考虑几何缺陷的轴压双层蒙皮加筋柱壳结构设计

王博*, 杜凯繁, 郝鹏, 田阔

大连理工大学工程力学系, 工业装备结构分析国家重点实验室, 国际计算力学研究中心, 大连 116024

*联系人, E-mail: wangbo@dlut.edu.cn

收稿日期: 2017-03-30; 接受日期: 2017-05-22; 网络出版日期: 2017-08-04

国家重点基础研究发展计划(编号: 2014CB049000)、国家自然科学基金(编号: 11372062, 11402049)和中国博士后基金特别资助项目(编号: 2015T80246)资助

摘要 将点阵结构引入薄壁筒壳结构的壁面构型中, 构建双层蒙皮加筋柱壳结构. 应用点阵结构的高比刚度、高比强度等优良力学性能, 提高薄壁筒壳结构的轴压极限承载力. 双层蒙皮网格加筋柱壳结构是在传统网格加筋结构的内侧增加一层蒙皮, 使得该网格加筋结构的横截面为“工”字型, 提高了该结构抗弯刚度, 进而提高了结构的轴压承载力. 针对双层蒙皮网格加筋结构, 本文开展了基于模态缺陷和基于单点凹陷的缺陷敏感性分析, 对比分析双层蒙皮网格加筋结构与传统网格加筋结构的轴压承载效率. 结果显示双层蒙皮网格加筋结构较传统结构具有显著的高承载力优点. 进一步, 本文给出了考虑几何缺陷的轴压双层蒙皮加筋柱壳结构的优化设计, 最优设计有效地提高了结构折减因子, 提高了结构抗缺陷能力.

关键词 双层蒙皮网格加筋结构, 屈曲, 缺陷敏感性分析, 轴压承载力

PACS: 02.60.Pn, 46.70.De, 45.10.Db

1 引言

新一代大直径运载火箭面临十分苛刻的服役环境, 需求更高的承载力和更低的结构重量, 而运载火箭助推结构、贮箱等主承力结构中大量的采用轻质、薄壁的网格加筋结构. 该类结构轴压失稳载荷是其设计载荷, 由于不可避免的初始几何缺陷, 网格加筋结构的轴压失稳载荷大幅降低, 在实际结构设计中, 往往采用折减因子(大于0小于1的修正系数), 对理论预测进行修正. 显然, 主承力结构缺陷敏感度的降低有助于结构轻量化设计. 伴随着航天结构的轻量化需求,

针对航空航天领域常见的蒙皮桁条结构及网格加筋柱壳结构的优化研究显得越来越重要. 国内外学者针对蒙皮桁条结构和网格加筋柱壳结构开展了优化设计工作^[1-9]. Wang等人^[7]和郝鹏^[10]针对箭体中典型的网格加筋柱壳结构, 提出了考虑了初始几何缺陷的结构轴压承载力的预测方法, 并基于该方法提出了网格加筋柱壳的优化设计方法. 王斌^[11]基于非线性显式后屈曲分析, 开展了蒙皮桁条结构优化设计. Wang等人^[12]提出了一种多级加筋板结构, 开展了其轴压极限承载力和缺陷敏感性分析研究.

双层蒙皮加筋柱壳结构是一种新的薄壁结构设

引用格式: 王博, 杜凯繁, 郝鹏, 等. 考虑几何缺陷的轴压双层蒙皮加筋柱壳结构设计. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 014608
Wang B, Du K F, Hao P, et al. Design of sandwich-walled cylindrical shell structure with initial imperfections (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 014608, doi: 10.1360/SSPMA2017-00085

计, 在传统网格加筋结构的内侧增加一层蒙皮, 使得该网格加筋结构的横截面为“工”字型, 提高了该结构抗弯刚度, 从而提高了结构的轴压承载力.

国内外学者针对双层蒙皮结构已开展了设计、加工和制造等方面的研究. Fan等人^[13-15]针对复合材料双层蒙皮筒壳结构开展加工制造研究, 提出了基于纤维缠绕的两次固化技术, 提高了双层蒙皮柱壳结构的制造工艺. Xiong等人^[16]开展了双层蒙皮柱壳结构加工制造研究, 柱壳结构的蒙皮采用复合材料, 内部加筋采用金属材料, 研究表明该结构的失效模式为局部屈曲破坏和蒙皮撕裂.

