结构的屈曲临界载荷增加,提升结构的稳定性。

关键词 玻/碳纤维混杂复合材料,轴向压缩,薄壁圆筒,屈曲载荷

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.04.005

Buckling Analysis of Thin-walled Cylinder of Glass/Carbon Fiber Hybrid Composites Under Axial Pressure

WANG Qiangqiang SUN Shuangshuang ZHANG Zhe

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061)

Abstract Thin-walled cylindrical structures were prone to buckling under axial compression. In this paper, the thin-walled cylinders made of glass/carbon fiber hybrid composites (G/CFHC) were taken as the object of study, six lay-up sequences were designed, and with the help of ABAQUS finite element analysis software, the effects of the position of the single-layer carbon fiber composite boards, the thickness of lay-ups, and the mixing ratio of the glass/carbon fibers on the buckling loads of the thin-walled cylinders made of G/CFHC were designed. The results show that under the same layup angle, the change of the position of the single-layer carbon fiber plate will lead to the change of the structural buckling load, and for the unidirectional layup of G/CFHC thin-walled cylinders, the influence on the buckling load is consistent, the maximum buckling load occurs in the single-layer carbon fiber plate located in the outermost layer, and the increase of the single-layer carbon fiber plate in the multi-directional layup even makes the structural buckling load decrease. For the different layup sequences of the thin-walled cylinders, the corresponding buckling load increases gradually with the increase of the layup thickness. When the thickness and the number of layers of the structure are certain, the increase of the single-layer carbon fiber composite and the reasonable change of the mixing method of the glass/carbon fibers will increase the buckling critical load of the structure and improve the stability of the structure.

Key words Glass/carbon fiber hybrid composites, Axial compression, Thin-walled cylinders, Buckling loads

收稿日期:2024-05-29

基金项目:山东省自然科学基金(No. ZR2014AL011)

第一作者简介:王强强,1997年出生,硕士研究生,主要从事复合材料结构与力学性能方面的研究工作。E-mail:wqq19972022@163.com

通信作者:孙双双,1971年出生,博士,教授,主要从事复合材料力学、智能材料与结构、结构振动与控制等方面的研究工作。E-mail:sunkira2011@163.com。

0 引言

复合材料以其质量轻、比强度和刚度好、良好的散热特性、便于大量生产等优点,被广泛应用于宇航、造船、兵器、石油、医药等领域^[1]。最常见的复合材料是玻璃纤维复合材料(GFRP)和碳纤维复合材料(CFRP),为了综合这两种复合材料的优点,纤维混合复合材料得以开发并利用,玻璃/碳纤维复合材料(G/CFHC)具有更高的强度,更坚固的结构,和更高的抗冲击能力^[2-3]。复合材料薄壁管因其具有几何轴对称和优异的力学性能被广泛关注,在飞机、潜艇、高铁等领域广泛应用,此外在复合材料薄壁管设计时,对其稳定性要求高于强度和刚度要求^[4]。在复合材料薄壁结构的工程应用中,最大限度地提高临界屈曲载荷,确保其在各种工作环境中的稳定性,以免造成安全事故和经济损失。

