

基于变环肋间距的碳纤维/环氧树脂复合材料 格栅加筋截顶圆锥壳体稳定性

石珊珊¹, 陈秉智^{*1}, 孙直², 陈浩然²

(1. 大连交通大学 交通运输工程学院, 大连 116028; 2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

摘要: 研究均布外压作用下具有非均匀特征的碳纤维/环氧树脂复合材料格栅加筋(AGS)圆锥壳体构型优化。首先, 充分考虑复合材料格栅圆锥壳体中格栅非均匀分布造成结构小端材料利用不充分问题, 提出变环肋铺设间距的优化分布方式, 使格栅在截顶圆锥壳体结构上小端疏大端密。之后, 基于考虑格栅非均匀分布及变环肋间距铺设特征的等效刚度模型, 并采用最小势能原理得到环肋铺设优化后的 AGS 圆锥壳体临界载荷值解析式。针对典型锥壳的有限元验证表明解析算法的误差在 1% 左右, 证实了本文提出的分析方法的可靠性和有效性。最后, 通过对环肋间距优化圆锥壳体的参数分析, 发现优化环肋分布方式可以使 AGS 锥壳结构的外压稳定性大幅上升。本文研究内容为碳纤维/环氧树脂复合材料 AGS 圆锥壳体的优化设计提供了一种具有较高承载力的构型, 并为此类结构的计算提供了解析算法。

关键词: 复合材料格栅加筋(AGS)结构; 圆锥壳体; 稳定性; 等效刚度; 环肋间距优化

中图分类号: O242; U663 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)08-2032-07

Stability of advanced grid stiffened carbon fiber/epoxy composite conical shells with novel distribution of circumferential ribs

SHI Shanshan¹, CHEN Bingzhi^{*1}, SUN Zhi², CHEN Haoran²

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. State Key Laboratory of Structural Analysis of Engineering Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The influence of rib non-uniform distribution on the stability of advanced grid stiffened (AGS) carbon fiber/epoxy composite conical shells was studied. Firstly, considering the non-uniform distribution of ribs on common AGS conical shells, which ultimately resulted in over safety at the small side, a novel distribution of circumferential ribs was proposed to reduce the spacing between circumferential ribs at the big side, yet to increase the spacing at the small side. Then, the tensile, bending and coupling stiffness matrices of AGS conical shells along the longitudes were deduced based on equivalent stiffness model. With the use of Donnell form of relations for shells and the minimum potential principle, the critical buckling load of typical AGS conical shells was predicted. The relative error of the present analytical model is about only 1% for typical AGS conical shells compared with FEM results, which indicates the accuracy and validity of the analytical model. Finally, a series of parameter studies were conducted. The results indicate that the optimized distribution of circumferential ribs can significantly enhance the stability of carbon fiber/epoxy AGS conical shells. The present study provides useful guideline for configuration of carbon fiber/epoxy AGS conical shells, as well as an analytical model for calculating the equivalent stiffness and buckling resistance.

Keywords: advanced grid stiffened (AGS) structures; conical shells; stability; equivalent stiffness; optimized distribution of circumferential ribs

收稿日期: 2017-08-15; 录用日期: 2017-10-17; 网络出版时间: 2017-10-27 17:11

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171027.003>

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11702048; 11502042); 中国铁路总公司科技研究开发计划(2015J007-H); 辽宁省自然科学基金指导计划(20170520293)

通讯作者: 陈秉智, 博士, 教授, 研究方向为轻质吸能结构的分析与设计 E-mail: chenbingzhi06@hotmail.com

引用格式: 石珊珊, 陈秉智, 孙直, 等. 基于变环肋间距的碳纤维/环氧树脂复合材料格栅加筋截顶圆锥壳体稳定性[J]. 复合材料学报, 2018, 35(8): 2032-2038.

SHI Shanshan, CHEN Bingzhi, SUN Zhi, et al. Stability of advanced grid stiffened carbon fiber/epoxy composite conical shells with novel distribution of circumferential ribs[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(8): 2032-2038 (in Chinese).

