

纤维缠绕复合材料约束球形浮力芯材准静态压缩吸能机制*

周晓松¹, 张焱冰², 梅志远²

(1. 中国人民解放军军事科学院 国防科技创新研究院, 北京 100071;

2. 海军工程大学 舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033)

摘要:针对海洋工程平台的防护吸能和浮力储备需求,设计一种纤维缠绕复合材料约束球形浮力芯材吸能结构。为分析其变形损伤特征和能量耗散机理,通过 ABAQUS 有限元软件和万能材料试验机开展数值模拟分析和试验验证研究。通过力学响应特征和损伤破坏模式分析可知,结构吸能设计的关键在于表层和芯材的泊松比匹配。芯材主要通过塑性压缩损伤和剪切断裂破坏吸收能量,而表层吸能则主要通过环向的花瓣形拉伸断裂破坏。研究表明,该型结构单元压缩吸能特性优异,可实现海洋工程结构平台的防护吸能和浮力储备要求。

关键词:纤维缠绕;复合结构;球形单元;吸能机制

中图分类号:TB332 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2020)03-091-06



听语音
与作者互动
聊科研

Quasi-static compression energy absorption mechanism of filament wound composite constrained spherical buoyancy core material

ZHOU Xiaosong¹, ZHANG Yanbing², MEI Zhiyuan²

(1. National Innovation Institute of Defense Technology, Academy of Military Sciences PLA China, Beijing 100071, China;

2. College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to meet the demand of the impact protection and the buoyancy reserve of sea structure platform, a new energy absorption structure of filament wound composite constrained spherical buoyancy core material element was designed. The numerical simulation analysis and experimental test verification were carried out for the structure element by using the ABAQUS finite element software and electronic universal material testing machine in order to investigate the damage modes and energy dissipation mechanism. Further analysis of the mechanical response characteristics and damage modes shows that the key to the structural energy absorption design lies in the matching of the Poisson's ratio of the surface layer and the core material. The core material absorbs energy mainly through plastic compression damage and shear fracture damage, while the surface energy absorption is mainly through circular petal-shaped tensile fracture damage. The results show that this type of structural unit has excellent compression and energy absorption characteristics, and can realize the protection energy absorption and buoyancy reserve requirements of the offshore engineering structure platform.

Keywords: filament wound; composite structures; spherical element; energy absorption mechanism

复合材料与传统金属材料相比具有较好的结构可设计性和能量吸收效率,已在结构防护工程领域得到日益广泛的应用,如纤维缠绕复合材料圆柱壳防护结构已成为航空领域直升机机身防坠落、耐撞性设计的首选方案^[1-2]。近年来,复合材料能量吸收结构的设计研究主要集中在复合材料壳状或管状结构,单一依靠纤维和基体的微观断裂、局部屈曲以及层内裂纹的扩展开裂等来吸收冲击能量^[3-5]。然而,极端服役条件对能量吸收结构提出了更多的特殊性要求,如海洋结构平台

的防护设计,对结构设计提出了防护吸能和浮力储备的双重设计要求^[6-8]。此外,海洋工程平台在复杂的海洋环境条件下,随时可能遭遇船只等大型浮动物体的碰撞冲击,且冲击载荷通常具有低速度和大质量的典型特征^[9-10],材料体系的单一化设计极易造成结构出现崩溃性破坏^[11],从而大幅度降低结构的能量吸收效率^[12]。

本文以海洋结构平台的防护需求和浮力储备为背景,设计了一种纤维缠绕复合材料约束球形浮力芯材吸能结构,建立数值模型并结合试验研

* 收稿日期:2019-03-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51479205)

