

材料性能对加筋圆柱壳结构稳定性的影响¹⁾

陈 岑^{*,2)} 刘 尹^{*,†} 朱时洋^{**} 和卫平^{**} 武晓雷^{*} 张均锋^{*,3)}

^{*}(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

[†](中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

^{**}(武汉第二船舶设计研究所, 武汉 430064)

摘要 研究加筋圆柱壳结构在静水压下的稳定性对深海工程具有重要意义。针对材料性能对加筋圆柱壳结构稳定性的影响, 本文选取两种材料——高强钢和钛合金, 建立典型的结构模型, 结合有限元计算和理论分析重点研究了材料的关键性能参数——杨氏模量、屈服强度以及硬化能力对加筋圆柱壳结构在静水压下的失稳临界载荷和失稳模式的影响规律。本文的工作能为加筋圆柱壳结构优化及承载能力的提升提供可靠依据。

关键词 加筋圆柱壳, 静水压, 稳定性, 高强钢, 钛合金

中图分类号: O344.7 DOI: 10.6052/1000-0879-24-098

文献标识码: A CSTR: 32047.14.1000-0879-24-098

EFFECT OF MATERIAL PROPERTIES ON STRUCTURAL STABILITY OF RING-STIFFENED CYLINDRICAL SHELLS¹⁾

CHEN Cen^{*,2)} LIU Yin^{*,†} ZHU Shiyang^{**} HE Weiping^{**} WU Xiaolei^{*} ZHANG Junfeng^{*,3)}

^{*}(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

[†](School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

^{**}(Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China)

Abstract Exploring the stability of ring-stiffened cylindrical shells under hydrostatic pressure is of highly importance for the deep-sea engineering. For the influences of mechanical properties on the stability of ring-stiffened cylindrical shells, two kinds of materials, i.e., high-strength steel and titanium alloy were chosen and the typical structural model was established in this paper. By combing the finite element calculation and theoretical analyses, the effects laws of pivotal material performance properties parameters on the instable critical pressure and mode of ring-stiffened cylindrical shells under hydrostatic pressure were mainly studied, such as Young's modulus, yield strength and hardening capacity. This work could provide a reliable basis for the optimal design and the increase of carrying capacity of ring-stiffened cylindrical shells.

Keywords ring-stiffened cylindrical shell, hydrostatic pressure, stability, high strength steel, titanium alloy

随着人类对深海科学研究和水下资源开发的不断深入, 对水下大型装备的下潜深度以及稳定性也提出了更高的要求^[1-2]。加筋圆柱壳作为水下

装备的主体结构, 研究其在静水压下的稳定性对载人潜水器^[3]、深海无人系统^[4]等重大装备的结构设计和优化具有重要意义^[5-12]。

2024-02-26 收到第 1 稿, 2024-03-12 收到修改稿。

1) 中国科学院基础与交叉前沿科研先导专项 (XDB0620303) 资助

2) 陈岑, 博士, 副研究员, 研究方向为固体力学。E-mail: chencen@lmm.imech.ac.cn

3) 张均锋, 博士, 副研究员, 研究方向为工程力学和结构安全。E-mail: zhangjf@imech.ac.cn

引用格式: 陈岑, 刘尹, 朱时洋等. 材料性能对加筋圆柱壳结构稳定性的影响. 力学与实践, 2024, 46(6): 1201-1206

Chen Cen, Liu Yin, Zhu Shiyang, et al. Effect of material properties on structural stability of ring-stiffened cylindrical shells. *Mechanics in Engineering*, 2024, 46(6): 1201-1206

通常提升结构的承载能力往往从结构优化或材料性能优化两方面着手。目前的研究中通过能量法(Ritz法^[13]和Galerkin法^[14])、遗传算法^[15-16]、有限差分法以及有限元^[17-18]等分析了壳体径长比、壳厚、肋骨尺寸、布置形式等结构参数对加筋圆柱壳稳定性的影响^[19-20]。除了传统的金属材料,针对功能梯度材料^[14,21-22]、复合材料^[9,15,23-25]以及碳化硅陶瓷^[8]等材料构建的加筋圆柱壳在静水压力下的稳定性也做了系统的研究,揭示了肋骨刚度、肋骨形状和体积指数等因素对结构稳定性的影响。这些工作从结构优化入手,探索了加筋圆柱壳如何在提高水下结构的承载能力的同时实现轻量化。