本文提出了一种双层蒙皮加筋柱壳结构, 在等质量的条件下, 可大幅提高结构的实际承载力. 首先, 讨论了双层蒙皮加筋柱壳结构关键参数对结构承载力的影响; 然后, 考虑到初始缺陷对薄壁结构承载力的折减, 开展了基于模态缺陷和单点凹陷的缺陷敏感性分析, 分析结果显示, 双层蒙皮网格加筋结构具有显著的高承载效率. 最后, 本文开展基于单点凹陷的双层蒙皮加筋柱壳结构优化设计, 对比传统网格加筋柱壳结构的最优设计, 证明双层蒙皮加筋柱壳结构具有更高的轴压承载能力.

2 非线性显式后屈曲分析

本文采用显式动力学方法分析薄壁筒壳结构的轴压承载能力. 对于显式动力学分析, 其运动方程可写为

$$M\ddot{\mathbf{a}}_t = \mathbf{F}_t^{\text{ext}} - \mathbf{F}_t^{\text{int}} - \mathbf{C}\mathbf{V}_t - \mathbf{K}\mathbf{U}_t, \quad (1)$$

式中, $\mathbf{M}$ 为质量矩阵, $\mathbf{C}$ 为阻尼矩阵, $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵, $\mathbf{a}$ 为节点加速度矢量, $\mathbf{V}$ 为节点速度矢量, $\mathbf{U}$ 为节点位移矢量, t 为时间, $\mathbf{F}^{\text{ext}}$ 和 $\mathbf{F}^{\text{int}}$ 分别为外力和内力矢量.

对节点位移进行泰勒展开:

$$\mathbf{U}_{t+\Delta t} = \mathbf{U}_t + \Delta t\mathbf{V}_t + \frac{\Delta t^2}{2}\mathbf{a}_t + \dots, \quad (2)$$

$$\mathbf{U}_{t-\Delta t} = \mathbf{U}_t - \Delta t\mathbf{V}_t + \frac{\Delta t^2}{2}\mathbf{a}_t - \dots. \quad (3)$$

由式(2)和(3)可得

$$\mathbf{a}_t = (\mathbf{U}_{t-\Delta t} - 2\mathbf{U}_t + \mathbf{U}_{t+\Delta t}) / \Delta t^2, \quad (4)$$

$$\mathbf{V}_t = (\mathbf{U}_{t+\Delta t} - \mathbf{U}_{t-\Delta t}) / 2\Delta t, \quad (5)$$

式中, Δt 为时间增量. 将式(4)和(5)代入运动方程中, 可得

$$\begin{aligned} \left(\frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} + \frac{\mathbf{C}}{2\Delta t} \right) \mathbf{U}_{t+\Delta t} &= \mathbf{F}_t^{\text{ext}} - \mathbf{F}_t^{\text{int}} + \left(\frac{2\mathbf{M}}{\Delta t^2} - \mathbf{K} \right) \mathbf{U}_t \\ &\quad - \left(\frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} - \frac{\mathbf{C}}{2\Delta t} \right) \mathbf{U}_{t-\Delta t}, \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可知, $\mathbf{U}_{t+\Delta t}$ 仅由 $\mathbf{U}_t$ 和 $\mathbf{U}_{t-\Delta t}$ 决定, 因此运动方程无需迭代可以直接求解, 不存在收敛性问题.