国内外学者对复合材料薄壁圆筒的稳定性研究进行了大量工作。田春雷等^[5]对CFRP层合圆筒进行轴向压缩试验,并利用ANSYS有限元分析软件进行了数值模拟,分别讨论了长径比、端部加强等因素对结构抗压稳定性的影响。MILLER B等^[6]分析了单层复合材料的铺层角度对复合材料薄壁圆筒的屈曲载荷的影响,并使用遗传算法对叠层顺序进行了优化研究。SOLAZZI L^[7]研究了正交各向异性复合材料薄壁圆柱壳的屈曲载荷的可变性,考虑几何参数(半径、厚度)和材料性能(弹性模量等)等因素对结构临界屈曲载荷的影响。在计算临界屈曲载荷时考虑了纤维取向,并通过有限元分析估算了临界屈曲载荷。薛晓敏等^[8]对玻璃纤维增强树脂基复合材料圆管进行了轴向压缩稳定性实验研究,并对屈曲稳定性计算公式加以改进。ZHOU J^[9]对复合薄壁加筋结构进行轴压稳定性试验研究,采用电阻应变仪、数字散斑相关法和有限元法对结构屈曲载荷进行测试分析,并从荷载应变结果、荷载位移结果和试验计算结果进行了描述。BISAGNI C^[10]对三个复合圆柱壳进行了静力屈曲实验,研究了薄壁圆柱壳在静、动两种轴压条件下的受力特性。ZHANG L^[11]采用拉挤和缠绕相结合的方法制备了一种新型的GFRP柱壳并对其进行了轴向压缩试验。SINGER J等人^[12]中对壳体屈曲试验和常用的实验方法进行了很好的概述,而TAKANO A^[13]则对各向异性薄壁圆柱体屈曲试验进行了总结。郑志才等^[14]对CFRP薄壁圆管进行了轴向压缩试验,分析了不同树脂含量、环向/纵向铺层比和端部结构对薄壁圆管稳定性的影响。钱鹏等^[15]对GFRP薄壁管进行了轴压实验,得到了结构的基本力学性能参数,并讨论了不同长细比对结构屈曲稳定性的影响。黄春芳等^[16]采用三种不同厚度的单层复合材料预浸料制备了薄壁圆管,分析了铺层厚度对结构屈曲载荷的影响。

通过对国内外相关文献的查阅发现,在复合材料薄壁圆筒的研究中,对单一纤维复合材料进行了研究,关于混杂纤维复合材料薄壁圆筒屈曲的研究鲜有报道,此外关于薄壁圆筒的研究大多为实验研究,只有少部分学者利用有限元分析软件进行分析,对薄壁圆筒结构分析比较单一,且大多考虑外部因素或者材料本身尺寸的变化对结构屈曲载荷的影响,结构本身的内部因素对于屈曲载荷的影响规律研究较少。本文将借助ABAQUS有限元分析软件以G/CFHC薄壁圆筒为研究对象,计算结构的屈曲载荷,将研究铺层顺序、单层碳纤维复合材料板位置、铺层厚度、混杂比等因素对复合材料薄壁结构屈曲载荷的影响。

1 理论分析

1.1 解析分析

以玻/碳纤维混杂复合材料薄壁圆筒为研究对象,该薄壁圆筒的长度为 L ,内径为 R ,薄壁圆筒的厚度为 t ,承受轴向压缩载荷 P 作用,底端固定约束,复合材料薄壁圆筒示意图如图1所示。

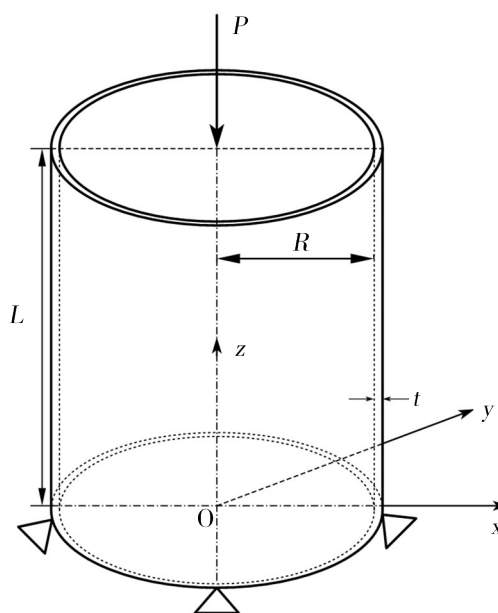


图1 复合材料薄壁圆筒示意图

Fig. 1 Schematic diagram of composite thin-walled cylinder

由文献[17]可知,对于承受轴压载荷 P 作用的薄壁圆筒,会在壳带两端产生轴向压力 N_x 。

$$N_x = \sigma_x t, N_x = \frac{nPR}{2} \quad (1)$$

式中, n 为积分系数。

对没有初始弯曲的圆柱壳,当屈曲发生时:

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{S_{12}^{eq}}{S_{22}^{eq}} \right) \quad (2)$$