作者简介:周晓松(1990—),男,江苏连云港人,助理研究员,博士,E-mail:1251487779@qq.com

究对准静态压缩载荷作用下结构单元的损伤失效机理和能量耗散机制进行分析研究,进而达到预报和设计的目标。

1 数值模型

1.1 结构几何模型

能量吸收结构由表层和芯材两部分构成,如图 1(a)所示。结构表层由 E-玻璃纤维和环氧乙烯基酯树脂复合固化而成,芯材为轻质深海固体浮力材料,密度为 $0.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,静水压缩屈服应力值高于 18 MPa。复合材料表层采用螺旋缠绕设计,为避免缠绕过程中芯材表面出现丝束滑脱现象,将内部芯材的几何型线设计成椭球形并对纤维缠绕角度进行优化,优化后的纤维缠绕角度范围为 $0^\circ \sim 25^\circ$ 。试件样品采用湿法缠绕成型工艺,纤维与树脂的质量比为 1:1,纤维缠绕角度取为 25° ,如图 1(b)所示。

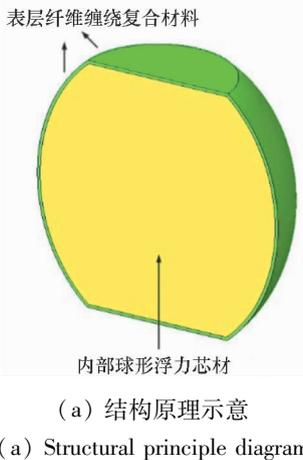


图 1 结构设计及制备成型工艺
Fig. 1 Structural design scheme and preparation molding process

结构单元的主要设计参量包括内部球形浮力芯材短半轴长度 R 、上下加载端面半径 D 和高度 H 、表层缠绕厚度 t_c 、缠绕角度 θ ,如图 2 所示。

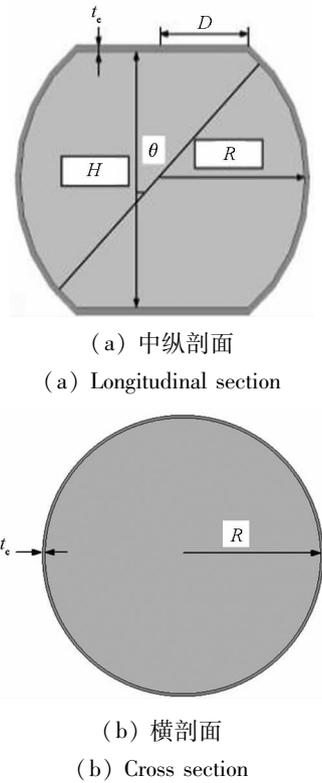


图 2 结构设计主要参数

Fig. 2 Main parameters of the structural design

1.2 复合材料损伤模型

结合吸能结构的轴压承载条件,采用 Tsai-Wu 准则中的二阶损伤张量进行简化,得到表层复合材料在不同应力状态下的力学性能退化方案。

Tsai-Wu 张量理论的表述多项式如下所示:

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j + F_{ijk} \sigma_i \sigma_j \sigma_k + \dots = 1, \quad i, j, k = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

式中, $\sigma_i, \sigma_j, \sigma_k$ 均为应力向量, F_i, F_{ij}, F_{ijk} 均为强度张量系数,其中约定 $\sigma_4 = \tau_{23}, \sigma_5 = \tau_{31}, \sigma_6 = \tau_{12}$ 。上述各张量均为对称张量,由试验材料与基本强度相联系。

在各个主方向上的空间应力分量通常表示为:

$$\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_{23}, \tau_{31}, \tau_{12}]^T \quad (2)$$

为降低确定张量系数的试验难度和费用,研究中取前二阶张量,表达式如下所示:

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_3 \sigma_3 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{33} \sigma_3^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 + 2F_{31} \sigma_3 \sigma_1 + F_{44} \sigma_4^2 + F_{55} \sigma_5^2 + F_{66} \sigma_6^2 = 1 \quad (3)$$

式(3)中共包括 12 个强度张量系数,可由下述公式具体表示: $F_1 = \frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C}; F_2 = \frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}; F_3 = \frac{1}{Z_T} - \frac{1}{Z_C}; F_{11} = \frac{1}{X_T X_C}; F_{22} = \frac{1}{Y_T Y_C}; F_{33} = \frac{1}{Z_T Z_C}; F_{44} =$

$$\frac{1}{S_{23}^2}; F_{55} = \frac{1}{S_{31}^2}; F_{66} = \frac{1}{S_{12}^2}; F_{12} = \frac{-1}{2 \sqrt{X_T X_C Y_T Y_C}}; F_{23} = \frac{-1}{2 \sqrt{Y_T Y_C Z_T Z_C}}; F_{31} = \frac{-1}{2 \sqrt{Z_T Z_C X_T X_C}}$$