3 轴压双层蒙皮筒壳结构参数分析

点阵结构作为近些年出现的一种轻质多孔材料, 点阵构型使得点阵结构具有超轻、高孔隙率、高比强、高比刚度、高强韧、高能量吸收等优良力学性能. 本文将点阵结构引入薄壁筒壳结构的壁面构型中, 应用其高比刚度、高比强度等优良力学性能, 提高薄壁筒壳结构的轴压极限承载力. Fan等人^[13-15]提出了等三角形格栅的复合材料双层蒙皮筒壳结构加工制造方法, Xiong等人^[16]提出了正置正交格栅双层蒙皮柱壳结构加工制造方法. 本文从结构制造工艺简易的角度, 重点开展正置正交格栅双层蒙皮柱壳结构的抗缺陷设计研究. 双层蒙皮加筋柱壳的壁板结构可以看作不连续点阵双层板, 不连续点阵双层板与其单胞参数如图1所示. 基于不连续点阵双层板, 建立双层蒙皮筒壳结构, 如图2和3所示. 双层蒙皮加筋柱壳筒壳结构的主要参数为内部筋条的比例和蒙皮质量与内部筋条的比重, 因此, 本节重点讨论这两个参数的表征参数 C_1 , C_2 与结构轴压极限承载力的关系. 其中参数 C_1 , C_2 如式(7)和(8)所示. 其中 $Stiffener_H$ 为筋条的高度; $Stiffener_W$ 为筋条的宽度.

$$C_1 = \frac{Stiffener_H}{UnitCell_H}, \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{Stiffener_W}{Skin_t}. \quad (8)$$

本文采用有限元分析软件ABAQUS, 涉及变量单位制采用MPa, N, mm, 分析方式为显式非线性分析. 边界条件: 底端固支, 顶端除(轴向位移)外, 均固定. 经

图1 不连续点阵单胞参数
Figure 1 Discrete lattice cells.

图2 双层蒙皮筒壳结构几何尺寸
Figure 2 Geometric parameters of sandwich-walled cylindrical shell.

图3 (网络版彩图)不连续点阵双层蒙皮筒壳有限元模型
Figure 3 (Color online) FEM of sandwich-walled cylindrical shell.

过收敛性分析, 加载速度选为100 mm/s.

表1给出了模型1-3的结构参数. 其中 H 为柱壳高度, R 为柱壳半径, Sk_{in_t} 为蒙皮厚度, N_a 为轴向筋条数目, N_c 为环向筋条数目, $Stiffener_t$ 为筋条厚度, $Stiffener_w$ 为筋条宽度.

首先, 分析等质量的双层蒙皮筒壳和网格加筋筒壳的轴压承载力, 比较其轴压承载力的优劣. 模型1和

模型2是双层蒙皮加筋柱壳结构, 模型3是传统网格加筋柱壳结构. 模型1-3的位移载荷曲线如图4所示. 模型2(双层蒙皮加筋柱壳2)的承载力最大, 模型3其次, 模型1最小. 图5给出了模型1-3的环向位移云图和轴向位移云图. 模型1和模型3发生整体失稳. 模型2结构轴向中间段存在多个小失稳波. 模型2在受到轴压载荷时, 先发生网格内部的局部失稳, 此时, 继续加载, 结构仍能承载, 当轴压载荷达到某一值时, 结构中段发生失稳, 此时, 结构不能承载. 结构发生局部失稳后能继续承载的特性, 使得双层蒙皮加筋柱壳存在具有更高的轴压承载力的可能. 而双层蒙皮加筋柱壳1并没有展示出该特性, 这说明恰当的设计参数才可以使

图4 (网络版彩图)模型1-3位移载荷曲线
Figure 4 (Color online) Load versus end-shortening curves of models 1-3.

图5 (网络版彩图)模型1-3环向轴向位移云图
Figure 5 (Color online) Displacement distributions of models 1-3.

表 1 模型1-3的结构参数

Table 1 Structure parameter of model 1-3

	模型1	模型2	模型3
参数	$H=4000$ mm	$H=4000$ mm	$H=4000$ mm
	$R=2500$ mm	$R=2500$ mm	$R=2500$ mm
	$Skin_t=2$ mm	$Skin_t=2$ mm	$Skin_t=4$ mm
	$N_a=40$	$N_a=40$	$N_a=40$
	$N_c=10$	$N_c=10$	$N_c=10$
	$C_1=0.5, Stiffener_t=2$ mm $Stiffener_w=20$ mm	$C_1=1.0, Stiffener_t=2$ mm $Stiffener_w=20$ mm	$Stiffener_t=2$ mm $Stiffener_w=20$ mm
质量 (kg)	718	736	739
极限承载力 (kN)	2780	6182	5598

结构具有该特性.

