复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 37 卷 第 1 期 1 月 2020 年
Vol. 37 No. 1 Jan 2020

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20190929.003

深海纤维增强树脂复合材料圆柱耐压壳力学性能的研究进展

王晓旭[1]，张典堂*[1]，钱坤[1]，王莹莹[2]，刘涛[2]

（1. 江南大学 纺织服装学院，无锡 214122；2. 中国船舶科学研究中心，无锡 214082）

摘　要： 纤维增强树脂复合材料因其轻质和优异力学性能，使其成为了关键深海战略材料，已应用在深海潜水器重大装备。其中，耐压壳是保证深海潜水器安全和稳定的重要部件，与潜水器的质量要求和总体性能密切相关。本文重点关注纤维增强树脂深海圆柱耐压壳，综述其结构设计特性、力学性能试验表征及数值模拟研究进展，并指出目前存在的问题，以期为今后深海复合材料圆柱耐压壳的设计及力学分析提供选材依据。

关键词： 深海环境；复合材料；圆柱耐压壳；力学性能；数值模拟

中图分类号： TB332　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-3851(2020)01-0016-11

Research progress on mechanical properties of deep-sea fiber reinforced resin composite cylindrical pressure shells

WANG Xiaoxu[1], ZHANG Diantang*[1], QIAN Kun[1], WANG Yingying[2], Liu Tao[2]

(1. College of Textile & Clothing, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;
2. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: The fiber reinforced resin composites have enormous development potentials in the field of deep-sea submersible equipment, and become key strategic materials owing to their light-mass and excellent mechanical properties. It should be noted that the pressure shell is an important part to ensure the safety and stability of a deep-sea submersible. Also, it is closely related to the quality requirements and general performances of submersible. This paper mainly focuses on the deep-sea fiber reinforced resin cylindrical pressure shells. In detail, the structural design characteristics, mechanics performance testing and numerical simulations were reviewed. Moreover, the existing problems were pointed out, and it is expected that these can provide the selection basis for the design and mechanical analysis of the deep-sea cylindrical pressure shells in the future.

Keywords: deep-sea equipment; composites; cylindrical pressure shells; mechanical properties; numerical simulation

近年来，为满足深海军事安全、资源勘探和商业等不同任务需求，趋向于大潜深、长航程、高航速的高性能轻量化潜水器成为重要发展方向。而耐压壳作为潜水器的核心部件，其设计需要满足低重量排水比及高强度和稳定性，这就对其结构性能提出了更高要求。因此，先进深海耐压材料正成为国内外学者关注的热点问题[1-3]。

纤维增强树脂复合材料由于其低密度、高强度、高模量、耐疲劳性、耐腐蚀性和较好的可设计性等优异性能[4-5]，在载人潜水器、无人潜水器、深海滑翔机等装备的耐压构件上得到了广泛应用[6-7]。

图 1 为不同材料圆柱耐压壳[8]。图 2 为碳纤维圆柱耐压壳[9]。美国海洋之门等公司研制的 Cyclops 系列载人潜水器，采用碳纤维增强树脂复合材料作为耐压壳，工作深度可达 3 000～6 000 m。俄罗斯科学院远东分院海洋问题研究所使用玻璃纤

收稿日期： 2019-06-27；**录用日期：** 2019-09-10；**网络出版时间：** 2019-09-29 17:29
网络出版地址： https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190929.003
基金项目： 国家自然科学基金(11702115)；江苏省自然科学基金(BK20170166)；中央高校国防培育基金(JUSRP41905)
通讯作者： 张典堂，博士，副研究员，硕士生导师，研究方向为纺织结构复合材料　E-mail：zhangdiantang@jiangnan.edu.cn
引用格式： 王晓旭，张典堂，钱坤，等. 深海纤维增强树脂复合材料圆柱耐压壳力学性能的研究进展[J]. 复合材料学报，2020，37(1)：16-26.
WANG Xiaoxu, ZHANG Diantang, QIAN Kun, et al. Research progress on mechanical properties of deep-sea fiber reinforced resin composite cylindrical pressure shells[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(1): 16-26 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn

图 1 不同材料圆柱耐压壳[8]

Fig. 1 Cylindrical pressure shell with different materials[8]

图 2 碳纤维增强树脂圆柱耐压壳[9]

Fig. 2 Carbon fiber reinforced resin cylindrical pressure shells[9]

维增强树脂复合材料作为 6 000 m 无人潜水器的耐压壳体，已通过打压测试。美国研制的 Deepglider 深海滑翔机耐压壳采用了碳纤维增强树脂复合材料，其质量体积比仅为 0.47，可在 6 000 m 的深度下正常工作。国内中科院沈阳自动化研究所自主研发了海翼号深海滑翔机，如图 3 所示，其耐压壳为碳纤维缠绕/树脂复合材料，最大工作深度已突破 8 000 m，一举刷新了水下滑翔机最大下潜深度的世界纪录。十三五期间，我国“深海关键技术与装备”重点专项明确提出研制适用于全海深(最大工作深度为 11 000 m)潜水器的复合材料耐压壳体，要求在重量体积比不大于 0.8 g/cm^3 的前提下，耐压强度达到 110 MPa 以上。本文重点关注深海圆柱耐压壳，综述其结构设计特性、力学性能试验表征及数值模拟研究进展，并指出目前存在的问题，以期为耐压壳选材提供依据，提升耐压壳的结构效率及可靠性。

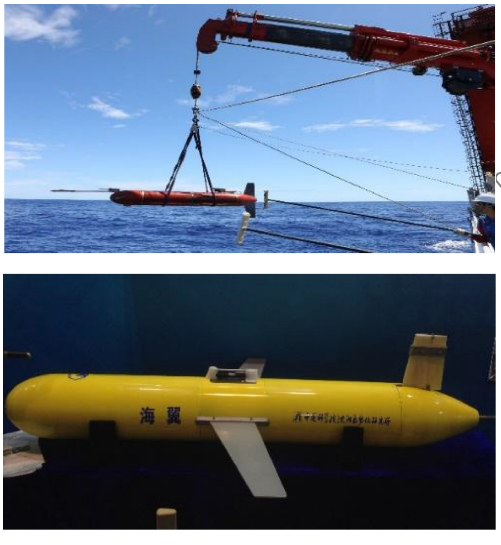

图 3 海翼号深海滑翔机

Fig. 3 Sea Wing Underwater Glider

1 圆柱耐压壳结构设计特性

在原材料锁定的情况下，纤维增强树脂复合材料圆柱耐压壳的结构特性设计主要涵盖细观纤维交织和宏观构造形态两个方面，这两者不仅影响复合材料耐压壳的质量体积比，还决定了其强度和稳定性。