其中,下标 T 和 C 分别为拉伸和压缩加载状态, X 为纤维增强主方向即纵向的拉伸和压缩强度, Y 为横观各向同性面内且垂直于纤维主方向即横向的拉伸和压缩强度, Z 为垂直于面板方向即面外的拉伸和压缩强度, S 为横观各向同性面内的剪切强度。使用 Fortran 编程语言编写 UMAT 损伤失效子程序,嵌入到 ABAQUS 材料模型库中进行计算。在数值模型中,复合材料力学性能退化刚度矩阵的各项参数均由复合材料力学性能测试所得,如表 1 所示。

表 1 复合材料参数

Tab. 1 Parameters of composite material

符号	属性	数值
E_{11}	纵向刚度	16.2 GPa
E_{22}	横向刚度	3.0 GPa
E_{33}	面外刚度	3.0 GPa
ν_{12}	环向泊松比	0.16
ν_{13}, ν_{23}	轴向泊松比	0.3
G_{12}, G_{13}	纵向剪切模量	3.0 GPa
G_{23}	横向剪切模量	2.8 GPa
X_T	纵向拉伸强度	360 MPa
X_C	纵向压缩强度	280 MPa
Y_T	横向拉伸强度	60 MPa
Y_C	横向压缩强度	116 MPa
S_L, S_T	纵、横剪切强度	63 MPa
ρ	密度	1660 kg/m ³

1.3 芯材弹塑性本构模型

浮力芯材的压缩本构参数由准静态压缩试验测试获取,5 个试件均为圆柱体,直径和高度均为 20 mm。采用 MTS Criterion Model 45 型电伺服万能材料试验机进行试验测试,加载应变率为 0.001/s,采用位移持续加载方式,直到试件出现明显的结构破坏。分析处理载荷-位移数据,可得到浮力芯材的应力-应变特征曲线,如图 3 所示。

由图 3 分析可知,在数值模型中可将浮力芯材定义为理想的弹塑性材料。由于 ABAQUS 模型中定义材料必须采用真实应力和应变,需要将

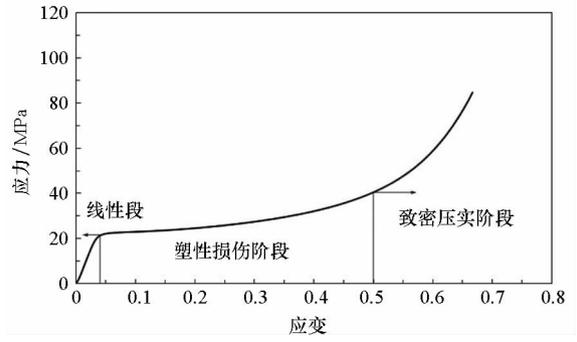


图 3 浮力芯材应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of the buoyancy core

准静态压缩试验获取的名义应力和名义应变数据进行转化。应变可根据式(4)进行转化:

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (4)$$

由于弹性及塑性变形具有不可压缩性,可得材料的真实应力与名义应力之间的关系: $\sigma = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom})$ 。由试验测试结果可知,浮力芯材在准静态压缩过程中横截面积并没有明显增加,可以近似地认为真实应力与名义应力相等,即:

$$\sigma = \sigma_{nom} \quad (5)$$

总应变和弹性应变的差值为塑性应变,即:

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon^l - \varepsilon^{el} = \varepsilon^l - \sigma/E \quad (6)$$

以上各式中, ε 为真实应变, ε_{nom} 为名义应变, σ 为真实应力, σ_{nom} 为名义应力, ε^{pl} 为真实塑性应变, ε^l 为真实总应变, ε^{el} 为真实弹性应变, E 为杨氏模量。

根据上述计算公式,结合试验数据,可以得到浮力芯材杨氏模量为 561 MPa,塑性参数如表 2 所示。

表 2 芯材塑性参数

Tab. 2 Core plasticity parameters

压缩屈服应力值/MPa	塑性应变
18.181	0.000
19.437	0.083
19.427	0.175
20.206	0.276
21.941	0.389
25.190	0.515
31.170	0.661
42.918	0.830

1.4 网格划分及边界条件

结构的数值分析模型采用 ABAQUS 有限元软件中的 Explicit 模块建立,网格全部划分为三

维实体单元,如图 4 所示。模型上下压缩圆盘均定义为离散刚体,下圆盘施加固支边界,上圆盘可沿着垂向移动。加载圆盘和试件之间定义面-面显式接触,切向设置摩擦系数 0.1,法向为硬接触。

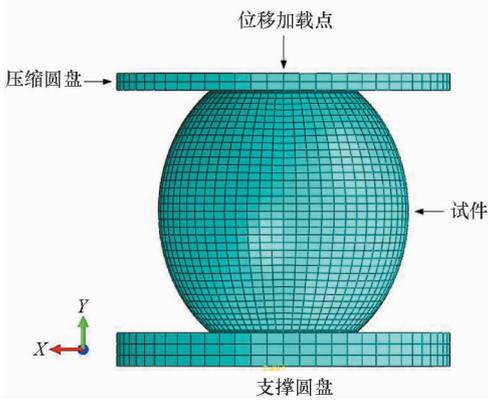


图 4 数值分析模型示意

Fig. 4 Schematic diagram of numerical analysis model

2 准静态压缩试验

2.1 试验设备及测试原理

结构单元试件的轴向准静态压缩试验在上海三思纵横 100 t 万能材料试验机上进行。准静态压缩试验测试过程中的载荷和位移数据可通过压头上的力传感器进行采集和存储,由控制计算机和分析软件进行后处理。

试验压缩加载速率始终保持不变,采用人为设定压缩行程的方式来控制实验。对于 10 m/s 以内的低速冲击而言,其变形损伤模式与准静态压缩过程相似度较高。与正常的冲击试验过程相比,准静态条件下更容易观察到详细的变形损伤演变过程。在验证新型吸能单元的冲击能量耗散特性是否良好之前,通常先开展准静态验证试验。

2.2 试验方案

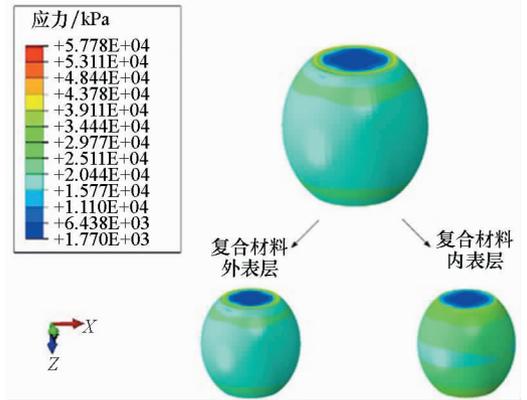
准静态试验加载工况分为两种,包括线性小载荷多次加载和极限载荷一次加载。线性加载载荷 20 kN,加载速度为 0.5 mm/min,前后重复 3 次,主要用于验证试件的工艺稳定性。极限载荷加载工况下,上圆盘持续位移加载速度为 2 mm/s,直至压缩载荷卸载或结构崩溃性破坏,得到完整的载荷-位移曲线。