式中, $S_{ij}^{eq}(i,j=1,2,6)$ 为层合板等效柔度系数。

薄壁圆筒上下表面单位长度上的均布载荷为:

$$q_z = \frac{\omega t}{R^2 \xi} - \frac{\eta N_x}{\xi R} \quad (3)$$

式中, ω 为 y 方向的挠度。

$$\xi = S_{22}^{\text{eq}} + \frac{S_{22}^{\text{eq}} K_{16}^{\text{eq}} S_{12}^{\text{eq}}}{1 - S_{16}^{\text{eq}} K_{16}^{\text{eq}}}, \quad \eta = S_{21}^{\text{eq}} + \frac{S_{26}^{\text{eq}} K_{16}^{\text{eq}} S_{11}^{\text{eq}}}{1 - S_{16}^{\text{eq}} K_{16}^{\text{eq}}} \quad (4)$$

式中, $K_{ij}^{\text{eq}} (i, j=1, 2, 6)$ 为层合板等效柔度刚度系数。

复合材料薄壁圆筒的弯曲平衡方程^[18]:

$$D\omega''(x) + N_x \omega(x) = -\frac{q_z L^2}{8} \left[1 - \left(\frac{2x}{L} \right)^2 \right] \quad (5)$$

对式(5)进行两次微分可得:

$$D\omega^{(4)}(x) + N_x \omega''(x) = q_z \quad (6)$$

将式(3)代入式(6)得:

$$D\omega^{(4)}(x) + N_x \omega''(x) + \frac{t\omega}{R^2 \xi} = \frac{\eta N_x}{\xi R} \quad (7)$$

令 $\omega = \omega_1 + \frac{\eta N_x}{\xi R K}$, $K = \frac{t}{R^2 \xi}$, 得

$$D\omega_1^{(4)}(x) + N_x \omega_1''(x) + K\omega_1 = 0 \quad (8)$$

求解可得:

$$N_x = 2\sqrt{DK} \quad (9)$$

将 $D = D_{11} - \frac{B_{11}^2}{A_{11}}$ 代入式(9)可得:

$$N_x = 2\sqrt{\left(D_{11} - \frac{B_{11}^2}{A_{11}} \right) \frac{t}{R^2 \xi}} \quad (10)$$

式中, A_{ij} 为拉伸刚度系数, B_{ij} 为拉弯耦合刚度系数, D_{ij} 为弯曲刚度系数。

求解可得, 复合材料薄壁圆筒轴压局部屈曲载荷:

$$N_{\text{cr}} = N_x \frac{2\pi R}{n} = \frac{4\pi}{n} \sqrt{\left(D_{11} - \frac{B_{11}^2}{A_{11}} \right) \frac{t}{\xi}} \quad (11)$$

1.2 有限元软件分析

表2 G/CFHC 薄壁圆筒屈曲载荷结果对比

Tab. 2 Comparison of buckling load results for G/CFHC thin-walled cylinders

铺层顺序	A_{11}	B_{11}	D_{11}	有限元解 R_1/kN	解析解 R_2/kN	$\left \frac{R_1 - R_2}{R_1} \right \%$
$[0_c/0_c]_s$	80.674 9	0	6.060 3	44.644	43.580	2.38
$[90_c/90_c]_s$	7.498 5	0	0.373 3	45.820	47.449	3.56
$[45_c/-45_c/0_c/90_c]$	40.610 5	2.078 2	0.988 1	68.571	66.274	3.35

由表2可知有限元解与解析解吻合度良好, 验证了本文有限元模型的准确性。

(2)算例二: 选取文献[19], 该算例的复合材料圆柱壳为对称、正交铺层, 长度为 $a=2\,000\text{ mm}$, 半径 $R=750\text{ mm}$, 承受轴压载荷作用。铺层为 $[(0^\circ/90^\circ)_2]_s$, 以 0° 参考方向为长度方向, 单层复合材料的参数如表3所示。