1.1 圆柱耐压壳细观结构设计

目前，在细观层面，纤维增强树脂复合材料圆柱耐压壳主要包括缠绕和层合。研究人员围绕缠绕角[10-14]、铺层角[15-16]、铺层类型[17-19]等进行了大量研究。Paul 等[20]经研究发现圆柱复合材料层合板的临界屈曲载荷和极限屈曲载荷取决于复合材料层合板的材料类型、几何形状、边界条件和层合规范。薄壳结构的动力特性和屈曲响应随厚度、长度比和层间叠加顺序的变化而发生显著变化。Moon 等[9]采用长丝缠绕工艺制备了相对厚壁复合圆筒(厚度与半径比 $t/R=1/18.8$)，采用螺旋缠绕和箍筋($[\pm30/90]_{FW}$、$[\pm45/90]_{FW}$ 和 $[\pm60/90]_{FW}$)不同参数，研究了不同缠绕角的中厚壁复合材料圆柱壳在外静压作用下的屈曲、后屈曲行为和破坏模式。沈克纯等[21]对碳纤维/环氧树脂、硼纤维/环氧树脂和玻璃纤维/环氧树脂复合材料的铺层类型、纤维角和铺层数进行了优化，研究结果表明，屈曲压力或材料破坏压力对不同类型复合材料设计压力有一定的制约作用。Liu 等[22]为了克服层合复合材料压力容器层间性能的分层和缺点，将编织工艺应用于复合材料压力容器的设计中，研究了编织角对弹性常数的影响，并对不同体积分数的弹性常数进行了预测。对于压力容器的结构设计和优化，采用编织复合材料代替纤维缠绕，对压力容器的结构设计和优化具有重要意义。但未进行实物编织及相关试验，编织复合材料耐压容器还处在模拟研究阶段。总体而言，关于缠绕、铺层和编织复合材料耐

压壳，现有研究缺少标准化设计方案，并未给出铺层方式、缠绕角和铺层类型等相关参数的最优数值及设计依据，尚未形成共性结论。

近年来，随着海洋深度增加及附加功能性要求，出现了新型夹芯/夹层圆柱耐压壳[23-27]。在该结构中，通过湿法缠绕工艺制备缩小比例的外蒙皮为碳纤维/树脂、芯层为浮体材料的夹芯复合材料潜艇耐压壳，进行轴压和静水压实验。经研究发现，夹芯复合材料圆柱壳的失效模式主要为整体失稳，构件制备过程中的工艺缺陷对耐压壳体的临界屈曲载荷有一定影响，但缺陷敏感度不高。同时，可以看到，通过合理选择芯材和设置圆柱壳体几何参数，夹芯复合材料圆柱壳可以承受水深超过1 000 m 的压力，可以对深海潜水器和海洋管道等各种结构的夹芯圆柱壳的设计研究提供参考。

1.2　圆柱耐压壳宏观构造设计

在宏观层面，环肋加强圆柱壳体[28-32]是潜艇的主要耐压结构，可有效提升圆柱壳的结构稳定性。图 4 为网络加筋圆柱体[31]。目前，主要包括环形肋骨加强和外形加筋增强两种形式。近年来，国内外学者对加肋形式[33-35]、环肋高度[36]和肋条数目[37]等参量与耐压壳性能的关联关系进行了大量研究和分析。研究表明：(1)加筋肋能够大大提高耐压壳结构效率，且加筋结构的屈曲荷载受初始缺陷的影响很小；(2)网格加筋能较有效地降低或消除开孔区附近局部屈曲响应的风险，并能更有效地提高壳体的临界荷载，网格加筋壳(尤其是格栅柱)仍是深海耐压壳的常见结构形式；(3)加肋骨和筋条圆柱耐压壳的轴向压缩初始屈曲和后屈曲抗力得到了明显改善，在轴向压缩过程的弹性变形阶段，加筋肋对结构刚度的影响起主导作用；(4)采用分层加筋肋的圆柱壳具有较高的比强度，但整体失稳和局部屈曲受分层加筋肋的制约；(5)在环肋夹芯圆柱壳结构中，当环肋的支撑刚度增加到一定值时，长舱段的屈曲模态会从整体屈曲转变为被环肋边界限制在舱段范围内的多段单分段屈曲模态，该环肋高度称为环肋有效支撑的临界环肋高度。当环肋高度大于临界环肋高度时，结构的分段屈曲载荷与环肋的属性关系不大，主要与夹芯圆柱壳自身的尺寸和材料属性有关；(6)肋条数目能够影响圆柱壳临界压力，在厚度半径比一定时，圆柱壳临界压力随着肋条数目的增多而不断增大，且随着肋条数目的增多，临界压力增加幅度均提升。图 5 为碳纤维增强树脂复合材料分层正交加筋圆柱制作过程[34]。

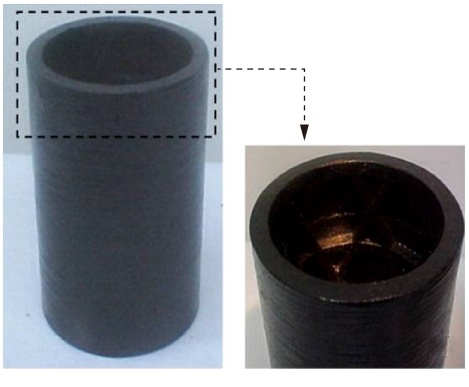

图 4　网格加筋圆柱壳[31]

Fig. 4　Grid-stiffened cylindrical shell[31]

总体来讲，已有研究主要集中于浅水复合材料圆柱耐压壳的设计，薄壳研究相对成熟，而关于中厚壳(厚度与半径比 $t/R>1/10$[38-41])的研究却相对较少。事实上，用于复合材料的纤维增强结构具有丰富的设计性，还可包括三维机织、三维编织、细编穿刺、缝合穿刺、三维缝合或某几种结构的耦合形式。然而，目前仅用到缠绕及层合结构，大大限制了纤维增强树脂复合材料耐压壳的应用和发展。因此，随着深潜深度的增加，如何实现细观和宏观结构的有效设计，进而满足耐压壳对承压和重量的要求是发展重点。

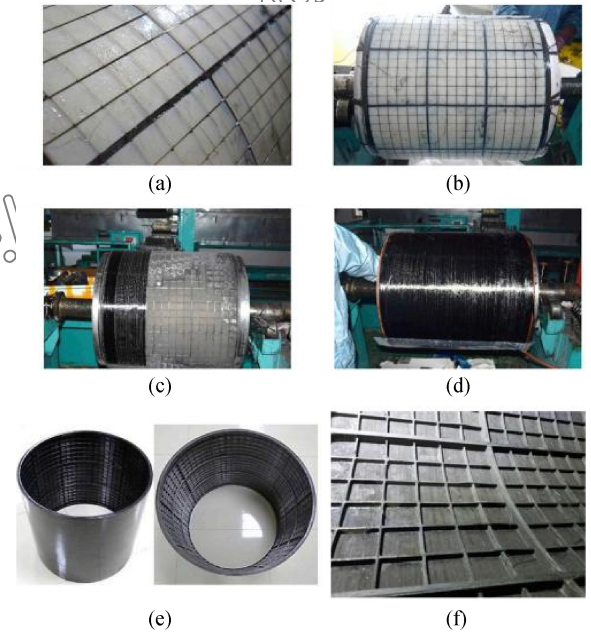

图 5　碳纤维增强树脂复合材料分层正交加筋圆柱制作过程[34]