3 结果对比分析

3.1 压缩响应特征分析

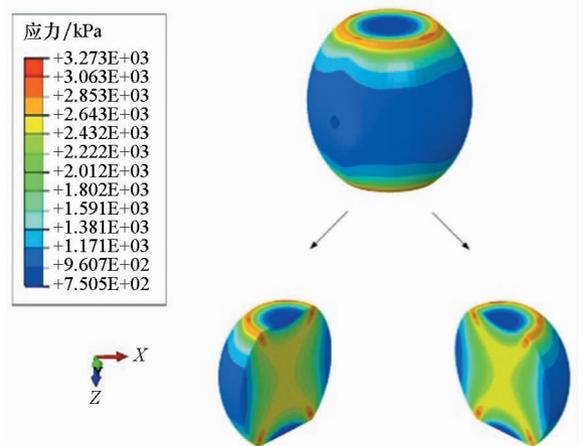
单元的准静态压缩响应过程可分为线弹性、

渐进损伤和结构破坏三个阶段。在线弹性阶段,压缩载荷与位移增加近似呈线性关系。轴向压缩载荷主要由内部芯材承载,而表层复合材料仅处于被动约束状态。此时,表层复合材料呈现典型的纬向带状应力分布特征;浮力芯材并未产生明显的横向膨胀效应,呈现斜向 45° 剪切方向应力分布特征,如图 5 所示。



(a) 复合材料层应力状态

(a) Stress state of composite layer



(b) 浮力芯材应力状态

(b) Stress state of buoyancy core

图 5 结构损伤应力状态

Fig. 5 Damage stress state of the structure

由于内部芯材泊松比 ν_{11} 远大于表层复合材料的环向泊松比 ν_{12} ,当内部芯材轴向受压产生横向膨胀变形时,表层处于被动约束状态进而产生环向约束应力。此时,单元内部芯材处于体积压缩状态,屈服强度和极限应变增大,从而提高了结构单元的力学承载能力和能量吸收水平。随着压缩载荷的上升,结构单元开始出现初始损伤并发出较大的基体脆性断裂声音,端面位置的复合材料呈现逐级压溃破坏模式。由于内部芯材不断加剧的压缩膨胀变形,表层复合材料被动状态下的环向约束应力不断增大,导致结构单元的破坏模式出现变化,开始进入渐进损伤阶段。结合数值

模型分析可知,当环向拉伸应力达到 60 MPa 时,表层复合材料沿纤维缠绕方向出现初始拉伸断裂并呈现出花瓣形损伤特征。随着准静态压缩载荷的进一步上升,表层的花瓣形裂纹持续增加,但并未出现表层和芯材分离的结构崩溃性破坏,如图 6 所示。



图 6 结构准静态压缩试验

Fig. 6 Quasi-static compression test of the structure

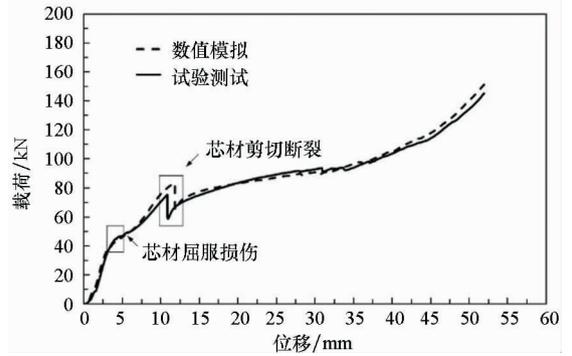
由图 6 分析可知,随着压缩位移的增加,表层复合材料被动状态下的环向约束效应是一个逐步减弱的过程,从而使内部芯材产生平稳的压缩塑性损伤和剪切断裂破坏,较大程度地提高了结构的能量吸收效率。由于内部浮力芯材具有椭圆形的几何型线特征,为避免湿法缠绕成型过程中芯材表面出现纤维缠绕丝束的滑落现象,最高缠绕角度设计值仅为 25°,相比轴向缠绕方向,环向的拉伸强度较低。随着内部芯材的压缩膨胀效应增强,表层环向应力不断上升,导致表层出现裂纹并沿纤维缠绕方向渐进扩展,直到对内部芯材的约束效应完全消失。

3.2 能量耗散机制分析

为进一步评估该型结构在海洋工程防护领域的工程应用价值,对结构单元的准静态压缩吸能机制进行了分析。结构数值分析和试验测试结果一致性较好,压缩载荷 - 位移曲线和能量 - 位移曲线对比如图 7 所示。