复合材料格栅结构是一种具有网状加强筋(也称为肋骨)的结构,作为一种新型结构形式,其突出优点是具有优异的比刚度和比强度,因此得到了广泛的应用。目前,格栅加筋(AGS)圆锥壳体结构广泛应用于火箭整流罩、飞机雷达罩、多级火箭的级间连接件、卫星和导弹的多种壳体结构。这些结构大都在压力载荷下工作,因此,研究其稳定性具有重要的工程意义。考虑到 AGS 结构具有较强的可设计性,为了满足不同工况下结构的使用要求,设计者可通过改变其格栅构型或构件(蒙皮和肋骨)的几何参数,例如格栅分布形式、肋骨间距、宽度和高度等,使结构具有高抗屈曲能力(重量比,即实现结构参数的最优化设计。

目前对于锥壳稳定性问题的分析方法主要为有限元法及解析法^[1-14],但有限元模型的计算成本通常较高^[15-16]。为了简化模型,一部分学者基于均匀化思想^[17-19],将大量相似的格栅单胞建立等效模型,对 AGS 壳体结构求解临界失稳载荷,得到较高的计算效率。

对于 AGS 壳体结构而言,肋骨是其主要承载构件,蒙皮往往只具有密封和传递荷载功能。观察 AGS 锥壳结构可以发现,由于锥角的存在,AGS 锥壳结构的格栅沿母线分布呈现出非均匀性,造成锥壳大端肋骨间距较大。因而,基于均匀化思想对 AGS 锥壳结构进行稳定性分析会造成较大误差^[20]。格栅非均匀分布通常使 AGS 锥壳结构发生破坏时,锥壳大端首先发生失稳破坏,导致小端材料利用不充分。是否可以调整肋骨方向角及间距等参数,以提高结构的抗屈曲能力,并使其屈曲模式均匀化得到研究者的重视。已有学者关注圆柱壳或曲壳的加强筋优化分布^[15-16],然而,针对具有几何非均匀性的锥壳结构,目前尚未有改变肋骨分布方式的复合材料 AGS 圆锥壳体优化设计研究。

本文为了考虑格栅非常规分布效应对碳纤维/环氧树脂复合材料 AGS 锥壳结构稳定性造成的影响,首先提出了环肋间距沿母线非常规变化的两种优化铺设方式。使环肋分布呈现出在锥壳小端疏而锥壳大端密的特性,提高锥壳大端的刚度,降低格栅非均匀性造成的格栅锥壳结构刚度不一致性。其次,针对不同的环肋铺设方式,得到 AGS 圆锥壳体的等效刚度阵。将两种环肋铺设方式引起的刚度变化系数分别引入 AGS 锥壳的总势能计算式,得到均布外压作用下变环肋铺设间距的复合材料

AGS 圆锥壳体总体失稳临界载荷解析表达式。最后,通过改变格栅锥壳结构半锥角和母线长度,得到两种环肋优化分布下格栅锥壳结构的整体失稳模态和临界失稳载荷,并研究不同环肋优化分布对碳纤维/环氧树脂复合材料格栅锥壳结构临界失稳载荷的增强作用。

1 环肋优化铺设方式及其等效刚度

如图 1 所示,本文选取碳纤维/环氧树脂复合材料 AGS 截顶圆锥壳为研究对象。设其母线长为 L ,小端半径为 R_1 ,大端半径为 R_2 ,锥壳跨中半径为 R_0 ,半锥角为 α 。 x 和 z 坐标方向分别为母线方向和锥壳内法线方向, φ 坐标方向为锥壳截面切线方向, $x\varphi z$ 坐标系符合右手准则,坐标系原点设在锥壳中点。

以三角形格栅为例,由于该结构是稳定性结构,当格栅板受面内荷载作用时,力主要通过肋骨来传递,在这种情况下,可忽略肋骨横截面内剪力和肋骨长度方向弯矩的影响,因此,节点处的连接可以看作是铰接。如图 2 所示,格栅结构的总刚度可由环形肋骨和斜置肋骨采用叠加原理求得:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^{\text{rib}} &= \mathbf{A}^{\text{crib}} + \mathbf{A}^{\text{arib}} \\ \mathbf{D}^{\text{rib}} &= \mathbf{D}^{\text{crib}} + \mathbf{D}^{\text{arib}} \end{aligned} \tag{1}$$

其中: $\mathbf{A}^{\text{crib}}$ 和 $\mathbf{D}^{\text{crib}}$ 分别代表了环向肋的拉伸刚度和弯曲刚度矩阵; $\mathbf{A}^{\text{arib}}$ 和 $\mathbf{D}^{\text{arib}}$ 分别代表了斜置肋骨的拉伸刚度和弯曲刚度矩阵。由于肋骨的对称性,耦合刚度阵 $\mathbf{B}^{\text{rib}}$ 的各项均为零。