Fig. 5　Fabrication process of carbon fiber reinforced resin composites layered orthogonal cylindrical pressure shells[34]

2 复合材料圆柱耐压壳力学性能的试验

目前，试验研究仍是评价复合材料圆柱耐压壳力学性能最基本、最直接的方法。事实上，深海环境下，复合材料圆柱壳要求承受巨大的外部压力，主要为均匀的环向压力和轴向压力(如图 6 所示)。其中，环向压力沿环向从圆柱壳面外向面内加压，轴向压力均匀作用在圆柱壳端头处从外向内加压。近些年，学者所进行的试验研究多集中于复合材料圆柱耐压壳的轴压试验[42-46]和外压试验[47-51]。

开展轴压实验主要是：(1)得到折减系数(KDFs)[52]，由于耐压壳结构存在缺陷，屈曲载荷的理论和实验结果之间存在很大差距。这些缺陷是在制造和运输过程中产生的，可以大大地降低壳体在使用过程中的屈曲载荷。在这种情况下，一般引入 KDFs 来评价与理想壳的关系；(2)确定轴压强度，以预测耐压壳轴向屈曲载荷，为下一步理论建模提供有效数据。Moon 等[9]在研究中，从碳纤维复合材料圆柱壳中取样进行单轴压缩试验，获得了影响材料性能的因素，并测量了模量。结果表明，测量数据比计算的理想材料性能大约减小了 19%。在此情况下，将 0.81 的折减系数与原属性相乘，得到材料性能的校准值。Taheri-Behrooz 等[39]采用纤维缠绕法制备了具有[90/+23/−23/90]叠层顺序的玻璃纤维/环氧树脂复合材料圆柱壳，并在轴压载荷下进行了测试，如图 7 所示。研究显示，用非线性分析方法得到的完整圆柱壳和穿孔圆柱壳的屈曲载荷和刚度与数值结果有较好的相关性。

事实上，由于海洋环境条件的限制及安全性的考虑，无法保证所有试验均进行深海实地测试。因此，大部分耐压壳实验通过深海模拟装置(试压罐)实现，以检验和论证复合材料圆柱耐压壳在深海中的使用性能。试压罐可在实验室条件下模拟深海环境，为研制水下设备提供便捷、可靠的陆地实验平台，对缩短设备研究周期、降低研制成本、减少因

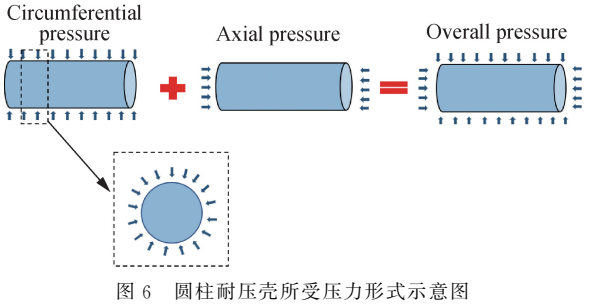

图 6 圆柱耐压壳所受压力形式示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the pressure in the cylindrical pressure shell

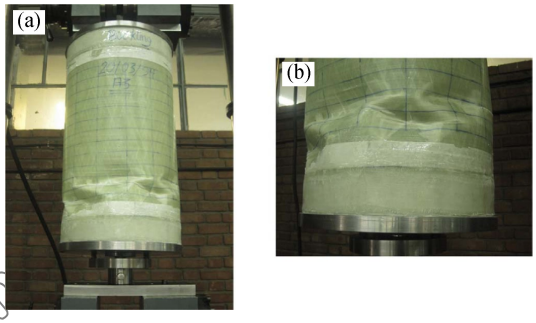

图 7 在试验台上进行单轴压缩的玻璃纤维增强树脂复合材料圆柱壳[39]

Fig. 7 Glass fiber reinforced resin composites cylindrical pressure shells subjected to uniaxial compression on a test-bed[39]

海试造成的意外损失等具有重要研究意义和实际价值。国外对深海耐压模拟系统方面的研究起步较早，技术水平相对较高，主要包括意大利、美国、德国及日本等国家。这些国家针对不同深海作业的结构模型进行了压力环境模拟装置开发，并取得了显著成果[53-56]。近年来，我国上海交通大学、浙江大学、华中科技大学、哈尔滨工程大学、中国科学院力学研究所及中船重工研究所等一些高校和科研单位也在深海环境模拟实验技术方面取得了长足的进步，能够为相关水下设备的研制提供一个稳定的静压实验环境。

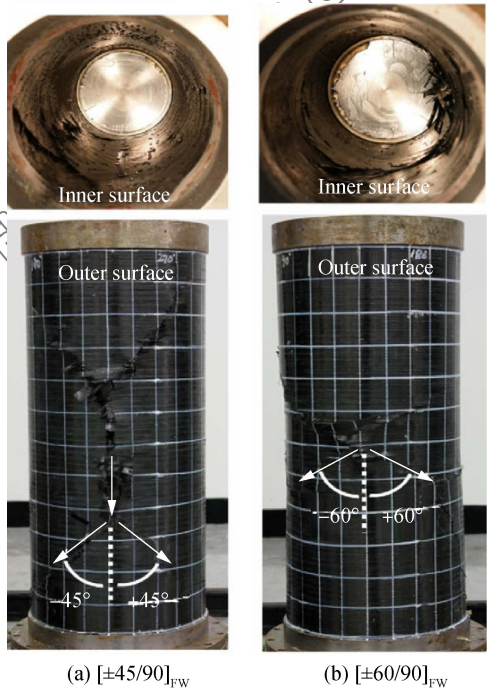

图 8 复合材料圆柱壳的典型最终失效模式[58]

Fig. 8 Typical final failure modes of the composite cylindrical shells[58]