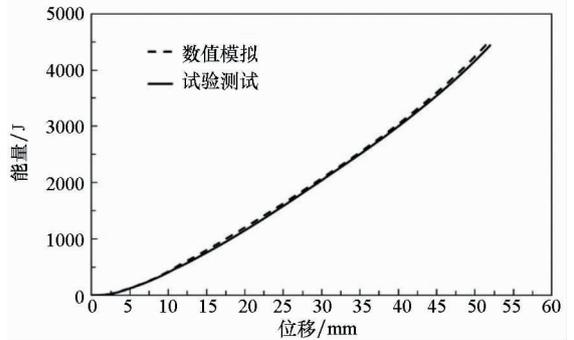
由图 7 分析可知,结构单元能量吸收的主要阶段为表层和芯材相互约束状态下的渐进损伤阶段。因此,提高稳态压缩载荷和渐进压缩应变区间是吸能设计的关键。进一步分析表层和芯材间的力学作用原理可知,吸能设计的关键在于协调匹配表层与芯材的泊松比参数。为了使内部浮力芯材在轴向压缩过程中较为稳定地吸收大量能量,表层复合材料在轴压膨胀阶段对内部芯材必须产生稳定持续的被动约束应力,因而表层复合材料的环向泊松比 ν_{12} 必须要远小于内部浮力芯材泊松比 ν_b 。由于复合材料表层具有较强的可

设计性,可通过改变纤维缠绕角度来调整泊松比参数,进而与内部芯材进行匹配,达到最优的能量耗散效率。



(a) 载荷 - 位移曲线对比

(a) Comparison of load - displacement curve



(b) 能量 - 位移曲线对比

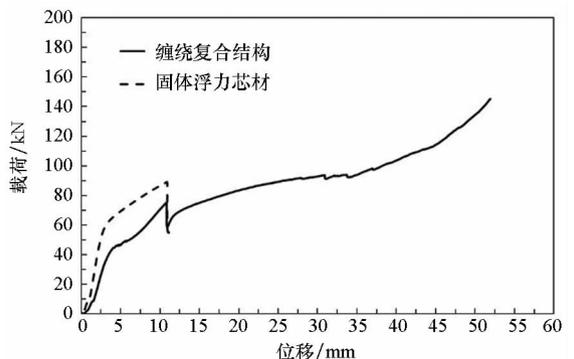
(b) Comparison of energy - displacement curve

图 7 数值模拟和试验测试对比

Fig. 7 Comparison of numerical simulation and experimental test

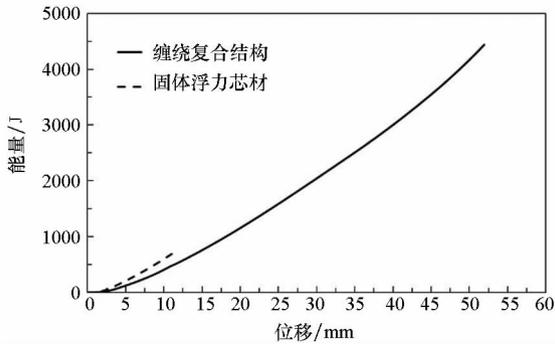
进一步对复合结构和独立芯材开展对比试验,从而验证复合结构设计的优越性,如图 8 所示。

由图 8 分析可知,由于表层复合材料持续稳定的被动约束作用,芯材在渐进损伤阶段产生了稳定的压缩塑性损伤和剪切断裂破坏,能量吸收效率较高。而独立芯材在压缩承载状态下则出现了结构的崩溃性破坏,吸能效率较低,破坏模式如图 9 所示。



(a) 载荷 - 位移对比

(a) Comparison of load - displacement



(b) 能量 - 位移对比

(b) Comparison of energy - displacement

图 8 复合结构和独立芯材试验曲线对比

Fig. 8 Comparison of experimental curves for the composite structure and the independent core material