为了讨论参数 C_1 对结构极限承载能力的影响, 下面具体分析了 $C_1=[0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0]$ 时结构的极限承载能力. 显式非线性分析中, 轴向位移载荷取结构高度的0.01倍(40 mm).

参数 C_1 对结构极限承载力的影响如图6所示. 结果显示结构极限承载力随参数 C_1 的增大单调增大, 且结构极限承载力/结构质量的比值也随参数 C_1 的增大而单调增大. 图6中也给出了结构进入后屈曲稳定状态时的位移云图. 结果表明, $C_1=0.1$ 和 $C_1=0.4$ 时, 结构的失稳模式为整体失稳; 而 $C_1=0.9$ 和 $C_1=1.0$ 时, 结构的失稳模式为结构轴向中间段存在失稳波形. 当结构出平面刚度较小时, 易发生整体失稳; 当结构出平面刚度较大时, 易发生柱壳中段失稳. 且发生柱壳中段失稳时, 结构的极限承载力较大.

本节讨论参数 C_2 对结构极限承载力的影响. 采用模型2的结构参数, 改变 $Stiffener_w$ 的取值, 调整 C_2 参数, 讨论其对结构极限承载力的影响. 其中, C_2 表示筋条宽度与蒙皮厚度的比值, C_2 的取值范围为1.0–20.0. 此时, C_2 为筋条宽度的倍数. 其中参数 $C_1=1.0$. 图7为 C_2 对结构极限承载力的影响. 双层蒙皮筒壳结构的轴压承载力随着 C_2 的增加而增大. C_2 取值在1–6时, 轴压承载力提高的缓慢; C_2 取值在6–10时, 轴压承载力提高的快速; C_2 取值在11–20时, 轴压承载力的提高趋于平稳. 传统网格加筋柱壳的轴压承载力也随着 C_2 的增加而增大. C_2 小于10时, 轴压承载力大于双层蒙皮筒壳结构; C_2 大于10时, 轴压承载力小于双层蒙皮加筋柱壳. 这说明, 参数 C_2 越大, 双层蒙皮筒壳壁面的抗弯刚度越大, 越难发生失稳, 因此, 双层蒙皮筒壳结构极限

图 6 (网络版彩图) 参数 C_1 对结构极限承载力的影响Figure 6 (Color online) Effect of parameter C_1 to load-carrying capacity.

承载力表现出的优势.

4 双层蒙皮筒壳结构的缺陷敏感性分析

网格加筋柱壳结构在实际生产过程中往往不可避免含有初始几何缺陷. 本节针对多种典型加筋柱壳结构, 开展了缺陷敏感性分析. 为了进一步验证双层蒙皮筒壳结构高效的承载能力, 本节对比分析多种形式的网格加筋柱壳的轴压承载能力. 航天领域常见的加筋筒壳包括: 三角形网格加筋筒壳1(图8(a)); 三角形网格加筋筒壳2(图8(b)); 正置正交网格加筋筒壳(图8(c)); 蒙皮筋条筒壳(图8(d)); 多级网格加筋筒壳(图8(e)).

轴压筒壳的缺陷敏感度分析主要采用两种方法: (1) 特征值模态缺陷; (2) 欧盟DESICOS的SPLA折减因子获取方法. 对于特征值模态法: 首先对结构进行特征值分析, 得到结构的屈曲模态, 然后, 以屈曲模态为

图7 (网络版彩图)参数 C_2 对结构极限承载力的影响

Figure 7 (Color online) Effect of parameter C_2 to load-carrying capacity.

图8 (网络版彩图)网格加筋筒壳. (a) 三角形网格加筋筒壳1; (b) 三角形网格加筋筒壳2; (c) 正置正交网格加筋筒壳; (d) 蒙皮桁条筒壳; (e) 多级网格加筋筒壳

Figure 8 (Color online) Stiffened cylindrical shells. (a) Triangle-grid stiffened cylindrical shell 1; (b) triangle-grid stiffened cylindrical shell 2; (c) isogrid stiffened cylindrical shell; (d) skin-stringer cylindrical shell; (e) hierarchical stiffened cylindrical shell.

