

夹层复合材料圆柱壳表层的缠绕优化

陈悦¹ 李华东² 朱锡² 朱子旭²

(1 海军工程大学勤务学院,天津 300450)

(2 海军工程大学舰船工程系,武汉 430033)

文 摘 以平衡型稳定网络为约束条件,以等强度和提高临界失稳载荷为设计目标,对夹层复合材料圆柱壳体的缠绕表层进行了优化研究。首先,基于等强度设计,得到表层的最优缠绕方式为螺旋加环型缠绕,且螺旋缠绕角应满足 $\alpha \leq 54.7^\circ$;其次,以结构强度及稳定性为双重指标,采用 ABAQUS 建立有限元模型,求解不同长径比的夹层复合材料圆柱壳的最优螺旋缠绕角 α_{opt} 。研究发现:当长径比 $0.5 \leq \eta \leq 3$ 时,随 η 增加,表层的最优缠绕方式从单一螺旋加环型缠绕过渡至纵向铺放加环向缠绕,且最大临界失稳载荷 P_{cr} 近似呈二次递减关系。该优化方法不仅可达到轻量化要求,而且满足结构强度和稳定性双重指标。

关键词 复合材料,缠绕,夹层圆柱壳,优化

中图分类号:TB332.1

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.03.006

Surface Layer Optimization of Filament-Wound Sandwich Composite Cylinder

CHEN Yue¹ LI Huadong² ZHU Xi² ZHU Zixu²

(1 Service College, Naval University of Engineering, Tianjin 300450)

(2 Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430003)

Abstract Based on the balanced stable network as constraint conditions, with equal strength designing and improving the critical buckling load as the design goals, wound surface of sandwich composite cylinder was optimized. Firstly, based on equal strength design method, the optimal winding pattern and winding angles of spiral winding were obtained. The winding angle should satisfy $\alpha \leq 54.7^\circ$. Secondly, in order to meet the need of structural strength and stability, stability models with different aspect ratio are established using ABAQUS finite element software to obtain the α_{opt} . The study has found that when the aspect ratio $0.5 \leq \eta \leq 3$, with the increase of η , the best way transited from a single wound spiral wound ring plus hoop wound to the longitudinal placement plus hoop wound, while the maximum critical buckling load is approximately decreasing in quadratic relationship. The optimization method can not only achieve weight reduction requirements, but also meet the dual indicators of structural strength and stability.

Key words Composite, Filament-wound, Sandwich cylinder, Optimal

0 引言

夹层复合材料圆柱壳广泛应用于航空航天、海洋等领域,其表层蒙皮常采用缠绕成型,形成平衡型网络结构,以利于发挥纤维的纵向强度。国内外对缠绕复合材料圆柱壳开展的相关研究有:基于网络理论,陈汝训^[1]推导了纤维缠绕壳体圆筒壁厚和爆破压强的理论解,与试验结果吻合良好;谭三五^[2]开发了纤维缠绕壳体可靠性数字仿真方法及程序;胡宽^[3]以壳体质量为目标,利用线性多步法和复形调优法,优

化设计固体发动机纤维壳体,指出比强度是影响纤维壳体质量的最重要因素;栾宇^[4]采用蚁群算法(ACA)对缠绕层顺序进行优化,并开发缠绕复合材料壳体铺层顺序优化程序系统,实现壳体结构的稳定性优化设计;祖磊^[5]基于薄膜理论和网络理论,给出均衡缠绕线型的确定方法,并利用序列二次规划算法(SQP)求得不同爆破压强下各项最优均衡缠绕参数;Cheol-Ung Kim^[6]考虑了纤维与心轴表面滑动及缠绕工艺的可靠性,采用半最短曲率路径算法,对内压容

收稿日期:2016-07-18;修回日期:2016-12-30

基金项目:国家部委基金资助项目(9140A14080914JB11044);海军工程大学自然科学基金

第一作者简介:陈悦,1989年出生,博士研究生,主要从事船用复合材料及其应用研究。E-mail:chenyue322@126.com

通信作者:李华东,1984年出生,讲师,主要从事复合材料结构设计与应用研究,E-mail:lhd0727@163.com

器的缠绕方式进行优化。

目前大部分优化设计均为满足壳体强度前提下,达到质量最轻量化,或以提高极限承载、爆破压力为优化目标,较少考虑结构稳定性问题。本文以夹层复合材料圆柱壳的缠绕表层为研究对象,首先基于网络理论,以平衡型稳定缠绕为约束,依据等强度设计理念,得到表层缠绕方式和缠绕角度的优化解;其次,采用 ABAQUS 有限元软件,建立结构稳定性计算模型,以提高临界失稳载荷为优化目标,求解满足结构强度及稳定性的最优缠绕方式及缠绕角度。