在 ABAQUS 中, 线性屈曲分析以特征值为分析对象。利用特征值屈曲求解得到特征值 λ , λ 乘以所加载荷便为结构的临界屈曲载荷。临界屈曲载荷可以通过式(12)线性广义特征值方程求得:

$$(K_0 + \lambda K_\Delta) \nu = 0 \quad (12)$$

式中, K_0 为对应于基础状态的刚度矩阵, λ 为特征值, K_Δ 为几何刚度矩阵, ν 为特征向量。

1.3 有限元模型的建立与验证

采用 ABAQUS 有限元软件对玻/碳纤维混杂复合材料薄壁圆筒的屈曲载荷进行计算与分析。

将从以下三个算例对有限元模型的准确性和可靠性进行验证。

(1)算例一: 单向轴压作用下玻/碳纤维混杂复合材料薄壁圆筒的有限元解与解析解对比。

薄壁圆筒尺寸为高 $L=250\text{ mm}$, 半径 $R=50\text{ mm}$, 碳纤维复合材料层合板的厚度与玻璃纤维复合材料层合板的厚度均为 0.2 mm , 材料属性选自材料数据库 Altair ESAComp, 见表1所示。

表1 CFRP与GFRP材料参数
Tab. 1 CFRP & GFRP material parameters

材料	E_1/GPa	$E_2=E_3/\text{GPa}$	$G_{12}=G_{13}/\text{GPa}$	G_{23}/GPa	ν_{12}
CFRP	155	8.5	5.5	3.270	0.3
GFRP	45	10	5	3.846	0.3

为了验证本文有限元模型的准确性, 将利用 ABAQUS 求解出的有限元解与根据第1.1节解析理论模型利用 MATLAB 编程求解出的解析解进行对比。将表1材料属性分别代入有限元模型和解析理论模型, 得到见表2所示的临界屈曲载荷结果。

将表3中的材料参数代入 ABAQUS 有限元模型得到的临界屈曲载荷与文献结果进行比较。对比结果见表4所示。本文有限元模型的准确性得到再次验证。

(3)算例三: 在轴压载荷作用下 T300 碳纤维/901 环氧复合材料层合圆柱壳的屈曲载荷的有限元解与文献[16]解对比。

表3 T-300/914单层复合材料参数					
Tab. 3 Material parameters of T-300/914 single-ply composites					
材料	E_1 / GPa	$E_2=E_3$ / GPa	$G_{12}=G_{13}$ / GPa	G_{23} / GPa	ν_{12}
T-300/914 复合材料单层板	125.0	8.0	5.0	3.0	0.3

表4 屈曲载荷结果对比		
Tab. 4 Comparison of buckling load results		
本文有限元解 R_1 / kN	文献[19]解 R_2 / kN	$\left \frac{R_1 - R_2}{R_1} \right / \%$
250.23	246.60	1.45

算例采用三种不同厚度的单层板的复合材料多层薄壁圆筒,分别采用正交和均衡两种铺层方式,试件尺寸为长 100 mm,半径为 20 mm,T300/901 复合材料单层板的工程常数见表 5 所示。

表5 T-300/901 复合材料单层板材料参数					
Tab. 5 The material parameters of T-300/901 composite monolayer					
材料属性	E_1 / GPa	$E_2=E_3$ / GPa	$G_{12}=G_{13}$ / GPa	G_{23} /GPa	ν_{12}
T-300/901 复合材料单层板	121.0	8.6	4.7	3.1	0.27

将本算例的材料参数以及不同厚度的单层板分别代入有限元模型中,得到的计算结果和对比结果如表 6 所示。

表6 T-300/901 复合材料薄壁圆筒屈曲载荷的有限元计算结果与文献[16]结果对比				
Tab. 6 Comparison of finite element calculation results of flexural loading of thin-walled cylinders of T-300/901 composites with the results of literature[16]				
铺层方式	铺层	有限元解 R_1 /kN	文献[16]解 R_2 / kN	$\left \frac{R_1 - R_2}{R_1} \right / \%$
正交铺层	T-125	19.411	18.100	6.75
	T-55	26.370	25.200	4.44
	T-20	28.398	28.900	1.77
均衡铺层	T-125	20.307	19.700	2.99
	T-55	27.125	27.000	0.46
	T-20	27.440	28.900	5.32