初始缺陷, 将屈曲模态引入完美模型中进行轴压承载力预测. 对于SPLA法: 首先在完美结构的中部施加一个扰动载荷, 使完美结构产生一个单点凹陷, 然后以该单点凹陷为初始缺陷, 将其引入完美模型进行轴压承载力预测.

本节主要讨论多种网格加筋筒壳结构构型对轴压极限承载力的影响. 结构参数主要分为3种: (1) 直径5 m, 高度3.3 m; (2) 直径8 m, 高度5.3 m; (3) 直径10 m, 高度6.7 m. 为了保证结构之间的可比性, 调整结构参数, 使同等直径模型之间的质量相当. 为了一般化的表述结构承载力与结构参数的关系, 采用线承载力表征结构承载力, 径厚比表征结构参数. 图中横坐标为网格加筋筒壳的径厚比 R/t , 纵坐标为网格加筋筒壳的线承

载力 N_x (结构的极限承载力/筒壳截面周长). 需要说明的是, 网格加筋筒壳的等效厚度是质量上的等效厚度, 对于相同材料的数值算例, 相同的径厚比表征了结构具有相同的质量. 完美结构的承载能力如图9所示, 基于特征值模态缺陷的结构承载能力如图10所示, 基于SPLA折减因子预测方法的结构承载能力如图11所示.

图中显示, 在不考虑初始缺陷时, 径厚比 R/t 为350时, 双层蒙皮加筋柱壳的线承载力高于其余结构; 随着径厚比增大, 双层蒙皮加筋柱壳的线承载力仍高于其余结构. 考虑特征值模态缺陷和单点凹陷时, 双层

图9 (网络版彩图)多种加筋筒壳轴压承载能力比较(无缺陷)

Figure 9 (Color online) Comparison of load-carrying capacity of stiffened cylindrical shells without imperfection.

图10 (网络版彩图)多种加筋筒壳轴压承载能力比较(模态缺陷)

Figure 10 (Color online) Comparison of load-carrying capacity of stiffened cylindrical shells with eigen-mode imperfection.

图 11 (网络版彩图)多种加筋筒壳轴压承载能力比较(单点凹陷)

Figure 11 (Color online) Comparison of load-carrying capacity of stiffened cylindrical shells with single dimple imperfection.

蒙皮加筋柱壳的实际线承载力均高于其他结构,说明在相同的质量下,双层蒙皮筒壳具有较高的刚度和承载能力.对于多级加筋筒壳,完美结构的情况下,其承载力不如某些结构形式的筒壳,如正置正交筒壳,但在缺陷敏感性分析时其极限承载力不低于除双层蒙皮筒壳以外的结构形式,这说明多级加筋筒壳的抗缺陷能力也较强.

5 双层蒙皮网格加筋柱壳结构优化设计

为了挖掘双层蒙皮网格加筋柱壳结构的高效承载能力,本节开展双层蒙皮网格加筋柱壳结构(直径5 m,高3.3 m)的优化设计工作,并与传统网格加筋筒壳结构对比分析,进一步说明双层蒙皮网格加筋柱壳结构的高效承载能力.考虑结构质量约束,构件优化列式:

$$\text{Maximize : } P_{co}, \quad (9)$$

$$\text{Subject to : } W \leq W_0, \quad (10)$$

$$X_i^l \leq X_i \leq X_i^u, i = 1, 2, \dots, 9, \quad (11)$$

式中, W 为结构重量, W_0 为结构初始质量, P_{co} 为结构轴

压极限载荷, X_i^u 和 X_i^l 分别为第 i 个设计变量 X_i 的上下限值.当不考虑缺陷时, P_{co} 是完美模型的轴压极限载荷;当考虑缺陷时, P_{co} 是基于单点凹陷(SPLA)的轴压极限载荷.表2给出了双层蒙皮网格加筋柱壳结构的设计参数.其中 V_1 表示蒙皮厚度; V_2 表示筋条宽度; V_3 表示筋条高度; V_4 表示筋条环向数目; V_5 表示筋条纵向数目.