1 基于等强度和稳定性的设计方法

1.1 设计思路

纤维缠绕的主要网络单元有 4 种,即单一螺旋型、螺旋加环型、螺旋加纵向型、纵向加环型,考虑到工程应用条件,本文仅对单一螺旋缠绕和螺旋加环型两种缠绕方式进行最优化设计。

设计分两步走:第一步,基于平衡型网络理论,以等强度设计为目标,得到满足结构强度要求的缠绕方式、缠绕层厚度、缠绕角度等参数,此时对应的结果并非唯一解;第二步,在满足等强度设计的基础上,采用有限元软件,建立结构稳定性计算模型,以提高最大临界失稳载荷为目标,得到同时满足结构强度及稳定性要求的最优解,具体流程见图 1。

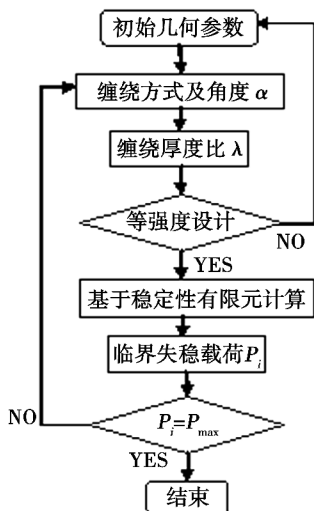


图 1 圆柱壳体表层最优缠绕设计流程

Fig.1 Optimal design process of filament-wound cylinder surface

1.2 实施步骤

对于均匀静水压力载荷作用下,采用螺旋加环向缠绕的复合材料夹层耐压圆柱壳,设螺旋缠绕角度为 $\pm\alpha$,环向缠绕角度为 $\pi/2$ 。取壳体的轴向坐标为 z ,环向坐标为 θ ,分别平行于 θ 和 z 方向切取单位长度的网络单元^[8]。

由平衡方程得,圆柱壳体的轴向和环向薄膜内力为:

$$\begin{cases} N_z = \frac{pR}{2} \\ N_\theta = pR \end{cases} \quad (1)$$

式中, R 为圆柱壳体半径, p 为均布压力的大小。

因芯材的模量远远低于表层碳纤维复合材料,忽略芯材对表层纤维应力的影响。当网络单元处于平衡状态时,则纤维张力与薄膜内力必须满足如下关系:

$$\begin{cases} N_z = \sigma_{f\alpha} h_{f\alpha} \cos^2 \alpha \\ N_\theta = \sigma_{f\alpha} h_{f\alpha} \sin^2 \alpha + \sigma_{f\theta} h_{f\theta} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\sigma_{f\alpha}$ 为螺旋缠绕纤维应力, $\sigma_{f\theta}$ 为环向缠绕纤维应力, $h_{f\alpha}$ 为螺旋缠绕纤维厚度, $h_{f\theta}$ 为环向缠绕纤维厚度。

平衡型应变状态时, $\varepsilon_{f\alpha} = \varepsilon_{f\theta} = \varepsilon$,所以 $\sigma_{f\alpha} = \sigma_{f\theta}$ 。此时式子(2)变为:

$$\begin{cases} N_z = \sigma_f h_{f\alpha} \cos^2 \alpha \\ N_\theta = \sigma_f (h_{f\alpha} \sin^2 \alpha + h_{f\theta}) \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)中的两式相除,得螺旋加环向缠绕网络的平衡条件:

$$\eta = \frac{N_\theta}{N_z} = \frac{\sin^2 \alpha + \lambda_{\theta z}}{\cos^2 \alpha} \quad (4)$$

式中, $\lambda_{\theta z}$ 为环向纤维与螺旋向纤维厚度比。记内力比 $\eta = N_\theta/N_z$,由式(4)得纤维厚度比为:

$$\lambda_{\theta z} = \frac{h_{f\theta}}{h_{f\alpha}} = (\eta + 1) \cos^2 \alpha - 1 \quad (5)$$

对于均匀外压力作用下的圆筒 $\eta = 2$,且由于厚度不能为负值,即 $\lambda_{\theta z} > 0$,故 $\cos \alpha \geq 1/\sqrt{3}$,即必须有 $\alpha \leq 54.7^\circ$ 。特别的,当 $h_{f\theta} = 0$ 时,即为单一螺旋缠绕,此时平衡型缠绕角度为 $\alpha = 54.7^\circ$ 。

由等强度设计理论知,纤维所受的应力:

$$\sigma = \sigma_{f\theta} = \sigma_{f\alpha} = \frac{N_z}{h_{f\alpha} \cos^2 \alpha} \quad (6)$$

在静水外压 p 作用下的纤维应力为:

$$\sigma_f = \frac{Rp}{2h_{f\alpha} \cos^2 \alpha} \quad (7)$$

设纤维断裂应力为 σ_b ,设计的结构承载压力为 p_b ,则圆筒的螺旋缠绕纤维厚度为:

$$h_{fa} = \frac{Rp_b}{2\sigma_b \cos^2 \alpha} \quad (8)$$

环向缠绕层厚度为:

$$h_{\theta a} = \lambda_{\theta z} h_{f\alpha} = \frac{Rp_b}{2\sigma_b} (2 - \tan^2 \alpha) \quad (9)$$

若夹层复合材料圆柱壳体为对称结构,即上下表层厚度各为 $h_f/2$,若采用单一螺旋型缠绕,可知其平衡缠绕角为 54.7° ,上下表层的厚度各为 $\frac{3Rp_b}{4\sigma_b}$ 。

对于夹层复合材料圆柱壳体表层,以平衡型网络结构为约束,考虑工艺可靠性,由等强度设计法得到的最优缠绕方式为螺旋加环型缠绕,缠绕角应满足 $\alpha \leq 54.7^\circ$,对应的螺旋缠绕和环向缠绕的厚度可由式(8)、式(9)确定。以上方法中,缠绕角 α 并非唯一

解,其最优角度可通过稳定性分析进行确定。采用有限元软件,建立结构稳定性计算模型,以提高最大临界失稳载荷为目标,通过复形调优法,得到同时满足结构强度及稳定性的最优缠绕方式及角度。

2 算例

某复合材料夹层圆柱壳直径 $D=553\text{ mm}$,表层复合材料体系为 EM301 树脂及 HF10-12K 型 T300 碳纤维,采用湿法缠绕工艺成型,内外蒙皮各缠绕四层。由该材料体系制备单向板进行材料力学性能测试(表 1)。芯层为高强浮体填充材料 HW055,弹性模量为 970 MPa ,泊松比为 0.3 。

定义长径比 $\eta=L/D$,采用有限元软件 ABAQUS 建立 $\eta=1,2,3$ 的复合材料夹层圆柱壳结构模型(图

2)。芯层采用实体单元 C3D8R 模拟,表层采用连续壳单元 SC8R 模拟,模型底部约束轴向位移及两个转角的自由度($U_3=UR_1=UR_2=0$),顶部采用 MPC 技术将顶部端面与参考点 RF 等效约束,同时约束轴向位移及三个转角的自由度($U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$),施加均匀静水外压,顶部于 MPC 参考点施加等效轴向集中力载荷,边界条件和载荷设计见图 3。

表 1 表层材料 HF10/EM301 力学性能

Tab.1 Mechanical properties of surface material HF10/EM301

纵向压缩 模量/GPa	横向压缩 模量/GPa	面内剪切 模量/GPa	纵向压缩 强度/MPa	横向压缩 强度/MPa	面内剪切 强度/MPa
111	8.67	4	1132	185	82.8

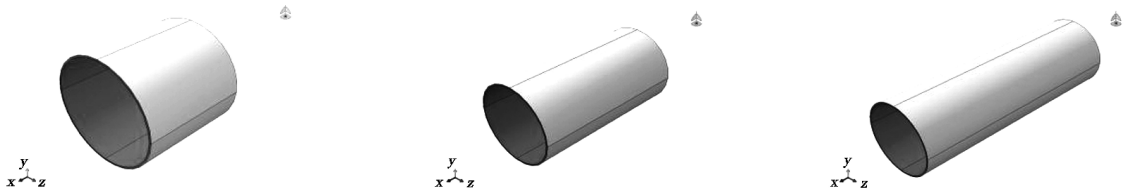


图 2 夹层复合材料圆柱壳体模型($\eta=1,2,3$)

Fig.2 Finite models of sandwich composite cylinders with different η

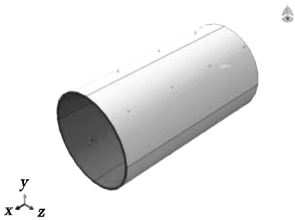


图 3 边界条件与载荷设计

Fig.3 Boundary conditions and load design

2.1 不同缠绕角度下的最优缠绕方式

对于螺旋加环向缠绕及单一螺旋缠绕复合材料圆柱壳,当缠绕角 $\alpha \leq 54.7^\circ$ 时,结构满足平衡型网络要求。由式(8)、(9),计算不同缠绕角 α 所对应的螺旋缠绕与环向缠绕厚度比例,如表 2 所示。

表 2 不同缠绕角对应的缠绕方式

Tab.2 Winding pattern changing over different winding angle

编号	缠绕角 $\alpha/(^\circ)$	纤维铺层比例	
		90°方向	$\pm\alpha$ 方向
1	0	0.66	0.34
2	5	0.66	0.34
3	10	0.66	0.34
4	15	0.64	0.36
5	20	0.62	0.38
6	25	0.59	0.41
7	30	0.56	0.44
8	35	0.5	0.5
9	40	0.43	0.57
10	45	0.33	0.67
11	50	0.19	0.81
12	54.7	0	1

采用有限元软件 ABAQUS,建立结构稳定性计算模型,分别计算采用上述缠绕方式的复合材料圆柱壳在静水外压作用下的临界失稳载荷,并绘制 $\eta=1,2,3$ 的复合材料夹层圆柱壳失稳载荷 p_{cr} 随螺旋缠绕角 α_p 的变化规律曲线(图 4)。由图 4 可知:对于长径比 $\eta=1,2,3$ 的复合材料圆柱壳,最优化缠绕角度 α_p 分别为 $50^\circ, 30^\circ, 0^\circ$ 。对于 $\eta=1$ 圆柱壳,随缠绕角度增加,最大临界屈曲载荷也增加,故最优缠绕方式应接近于单一螺旋缠绕, $\alpha_p = 54.7^\circ$;对于 $\eta=3$ 圆柱壳,随缠绕角度增加,最大临界失稳载荷呈下降趋势,故最优缠绕方式应接近于纵向铺放加环向缠绕,但此缠绕方式为工艺带来难度,从耐压圆柱壳体稳定性角度考虑,建议圆柱壳体长径比不宜过大,当长径比较大时,需考虑增加舱壁或肋骨以便于缠绕工艺的实施。

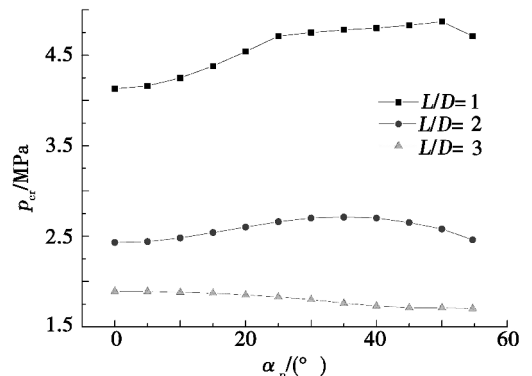


图 4 不同长径比圆柱壳失稳载荷随缠绕角变化曲线
Fig.4 Critical load changing over winding angle of cylinders with different η

2.2 任一长径比下的最优缠绕角

对于长径比 $0.5 \leq \eta \leq 3$ 的复合材料夹层圆柱壳, 采用 ABAQUS 建立结构稳定性有限元计算模型, 求解满足等强度要求的各缠绕方式所对应的临界失稳载荷, 通过复形调优反复迭代与选择, 得到出最大临界失稳载荷 p_{cr} 及最优螺旋缠绕方式, 如表 3 所示。其中, $\eta = 0.938$ 时, 对应圆柱壳长度 $L = 0.5$ m, $\eta = 1.867$ 时, 对应圆柱壳长度为 $L = 1$ m。最后, 绘制最优缠绕角度随长径比的变化规律 $\alpha_p - \eta$ 曲线及最大临界失稳载荷随长径比的变化规律 $p_{cr} - \eta$ 曲线, 见图 5、图 6。