然而,受材料自身强度及密度的影响,仅通过结构优化对承载能力和下潜深度的提升十分有限。例如,传统水下结构通常采用高强钢作为主体材料,其下潜深度一般在400~600 m。而随着材料制备和大型板材加工工艺的发展,现代深潜结构的主体材料则采用更能实现轻量化、屈强比更高的钛合金,下潜深度能达到数千米级^[26-27]。因此,随着材料制备工艺的发展,如何优化材料性能,实现材料与结构的最佳匹配,在提升下潜深度的同时提高材料的利用率,对目前深潜结构的设计具有重要意义^[28]。

尽管目前对加筋圆柱壳的结构优化已经有了充分的研究,但针对材料性能与结构稳定性之间的关联性还缺乏系统的研究。针对这一问题,本文选取了2种应用于深海工程中的典型材料——高强钢和钛合金作为研究对象,通过有限元软件ANSYS APDL,以及稳定性理论分析材料关键性能参数(杨氏模量、屈服强度、切线模量)对典型加筋圆柱壳结构在静水压下的失稳临界载荷以及失稳模式的影响。本文的工作能为加筋圆柱壳结构的材料优化及承载能力提升提供可靠依据。

1 材料性能对结构稳定性影响的数值计算分析

1.1 材料参数

本文在设定材料参数时参考了文献中强度接近的高强钢和钛合金^[29-30](如图1所示)。其中,

高强钢的杨氏模量为210 GPa,泊松比为0.3;钛合金的杨氏模量为113 GPa,泊松比为0.35;两者的屈服强度都为813 MPa。在计算过程中,基于图1中的应力应变曲线,将材料参数做不同的变化,以考察材料参数对结构承载能力的影响。

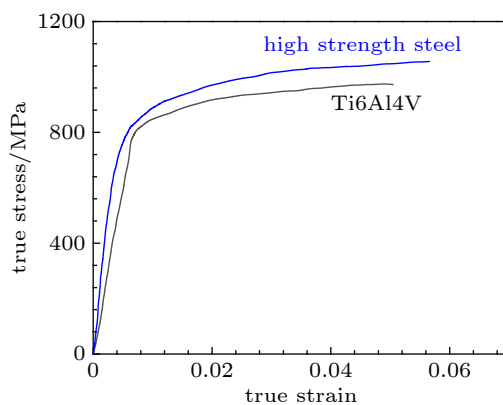


图1 材料性能曲线

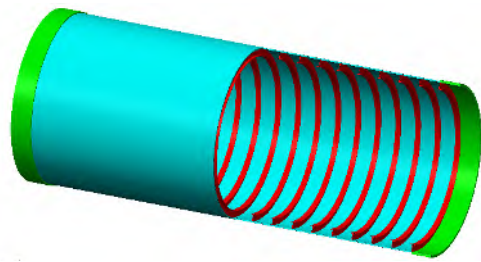
Fig. 1 Material properties curves

1.2 几何模型

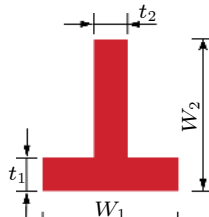
如图2(a)所示,圆柱壳的长度为3000 mm,厚度为9 mm,直径为1200 mm,肋骨间距为150 mm。环向加强筋的截面形状为T型(如图2(b)所示),其中, $W_1=40$ mm, $W_2=50$ mm, $t_1=t_2=4$ mm。采用有限元软件ANSYS APDL对加筋圆柱壳进行弹塑性稳定性分析。在计算过程中,薄壁圆柱壳和环向肋骨均采用shell 181单元进行模拟,全局采用映射网格划分,网格尺寸5 mm(如图2(c)所示),壳体表面承受均布压力,一端采用固定约束,另一端仅固定环向2个自由度,轴向自由度不做约束,计算分析时采用双线性本构方程。