在深水静压测试方面，国内外众多研究学者对复合材料圆柱耐压壳进行了力学性能和失效评价。谭智铎[57]对碳纤维增强环氧树脂复合材料圆柱耐压壳在 80 MPa 水压下的模拟测试。测试过程主要为：每隔 10 min，压力增加 10 MPa，并保压 10 min；重复上述过程，直至压力升至 80 MPa，并进行长达 12 h 的保压。结果显示，碳纤维增强环氧树脂复合材料圆柱耐压壳可用于 7 000 m 水下滑翔机耐压舱。Cai 等[13]对复合材料圆柱壳在 50 MPa 下的性能进行表征。将耐压壳浸入水中，以 0.1 MPa 的外部压力逐步增加，并在每个步骤后保压 1 min，直到发生屈曲和随后的爆裂行为。Moon 等[9]为了更好的测量耐压壳的应变响应，研究团队沿圆柱耐压壳中部(0°、90°、180°和 270°)均匀地附加了四个轴向准应变片，获得了轴向及环向应变渐进变化。Paul 等[20]评价了碳纤维增强环氧树脂复合材料圆柱壳的纤维缠绕、编织、卷绕等交织结构及加固方式对其深水静压力学性能的影响规律，揭示了其失效和破坏机制。总体来讲，试验结果显示，复合材料圆柱耐压壳常见失效主要为屈曲失稳和结构失效。其中，屈曲失效包括弹性微屈曲和塑性微屈曲等，而结构失效包括塑性坍塌、局部过度应变、结构纵向开裂、结构周向开裂、纤维断裂、基体破坏、疲劳等。此外，静水外压下轴对称环向加肋圆柱壳主要包括三种主要失效模式，即轴对称壳体屈服、壳体局部屈曲和总体失稳失效[1]。图 9 为 240 MPa 容量的压力容器测试耐压大小[59]。图 10 为深海压力模拟测试装置[60]。

综上，有关复合材料圆柱耐压壳性能试验比较单一，先进的性能表征手段运用的不够灵活。

图 9　240 MPa 容量的压力容器测试耐压大小[59]

Fig. 9　Test pressure tolerance of pressure vessel with 240 MPa capacity[59]

图 10　深海压力模拟测试装置[60]

Fig. 10　Deep-sea pressure simulation testing device[60]

同时，深海外压环境下，复合材料圆柱耐压壳的实时变形、损伤和演化过程等方面的试验研究还不够充分。除此之外，还应加强低周疲劳、断裂韧性、连接和开孔对结构强度影响等方面的试验研究。

3　复合材料圆柱耐压壳力学性能的数值模拟

复合材料圆柱耐压壳结构复杂，纤维复合材料存在各向异性，采用试验手段分析其损伤及失效机制十分困难。同时，耐压壳水下实验花费高昂，实验难度巨大，且模拟深海环境装置较少。为了降低试验成本，理论模型和数值模拟是两种主要研究手段。其中，在理论模型方面，研究学者先后提出了非线性大挠度理论、非线性前屈曲理论、初始后屈曲理论、边界层理论等来分析圆柱壳的受压屈曲问题。但理论公式仅适用于一些简单情况，对于相对复杂的载荷条件和边界条件，理论上无法求解临界载荷，不能准确揭示复合材料圆柱耐压壳在深潜服役环境下的失效机制及直观体现耐压壳受力特点。因此，数值模拟成为了复合材料圆柱耐压壳渐进损伤演化和失效机制评价的主流方法。

圆柱耐压壳屈曲[61-64]和后屈曲[65-68]问题关系着耐压壳的极限承载压力和安全服役范围，受到研究人员广泛关注。预测结构屈曲临界载荷和屈曲模态的方法主要有两种，分别为特征值屈曲分析和非线性屈曲分析。

Lopatin 等[23]在研究中给出了复合材料夹层圆柱壳在均匀外力作用下屈曲问题的近似解析解。通过与有限元解的比较，推导出复合材料圆柱壳临界荷载的解析公式。Sajjady 等[69]采用内聚单元的有限元分析，利用 ABAQUS 软件对分层的三维建模

http://hcxb.buaa.edu.cn

及其扩展进行了研究，采用理论关系和有限元分析相结合的方法，成功地研究了复合材料圆柱壳在均匀外力作用下的屈曲问题。图 11 为碳纤维增强树脂复合材料圆柱壳数值分析得到的屈曲形状[70]。陈悦等[71]利用有限元软件 ABAQUS 6.14 建立了夹层复合材料圆柱耐压壳失稳机制的数值计算模型。在考虑材料的渐进破坏和损伤累积效应的情况下，考虑结构强度和稳定性的双重指标，采用非线性弧长算法预测材料的极限承载力。在初始缺陷形式的非线性屈曲计算中增加了线性屈曲模式。通过非线性后屈曲计算，得到了 1.42 MPa 的极限载荷，与试验结果的误差为 5.97%，验证了模拟方法的可靠性。Sridharan 等[64]对轴压测试后的变刚度复合材料圆柱壳进行了后屈曲分析，采用时间集成有限元模型(ABAQUS)对完整的装卸周期进行了动力分析。数值计算结果与试验数据进行了比较，结果表明，轴向力相对于端面缩短和整体位移场具有较好的一致性。Almeida 等[38]建立了基于弧长法的非线性有限元模型。采用 T700 型拖曳管经干丝缠绕制造，并进行了外压试验，对计算分析结果进行了评价，如图 12 所示。数值计算结果表明，厚度半径比 t/R 小于 1∶10 的管发生屈曲破坏，而 t/R 比较大的管[$90\pm55_{12}/90$]破坏主要由平面内剪切驱动，发生分层破坏。

在圆柱耐压壳存在初始缺陷时，其后屈曲压力远小于壳体失稳时的临界压力，基于弧长法的后屈曲分析显示，结构具有后屈曲承载能力和稳定的后屈曲平衡路径，能更准确地捕捉临界屈曲载荷，所得屈曲模态也更加贴近试验屈曲模态[67]。

除屈曲问题外，专家学者就耐压壳材料失效对

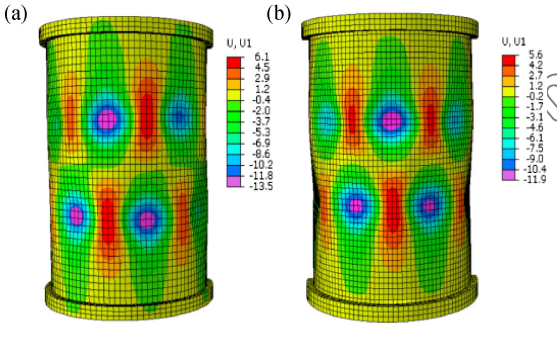

图 11　碳纤维增强树脂复合材料圆柱壳数值分析得到的屈曲形状[70]

Fig. 11　Buckling shape of carbon fiber reinforced resin composites cylindrical shell obtained by numerical analysis ((a)constant-stiffness cylinder; (b)variable-stiffness cylinder)[70]