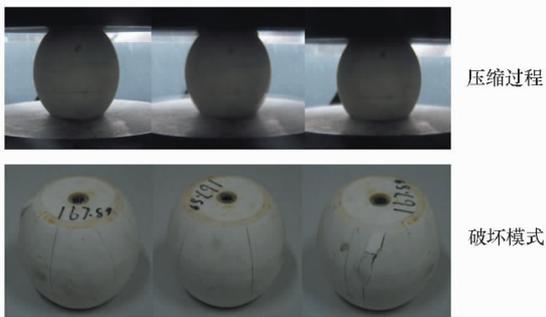


图 9 芯材准静态压缩试验

Fig. 9 Quasi-static compression test of the core

4 结论

1) 纤维缠绕复合材料约束球形浮力芯材吸能结构单元的准静态压缩吸能过程可分为三个阶段,包括线弹性阶段、渐进损伤阶段和结构破坏阶段。

2) 纤维缠绕复合材料约束球形浮力芯材吸能结构单元典型的压缩破坏模式主要有三种:上下端面复合材料逐级压溃破坏;中部区域复合材料花瓣形拉伸断裂破坏;内部浮力芯材压缩塑性损伤和剪切断裂破坏。

3) 渐进损伤阶段是结构吸收能量的主要阶段,吸能设计的关键在于表层复合材料与内部芯材的泊松比参数匹配性。

参考文献 (References)

[1] Lim J Y, Bart-Smith H. Theoretical approach on the dynamic global buckling response of metallic corrugated core sandwich

columns[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2014, 65: 14 - 31.

- [2] 闫光, 韩小进, 阎楚良, 等. 复合材料圆柱壳轴压屈曲性能分析[J]. 复合材料学报, 2014, 31(3): 781 - 787.
YAN Guang, HAN Xiaojin, YAN Chuliang, et al. Buckling analysis of composite cylindrical shell under axial compression load[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3): 781 - 787. (in Chinese)
- [3] Li X, Wang Z H, Zhu F, et al. Response of aluminum corrugated sandwich panels under air blast loadings: experiment and numerical simulation [J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 65: 79 - 88.
- [4] 赵效东. 海洋工程结构物碰撞失效准则研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
ZHAO Xiaodong. Research of failure criterion of offshore structural collision [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. (in Chinese)
- [5] Yan L L, Han B, Yu B, et al. Three-point bending of sandwich beams with aluminum foam-filled corrugated cores[J]. Materials & Design, 2014, 60: 510 - 519.
- [6] 周晓松, 梅志远, 吴梵. 玻璃纤维/树脂复合材料缠绕空心玻璃微珠/树脂实芯球形结构单元耐撞能量耗散机制[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6): 1472 - 1480.
ZHOU Xiaosong, MEI Zhiyuan, WU Fan. Energy dissipation mechanism of glass fiber/resin composite wound hollow glass microspheres/resin solid ball element under impact loading[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1472 - 1480. (in Chinese)
- [7] 梅志远, 周晓松, 吴梵. 不同高径比固体浮力材料单轴压缩变形机制及能量耗散特征[J]. 材料研究学报, 2018, 32(8): 591 - 598.
MEI Zhiyuan, ZHOU Xiaosong, WU Fan. Deformation mechanism and energy dissipation of solid buoyant material in different height to diameter under uniaxial compression loading[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2018, 32(8): 591 - 598. (in Chinese)
- [8] Biagi R, Bart-Smith H. In-plane column response of metallic corrugated core sandwich panels[J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49(26): 3901 - 3914.
- [9] Sun F F, Fan H L, Zhou C W, et al. Equivalent analysis and failure prediction of quasi-isotropic composite sandwich cylinder with lattice core under uniaxial compression [J]. Composite Structures, 2013, 101: 180 - 190.
- [10] Takano A. Buckling of thin and moderately thick anisotropic cylinders under combined torsion and axial compression[J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49(2): 304 - 316.
- [11] He W, Guan Z D, Li X, et al. Prediction of permanent indentation due to impact on laminated composites based on an elasto-plastic model incorporating fiber failure [J]. Composite Structures, 2013, 96(4): 232 - 242.
- [12] Ismail M S, Purbolaksono J, Andriyana A, et al. The use of initial imperfection approach in design process and buckling failure evaluation of axially compressed composite cylindrical shells[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 51: 20 - 28.