由表 6 可以看出,在正交铺层中有限元解与文献解相比最大误差为 6.75%,最小为 1.77%;在均衡铺层中最大误差为 5.32%,最小仅为 0.46%,可以看出,本文有限元解和文献[16]解吻合良好。

2 结果与讨论

本文研究对象为 G/CFHC 薄壁圆筒,薄壁圆筒的宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025 年 第 4 期

几何尺寸为长 $L=250$ mm,半径 $R=50$ mm,单层板的厚度为 0.2 mm。材料属性选自材料数据库 Altair ESAComp,见上述表 1 所示。

对于承受轴向载荷的结构,为获得最高的屈曲载荷,可以优先将 45°层和 90°层铺设在表面^[20],因此本文设计六种铺层顺序,见表 7 所示。

表7 复合材料薄壁圆筒铺层方式和铺层顺序	
Tab. 7 Composite thin-walled cylinder layup method and layup sequence	
铺层方式	铺层顺序
单向铺层	A1[0°/0°/0°/0°]
	A2[90°/90°/90°/90°]
多向铺层	B1[45°/-45°/0°/90°]
	B2[90°/0°/0°/90°]
	C1[90°/0°/45°/-45°]
	C2[45°/-45°/45°/-45°]

2.1 碳纤维复合材料单层板位置对 G/CFHC 薄壁圆筒屈曲载荷的影响

主要研究对于不同的铺层顺序的碳纤维复合材料单层板的位置对 G/CFHC 薄壁圆筒屈曲载荷的影响。由于一阶屈曲载荷对结构具有最大影响,对每个铺层顺序和混杂方式下的一阶屈曲载荷进行研究。在单层碳纤维复合材料层合板位于不同位置时,利用 ABAQUS 计算出的有限元结果如表 8 所示。

结合表 8 可以看出,单层碳纤维复合材料层合板位置的改变对这六种铺层顺序的薄壁圆筒屈曲载荷均有较大影响。对于 A1、A2 两种单向铺设的薄壁圆筒,其屈曲载荷的影响规律是一致的,当碳板位置位于最外层时具有最大的临界屈曲载荷值,与玻璃纤维复合材料薄壁圆筒相比其临界屈曲载荷值分别增加了 18.0%、20.1%;当碳板位于第二层(由内向外铺层)具有最小屈曲载荷,但均比纯玻璃纤维复合材料薄壁圆筒屈曲载荷要高。对于多向铺设的薄壁圆筒,当存在 45°层和-45°层且数目相同的情况下,无论碳板位置位于 45°层还是-45°层,对整体的屈曲载荷均有非常大的影响,对于同一铺层顺序下,其对应的屈曲载荷值均小于玻璃纤维复合材料薄壁圆筒的屈曲载荷值如 B1、C1、C2,当碳板位置位于 0°层和 90°层时,其临界屈曲载荷均会提高;当铺层顺序为 B1、碳板位置在最外层时其整体的屈曲载荷值最大,远高于其他几种铺层顺序下的最大屈曲载荷;当铺层顺序为 B2,碳板位置位于最外层时与纯玻璃纤维复合材料薄壁圆筒相比,屈曲载荷值增幅最高,达到了 29.1%。

表 8 不同混杂方式下的屈曲载荷
Tab. 8 Buckling loads for different mixing methods

铺层顺序	混杂方式	屈曲载荷/kN	增幅/%
A1	G G G G	35.753	18.0
	C G G G	37.262	
	G C G G	36.518	
	G G C G	37.946	
	G G G C	42.196	
A2	G G G G	36.010	20.1
	C G G G	37.351	
	G C G G	36.840	
	G G C G	38.624	
	G G G C	43.259	
B1	G G G G	44.094	16.7
	C G G G	37.888	
	G C G G	27.641	
	G G C G	47.052	
	G G G C	51.440	
B2	G G G G	37.442	29.1
	C G G G	38.217	
	G C G G	39.244	
	G G C G	41.329	
	G G G C	48.338	
C1	G G G G	36.902	3.8
	C G G G	37.738	
	G C G G	38.319	
	G G C G	26.086	
	G G G C	31.903	
C2	G G G G	39.426	-8.0
	C G G G	36.276	
	G C G G	32.215	
	G G C G	33.758	
	G G G C	35.714	

2.2 铺层厚度对 G/CFHC 薄壁圆筒屈曲载荷的影响

圆筒结构而言,壁厚是影响结构稳定性的重要参数。基于 1.1 分析中的结论,取 A1,A2,B1,B2 四种铺层顺序,考虑单层碳纤维复合材料层合板位置的影响,取具有最大屈曲载荷的四个混杂铺层顺序为研究对象。为研究铺层厚度对薄壁圆筒屈曲载荷的影响,本文将考虑堆砌([_n]型)和均衡([_n]型)两种铺层方式研究其对结构屈曲稳定性的影响。有限元仿真结果如表 9 所示。

表 9 不同铺层厚度下薄壁圆筒的屈曲载荷
Tab. 9 Buckling loads of thin-walled cylinders with different layup thicknesses

铺层方式	混杂铺层顺序	层数(n=1,2,3,4)	屈曲载荷/kN
堆砌铺层[_n]型	[0 _{nG} /0 _{nG} /0 _{nG} /0 _{nG}]	1	42.196
		2	162.577
		3	352.393
		4	614.131
	[90 _{nG} /90 _{nG} /90 _{nG} /90 _{nG}]	1	43.259
		2	171.020
		3	379.483
		4	680.098
	[45 _{nG} /-45 _{nG} /0 _{nG} /90 _{nG}]	1	51.438
		2	205.044
		3	458.614
		4	810.276
	[90 _{nG} /0 _{nG} /0 _{nG} /90 _{nG}]	1	48.337
		2	190.863
		3	422.315
		4	748.815
均衡铺层[_n]型	[0 _G /0 _G /0 _G /0 _C] _n	1	42.196
		2	157.982
		3	340.835
		4	599.593
	[90 _G /90 _G /90 _G /90 _C] _n	1	43.259
		2	164.409
		3	359.242
		4	639.400
	[45 _G /-45 _G /0 _G /90 _C] _n	1	51.438
		2	258.250
		3	560.501
		4	990.071
	[90 _G /0 _G /0 _G /90 _C] _n	1	48.337
		2	194.869
		3	423.543
		4	733.616

由表 9 可以看出,随着铺层厚度的增加,G/CFHC 薄壁圆筒屈曲载荷逐渐增加,且增幅逐渐升高。在单向铺设中,在相同的铺层数目下,堆砌铺层对应的屈曲载荷值总要高于均衡铺层,且在铺层厚度和铺层方式相同的情况下,两种单向铺设下的屈曲载荷值相差不大。在相同的铺层厚度下,铺层角度[45°/

-45°、0°、90°c]相比于其他三组具有最大屈曲载荷,且远高于其他三组,均衡铺层对应的屈曲载荷要极大高于堆砌铺层对应的屈曲载荷。对于只存在0°和90°铺层角,在同一铺层厚度下,堆砌铺层和均衡铺层对薄壁圆筒结构屈曲载荷影响规律一致。通过以上数据可以看出,铺层厚度对结构的屈曲稳定性影响很大,铺层方式对其也有很大影响。

2.3 混杂比对G/CFHC薄壁圆筒屈曲载荷的影响

对于混杂复合材料结构而言,混杂比对结构屈曲载荷有重要影响,本文改变混杂比是通过改变碳纤维单层板的层数。取1.1中A1,A2,B1,B2四种铺层顺序研究混杂比的影响。利用ABAQUS有限元软件计算每个混杂比下的屈曲载荷,将同一混杂比下最大屈曲载荷进行分析,对应的混杂方式和屈曲载荷见表10所示。

表10 不同混杂比下G/CFHC薄壁圆筒的屈曲载荷
Tab. 10 Buckling loads of G/CFHC thin-walled cylinders with different mixing ratios

铺层角度	混杂比(C:G)	混杂方式	屈曲载荷/kN
[0°/0°/0°/0°]	0:1	GGGG	35.753
	1:3	GGGC	42.196
	1:1	CGGC	44.644
	3:1	CGCC	46.104
	1:0	CCCC	46.792
[90°/90°/90°/90°]	0:1	GGGG	36.010
	1:3	GGGC	43.259
	1:1	CGGC	45.820
	3:1	CGCC	47.514
	1:0	CCCC	48.212
[45°/-45°/0°/90°]	0:1	GGGG	44.094
	1:3	GGGC	51.438
	1:1	GGCC	68.571
	3:1	CGCC	80.385
	1:0	CCCC	94.119
[90°/0°/0°/90°]	0:1	GGGG	37.442
	1:3	GGGC	48.337
	1:1	GGCC	54.418
	3:1	GCCC	58.028
	1:0	CCCC	60.075

由表10可知,随着碳纤维单层板层数的增加,G/CFHC薄壁圆筒屈曲载荷不断提高。在不同的铺层角度下,对于混杂比相同的情况下,其取得最大屈曲载荷所对应的混杂方式并不一定相同,例如铺层角度为[0°/0°/0°/0°]和[45°/-45°/0°/90°]。在同一混杂宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 第4期

比下,相比于其他铺层角度,铺层角度[45°/-45°/0°/90°]总有最大屈曲载荷。翻倍增加碳纤维单层板数量,并未使得结构屈曲载荷翻倍提升,碳纤维单层板数量从0到1时效率最高,因此,若考虑经济效益,可以增加单层碳板,此时对结构稳定性的提升效率最高,在本文中对应的混杂比为C:G=1:3。且在相同的混杂比下,铺层角度对结构的稳定性影响也很大,就本文而言,[45°/-45°/0°/90°]铺层角度便是最优选择,相同材料用量情况下,结构稳定性最佳。

3 结论

(1)通过设计合理的铺层角度,改变单层碳板的位置,会使得结构整体的屈曲载荷有着很大的提升,若铺层角度不合理,即便改变单层碳板位置影响也不大,甚至会使得结构稳定性降低。

(2)结构的屈曲载荷随着铺层厚度的增加逐渐增大,并且增幅逐渐增大,通过改变铺层方式也会使得结构的屈曲载荷有着较大的差别。且对于不同的铺层角度,铺层厚度对结构的屈曲稳定性影响程度并不相等,但均会使得结构的屈曲载荷提高,提升结构的稳定性。

(3)在混杂比相同的情况下,由于混杂方式的不同,结构的屈曲载荷也有很大差别。合理的混杂方式下,随着碳纤维单层板数量的提升,结构的屈曲载荷也会提升。混杂比一定的情况下,铺层角度对结构的屈曲载荷影响也很大,甚至在C:G小的情况下,具有更好的屈曲承载能力。

(4)在材料用量一致的情况下,合理调整铺层角度也能够很大程度提高复合材料结构的屈曲承载能力。就本文研究而言,最佳铺层角度为[45°/-45°/0°/90°],无论是研究单层碳板位置、铺层厚度、铺层方式还是混杂比,其均有最佳表现。

参考文献

[1] 沈观林,胡更,开刘彬. 复合材料力学(第2版)[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
SHEN Guanlin, HU Geng, KAI Liubin. Mechanics of Composite Materials (Second Edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Prss, 2013.
[2] SHARMA K K, KUSHWAHA J, KUMAR K, et al. Fabrication and testing of hybrid fibre reinforced composite: A comprehensive review [J]. Australian Journal of Mechanical Engineering, 2023, 21(05): 1547-1563.
[3] 刘锦程,邱睿,曹清林. 碳/玻混杂纤维复合材料力学性能与失效机理研究[J]. 化工新型材料, 2022, 50(11): 153-157, 162.
LIU Jincheng, QIU Rui, CAO Qinglin. Study on mechanical properties and failure mechanism of carbon/glass hybrid fiber composites [J]. New Chemical Materials, 2022, 50(11): 153-

157,162.

[4] 王博,郝鹏,田阔,等. 航空航天结构轻量化设计与实验方法研究进展[J]. 宇航学报,2023,44(04):596-606.

WANG Bo, HAO Peng, TIAN Kuo, et al. Advances in lightweight design and experimental methods for aerospace structures[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(04): 596-606.