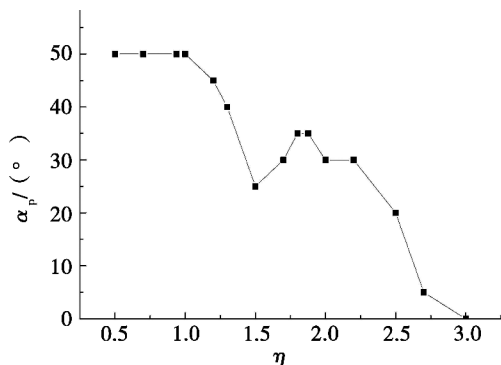


图 5 不同长径比圆柱壳体最优螺旋缠绕角度

Fig.5 Optimal winding angle changing over η

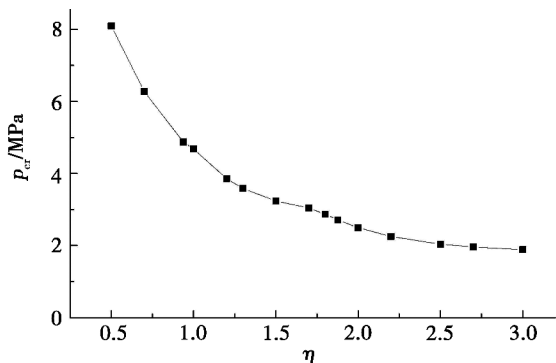


图 6 圆柱壳体失稳临界载荷随长径比变化曲线

Fig.6 Critical load changing over η

由图 5 知, 当 $0.5 \leq \eta \leq 3$ 时, 随长径比 η 增加, 圆柱壳表层最优螺旋缠绕角从 50° 逐渐变化至 0° , 最优缠绕方式从单一螺旋加环型缠绕 ($0^\circ \leq \alpha_p \leq 54.7^\circ$) 过渡至纵向铺放加环向缠绕 ($\alpha_p = 0^\circ$)。由图 6 知, 最大临界失稳载荷 p_{cr} 随长径比 η 的增加而减小, 近似呈

二次递减关系, 这与经典欧拉屈曲理论一致^[9]。

3 结论

通过对夹层复合材料圆柱壳的缠绕表层进行优化设计, 得到以下结论。

(1) 基于网络理论, 以平衡型稳定缠绕为约束, 采用结构等强度设计法, 得到表层的最优缠绕方式为螺旋加环型缠绕, 缠绕角应满足 $\alpha \leq 54.7^\circ$;

(2) 对于 $\eta = 1$ 圆柱壳, 随缠绕角度增加, 最大临界屈曲载荷增加, 最优缠绕方式应接近于单一螺旋缠绕, $\alpha_p \leq 54.7^\circ$; 对于 $\eta = 3$ 圆柱壳, 随缠绕角度增加, 最大临界失稳载荷呈下降趋势, 最优缠绕方式应接近于纵向铺放加环向缠绕, 但此缠绕方式为工艺带来难度, 故当长径比较大时, 需考虑增加舱壁或肋骨;

(3) 当 $0.5 \leq \eta \leq 3$ 时, 随长径比 η 增加, 最优缠绕方式从单一螺旋加环型缠绕 ($0^\circ \leq \alpha_p \leq 54.7^\circ$) 过渡至纵向铺放加环向缠绕 ($\alpha_p = 0^\circ$), 而最大临界失稳载荷 p_{cr} 近似呈二次递减关系。

参考文献

- [1] 陈汝训. 纤维缠绕壳体设计的网络分析方法[J]. 固体火箭技术, 2003, 26(1): 30-32.
- [2] 谭三五. 基于网络理论的纤维缠绕壳体结构可靠性数字仿真[J]. 固体火箭技术, 1996, 19(1): 12-17.
- [3] 胡宽, 宋笔锋, 常新龙, 等. 基于网络理论的固体火箭发动机纤维缠绕壳体优化设计[J]. 兵工学报, 2008, 29(9): 1099-1103.
- [4] 栾宇, 丁文辉, 林天军, 等. 基于蚁群算法的复合材料缠绕壳体铺层顺序优化[J]. 计算力学学报, 2011, 28(2): 248-254.
- [5] 祖磊, 何钦象, 李辅安. 纤维缠绕复合材料圆环壳线型设计与优化[J]. 宇航材料工艺, 2006, 36(3): 14-18.
- [6] KIM CHEOL-UNG, KANG JI-HO, HONG CHANG-SUN, et al. Optimal design of filament wound structures under internal pressure based on the semi-geodesic path algorithm[J]. Composite Structures, 2005 (67): 443-452.
- [7] 邓忠民. 飞行器复合材料结构设计基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014.
- [8] 陈汝训. 固体火箭发动机设计与研(下)[M]. 北京: 宇航出版社, 1992.
- [9] 吴梵, 朱锡, 梅志远. 船舶结构力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.