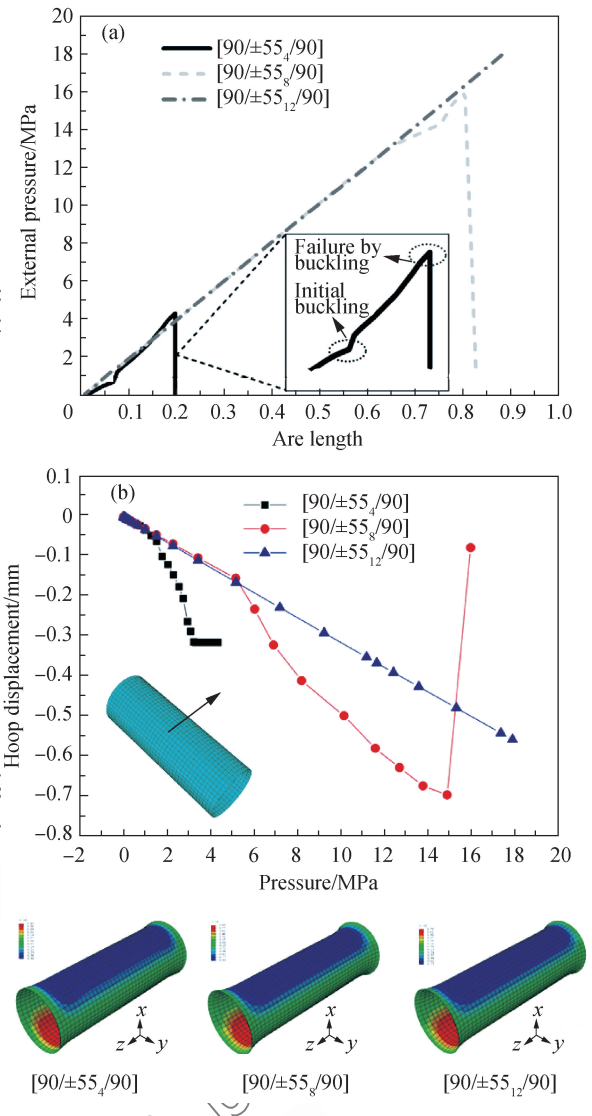

图 12　碳纤维增强树脂复合材料圆柱壳的屈曲模拟压力随弧长法函数的变化[38]

Fig. 12　Variation of buckling simulation pressure of carbon fiber reinforced resin composites cylindrical shells with arc length method[38]

耐压壳临界载荷和服役性能的影响也进行了一系列研究[72-73]。相关研究人员通过微遗传算法优化发现，夹芯圆柱耐压壳随着芯层厚度的增加，材料破坏决定了设计的最大压力，因此，复合材料夹芯圆柱壳的优化设计应考虑材料的破坏和屈曲。采用基于连续损伤介质力学方法的渐进损伤破坏分析模型对缠绕复合材料壳体的水压破坏过程进行仿真分析，研究结果表明，内压作用下缠绕复合材料的最终破坏是由于纤维断裂导致的，且纤维破坏主要出现在环向层，基体破坏主要出现在纵向层。在此基础上，研究复合材料圆柱耐压壳的极限承载能力及失效演变情况，能够提出适用于复合材料耐压壳结

http://hcxb.buaa.edu.cn

构的高效率、高精度的优化方法。

李彬等[74]利用复合材料力学理论和复合材料细观力学刚度的有限元分析方法，对耐压壳结构进行了力学仿真分析。结合椭球基(EBF)神经网络近似模型技术和拉丁超立方体设计试验方法，从细观层次研究了构件材料性质对非均匀环肋复合材料耐压壳性能的影响。结果表明，纤维和基体的弹性模量对耐压壳体结构的力学性能影响最大，剪切模量对其力学性能的影响很小。在构件材料具有一定性能的情况下，随着纤维体积分数的增加，Tai-Wu破坏指数和临界失稳压力增大，而相邻肋中点壳板的周向应力减小，肋处壳板轴向应力和肋应力减小。

综上，深海外压条件下，纤维增强树脂复合材料的强度和屈曲是两个重要的关注点。研究表明，当厚度与半径比 $t/R\leqslant 1/10$ 时，复合材料圆柱耐压壳以结构屈曲失效为主，而当 $t/R>1/10$ 时，材料已处于非线性损伤状态，由材料损伤引起屈曲失效。因此，如何发展适用于深海外压条件下复合材料圆柱耐压壳的损伤分析模型，进而采用数值模拟对其力学行为进行准确预测是研究的难点。

4　结论与展望

从整体来看，当前国内外对于纤维增强树脂复合材料深海耐压壳的结构形式及力学性能研究仍处于探索阶段。主要存在以下问题：

(1) 深海纤维增强树脂复合材料圆柱耐压壳细观纤维交织结构及宏观构造形式还有待进一步丰富；

(2) 深海纤维增强树脂复合材料圆柱耐压壳性能表征手段单一，标准化程度不高，静水压实验条件十分有限，实验花费巨大。我国的深海环境模拟实验技术处在发展阶段，尚未发展完善，影响实验数据的采集，由此导致海洋环境性能数据积累不足。我国大型复合材料耐压壳体的技术经验还不够，相关试验中缺乏大型无损检测设备和评价方法；

(3) 由于复合材料深海圆柱耐压壳是异形结构，存在结构失稳情况和材料失效情况，当复合材料圆柱耐压壳厚度与半径比 $t/R\leqslant 1/10$ 时，复合材料耐压壳以结构屈曲失效为主，而当复合材料圆柱耐压壳厚度与半径比 $t/R>1/10$ 时，材料已处于非线性损伤状态，由材料损伤引起屈曲失效，但有关中厚壳($t/R>1/10$)结构屈曲失效和材料损伤失效之间的关系研究较少。同时至今还未建立与其相适应的强度准则，只能以现有强度准则代替，对深海复合材料圆柱耐压壳的渐进损伤及失效机制研究仍很欠缺。

针对上述问题，随着海洋开发的深度不断加大，现有复合材料圆柱耐压壳将逐渐不能满足实际需要，因此应不断完善理论研究，开创新的制备工艺，不断寻求 3D 机织、3D 针刺、细编穿刺、缝合穿刺或某几种结构的耦合形式，进而满足耐压壳对承压和质量的要求，不断发展耐海水腐蚀性更优的树脂制备技术和耐海水腐蚀涂层技术。采用更先进的无损检测手段，如计算机断层扫描技术(Micro-CT[75])、非接触全场应变测量系统(DIC[76])、超声波扫描技术[77]、X-射线断层扫描[78]和高速摄影[79]等技术，结合工程力学、海洋学、计算机科学及其他学科，发展适用于深海外压条件下复合材料圆柱耐压壳的损伤分析模型，建立更接近实际应用的受力体系，进而采用数值模拟对其力学行为进行准确预测。深入分析深海复合材料圆柱耐压壳的水下失稳及失效机制，不断优化结构设计及预测大型结构件的临界载荷等内容。

参考文献：

[1] 刘涛. 大深度潜水器结构分析与设计研究[D]. 无锡：中国船舶科学研究中心，2001.
LIU T. Analysis and design of deep-sea submersible structure [D]. Wuxi: China Ship Scientific Research Center, 2001 (in Chinese).