1.3 杨氏模量对结构稳定性的影响

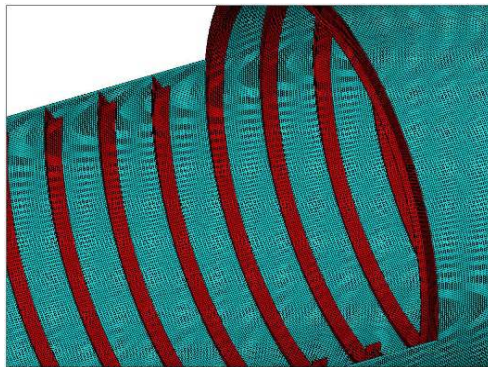
基于图2中的结构,本文首先分析材料的杨氏模量对结构弹塑性稳定性的影响。针对高强钢和钛合金两种材料,根据图1中的应力应变曲线,计算中保持塑性参数不变,其中屈服强度取813 MPa,切线模量取1.15 GPa。通过有限元计算得到两种材料的弹塑性失稳临界载荷如表1所示。结果显示,当结构参数及材料塑性参数一致时,杨氏模量较高的材料失稳临界载荷也更高。对比两种材料的失稳模态(如图3和图4所示)可以看出,杨氏模量的变化也会导致失稳模式发生改变,杨



(a) Diagram of ring-stiffened cylindrical shell



(b) Cross-sectional shape of annular reinforcement



(c) Mapped meshing

图 2 加筋圆柱壳示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ring-stiffened cylindrical shell

表 1 两种材料的失稳临界载荷

Table 1 Instability critical pressures for the two kinds of materials

Material	Instability critical pressure/MPa					
	1st order	2nd order	3rd order	4th order	5th order	6th order
high-strength steel	17.56	17.61	17.64	17.78	17.85	17.87
titanium alloy	14.05	14.68	18.93	18.98	19.12	19.15

氏模量较高的高强钢低阶失稳模态以局部失稳为主，而杨氏模量较低的钛合金低阶失稳模态则是整体失稳为主。

1.4 材料屈服强度对结构稳定性的影响

为阐明材料塑性参数对结构稳定性的影响，选取钛合金作为研究对象，首先分析其屈服强度

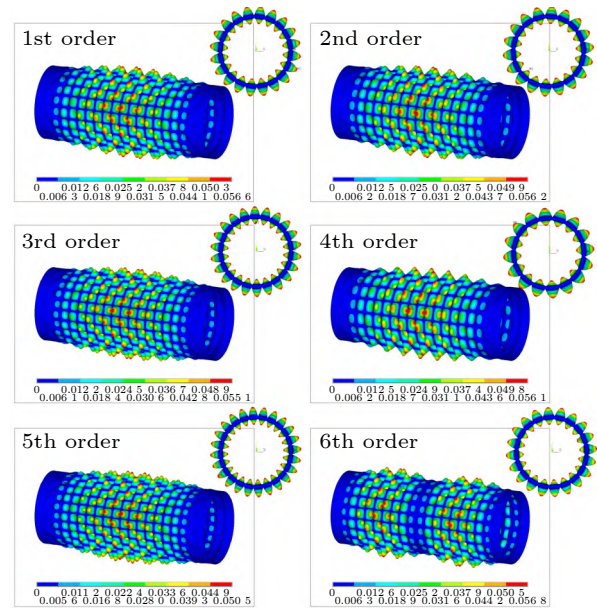


图 3 高强钢失稳模态

Fig. 3 Instability modes of high-strength steel

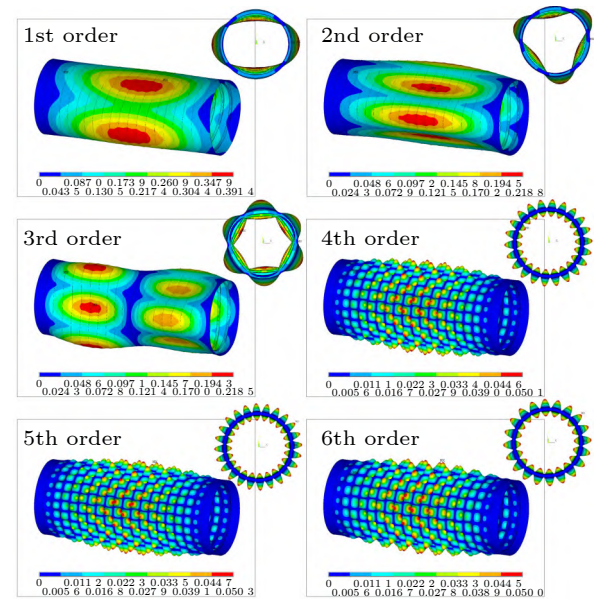


图 4 钛合金失稳模态

Fig. 4 Instability modes of titanium alloy

对加筋圆柱壳结构稳定性的影响。同样针对图 2 中的结果进行计算分析，计算过程中保持弹性常数和切线模量不变，仅改变屈服强度。计算得到的弹塑性失稳临界载荷如表 2 所示。从表中可以看出，对于本文的结构参数，当屈服强度小于 750 MPa 时，失稳临界载荷随着屈服强度的提升而增加。当钛合金的屈服强度大于 750 MPa 时，失稳临界载荷几乎不发生变化。此外，随着屈服强度的提高，失稳模态也发生变化。当屈服强度

较低时,低阶失稳模态以局部失稳为主(图5)。随着屈服强度的提高,低阶失稳模态则以整体失

稳(图4和图6)为主。同时,当屈服强度高于750 MPa时,失稳模态不再发生变化,与图4相同。

表2 钛合金不同屈服强度的失稳临界载荷
Table 2 Instability critical pressure of titanium alloy with different yield strength

Yield strength/MPa	Instability critical pressure/MPa					
	1st order	2nd order	3rd order	4th order	5th order	6th order
600	11.87	11.93	11.95	12.02	12.08	12.12
650	12.71	12.73	12.87	12.89	12.99	13.15
700	13.52	13.68	13.71	13.80	13.80	13.86
750	14.02	14.68	17.29	17.31	17.31	17.33
800	14.05	14.68	18.93	18.98	19.12	19.13
900	14.06	14.68	18.94	18.99	19.13	19.13
1000	14.06	14.68	18.94	18.99	19.13	19.13

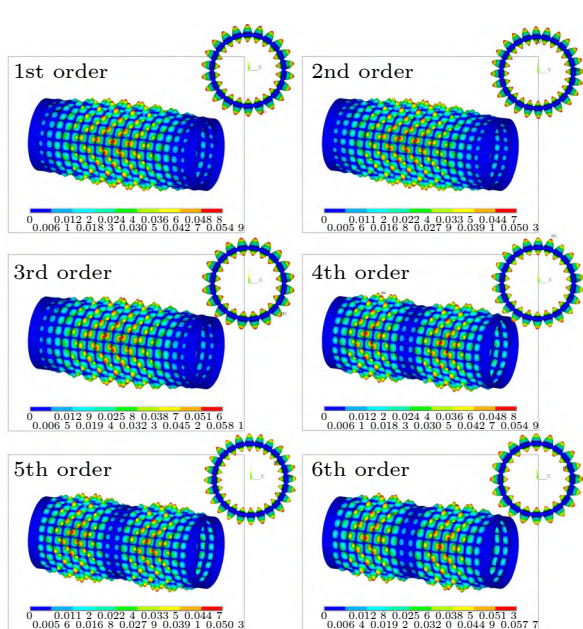


图5 钛合金屈服强度为600 MPa时的失稳模态
Fig. 5 Instability modes of titanium alloy with yield strength of 600 MPa

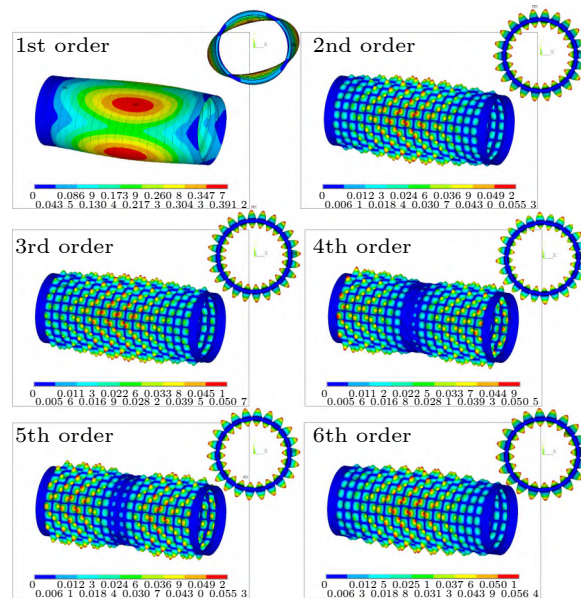


图6 钛合金屈服强度为700 MPa时的失稳模态
Fig. 6 Instability mode of titanium alloy with yield strength of 700 MPa

1.5 材料硬化能力对结构稳定性的影响

硬化能力对材料的塑性变形行为有着重要影响。为考察硬化能力对结构失稳的影响,选取钛合金作为研究对象,针对图2中的结构,计算中保持弹性常数和屈服强度(700 MPa)不变,设置了3组不同的切线模量来反映材料硬化能力的变化。计算得到的弹塑性失稳临界载荷如表3所示,从中可以看出切线模量对结构的失稳临界载荷影响很小,同时低阶模态也都以整体失稳为主(如图6)。

表3 钛合金不同切线模量的失稳临界载荷

Table 3 Instability critical pressure of titanium alloy with different tangent modulus

Tangent modulus/GPa	Critical pressure/MPa
1.15	13.52
5.75	13.59
11.50	13.66

2 材料性能对失稳临界载荷影响的理论分析

加筋圆柱壳弹塑性失稳临界载荷计算公式为^[6]

$$p_E = \frac{1}{0.5m^2\alpha^2 + n^2 - 1} \cdot \left[\frac{D}{R^3} F_1(B) + \frac{Et}{R(1-\mu^2)} F_2(B) + \frac{E_t' I}{lR^3} (n^2 - 1)^2 \right] \quad (1)$$

式中, E 为弹性模量, μ 为泊松比, R 为圆柱壳半径, t 为圆筒壁厚度。 $D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)}$ 为抗弯刚度。整体失稳时, $\alpha = \frac{\pi R}{L}$, L 为圆柱壳长度, 局部失稳时, $\alpha = \frac{\pi R}{l}$, l 为肋骨间距。 m 为壳失稳时纵向形成的半波数, n 为壳失稳时周向形成的整波数。 E_t' 为肋骨材料在单向应力状态下的切线模量。 I 为计及附连壳板的肋骨剖面惯性矩。 $F_1(B)$ 和 $F_2(B)$ 由结构参数与材料的切/割线刚度计算得到^[6]。

通过式 (1) 可以看出, 当结构参数不变时, 材料的杨氏模量越高, 计算得到的临界失稳载荷也越高。为考察屈服强度对失稳临界载荷的影响, 针对图 2 中典型结构, 利用式 (1) 的计算公式, 采用逼近法^[6] 计算弹塑性失稳临界载荷。计算时基于图 1 中钛合金的应力应变曲线, 设置不同的屈服强度进行计算, 得到屈服强度与失稳临界载荷的关系如图 7 所示。由理论计算结果可知, 当屈服强度达到 750 MPa 时, 失稳临界载荷达到最高值, 与数值计算结果一致。

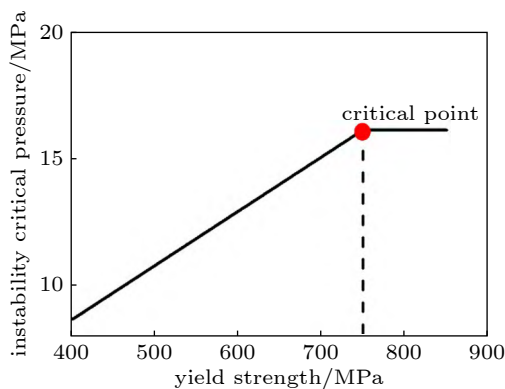


图 7 钛合金屈服强度对失稳临界载荷的影响

Fig. 7 Influence of yield strength of titanium alloy on instability critical pressure

3 结论

本文的工作着眼于如何提升深海大型装备的承载能力, 以加筋圆柱壳这一典型水下结构为研

究对象, 重点考察材料性能与结构稳定性之间的关联性。通过数值模拟和理论分析研究了材料杨氏模量、屈服强度和硬化能力对加筋圆柱壳在静水压下稳定性的影响。有限元计算和理论分析结果显示: 当结构参数不变时, 提升杨氏模量和屈服强度能有效提高结构的失稳临界载荷, 但同时也会改变失稳模式。而受结构刚度限制, 当屈服强度达到一定值时, 将不再影响结构的稳定性, 即使提高屈服强度也无法提升失稳临界载荷, 失稳模态也不再发生变化。同时材料的硬化能力几乎不影响结构的稳定性。

从本文的分析结果可以看出, 材料的杨氏模量和屈服强度对加筋圆柱壳在静水压下的失稳临界载荷和失稳模态都有着重要影响。而传统的优化设计方案仅考虑结构优化, 难以满足现阶段深海工程的需求。基于本文的研究方法, 在进行加筋圆柱壳优化设计时, 可针对具体工程需求, 在优化结构参数的基础上进一步明确材料参数对承载能力的影响, 并基于现阶段成熟材料制备技术, 提出合理的材料性能优化方案, 从而在提升水下结构承载能力的同时, 提高材料的利用率。因此, 本文的工作能为加筋圆柱壳结构的优化设计提供指导依据, 也能为深潜装备的发展提供支撑。

参 考 文 献

- 高福平. 深海工程力学专题序. *力学与实践*, 2022, 44(5): 1003-1004
Gao Fuping. Preface of special issue on deep-sea engineering mechanics. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(5): 1003-1004 (in Chinese)
- 沈义俊, 陈敏芳, 杜燕连等. 深海矿物资源开发系统关键力学问题及技术挑战. *力学与实践*, 2022, 44(5): 1005-1020
Shen Yijun, Chen Minfang, Du Yanlian, et al. Key mechanical issues and technical challenges of deep-sea mining development system. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(5): 1005-1020 (in Chinese)
- 李学斌. 载人潜水器圆柱形耐压壳体的优化设计研究. *海洋技术*, 2007(3): 5-8, 12
Li Xuebin. Optimization analysis of circular cylindrical shells for manned submersible vehicle. *Ocean Technology*, 2007(3): 5-8, 12 (in Chinese)
- 陈沙古, 高原, 吴智睿等. 深海无人系统大长径比环肋圆柱壳结构设计与试验研究. *海洋工程*, 2024, 42(1): 115-123
Chen Shagu, Gao Yuan, Wu Zhirui, et al. Study on design and experimental of ring-stiffened cylindrical shell with large length-diameter ratio for unmanned deep-sea systems.

- The Ocean Engineering*, 2024, 42(1): 115-123 (in Chinese)
- 5 朱卫平. 波纹管在内压作用下柱失稳临界压力的计算. *力学与实践*, 2002, 24(5): 32-35
Zhu Weiping. Instability analysis of corrugated cylinder under internal pressure. *Mechanics in Engineering*, 2002, 24(5): 32-35 (in Chinese)
 - 6 徐秉汉. 现代潜艇结构强度的理论与试验. 北京: 国防工业出版社, 2007
Xu Binghan. Theory and Experiments on the Structural Strength of Modern Submarines. Beijing: National Defence Industry Press, 2007 (in Chinese)
 - 7 许辑平. 潜艇强度. 北京: 国防工业出版社, 1980
Xu Jiping. Submarine Intensity. Beijing: National Defence Industry Press, 1980 (in Chinese)
 - 8 Shen K, Jiang L, Pan G, et al. Buckling and failure behavior of the silicon carbide (SiC) ceramic cylindrical shell under hydrostatic pressure. *Ocean Engineering*, 2023, 287: 115773
 - 9 Sun Z, Hu G, Nie X, et al. An analytical symplectic method for buckling of ring-stiffened graphene platelet-reinforced composite cylindrical shells subjected to hydrostatic pressure. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(12): 1834
 - 10 朱邦俊, 万正权. 环肋圆柱壳应力分析的一种新方法. *船舶力学*, 2004, 8(4): 61-67
Zhu Bangjun, Wan Zhengquan. A method for stress analysis of ring-stiffened cylindrical shell. *Journal of Ship Mechanics*, 2004, 8(4): 61-67 (in Chinese)
 - 11 戴自昶. 环肋圆柱壳总稳定性探讨. *舰船科学技术*, 2000(2): 8
Dai Zichang. Discussion on the total stability of ring-ribbed cylindrical shells. *Ship Science and Technology*, 2000(2): 8 (in Chinese)
 - 12 陈铁云, 沈一鸣. 加肋圆筒形薄壳在静水外压作用下肋间壳板弹性弯曲. *中国造船*, 1981(4): 36-46
Chen Tieyun, Shen Yiming. Elastic-plastic bending of thin ribbed cylindrical shells under hydrostatic external pressure in the intercostal shell plate. *Shipbuilding of China*, 1981(4): 36-46 (in Chinese)
 - 13 Wang CM, Swaddiwudhipong S, Tian J. Ritz method for vibration analysis of cylindrical shells with ring stiffeners. *Journal of Engineering Mechanics*, 1997, 123(2): 134-142
 - 14 Dai HL, Qi LL, Zheng HY. Buckling analysis for a ring-stiffened FGM cylindrical shell under hydrostatic pressure and thermal loads. *Journal of Mechanics*, 2014, 30(4): 403-410
 - 15 Ghasemi AR, Hajmohammad MH. Mass and buckling criterion optimization of stiffened carbon/epoxy composite cylinder under external hydrostatic pressure. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2018, 15(1): e08
 - 16 Bagheri M, Jafari AA, Sadeghifar M. A genetic algorithm optimization of ring-stiffened cylindrical shells for axial and radial buckling loads. *Archive of Applied Mechanics*, 2011, 81(11): 1639-1649
 - 17 Rathinam N, Prabu B, Anbazhaghan N. Buckling analysis of ring stiffened thin cylindrical shell under external pressure. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2021, 6(4): 360-366
 - 18 赵振, 刘才山, 陈滨等. 薄壁加筋肋圆柱壳稳定性分析的参数化研究. *力学与实践*, 2004, 26(2): 17-21
Zhao Zhen, Liu Caishan, Chen Bin, et al. Parameterization study of orthogrid stiffened cylinder shells. *Mechanics in Engineering*, 2004, 26(2): 17-21 (in Chinese)
 - 19 Arbocz J. Effect of Initial Imperfections on Shell Stability. Springer Link, 2002
 - 20 胡子啸, 李世强, 刘子晗等. 双层耐压加筋圆柱壳结构承载能力与抗爆性能分析. *中国舰船研究*, 2024, 19(3): 205-216
Hu Zixiao, Li Shiqiang, Liu Zihan, et al. Analysis on the bearing capacity and blast resistance of pressure stiffened double cylindrical shell structure. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(3): 205-216 (in Chinese)
 - 21 梁斌, 陈金晓, 李戎等. 水下环肋功能梯度材料圆柱壳稳定性研究. *振动与冲击*, 2017, 36(13): 80-85, 121
Liang Bin, Chen Jinxiao, Li Rong, et al. Stability of a submerged ring-stiffened FGM cylindrical shell. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(13): 80-85, 121 (in Chinese)
 - 22 刘林霞, 梁斌, 李戎等. 肋骨刚度对水下环肋功能梯度圆柱壳的稳定性影响分析 (英文). *船舶力学*, 2018, 22(12): 1549-1556
Liu Linxia, Liang Bin, Li Rong, et al. Effect of rib stiffness on stability of submerged ring-stiffened functionally graded cylindrical shells. *Journal of Ship Mechanics*, 2018, 22(12): 1549-1556
 - 23 潘光, 鲁江锋, 沈克纯. 复合材料圆柱壳体水下非线性屈曲数值分析. *哈尔滨工程大学学报*, 2015, 36(9): 1159-1164
Pan Guang, Lu Jiangfeng, Shen Kechun. Nonlinear numerical buckling analysis of composite underwater cylindrical shell. *Journal of Harbin Engineering University*, 2015, 36(9): 1159-1164 (in Chinese)
 - 24 Bai X, Xu W, Ren H, et al. Analysis of the influence of stiffness reduction on the load carrying capacity of ring-stiffened cylindrical shell. *Ocean Engineering*, 2017, 135: 52-62
 - 25 Yang Z, Zhang X, Pan G, et al. Buckling and strength failure for unstiffened and ring-stiffened composite shells. *Ocean Engineering*, 2023, 278: 114513
 - 26 Hayat MD, Singh H, He Z, et al. Titanium metal matrix composites: an overview. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 121: 418-438
 - 27 马运义, 冯余其, 杨雄辉等. 我国舰船装备对材料的需求与应用探讨. *新材料产业*, 2013(11): 11-16
Ma Yunyi, Feng Yuqi, Yang Xionghui, et al. China's naval equipment on the demand and application of materials to discuss. *Advanced Materials Industry*, 2013(11): 11-16 (in Chinese)
 - 28 杨建明, 张新宇, 刘朝骏. 高强度钢在潜艇应用中的若干重要问题综述. *中国舰船研究*, 2016, 11(1): 27-35
Yang Jianming, Zhang Xinyu, Liu Chaojun. Overview of vital matters on high strength steel utilization in submarines. *Chinese Journal of Ship Research*, 2016, 11(1): 27-35 (in Chinese)
 - 29 Lei L, Zhao Y, Zhao Q, et al. Impact toughness and deformation modes of Ti-6Al-4V alloy with different microstructures. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 801: 140411
 - 30 Zhao Y, Tong X, Wei XH, et al. Effects of microstructure on crack resistance and low-temperature toughness of ultra-low carbon high strength steel. *International Journal of Plasticity*, 2019, 116: 203-215

(责任编辑: 胡漫)