由于后屈曲分析耗时较长,本文采用代理模型技术进行优化.采用优化拉丁超立方方法进行实验设计抽样200次,并构造径向基函数代理模型,然后基于多岛遗传算法进行寻优,每次优化迭代完成后将当前的最优设计加入至原样本集中,然后重新构建代理模型直至收敛.双层蒙皮筒壳结构与网格加筋筒壳结构的最优设计由表3给出.结果显示,不考虑缺陷的情况下,双层蒙皮加筋柱壳结构轴压承载力(75000 kN)高于网格加筋柱壳结构(34333 kN);考虑缺陷的情况下,双层蒙皮加筋柱壳结构轴压承载力(72400 kN)仍高于网格加筋柱壳结构(26246 kN);且双层蒙皮筒壳结构的折减因子(0.965)也高于传统结构(0.764).这说明双层蒙皮加筋柱壳结构的轴压承载能力高于传统网格加筋柱壳结构.

进一步分析两种结构形式的失效机理,如图12所示.双层蒙皮筒壳结构的失稳区域靠近筒壳结构上边缘.引入单点凹陷时,结构中部区域出现失稳波,这与上边缘的失稳波形成干涉,抑制了失稳波的扩散.也就是说,双层蒙皮筒壳结构的失稳区域在结构边缘,而

表 2 双层蒙皮网格加筋柱壳设计参数

Table 2 design variables of sandwich-walled cylindrical shell

变量	下限	初始值	上限
V_1 (mm)	2.5	4	5.5
V_2 (mm)	6	9	12.0
V_3 (mm)	15	19	23
V_4	20	30	40
V_5	60	90	120

表 3 双层蒙皮加筋柱壳结构与网格加筋柱壳结构的最优设计

Table 3 Load-carrying capacity of stiffened cylindrical shell and sandwich-walled cylindrical shell

	完美模型极限承载力(kN)	基于单点凹陷极限承载力(kN)	折减因子
双层蒙皮加筋柱壳结构最优设计	75000	72400	0.965
网格加筋柱壳结构最优设计	34333	26246	0.764

图 12 (网络版彩图)双层蒙皮加筋柱壳结构与网格加筋柱壳结构失稳模式

Figure 12 (Color online) Critical unstable modes of stiffened cylindrical shell and sandwich-walled cylindrical shell.

不是在缺陷出现频率较高的中部区域,两种失稳波形成干涉,抑制失稳波传播,从而提高了结构抗失稳能力,提高了结构的轴压折减因子,因此,该结构具有更高的轴压承载能力。

6 结论

双层蒙皮网格加筋柱壳结构可以看作不连续点阵板弯曲而成的。针对双层蒙皮网格加筋柱壳结构两

个主要设计参数 C_1 和 C_2 开展了研究。研究结果显示, C_1 取值为1时,双层蒙皮加筋柱壳结构的轴压承载力有显著提升;双层蒙皮加筋柱壳结构的轴压承载力随着 C_2 的增大而增大。

通过对典型网格加筋柱壳结构、蒙皮桁条结构以及双层蒙皮筒壳结构的轴压承载力的比较发现,双层蒙皮筒壳结构具有较高的轴压承载力能力,但其承载能力小于蒙皮桁条结构。引入结构初始几何缺陷后,双层蒙皮筒壳结构展现出低缺陷敏感性,其轴压承载力显著高于传统结构。

通过优化设计方法,获得双层蒙皮网格加筋柱壳结构的最优设计。对比传统网格加筋柱壳结构最优设计,双层蒙皮网格加筋柱壳结构具有更高的轴压承载力和折减因子。这是由于双层蒙皮筒壳结构的失稳区域在结构边缘,而不是在缺陷出现频率较高的中部区域,两种失稳波形成干涉,抑制失稳波传播,从而提高了结构抗失稳能力,提高了结构的轴压折减因子。