[2] 刘进. 计及海洋参数水下滑翔机耐压壳体优化[D]. 天津：天津大学，2014.
LIU J. The optimization design of underwater glider pressure hull based on ocean parameters[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014 (in Chinese).

[3] YANO Y, TAKAGAWA S. Exploratory study on engineering ceramics pressure hulls for deep-sea submergence services [J]. Marine Technology Society Journal, 2005, 39(3): 49-55.

[4] 杜善义，关志东. 我国大型客机先进复合材料技术应对策略思考[J]. 复合材料学报，2008，25(1)：1-10.
DU S Y, GUAN Z D. Strategic considerations for development of advanced composite technology for large commercial aircraft in China[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(1): 1-10 (in Chinese).

[5] 陈燕，葛恩德，傅玉灿，等. 碳纤维增强树脂 基复合材料制

http://fhclxb.buaa.edu.cn

孔技术研究现状与展望[J]. 复合材料学报，2015，32(2)：3013-3016.
CHEN Y，GE E D，FU Y C，et al. Review wand prospect of drilling technologies for carbon fiber reinforced polymer[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2015，32(2)：3013-3016 (in Chinese).

[6] 管清宇，严文军，吴光辉，等. 碳纤维/环氧树脂复合材料层压板冲击凹坑的回弹特性[J]. 复合材料学报，2019，DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20190510.001
GUAN Q Y，YAN W J，WU G H，et al. Impact dent relaxation characteristic of carbon fiber/epoxy resin composite laminate[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2019，DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20190510.001 (in Chinese).

[7] 于礼玮，曹维宇. 碳纤维复合材料在海洋中的应用[J]. 化工新型材料，2016，44(8)：4-5，8.
YU L W，CAO W Y. Application of carbon fiber composites in marine area[J]. New Chemical Materials，2016，44(8)：4-5，8 (in Chinese).

[8] DAVIES P，CHOQUEUSE D，BIGOURDAN B，et al. Composite cylinders for deep sea applications：An overview[J]. Journal of Pressure Vessel Technology，2016，138(6)：060904.

[9] MOON C J，KIM I H，CHOI B H，et al. Buckling of filament-wound composite cylinders subjected to hydrostatic pressure for underwater vehicle applications[J]. Composite Structures，2010，92(9)：2241-2251.

[10] HUGAAS E，VEDVIK N P，ECHTERMEYER A T. Buckling due to external pressure of a composite tube measured by Rayleigh optical backscatter reflectometry and analyzed by finite elements[J]. Structural Control and Health Monitoring，2018，25(8)：e2205.

[11] 李博，熊超，殷军辉，等. 多角度交替缠绕复合圆筒的剩余应力算法及水压试验[J]. 复合材料学报，2018，35(6)：1452-1463.
LI B，XIONG C，YIN J H，et al. Residual stress algorithm for composite cylinder with alternate multi-angle winding layers and water-pressure test[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2018，35(6)：1452-1463 (in Chinese).

[12] HERNÁNDEZ-MORENO H，DOUCHIN B，COLLOMBET F，et al. Influence of winding pattern on the mechanical behavior of filament wound composite cylinders under external pressure[J]. Composites Science and Technology，2008，68(3-4)：1015-1024.

[13] CAI B P，LIU Y H，LIU Z K，et al. Reliability-based load and resistance factor design of composite pressure vessel under external hydrostatic pressure[J]. Composite Structures，2011，93(11)：2844-2852.

[14] 邢静忠，陈利. 内外压作用下纤维缠绕厚壁柱形容器的强度[J]. 复合材料学报，2011，28(1)：124-131.
XING J Z，CHEN L. Strength of filament wound thick-walled cylindrical vessel under internal and external pressure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2011，28(1)：124-131 (in Chinese).

[15] WEI R F，PAN G，JIANG J. Influence of ply angle and length on buckling behavior of composite shells under hydrostatic pressure[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites，2019，38(10)：478-491.

[16] MIAN H H，WANG G，DAR U A，et al. Optimization of composite material system and lay-up to achieve minimum weight pressure vessel[J]. Applied Composite Materials，2013，20(5)：873-889.

[17] XU L R，KRISHNAN A，NING H，et al. A seawater tank approach to evaluate the dynamic failure and durability of E-glass/vinyl ester marine composites[J]. Composites Part B：Engineering，2012，43(5)：2480-2486.

[18] ELLUL B，CAMILLERI D. The applicability and implementation of the discrete Big Bang-Big Crunch optimisation technique for discontinuous objective function in multi-material laminated composite pressure vessels[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping，2018，168：39-48.

[19] 孙士平，张冰，邓同强，等. 复合载荷作用 变刚度复合材料回转壳屈曲优化[J]. 复合材料学报，2019，36(4)：1052-1061.
SUN S P，ZHANG B，DENG T Q，et al. Buckling optimization of variable stiffness composite rotary shell under combined loads[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2019，36(4)：1052-1061 (in Chinese).

[20] PAUL P A，RAJAMOHAN V，MATHEW A T. Recent developments in investigation on buckling and post buckling responses of laminated composite shells[J]. Polymer Composites，2018，39(12)：4231-4242.

[21] 沈克纯，潘光，施瑶. 静水压力下纤维缠绕复合材料壳体耐压因子的优化设计[J]. 船舶力学，2017，21(12)：1551-1563.
SHEN K C，PAN G，SHI Y. Optimization of composites shell subjected to hydrostatic pressure to maximize design pressure factor[J]. Journal of Ship Mechanics，2017，21(12)：1551-1563 (in Chinese).

[22] LIU G，GAO H，WEI G，et al. A novel structure design of braided composite pressure vessel and its mechanical analysis[J]. The Journal of The Textile Institute，2019，110(1)：124-133.

[23] LOPATIN A V，MOROZOV E V. Buckling of the composite sandwich cylindrical shell with clamped ends under uniform external pressure[J]. Composite Structures，2015，122：209-216.

[24] ARJOMANDI K，TAHERI F. Stability and post-buckling response of sandwich pipes under hydrostatic external pres-

http://fhclxb.buaa.edu.cn

sure[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2011, 88(4): 138-148.

[25] ARJOMANDI K, TAHERI F. Elastic buckling capacity of bonded and unbonded sandwich pipes under external hydrostatic pressure[J]. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2010, 5(3): 391-408.