由图 1 可知,由于碳纤维/环氧树脂复合材料

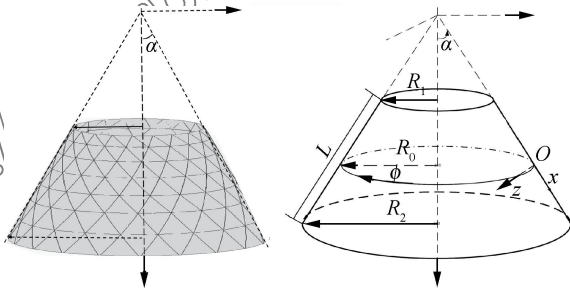


图 1 典型碳纤维/环氧树脂复合材料格栅加筋(AGS)圆锥壳示意图

Fig. 1 Schematic of a typical carbon (AGS) fiber/epoxy advanced grid stiffened (AGS) conical shell

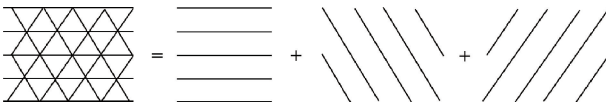


图 2 三角形格栅示意图

Fig. 2 Schematic of triangle grid

锥壳结构几何特性, 环向肋及斜置肋骨间距在锥壳母线方向呈现非均匀性。非均匀性的存在使格栅加筋进行等效刚度计算时, 其刚度阵沿格栅加筋圆锥壳体母线方向改变。设斜置肋骨间距正比于半径 $R(x)$ 线性变化, 并将该变化系数引入 Chen 和 Tsai^[17] 提出的格栅结构等效平铺刚度模型, 可得锥壳斜置肋骨刚度阵沿母线变化表达式^[20]:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(x)^{\text{arib}} &= \frac{R_0}{R(x)} \mathbf{A}_0^{\text{arib}} \\ \mathbf{D}(x)^{\text{arib}} &= \frac{R_0}{R(x)} \mathbf{D}_0^{\text{arib}} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{A}_0^{\text{arib}}$ 和 $\mathbf{D}_0^{\text{arib}}$ 分别为锥壳跨中位置的斜置肋骨面内拉伸和弯曲等效刚度阵。

通常情况下, 环肋间距及其等效刚度阵沿母线的变化趋势与斜置肋骨相同, 导致结构出现了格栅在靠近锥壳小端过密而在靠近锥壳大端过疏的特征, 由此使失稳极易出现在锥壳大端, 使小端材料利用不充分。为了改善这一现象, 可以将环肋铺设进行优化设计, 使其在锥壳大端分布较小端密, 从而增加碳纤维/环氧树脂复合材料 AGS 锥壳结构大端的刚度, 降低小端的刚度, 使结构刚度趋于均匀, 提高材料整体利用率。本文分别考察环肋间距反比于锥壳半径、环肋间距反比于锥壳半径的平方两种环肋间距非常规变化的优化铺设方式, 如图 3 (b) 和图 3 (c) 所示, 每种铺设方式下刚度阵沿母线变化表达式分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(x)^{\text{crib}} &= \frac{R(x)}{R_0} \mathbf{A}_0^{\text{crib}} \\ \mathbf{D}(x)^{\text{crib}} &= \frac{R(x)}{R_0} \mathbf{D}_0^{\text{crib}} \end{aligned} \quad (3)$$

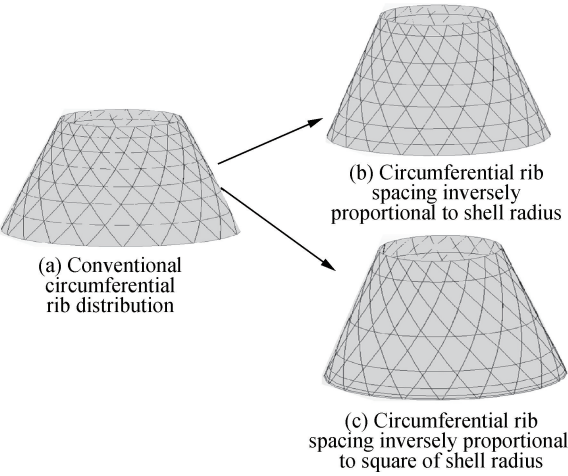


图 3 碳纤维/环氧树脂复合材料 AGS 截顶圆锥壳
Fig. 3 Carbon fiber/epoxy composite AGS conical shell

及

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(x)^{\text{crib}} &= \frac{R^2(x)}{R_0^2} \mathbf{A}_0^{\text{crib}} \\ \mathbf{D}(x)^{\text{crib}} &= \frac{R^2(x)}{R_0^2} \mathbf{D}_0^{\text{crib}} \end{aligned} \quad (4)$$

2 基于环肋优化分布的 AGS 圆锥壳体稳定性分析方法

考虑碳纤维/环氧树脂复合材料 AGS 锥壳结构中格栅结构分布呈现非均匀特性, 常规复合材料格栅加筋截顶圆锥壳体等效刚度沿母线变化的表达式^[20]为

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(x) &= \frac{R_0}{R(x)} [\mathbf{A}_0^{\text{skin}} + \mathbf{A}_0^{\text{rib}}] \\ \mathbf{B}(x) &= \frac{R_0}{R(x)} [\mathbf{B}_0^{\text{skin}} + \mathbf{B}_0^{\text{rib}}] \\ \mathbf{D}(x) &= \frac{R_0}{R(x)} [\mathbf{D}_0^{\text{skin}} + \mathbf{D}_0^{\text{rib}}] \end{aligned} \quad (5)$$

当对环肋间距沿母线变化分布方式进行如图 3 (b) 和图 3 (c) 所示的改变后, 结合式 (3) 和式 (4), AGS 截顶圆锥壳体沿母线变化的等效刚度表达式如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(x) &= \frac{R_0}{R(x)} [\mathbf{A}_0^{\text{skin}} + \mathbf{A}_0^{\text{arib}}] + \frac{R(x)}{R_0} \mathbf{A}_0^{\text{crib}} \\ \mathbf{B}(x) &= \frac{R_0}{R(x)} [\mathbf{B}_0^{\text{skin}} + \mathbf{B}_0^{\text{arib}}] \\ \mathbf{D}(x) &= \frac{R_0}{R(x)} [\mathbf{D}_0^{\text{skin}} + \mathbf{D}_0^{\text{arib}}] + \frac{R(x)}{R_0} \mathbf{D}_0^{\text{crib}} \\ \mathbf{A}(x) &= \frac{R_0}{R(x)} [\mathbf{A}_0^{\text{skin}} + \mathbf{A}_0^{\text{arib}}] + \frac{R^2(x)}{R_0^2} \mathbf{A}_0^{\text{crib}} \\ \mathbf{B}(x) &= \frac{R_0}{R(x)} [\mathbf{B}_0^{\text{skin}} + \mathbf{B}_0^{\text{arib}}] \\ \mathbf{D}(x) &= \frac{R_0}{R(x)} [\mathbf{D}_0^{\text{skin}} + \mathbf{D}_0^{\text{arib}}] + \frac{R^2(x)}{R_0^2} \mathbf{D}_0^{\text{crib}} \end{aligned} \quad (6) \quad (7)$$

由经典层合理论, 内力、内力矩与应变、曲率间的物理方程为

$$\begin{aligned} \mathbf{N} &= \mathbf{A}\boldsymbol{\epsilon} + \mathbf{B}\boldsymbol{\chi} \\ \mathbf{M} &= \mathbf{B}\boldsymbol{\epsilon} + \mathbf{D}\boldsymbol{\chi} \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $\mathbf{N}$ 和 $\mathbf{M}$ 分别为内力和内力矩向量; $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{D}$ 可分别由等效刚度计算式 (6) 和式 (7) 计算得到。

对于在均布外压 q 作用下格栅加筋圆锥壳体稳定性分析的总势能表达式为

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_0^{2\pi} (N_x \epsilon_x + N_\varphi \epsilon_\varphi + N_{x\varphi} \gamma_{x\varphi} + M_x \chi_x + \\ &\quad M_\varphi \chi_\varphi + 2M_{x\varphi} \chi_{x\varphi}) x \sin \alpha dx d\varphi - \frac{1}{2} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_0^{2\pi} \end{aligned}$$

$$\left[N_{x0} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + N_{\varphi 0} \left(\frac{1}{x \sin \alpha} \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right)^2 \right] x \sin \alpha dx d\varphi \quad (9)$$

式中，内力分量 N_{x0} 、 $N_{\varphi 0}$ 和 $N_{x\varphi 0}$ 分别为在均布外压 q 作用下圆锥壳体在失稳前的内力分量，其可由薄膜理论得到^[20]：

$$N_{x0} = -\frac{q \operatorname{tg} \alpha}{2 \left(x + \frac{R_0}{\sin(\alpha)} \right)} \left(\left(x + \frac{R_0}{\sin(\alpha)} \right)^2 - \left(\frac{R_1}{\sin(\alpha)} \right)^2 \right) \\ N_{\varphi 0} = -q \left(x + \frac{R_0}{\sin(\alpha)} \right) \operatorname{tg} \alpha, N_{x\varphi 0} = 0 \quad (10)$$

当环肋间距及其等效刚度阵沿母线的变化趋势与斜置肋骨相同时，根据实验结果^[19]，碳纤维/环氧树脂复合材料 AGS 圆锥壳体结构的上、下端为简支支承，失稳时的位移分量可设为

$$u = \sum_m \sum_n u_{mn} R^2(x) \cos \left[\frac{m\pi}{L} \left(x - \frac{L}{2} \right) \right] \cos(n\varphi) \\ v = \sum_m \sum_n v_{mn} R^2(x) \sin \left[\frac{m\pi}{L} \left(x - \frac{L}{2} \right) \right] \sin(n\varphi) \\ w = \sum_m \sum_n w_{mn} R^2(x) \sin \left[\frac{m\pi}{L} \left(x - \frac{L}{2} \right) \right] \cos(n\varphi) \quad (11)$$

采用环肋间距反比于锥壳半径、环肋间距反比于锥壳半径的平方两种环肋间距非常规变化的优化铺设方式，可以改善 AGS 锥壳体大端刚度低的情况，降低结构大端的位移，导致结构失稳模态发生变化，参考式(11)，本文同时使用另外 2 种更加均匀的位移分布作为结构失稳的试探位移分量：

$$u = \sum_m \sum_n u_{mn} R(x) \cos \left[\frac{m\pi}{L} \left(x - \frac{L}{2} \right) \right] \cos(n\varphi) \\ v = \sum_m \sum_n v_{mn} R(x) \sin \left[\frac{m\pi}{L} \left(x - \frac{L}{2} \right) \right] \sin(n\varphi) \\ w = \sum_m \sum_n w_{mn} R(x) \sin \left[\frac{m\pi}{L} \left(x - \frac{L}{2} \right) \right] \cos(n\varphi) \quad (12)$$

$$u = \sum_m \sum_n u_{mn} \cos \left[\frac{m\pi}{L} \left(x - \frac{L}{2} \right) \right] \cos(n\varphi) \\ v = \sum_m \sum_n v_{mn} \sin \left[\frac{m\pi}{L} \left(x - \frac{L}{2} \right) \right] \sin(n\varphi) \quad (13) \\ w = \sum_m \sum_n w_{mn} \sin \left[\frac{m\pi}{L} \left(x - \frac{L}{2} \right) \right] \cos(n\varphi)$$

将考虑两种环肋间距非常规变化的壳体等效刚度阵(式(6)和式(7))及 3 种试探位移分量(式(11)、式(12)和式(13))代入式(8)，即可分别得到变环肋间距的 AGS 圆锥壳体的外压临界失稳载荷表达式。

该表达式十分繁冗，使用 Maple 13 版本软件可推导出相关表达式，故本文未予列出。

3 基于环肋优化分布的 AGS 圆锥壳体稳定性结果分析

3.1 环肋优化分布 AGS 圆锥壳的整体失稳模态

本节以文献[20]给出的在均布外压下典型碳纤维/环氧树脂复合材料三角形 AGS 截顶圆锥壳体屈曲分析为基准，使该锥壳的材料属性、跨中半径、跨中肋骨和蒙皮参数均保持不变，调整锥壳顶锥角，以获得肋骨间距非均匀程度不同的锥壳结构。对环肋间距反比于锥壳半径、环肋间距反比于锥壳半径的平方的 AGS 锥壳结构，分别采用第 2 节所提出的 3 种不同失稳位移分量，计算出相应的整体外压临界载荷。基于最小势能原理，在所有可能位移中，真实位移使结构总势能最小，因此可以推断使临界失稳载荷最小的位移分量最接近结构的真实失稳模态。为了确定在环肋间距反比于锥壳半径和环肋间距反比于锥壳半径的平方两种分布方式下，哪种位移分量更接近真实失稳模态，本文将所得结果进行对比，并考察碳纤维/环氧树脂复合材料截顶圆锥壳结构半锥角变化时，AGS 圆锥壳体整体失稳模态。

碳纤维/环氧树脂复合材料三角形 AGS 截顶圆锥壳体算例的材料性能为：肋骨弹性模量 $E=84.5$ GPa，蒙皮单层复合材料的各向异性性能 $E_1=84.5$ GPa、 $E_2=6.86$ GPa、 $G_{12}=4.9$ GPa、 $\nu_{12}=0.30$ ，肋骨及蒙皮增强相体积分数均为 60% 左右^[19]。AGS 截顶圆锥壳体的结构几何参数和蒙皮铺层见表 1。

表 1 典型碳纤维/环氧树脂复合材料 AGS 截顶圆锥壳体结构几何参数和蒙皮铺层

Table 1 Geometrical parameters and skin laying parameters of a typical carbon fiber/epoxy composite AGS conical shell

Geometrical parameters	Values
Mid-span radius R_0 /mm	217.25
Plying angles of skin/(°)	90°/35°/-35°/35°/90°
Thickness of skin layers h /mm	0.25/0.2/0.2/0.2/0.25
Height of ribs H /mm	5.8, 5.8, 5.8
Width of ribs b /mm	2.0, 2.0, 2.4
Orientation of ribs θ /(°)	27.5°, -27.5°, 90°
Mid-span rib spacing Δ /mm	40.6, 40.6, 44.0