致谢 感谢大连理工大学的周演和周才华对本文的支持和建议。

参考文献

- Han H. Buckling analysis of the stiffened shell for the launch vehicle (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2005 [韩涵. 运载火箭加筋壳结构稳定性分析. 硕士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2005]
- Hao P, Wang B, Tian K, et al. Efficient optimization of cylindrical stiffened shells with reinforced cutouts by curvilinear stiffeners. *AIAA J*, 2016, 54: 1350–1363
- Lindgaard E, Lund E, Rasmussen K. Nonlinear buckling optimization of composite structures considering “worst” shape imperfections. *Int J Solids Struct*, 2010, 47: 3186–3202
- Barthelemy J F M, Haftka R T. Approximation concepts for optimum structural design—a review. *Struct Optimization*, 1993, 5: 129–144
- Wang B, Tian K, Hao P, et al. Numerical-based smeared stiffener method for global buckling analysis of grid-stiffened composite cylindrical shells. *Composite Struct*, 2016, 152: 807–815
- Wang B, Tian K, Hao P, et al. Hybrid analysis and optimization of hierarchical stiffened plates based on asymptotic homogenization method. *Composite Struct*, 2015, 132: 136–147
- Wang B, Hao P, Li G, et al. Generatrix shape optimization of stiffened shells for low imperfection sensitivity. *Sci China Technol Sci*, 2014, 57: 2012–2019
- Hao P, Wang B, Li G, et al. Hybrid optimization of hierarchical stiffened shells based on smeared stiffener method and finite element method. *Thin-Walled Struct*, 2014, 82: 46–54
- Cunha F R S D, Wille T, Degenhardt R, et al. A robustness-based design strategy for composite structures. *Aircraft Eng Aerospace Tech*, 2014, 86: 274–286
- Hao P. Optimum Design of Stiffened Shell Structures for New Generation Launch Vehicle (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2013 [郝鹏. 面向新一代运载火箭的网格加筋柱壳结构优化研究. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2013]
- Wang B. Multi-performance Optimization of Structures and Its Application in Aerospace Structural Design (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2010 [王斌. 结构多性能优化设计及其在航天结构设计中的应用. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2010]

大连理工大学, 2010]

- 12 Wang B, Tian K, Hao P, et al. Load-carrying capacity and imperfection-sensitivity analysis of hierarchical stiffened panels. *J Solid Rocket Tech*, 2014, 37: 408–412
- 13 Fan H, Fang D, Chen L, et al. Manufacturing and testing of a CFRC sandwich cylinder with Kagome cores. *Composites Sci Tech*, 2009, 69: 2695–2700
- 14 Chen L, Fan H, Sun F, et al. Improved manufacturing method and mechanical performances of carbon fiber reinforced lattice-core sandwich cylinder. *Thin-Walled Struct*, 2013, 68: 75–84
- 15 Fan H L, Zeng T, Fang D N, et al. Mechanics of advanced fiber reinforced lattice composites. *Acta Mech Sin*, 2010, 26: 825–835
- 16 Xiong J, Ghosh R, Ma L, et al. Sandwich-walled cylindrical shells with lightweight metallic lattice truss cores and carbon fiber-reinforced composite face sheets. *Composites Part A-Appl Sci Manufact*, 2014, 56: 226–238

Design of sandwich-walled cylindrical shell structure with initial imperfections

WANG Bo^{*}, DU KaiFan, HAO Peng & TIAN Kuo

*International Center for Computational Mechanics, State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,
Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*

Sandwich-walled cylindrical shell has been built with lattice-like stiffeners by adding another layer of skin in the inner surface of shell. Taking advantage of high mechanical property of lattice-like stiffeners, such as high specific stiffness, high specific strength etc., sandwich-walled cylindrical shell is studied for high load-carrying capacity in this paper. In this study, major parameters of sandwich-walled cylindrical shell is discussed for the effect of load-carrying capacity, and the imperfection sensitivity analysis of sandwich-walled cylindrical shells is carried out based on the eigenmode-shape imperfection approach and the single perturbation load approach. Comparing with the traditional stiffened cylindrical shell, the sandwich-walled cylindrical shell has a higher load-carrying efficiency. The reason of phenomenon is high bending stiffness of lattice-like stiffeners. And then, the optimization design of sandwich-walled cylindrical shells is carried out. It is results that optimum design of sandwich-walled cylindrical shell improved knockdown factor and load-carrying capacity. It can be concluded that sandwich-walled cylindrical shell is a potential structure to be more efficient structure in the future aerospace and aircraft designs.

sandwich-walled cylindrical shell, buckling, imperfection sensitivity analysis, load-carrying capacity

PACS: 02.60.Pn, 46.70.De, 45.10.Db

doi: [10.1360/SSPMA2017-00085](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00085)