[26] 朱子旭，李永清，朱锡，等. 夹芯复合材料耐压壳工艺缺陷对承载能力的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报，2019，40(2)：38-43.
ZHU Z X, LI Y Q, ZHU X, et al. A capacity study on the effect of process defects in composite sandwich pneumatic shell[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2019, 40(2): 38-43 (in Chinese).

[27] KISHORE S, NAIK P P, DENARDO N, et al. Underwater dynamic collapse of sandwich composite structures[J]. Experimental Mechanics, 2019, 59(5): 583-598.

[28] LI B, PANG Y J, CHENG Y X, et al. Collaborative optimization for ring-stiffened composite pressure hull of underwater vehicle based on lamination parameters[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2016, 9(4): 373-381.

[29] 朱信竞，宋保维，王鹏，等. UUV 内、外环肋加强耐压壳体强度与稳定性分析[J]. 系统仿真学报，2013，25(2)：371-376.
ZHU X Y, SONG B W, WANG P, et al. Strength and stability analysis of UUV's cylindrical shell stiffened by inside and outside rings[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(2): 371-376 (in Chinese).

[30] KIDANE S, LI G, HELMS J, et al. Buckling load analysis of grid stiffened composite cylinders[J]. Composites Part B: Engineering, 2003, 34(1): 1-9.

[31] BURAGOHAIN M, VELMURUGAN R. Study of filament wound grid-stiffened composite cylindrical structures[J]. Composite Structures, 2011, 93(2): 1031-1038.

[32] SHAHSAVARI A H, SOROUSH S, MOJTABA S. Parametric study of specific buckling load of cylindrical grid stiffened composite shells[J]. Advanced Science Letters, 2012, 13(1): 482-485.

[33] SHI S, SUN Z, REN M, et al. Buckling response of advanced grid stiffened carbon-fiber composite cylindrical shells with reinforced cutouts[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 44(1): 26-33.

[34] WU H, LAI C, SUN F, et al. Carbon fiber reinforced hierarchical orthogrid stiffened cylinder: Fabrication and testing[J]. Acta Astronautica, 2018, 145: 268-274.

[35] MOEINIFARD M, LIAGHAT G, RAHIMI G, et al. Experimental investigation on the energy absorption and contact force of unstiffened and grid-stiffened composite cylindrical shells under lateral compression[J]. Composite Structures, 2016, 152: 626-636.

[36] 朱子旭，李永清，朱锡，等. 夹芯复合材料耐压壳舱段仿真计算及临界环肋高度确定方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报，2019，51(5)：155-162.
ZHU Z X, LI Y Q, ZHU X, et al. A simulation study on the section rib-ring in sandwich composite pressure shell and a calculation method for the critical height[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(5): 155-162 (in Chinese).

[37] 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[J]. 振动与冲击，2017，36(13)：80-85，121.
LIANG B, CHEN J X, LI R, et al. Stability of a submerged ring-stiffened FGM cylindrical shell[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13): 80-85, 121 (in Chinese).

[38] ALMEIDA J H S, RIBEIRO M L, TITA V, et al. Damage and failure in carbon/epoxy filament wound composite tubes under external pressure: Experimental and numerical approaches[J]. Materials & Design, 2016, 96: 431-438.

[39] TAHERI-BEHROOZ F, OMIDI M, SHOKRIEH M M. Experimental and numerical investigation of buckling behavior of composite cylinders with cutout[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 116: 136-144.

[40] NARAYAN D A, GANAPATHI M, PRADYUMNA B, et al. Investigation of thermo-elastic buckling of variable stiffness laminated composite shells using finite element approach based on higher-order theory[J]. Composite Structures, 2019, 211: 24-40.

[41] LI Y W, ELISHAKOFF I, JR-STARNES J H. Axial buckling of composite cylindrical shells with periodic thickness variation[J]. Computers & Structures, 1995, 56(1): 65-74.

[42] LABANS E, ABRAMOVICH H, BISAGNI C. An experimental vibration-buckling investigation on classical and variable angle tow composite shells under axial compression[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 449: 315-329.

[43] TAKLA M. Non-symmetric bifurcation and collapse of elastic-plastic thick-walled cylinders under combined radial and axial loading[J]. Marine Structures, 2019, 64: 246-262.

[44] WAGNER H N R, SOSA E M, LUDWIG T, et al. Robust design of imperfection sensitive thin-walled shells under axial compression, bending or external pressure[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 156: 205-220.

[45] ZHU Y, LUO X Y, OGDEN R W. Asymmetric bifurcations of thick-walled circular cylindrical elastic tubes under axial loading and external pressure[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(11-12): 3410-3429.

[46] 杨颜志，郑权，李昊，等. 复合材料格栅圆柱 筒稳定性数值仿真与试验[J]. 复合材料学报，2015，31(1)：295-300.
YANG Y Z, ZHENG Q, LI H, et al. Numerical simulation and test on stability of composite grid stiffened cylinder[J].

http://fhclxb.buaa.edu.cn

Acta Materiae Compositae Sinica，2015，31(1)：295-300 (in Chinese).

[47] KHAZAEINEJAD P，NAJAFIZADEH M M，JENABI J，et al. On the buckling of functionally graded cylindrical shells under combined external pressure and axial compression [C]//ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference. Pragu：ASME，2009：755-762.

[48] PINTO M，GUPTA S，SHUKLA A. Differences in the hydrostatic implosion of metallic and composite tubes studied using digital image correlation[C]//SONG B，LAMBERSON L，CASEM D，et al. Proceedings of the 2015 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics：Dynamic Behavior of Materials，Volume 1. Springer，2016：171-176.

[49] 尚闻博. 深海耐压舱设计的 ANSYS 仿真研究[D]. 青岛：中国海洋大学，2015.
SHANG W B. ANSYS simulation research of deep ocean pressure tank design[D]. Qingdao：Ocean University of China，2015 (in Chinese).

[50] PINTO M，GUPTA S，SHUKLA A. Study of implosion of carbon/epoxy composite hollow cylinders using 3D digital image correlation [J]. Composite Structures，2015，119：272-286.

[51] JAVIER C，MATOS H，SHUKLA A. Hydrostatic and blast initiated implosion of environmentally degraded carbon-epoxy composite cylinders[J]. Composite Structures，2018，202：897-908.

[52] WANG B，MA X，HAO P，et al. Improved knockdown factors for composite cylindrical shells with delamination and geometric imperfections[J]. Composites Part B：Engineering，2018，163：314-323.

[53] 刘敬喜，王敏. 深海环境模拟实验装置压力控制系统设计[J]. 电子设计工程，2012，20(4)：87-90.
LIU J X，WANG M. Design of pressure control system for deep-sea environment simulator[J]. Electronic Design Engineering，2012，20(4)：87-90 (in Chinese).

[54] Department of the Navy. The navy unmanned undersea vehicle (UUV) master plan[R]. U. S.：Department of the Navy，2004.