表 2 对比了几种环肋分布方式下，半顶锥角为 9° 的 AGS 截顶圆锥壳体的外压临界失稳载荷，有

表 2 典型碳纤维/环氧树脂复合材料 AGS 截顶圆锥壳体的外压临界失稳载荷

Table 2 Critical buckling pressure of typical carbon fiber/epoxy composite AGS conical shells

	Conventional circumferential rib distribution	Circumferential rib spacing inversely proportional to shell radius	Circumferential rib spacing inversely proportional to square of shell radius
FEM results/MPa	0.9355	0.9450	0.9521
Analytical predictions/MPa	0.9478	0.9530	0.9560
Relative errors/%	1.31	0.85	0.41

限元分析过程参见文献[20]。结果显示，解析表达式预测结果相对于有限元结果的误差均在 1% 左右，验证了本文公式的有效性和可靠性。半顶锥角为 9° 时，环肋优化分布对外压临界失稳载荷的提升尚不明显，主要是由于顶锥角较小，环肋分布的非均匀性不明显。

图 4 为环肋间距反比于锥壳半径、环肋间距反比于锥壳半径的平方两种环肋间距非常规分布时，基于不同失稳位移分量的碳纤维/环氧树脂复合材料截顶圆锥壳整体临界失稳载荷计算结果，图中 R^2

(x) 、 $R^1(x)$ 和 $R^0(x)$ 分别代表使用式(11)、式(12)和式(13)试探位移分量时得到的整体临界载荷。对比基于不同试探位移分量的失稳载荷计算结果，使计算结果最小的试探位移分量最贴近于结构失稳时的真实模态，可以发现：在本文算例中，当环肋间距反比于锥壳半径时，锥壳位移正比于半径的平方是最贴近真实失稳模态的试探位移分量，但临界失稳载荷的预测值和其他试探位移分量不断减小；而当环肋间距反比于锥壳半径的平方时，在半锥角小于 12° 时，锥壳位移正比于半径的平方是最贴近真实失稳模态的试探位移分量，而半锥角大于 12° 后，锥壳位移正比于半径是最贴近真实失稳模态的试探位移分量，碳纤维/环氧树脂复合材料锥壳的失稳模态趋于均匀化。这是由于结构锥角较小时，环肋的非均匀分布效应不明显，因此结构失稳模态与未优化锥壳类似；而当锥角较大时，环肋分布方式的改变对结构刚度贡献更明显，提高了 AGS 锥壳结构大端的刚度，使结构失稳模态趋于均匀化。

3.2 基于环肋优化分布的 AGS 圆锥壳体稳定性参数分析

为方便起见，本节同样采用表 1 所示的碳纤维/环氧树脂复合材料锥壳材料属性、跨中半径、跨中肋骨和蒙皮参数。基于 3.1 节对比结果，根据锥壳半锥角的变化，选择最贴近真实的失稳位移分量，采用对应的临界失稳载荷计算公式，分别考察改变锥壳结构半锥角与母线长度时，环肋非常规优化分布对圆锥壳体临界失稳载荷的增强作用，给出其相对于常规 AGS 圆锥壳体的增强百分比。

图 5 为环肋间距反比于锥壳半径、环肋间距反比于锥壳半径的平方两种环肋间距非常规分布时，碳纤维/环氧树脂复合材料 AGS 圆锥壳体临界失稳载荷较传统格栅锥壳结构提高的百分比。可见，虽然两种经过环肋间距优化的碳纤维/环氧树脂复合材料格栅锥壳承载力均有所上升，但环肋间距反比于锥壳结构半径的平方分布时得到的承载力明显优于环肋间距反比于锥壳结构半径分布，且随着半锥

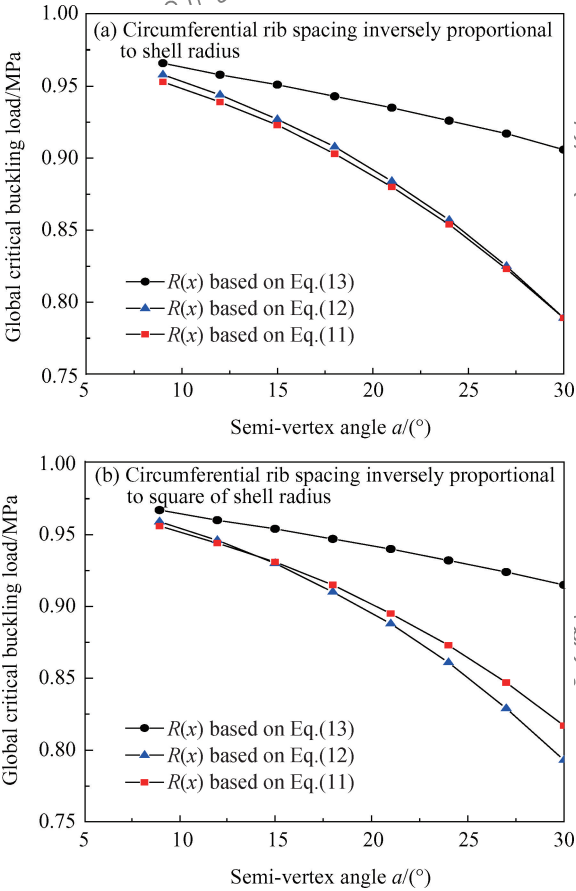


图 4 基于不同失稳位移假设的碳纤维/环氧树脂复合材料 AGS 锥壳临界失稳载荷

Fig. 4 Critical buckling load of conical shells of carbon fiber/epoxy composite AGS based on different hypothetical instability displacement components

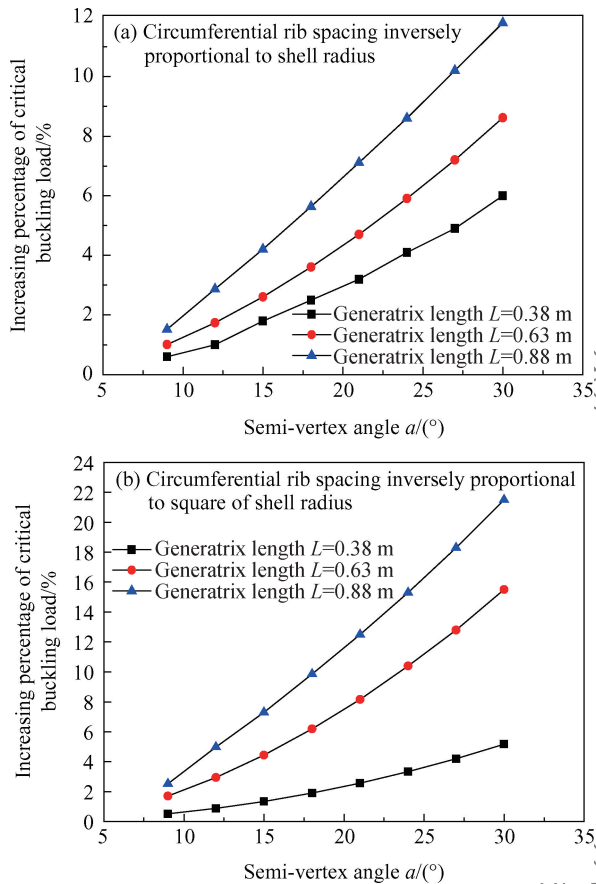


图5 非常规环肋优化分布对碳纤维/环氧树脂复合材料AGS锥壳临界失稳载荷的增强作用

Fig. 5 Reinforcing effect of novel circumferential rib distribution on carbon fiber/epoxy composite AGS conical shells

角的不断增加,二者之间差距随之加大。其原因为传统格栅锥壳在受压载荷下的屈曲模态与锥壳半径的平方成正比,而环肋间距反向平方分布的优化方式使锥壳环向刚度变化趋势与之相抵消,即使结构屈曲模态均匀化,进而提高AGS圆锥壳体整体稳定性。

同时,随着结构半锥角及母线长度的增加,本文提出的两种格栅优化分布构型对结构承载力提升的百分比逐渐增加:在半锥角 30° 、母线长 0.88 m 条件下,分别可达到 12% 和 22% 。这是由于在其他条件相同情况下,提高结构半锥角及母线长度会加剧锥壳两端半径的比值,即加剧结构大端刚度的退化,降低结构承载力。而使用本文所提出的两种格栅分布优化构型可以较好地改善这一现象,提高结构抗屈曲能力。

4 结 论

(1) 针对具有格栅间距非常规优化分布特征的

碳纤维/环氧树脂复合材料格栅加筋(AGS)圆锥壳,为其结构整体稳定性预测提供了一种有效的分析模型。

(2) 由典型锥壳结构算例可知,采用非常规环肋优化分布方式,可使碳纤维/环氧树脂复合材料AGS锥壳的外压失稳模态趋于均匀化。

(3) 本文中提出的非常规环肋优化分布方式,为提高碳纤维/环氧树脂复合材料AGS锥壳结构的整体稳定性提供了一种可行的设计方法。

参考文献:

- [1] SHI S, SUN Z, REN M, et al. Buckling resistance of grid-stiffened carbon-fiber thin-shell structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45: 888-896.
- [2] 石姗姗, 孙直, 任明法, 等. 温度-机械混合载荷作用下先进复合材料格栅加筋截顶圆锥壳体的屈曲分析[J]. 复合材料学报, 2018, 30(6): 209-214.
SHI S, SUN Z, REN M F, et al. Buckling resistance of advanced grid stiffened composite trapped conical shells under thermal and mechanical mixed loading[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(6): 209-214 (in Chinese).
- [3] 谭翔飞, 何宇廷, 冯宇, 等. 航空复合材料加筋板剪切稳定性及后屈曲承载性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(2): 320-331.
TAN X F, HE Y T, FENG Y, et al. Stability and post-buckling carrying capacity of aeronautic composite stiffened panel under shear loading[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(2): 320-331 (in Chinese).
- [4] SUN Z, LI D, ZHANG W S, et al. Topological optimization of biomimetic sandwich structures with hybrid core and CFRP face sheets[J]. Composite Science & Technology, 2017, 142: 19-30.
- [5] SUN Z, SHI S S, GUO X, et al. On compressive properties of composite sandwich structures with grid reinforced honeycomb core[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 94: 245-252.
- [6] SHROFF S, ACAR E, KASSAPOGLOU C. Design, analysis, fabrication, and testing of composite grid-stiffened panels for aircraft structures[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 119: 235-246.
- [7] XU Y, TONG Y, LIU M, et al. A new effective smeared stiffener method for global buckling analysis of grid stiffened composite panels[J]. Composite Structures, 2016, 158: 83-91.
- [8] JANG T S, RHEE J, HYUN B S, et al. A study on grid-stiffened multi-functional composite structures with radiation spot shielding[J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 54: 330-339.
- [9] SUN J, LIM C W, XU X, et al. Accurate buckling solutions

- of grid-stiffened functionally graded cylindrical shells under compressive and thermal loads[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 89: 96-107.
- [10] HUANG L, SHEIKH A H, NG C T, et al. An efficient finite element model for buckling analysis of grid stiffened laminated composite plates[J]. *Composite Structures*, 2015, 122: 41-50.
- [11] WANG D, ABDALLA M M. Global and local buckling analysis of grid-stiffened composite panels[J]. *Composite Structures*, 2015, 119: 767-776.
- [12] HEMMATNEZHAD M, RAHIMI G H, ANSARI R. On the free vibrations of grid-stiffened composite cylindrical shells[J]. *Acta Mechanica*, 2014, 225(2): 609-623.
- [13] WEBER M J, MIDDENDORF P. Semi-analytical skin buckling of curved orthotropic grid-stiffened shells[J]. *Composite Structures*, 2014, 108(1): 616-624.
- [14] LIM K H, HE W, GUAN Z D. Buckling analysis of advanced grid stiffened composite cylinders[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 875-877: 755-762.
- [15] ZHAO Y, CHEN M, YANG F, et al. Optimal design of hierarchical grid-stiffened cylindrical shell structures based on linear buckling and nonlinear collapse analyses[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 119: 315-323.
- [16] WANG D, ABDALLA M M, ZHANG W. Buckling optimization design of curved stiffeners for grid-stiffened composite structures[J]. *Composite Structures*, 2017, 159: 656-666.
- [17] CHEN H J, TSAI S W. Analysis and optimum design of composite grid structures[J]. *Journal of Composite Materials*, 1996, 30(4): 503-534.
- [18] 隋倩倩, 江舒, 孙芳芳, 等. 多级三角形格栅夹芯板力学分析[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(3): 675-680.
- SUI Q Q, JIANG S, SUN F F, et al. Mechanical analysis of hierarchical isogrid sandwich plate[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2016, 33(3): 675-680 (in Chinese).
- [19] 王虎, 王俊奎. 在均布外压作用下复合材料三角形网格加筋圆锥壳体总体稳定性分析[J]. *应用力学学报*, 1992, 9(3): 44-51.
- WANG H, WANG J K. General instability analysis of composite conical shells with triangular grid stiffeners[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 1992, 9(3): 44-51 (in Chinese).
- [20] 石姗姗, 孙直, 任明法, 等. 格栅非均匀分布效应对复合材料格栅加筋圆锥壳体稳定性的影响[J]. *工程力学*, 2012, 29(4): 43-48.
- SHI S S, SUN Z, REN M F, et al. The effect of non-uniform distribution of grid on stability of advanced grid stiffened [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(4): 43-48 (in Chinese).