[5] 田春雷,皮爱国,黄风雷. CFRP复合材料层合圆筒轴向压缩试验与数值模拟[J]. 复合材料学报,2013,30(02):159-164.

TIAN Chunlei, PI Aiguo, HUANG Fenglei. Experimental and numerical study on CFRP tubes under axial crushing [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(02): 159-164.

[6] MILLER B, ZIEMIAŃSKI L. Optimization of dynamic and buckling behavior of thin-walled composite cylinder, supported by nature-inspired algorithms [J]. Materials, 2020, 13 (23):5414.

[7] SOLAZZI L. Reliability evaluation of critical local buckling load on the thin walled cylindrical shell made of composite material [J]. Composite Structures, 2022, 284: 115163.

[8] 薛晓敏,孙清,王虎长,等. 玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料受压管件稳定性试验及理论研究[J]. 工程力学, 2013,30(09):251-258.

XUE Xiaomin, SUN Qing, WANG Huchang, et al. Experimental and theoretical study on stability of slender components made from glass fiber/epoxy composite material [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(09): 251-258.

[9] ZHOU J, CHEN L, BAI L, et al. Test and analysis of axial compression stability of composite thin-walled reinforced structures [C]//Seventh Symposium on Novel Photoelectric Detection Technology and Applications, SPIE, Kunming, China, 2021, 11763:1302-1308.

[10] BISAGNI C. Composite cylindrical shells under static and dynamic axial loading: An experimental campaign [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2015, 78: 107-115.

[11] ZHANG L, ZHAO Q, HUANG Y, et al. Manufacturing and axial compression performance of a novel composite cylindrical shell [J]. Polymer Composites, 2022, 43 (06): 4056-4071.

[12] SINGER J, ARBOCZ J, WELLER T. Buckling Experiments: Experimental Methods in Buckling of Thin-walled

Structures, Volume 2: Shells, Built-up Structures, Composites and Additional Topics [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2002.

[13] TAKANO A. Statistical knockdown factors of buckling anisotropic cylinders under axial compression [J]. Journal of Applied Mechanics, 2012, 79(05): 1-17

[14] 郑志才,孙士祥,陈艳,等. 碳纤维复合材料薄壁管的制备及其轴向压缩性能研究[J]. 工程塑料应用, 2008, 36 (04):44-47.

ZHENG Zhicai, SUN Shixiang, CHEN Yan, et al. Preparation and axial compressive properties of thin-wall pipe of carbon fiber composite [J]. Engineering Plastics Application, 2008, 36(04): 44-47.

[15] 钱鹏,冯鹏,叶列平. GFRP管轴心受压性能的试验研究[J]. 天津大学学报, 2007, 40(01): 19-23.

QIAN Peng, FENG Peng, YE Lieping. Experimental study on GFRP pipes under axial compression [J]. Transactions of Tianjin University, 2007, 40(01): 19-23.

[16] 黄春芳,肖加余,黄展鸿,等. 薄铺层复合材料薄壁管轴压屈曲行为研究[J]. 工程科学学报, 2018, 40(07): 857-863.

HUANG Chunfang, XIAO Jiayu, HUANG Zhanhong, et al. Buckling of composite cylindrical shells fabricated using thin-ply under axial compression [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(07): 857-863.

[17] LUO P, LUO H, TONG F. The influence of prebuckling deformations and stresses on the buckling of the spherical shell [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2013, 1(04): 284-292.

[18] 朱锐杰,李峰,张恒铭. 基于弹性基础梁理论的复合材料薄壁圆柱壳屈曲承载力模型[J]. 复合材料学报, 2017, 34 (08):1745-1753.

ZHU Ruijie, LI Feng, ZHANG Hengming. A model for critical buckling load of thin composite tube based on elastic foundation beam theory [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(08): 1745-1753.

[19] 闫光. 轴压载荷下复合材料层合圆柱壳的设计与试验研究[D]. 吉林:吉林大学, 2013.

YAN Guang. The Design and Experimental Study of Composite Cylindrical Shell Under Axial Compressive Load [D]. Jilin: Jilin University, 2013.