[55] 李天. 深海压力环境模拟试验装置及其恒压控制系统研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2013.
LI T. Research on the deep-sea pressure environmental simulation test device and its constant pressure control system [D]. Harbin：Harbin Engineering University，2013 (in Chinese).

[56] 张强，张雷励，张铭钧. 深海环境模拟实验装置及压力动态控制技术[J]. 哈尔滨工程大学学报，2016，37(11)：1565-1572.
ZHANG Q，ZHANG L L，ZHANG M J. Experiment devices for simulating a deep-sea environment[J]. Journal of Harbin Engineering University，2016，37(11)：1565-1572 (in Chinese).

[57] 谭智铎. 7000 米级深海滑翔机复合材料耐压舱结构设计研究[D]. 沈阳：东北大学，2015.
TAN Z D. Research on structure design of composite pressure hulls for 7000 depth glider[D]. Shenyang：Northeastern University，2015 (in Chinese).

[58] CHO Y S，OH D H，PAIK J K. An empirical formula for predicting the collapse strength of composite cylindrical-shell structures under external pressure loads[J]. Ocean Engineering，2019，172：191-198.

[59] ARHANT M，BRIANCON C，BURTIN C，et al. Carbon/polyamide 6 thermoplastic composite cylinders for deep sea applications[J]. Composite Structures，2019，212：535-546.

[60] LOPATIN A V，MOROZOV E V. Buckling of a composite cantilever circular cylindrical shell subjected to uniform external lateral pressure[J]. Composite Structures，2012，94(2)：553-562.

[61] LEE G C，KWEON J H，CHOI J H. Optimization of composite sandwich cylinders for underwater vehicle application [J]. Composite Structures，2013，96：691-697.

[62] HASHEMIAN R，MOHAREB M. Finite difference model for the buckling analysis of sandwich pipes under external pressure[J]. Ocean Engineering，2016，122：172-185.

[63] 李志敏. 船舶与海洋工程中复合材料圆柱壳结构屈曲和后屈曲行为研究[D]. 上海：上海交通大学，2008.
LI Z M. Buckling and postbuckling behavior of composite cylindrical shell structures in naval architecture and ocean engineering[D]. Shanghai：Shanghai Jiao Tong University，2008 (in Chinese).

[64] SRIDHARAN S，KASAGI A. On the buckling and collapse of moderately thick composite cylinders under hydrostatic pressure[J]. Composites Part B：Engineering，1997，28(5-6)：583-596.

[65] PARNAS L，ARMANIOS E A，SRIRAM P. Postbuckling analysis of composite stiffeners under uniaxial compression [C]//Mechanics Computing in 1990's and Beyond. Ohio：ASCE，1991.

[66] SHEN H S. Postbuckling of axially-loaded laminated cylindrical shells surrounded by an elastic medium[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures，2012，20(2)：130-150.

[67] 陈志刚，吴永康，程小全，等. 1/3 含口盖复合材料柱壳后屈曲性能[J]. 北京航空航天大学学报，2017，43(3)：544-550.
CHEN Z G，WU Y K，CHENG X Q，et al. Post-buckling performance of 1/3 composite cylindrical shell with cover[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2017，43(3)：544-550 (in Chinese).

[68] WHITE S C，WEAVER P M，WU K C. Post-buckling ana-

http://fhclxb.buaa.edu.cn

lyses of variable-stiffness composite cylinders in axial compression[J]. Composite Structures, 2015, 123: 190-203.

[69] SAJJADY S A, RAHNAMA S, LOTFI M, et al. Numerical analysis of delamination buckling in composite cylindrical shell under uniform external pressure: Cohesive element method[J]. Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production, 2017, 6(3): 87-106.

[70] LABANS E, BISAGNI C. Buckling and free vibration study of variable and constant-stiffness cylindrical shells[J]. Composite Structures, 2019, 210: 446-457.

[71] 陈悦，朱子旭，李永清，等. 夹层复合材料耐压圆柱壳深水静压承载特性分析[J]. 海军工程大学学报，2018，30(2)：87-91.
CHEN Y, ZHU Z X, LI Y Q, et al. On ultimate bearing capability of sandwich composites cylinders for underwater vehicle under hydrostatic external pressure[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2018, 30(2): 87-91 (in Chinese).

[72] 常新龙，刘万雷，张晓军，等. 缠绕复合材料壳体爆破压强的预测[J]. 航空动力学报，2017，32(12)：2817-2823.
CHANG X L, LIU W L, ZHANG X J, et al. Burst pressure prediction of filament wound composite shell[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(12): 2817-2823 (in Chinese).

[73] 程妍雪. 复合材料潜器耐压壳设计优化方法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2015.
CHENG Y X. Research on optimization and design methodology of composite material submersible pressure hull[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015 (in Chinese).

[74] 李彬，庞永杰，程妍雪，等. 基于EBF神经网络的复合材料耐压壳性能研究[J]. 哈尔滨工程大学学报，2016，37(10)：1323-1329.
LI B, PANG Y J, CHENG Y X, et al. Research on a composite pressure hull based on an EBF neural network[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2016, 37(10): 1323-1329 (in Chinese).

[75] ZHANG F, WAN Y, GU B, et al. Impact compressive behavior and failure modes of four-step three-dimensional braided composites-based meso-structure model[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2015, 24(6): 805-827.

[76] SESHADRI M, RAMJI M. Prediction of mechanical behaviour of adhesively bonded CFRP scarf jointed specimen under tensile loading using localised DIC and CZM[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019, 89(3): 88-108.

[77] 李树健，湛利华，周源琦，等. 基于图像处理的碳纤维增强树脂基复合材料固化压力-缺陷-力学性能建模与评估[J]. 复合材料学报，2018，35(12)：3368-3376.
LI S J, ZHAN L H, ZHOU Y Q, et al. Modeling and evaluation of curing pressure-defects-mechanical properties of carbon fiber composites based on image processing[J]. Acta Materiae compositae Sinica, 2018, 35(12): 3368-3376 (in Chinese).

[78] 王卿平，费本华，蒋明亮，等. 基于X射线计 算机断层扫描技术的重组竹湿热耦老化评估[J]. 复合材料学报，2018，35(4)：989-998.
WANG Q P, FEI B H, JIANG M L, et al. Hydrothermal aging evaluation method of recombinant bamboo based on X-ray computed tomography technology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(4): 989-998 (in Chinese).

[79] 黄雄，谭焕成，刘璐璐，等. 编织角和承载方向对三维四向编织复合材料动态压缩性能的影响[J]. 复合材料学报，2018，35(4)：823-833.
HUANG X, TAN H C, LIU L L, et al. Influence of braid angle and bearing direction on dynamic compressive properties of 3D four-directional braided composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(4): 823-833 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn