

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20161130.002

纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体 准静态压缩吸能机制

周晓松, 梅志远, 吴梵*
(海军工程大学 舰船工程系, 武汉 430033)

摘 要: 提出并设计了一种新型纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体吸能结构单元。为探讨其在准静态压缩载荷作用下初始损伤的产生、扩展及演变规律, 基于 ABAQUS 建立该单元数值分析模型, 并开展了准静态压缩试验。数值模拟与试验现象综合分析表明, 准静态压缩载荷作用下单元结构的响应具有三阶段特征, 包括初始线弹性压缩阶段、渐进损伤阶段和结构破坏阶段。固体浮力芯材在压缩载荷作用下产生塑性损伤变形和剪切断裂破坏, 纤维缠绕复合材料表层在芯材横向膨胀效应引起的环向应力作用下发生环向纤维的拉伸断裂破坏, 导致单元结构稳态吸能过程的终止。研究结果表明, 该单元比吸能效率远高于传统的复合材料圆柱壳结构。

关键词: 纤维缠绕; 复合材料; 夹芯圆柱体; 数值模型; 比吸能效率

中图分类号: TB330.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2017)08-1764-08

Energy absorption mechanism of filament wound composite sandwich cylinder under quasi-static compression loading

ZHOU Xiaosong, MEI Zhiyuan, WU Fan*

(Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The new energy absorption structure element of filament wound composite sandwich cylinder has been put forward and designed. In order to investigate the damage formation, extension and evolvement law of the element, the numerical analysis model was built by ABAQUS and the experiments were conducted under quasi-static compression loading. Comprehensive analysis of numerical simulation and experimental results show that the quasi-static compression process can be divided into three stages, including the initial elastic compression stage, the progressive damage stage and the structural damage stage. The plastic damage deformation and shear failure of solid buoyant core occur under compression load. Then steady energy absorption process is terminated by the tensile breaking of hoop fibers owing to transverse expansion effect of solid buoyant core. The results show that the energy absorption efficiency of this element is much higher than that of the traditional composite cylindrical shell structure.

Keywords: filament wound; composite; sandwich cylinder; numerical model; energy absorption efficiency

纤维缠绕复合材料薄壁圆柱壳结构在轴向压缩载荷作用下发生缠绕纤维和树脂基体的微观断裂局部屈曲以及层内裂纹的扩展开裂等, 能够较为稳定地吸收大量的冲击能, 是一种较为理想的冲击吸能元件。对此已有大量的数值模拟和试验研究, 并已在结构防护工程领域得到日益广泛的应用^[1-6],

如航空航天领域, 复合材料圆柱壳缓冲底座结构已成为直升机机身防坠落耐撞设计的首选方案。然而在一些特殊或者极端的使用环境中, 不仅需要防护结构具有优异的吸能特性, 而且还要具有较好的环境适应性及其他特殊性能^[7-12]。如水下结构平台非耐压舷间耐撞防护结构的设计, 不仅对防护

结构的吸能特性提出了较高要求, 而且需要防护结构为水下结构平台提供一定的储备浮力。近年来出现了大量的轻质耐压材料, 由于其质量轻, 压垮力平台较为平稳, 有利于结构的稳定吸能且能提供一定的储备浮力, 因而受到了广泛的关注。以深水轻质耐压浮力芯材为填充材料的薄壁管结构作为一种新型的吸能元件, 开始引入水下结构平台工程设计领域^[13-19]。

本文基于上述防护结构的使用环境和功能性要求提出并设计了一种新型的轻质浮力补偿型纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体吸能结构单元, 建立数值模型并结合试验研究对准静态压缩载荷作用下单元结构的吸能机制进行分析研究, 探讨了纤维缠绕复合材料表层和内部固体浮力芯材的协同承载特性和复合吸能机制。该研究工作为水下复合材料耐撞吸能结构设计提供了新的思路, 在理论和工程上均具有重要意义, 可供研究和设计者参考。

1 数值模型

1.1 结构几何模型

本文设计的纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体结构单元由表层纤维缠绕复合材料和内部轻质中空玻璃微珠增强乙烯基酯固体浮力芯材组成, 如图 1 所示。制作该结构需要三种原材料, 表层复合材料采用的缠绕纤维为 E-玻璃纤维, 丝束宽度为 3.2 mm, 树脂基体采用环氧改性的乙烯基酯树脂, 内部芯材选用轻质深海固体浮力材料, 比重低于 0.5, 静水耐压强度大于 18 MPa。E-玻璃纤维因其良好的强度特性和耐水降解性, 是船舶复合材料层合结构最普遍的增强材料。乙烯基酯树脂具有良好的抗腐蚀性能、水解稳定性和卓越的物理特性, 如抗冲击和抗疲劳特性, 与 E-玻璃纤维固化成型后的复合界面性能良好, 整体结构性能较优。

结构单元的主要设计参量包括: 圆柱形浮力芯材半径 $R=20\text{ mm}$, 高度 $H=20\text{ mm}$; 表层复合材料厚度 $d=2\text{ mm}$ 。复合材料表层薄壁结构采用环向缠绕方式, 缠绕角度为 85° , 测试试件结构尺寸如图 2 所示。

为保证结构单元试件的制作质量, 采用工艺性较好的湿法缠绕成型工艺。首先在数控机床上根据型线要求加工好圆柱形固体浮力芯材, 然后采用湿法缠绕的方式在圆柱体表面均匀缠绕玻璃纤维丝

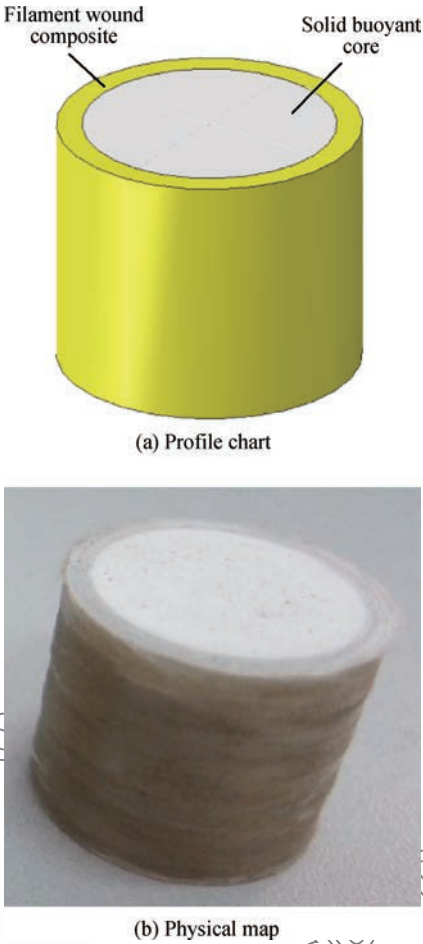


图 1 纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of filament wound composite sandwich cylinder

束, 最后在常温下固化成型, 成型后纤维树脂质量比为 100 : 100。固化成型后在机床上进行切割操作, 形成结构单元分段, 工艺流程如图 3 所示。

1.2 复合材料渐进损伤模型

本文采用的复合材料渐进损伤模型是基于材料应力状态的材料弹性性能退化方案。在损伤模型中, 应力状态和材料退化弹性性能由损伤变量相联系, 三者的关系如图 4 所示。

纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体试件受到准静态轴压载荷时, 表层复合材料会出现多种形式的损伤, 主要包括纤维断裂、纤维压缩、基体挤压和基体开裂等, 且不同的损伤形式之间会相互影响。由于表层复合材料结构是由几层缠绕角度均相同的网状纤维束粘结而成的层合结构, 对于层合结构的失效, 忽略其层间应力的影响, 采用 ABAQUS 有限元软件中的二维 Hashin 失效准则对试验过程可进行有效地损伤模拟, 具体表达式表示如下:

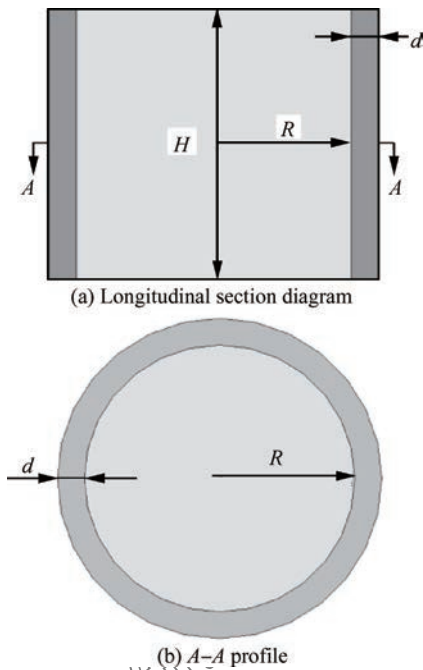


图 2 纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体结构主要设计参量
Fig. 2 Design parameters of filament wound composite sandwich cylinder

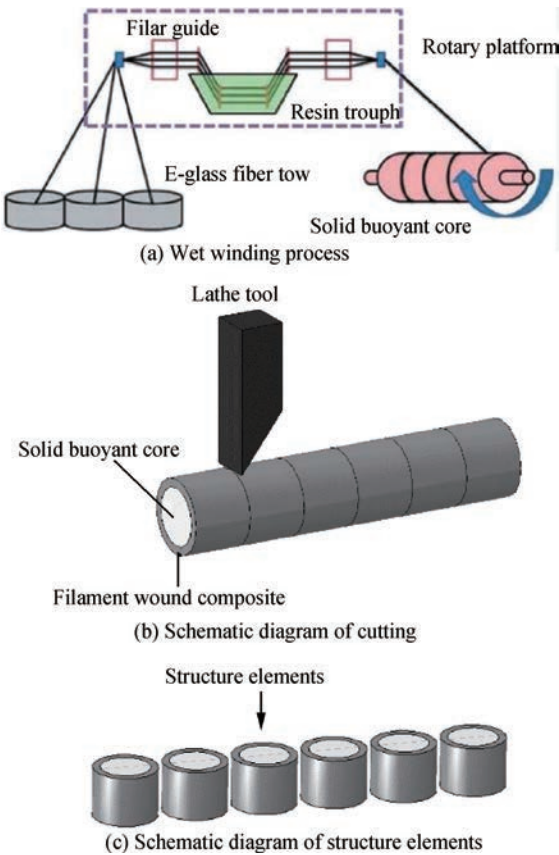


图 3 纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体结构工艺流程
Fig. 3 Technological process of filament wound composite sandwich cylinder

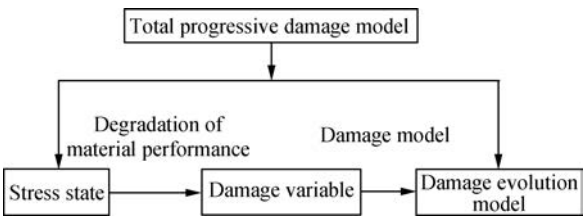


图 4 渐进损伤模型结构
Fig. 4 Structure of progressive damage model

纤维拉伸失效:

$$F_f^t = \left[\frac{\sigma_{11}}{X_T} \right]^2 + \alpha \left[\frac{\sigma_{12}}{S_T} \right]^2, \quad \sigma_{11} \geq 0 \quad (1)$$

纤维压缩失效:

$$F_f^c = \left[\frac{\sigma_{11}}{X_C} \right]^2, \quad \sigma_{11} \leq 0 \quad (2)$$

基体拉伸失效:

$$F_m^t = \left[\frac{\sigma_{22}}{Y_T} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_{23}}{S_L} \right]^2, \quad \sigma_{11} \geq 0 \quad (3)$$

基体压缩失效:

$$F_m^c = \left[\frac{\sigma_{22}}{2S_T} \right]^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \left[\frac{\sigma_{12}}{S_L} \right]^2 \quad (4)$$

式中: F_f^t 和 F_f^c 分别为纤维拉伸失效和压缩失效值, F_m^t 和 F_m^c 分别为基体拉伸失效和压缩失效值, 其中下标 f 和 m 分别代表纤维和基体, 上标 t 和 c 分别代表拉伸和压缩状态; X_C 为纵向抗压强度; X_T 为纵向抗拉强度; Y_T 为横向抗拉强度; Y_C 为横向抗压强度; S_L 和 S_T 为抗剪强度, 它们均由复合材料材料力学性能试验测定; α 是决定剪切应力在纤维拉伸失效中所起作用的贡献系数; σ_{11} 、 σ_{12} 和 σ_{22} 是有效应力张量 σ 的分量, 复合材料的工程常数和损伤强度值如表 1 所示。

表 1 复合材料单向板参数

Table 1 Material properties of composite laminate		
Property	Symbol	Value
Longitudinal stiffness	E_{11} /GPa	16.2
Transverse stiffness	E_{22} /GPa	3.0
Out-of-plane stiffness	E_{33} /GPa	3.0
Poisson's ratio	ν_{12}	0.16
Poisson's ratio	ν_{13}, ν_{23}	0.3
Shear modulus	G_{12}, G_{13} /GPa	3.0
Shear modulus	G_{23} /GPa	2.8
Longitudinal tensile strength	X_T /MPa	360
Longitudinal compressive strength	X_C /MPa	280
Transverse tensile strength	Y_T /MPa	60
Transverse compressive strength	Y_C /MPa	116
Shear strength	S_L, S_T /MPa	63
Density	ρ /(kg·m ⁻³)	1 660

1.3 芯材弹塑性本构模型

由于固体浮力芯材由中空玻璃微珠和乙烯基酯树脂复合而成, 其力学性能与致密金属材料有很大的不同, 具有两个典型特征, 即静水压力影响屈服强度和体积塑性可压缩特点。对于前者, 将应力第一不变量包含在屈服函数的定义中即可; 对于后者, 引入非关联塑性流动模型是常用的处理方式。基于固体浮力芯材准静态压缩试验结果, 将固体浮力芯材模型定义为 Deshpande-Fleck 弹塑性可压缩本构模型^[20], 该模型为各向同性硬化模型, 其屈服函数定义为

$$Y = \sqrt{q^2 + \alpha^2 p^2} - B \tag{5}$$

$$B = \alpha p_c = \sigma_c \sqrt{1 + (\alpha/3)^2} \tag{6}$$

$$\alpha = \frac{3k}{\sqrt{9 - k^2}} \tag{7}$$

式中: q 为等效 Mises 应力; p 为静水压力; B 定义为屈服面椭圆的大小, 具体见式(6); p_c 为材料的静水压缩屈服强度; σ_c 为单轴压缩屈服强度的绝对值; α 定义为屈服面的形状影响影子, 具体见式(7); k 为单轴压缩状态与静水压缩状态下浮力芯材初始屈服应力的比值。等效 Mises 应力屈服面与平均应力屈服面的关系如图 5 所示。

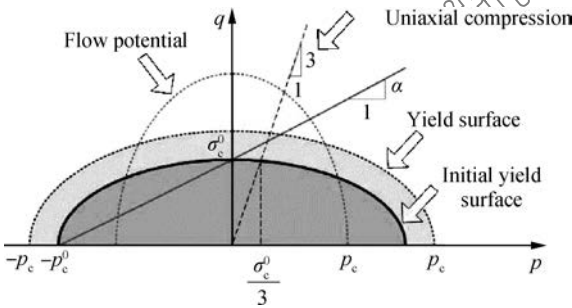


图 5 中空玻璃微珠增强乙烯基酯固体浮力芯材本构模型
Fig. 5 Constitutive model of hollow glass bead reinforced vinyl ester solid buoyant core

材料的塑性流动采用非关联塑性模型描述。该各向同性硬化模型的流动势函数定义为

$$G = \sqrt{q^2 + \beta^2 p^2} \tag{8}$$

$$\beta = \frac{3}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1 - 2\nu_p}{1 + \nu_p}} \tag{9}$$

其中: ν_p 为塑性泊松比率, 具体见式(10)。塑性应变如式(11)所示, λ 为非负塑性流动乘法算子。

$$\nu_p = \frac{3 - k^2}{6} \tag{10}$$

$$\dot{\epsilon}^p = \lambda \frac{\partial G}{\partial \sigma} \tag{11}$$

由以上分析可以看出, 弹塑性可压缩本构模型利用了单轴和三轴(静水压缩)数据刻画材料初始屈服面与加载曲面的演化, 可描述固体浮力芯材在复杂应力状态下的力学响应。根据上述计算公式, 结合圆柱形固体浮力芯材的单轴压缩试验数据, 可以得到固体浮力芯材屈服应力和塑性应变之间的关系^[21], 弹塑性本构参数如表 2 所示。浮力芯材杨氏模量和泊松比分别为 561 MPa 和 0.39, 塑性段的泊松比为 0.26。

表 2 中空玻璃微珠增强乙烯基酯固体浮力芯材
弹塑性本构参数

Table 2 Elastic-plastic data of hollow glass bead reinforced vinyl ester solid buoyant core

Yield stress/MPa	Plastic strain
18.181	0
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

本文采用 Abaqus/Explicit 建立单元结构在试验条件下的数值模型, 分别采用 C3D8R 和 SC8R 三维实体单元对固体浮力芯材和复合材料表层进行网格划分, 对上下加载端面应力集中区域进行网格细化。为提高模型的计算效率, 暂不考虑固体浮力芯材与表层复合材料之间的复合界面。模型上下方的钢质压头定义为离散刚体, 下压头定义为固支边界条件, 上压头沿垂向可以移动。压头和试件单元之间的接触通过显示分析里面的通用接触(General contact)来定义; 法向之间采用硬接触(Hard contact); 切向之间存在摩擦, 摩擦系数为 0.1; 上压头和参考点之间设置 MPC 约束, 在参考点施加垂向位移加载, 加载速度为 1.2 mm/min, 此时结构的动态效应可以忽略, 模型及网格划分如图 6 所示。

2 准静态压缩试验

2.1 试验设备及测试原理

试验工作在海军工程大学舰船结构与材料工程实验室完成, 试验主要设备为西安力创 10⁴ kg 电伺

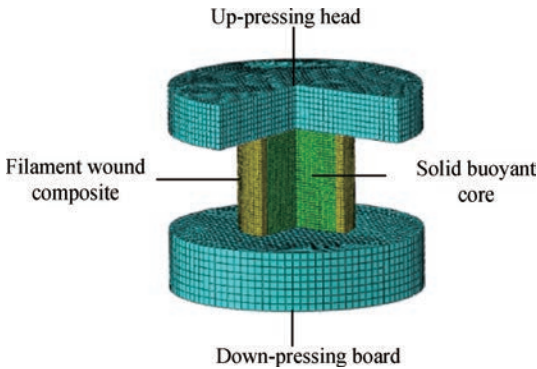


图 6 纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体结构有限元模型
Fig. 6 Finite element model of filament wound composite sandwich cylinder structural element

服万能材料试验机。压缩过程的载荷-位移曲线可由试验机经配套软件进行采集和存储，输入计算机处理。

纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体结构单元的准静态压缩试验是一种位移控制试验，通过人为设定压缩行程来控制实验过程。在压缩过程中加载速率保持恒定，这与真实冲击吸能历程中压缩速率不断降低直到撞击落锤静止的事实并不完全相同。对于 10 m/s 以内的低速碰撞，准静态下的变形模式与低速冲击过程中的变形模式十分相似，相比正常冲击的试验条件更容易观察到详细的破坏细节和破坏历程，尤其是在检验新材料、新结构是否具有优异的缓冲吸能性能的时候，一般首先进行准静态试验进行验证。

2.2 试验测试方案

为了对比分析新型纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体结构单元设计方案的优越性，对纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体结构单元(Filled)试件开展试验研究的同时，对同尺寸的传统纤维缠绕复合材料圆柱壳空管结构(Unfilled)和填充的圆柱形固体浮力芯材试件(SBM)进行准静态压缩对比试验，如图 7 所示。

试验加载情况包括线性载荷重复加载和极限加载。前一种方式，加载速度为 1.20 mm/min，每一试件重复 3 次，用于验证试件工艺稳定性和测量初始刚度。后一种方式为位移持续加载，加载速度为 1.2 mm/min，直至卸载或试件出现明显的结构破坏，以获取完整的载荷/位移曲线。为了减小加载面摩擦力的影响，对加载面进行润滑油涂层处理。

3 结果对比分析

3.1 破坏模式及吸能机制

固体浮力芯材、纤维缠绕复合材料圆柱壳和纤

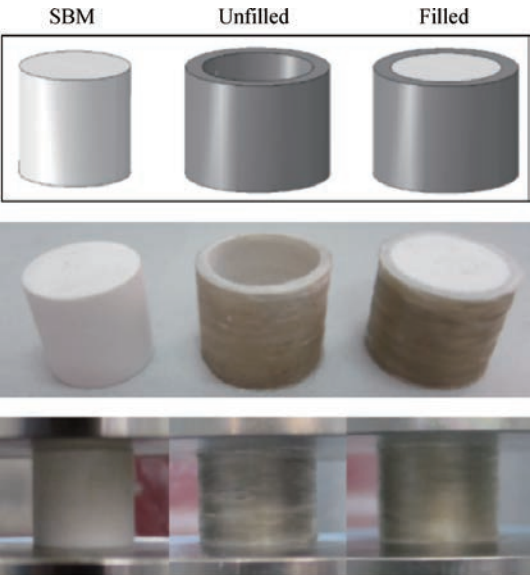


图 7 固体浮力芯材、纤维缠绕复合材料圆柱壳及纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体对比测试方案示意图
Fig. 7 Comparative test of solid buoyant core, filament wound composite shell and filament wound composite sandwich cylinder

纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体结构准静态压缩试验的载荷-位移曲线如图 8 所示。数值模拟(FEA)和试验(Exp)结果对比如图 9 所示。通过对比分析可知，三种结构均具有三阶段响应特征，包括初始弹性压缩承载阶段、渐进损伤阶段和结构压实破坏阶段，具体分析过程如下。

为了分析复合材料夹芯圆柱体协同承载特点和复合损伤机制。首先需要对固体浮力芯材在单轴压缩状态下的变形和损伤机制进行分析。在初始弹性压缩阶段，准静态压缩载荷随位移增加近似呈线性

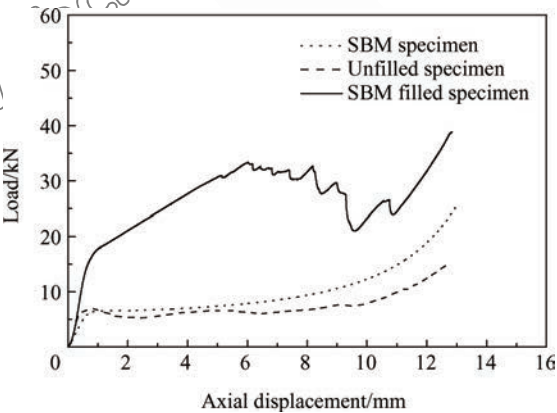


图 8 固体浮力芯材、纤维缠绕复合材料圆柱壳及纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体试件载荷-位移曲线
Fig. 8 Load-displacement curves of solid buoyant core, filament wound composite shell and filament wound composite sandwich cylinder specimens

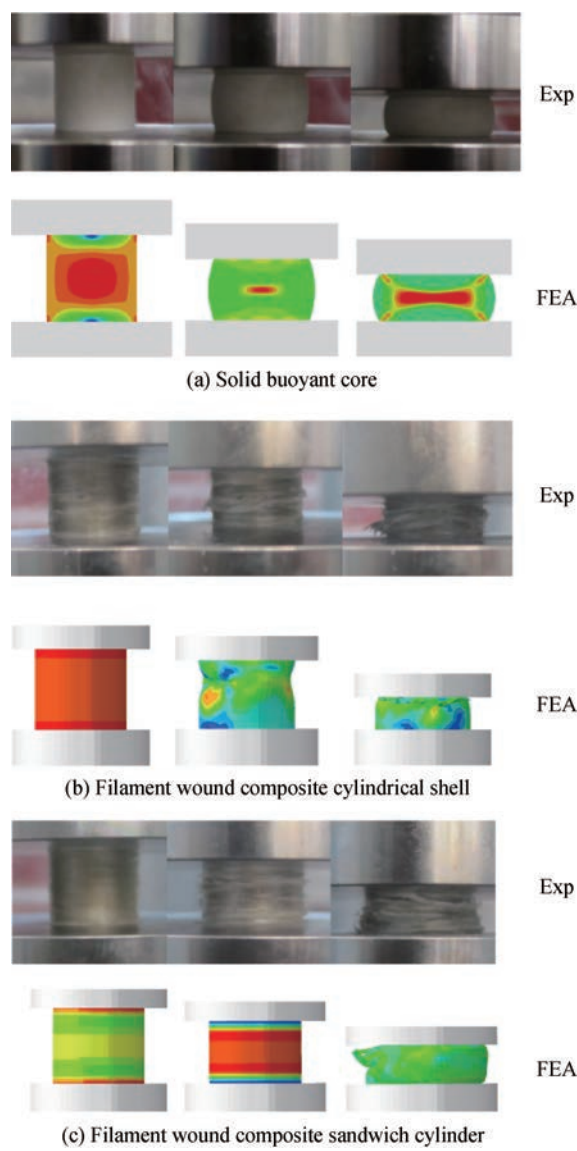


图9 固体浮力芯材、纤维缠绕复合材料圆柱壳及纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体试件仿真与试验结果对比

Fig. 9 Comparison of experiment and simulation results for solid buoyant core, filament wound composite shell and filament wound composite sandwich cylinder specimens

增长,此时固体浮力芯材呈现典型的均布压缩应力分布特征;随着压缩变形的增加,固体浮力芯材加载端接触面积逐步增加,横向膨胀变形逐渐明显,沿斜向45°方向呈现剪切应力分布特征;随着位移继续加载,浮力芯材进入压实阶段,载荷迅速上升,试验过程和数值分析结果一致性较好,如图9(a)所示。

纤维缠绕复合材料圆柱壳结构在轴向压缩载荷下的变形特征和损伤机制如图9(b)所示。在压缩载荷作用下,上下加载端面位置的复合材料开始出现损伤,大量轴向和环向的层间裂纹和层内裂纹萌

发和扩展;当载荷继续增加时,纤维缠绕复合材料圆柱壳结构进入压缩载荷较为稳定的大变形吸能阶段,直到结构完全破坏,载荷-位移曲线如图8所示。在渐进损伤初始阶段,轴向呈现明显的树脂基体压缩损伤特征,轴向裂纹的扩展主要取决于树脂基体的压缩性能;在渐进损伤后续阶段,环向裂纹的扩展占据主导地位,主要取决于环向缠绕纤维的刚度和断裂应变,纤维缠绕角度使绝大多数裂纹沿环向扩展。同时环向层束受到横向剪切的作用,层束之间形成弯矩,当超过材料的拉伸强度时,层束就会发生断裂。因此,纤维缠绕复合材料圆柱壳能量耗散的主要路径为层内裂纹扩展、层间裂纹扩展以及层束的断裂。纤维缠绕复合材料圆柱壳结构在压缩载荷作用下虽然能较多地吸收能量,但也存在压缩过程中载荷稳定性较差且纤维断裂不充分的缺点。理论上,纤维拉伸断裂所吸收的能量要远高于树脂基体损伤和纤维弯曲断裂所吸收的能量。因此,将固体浮力芯材引入纤维缠绕复合材料圆柱壳结构,利用固体浮力芯材塑性损伤段的横向膨胀效应使纤维缠绕复合材料表层发生充分的拉伸断裂破坏,提高纤维缠绕复合材料表层结构的能量吸收效率。纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体的载荷-位移曲线如图8所示。结合固体浮力芯材和纤维缠绕复合材料圆柱壳试验结果分析可知,当纤维缠绕复合材料圆柱壳与固体浮力芯材协同承载时,初始载荷屈服点比单独承载时的屈服点载荷之和提高33%。当压缩载荷达到13.9 kN时,结构单元产生初始损伤并伴有细微的基体断裂声响,上下加载端面位置的复合材料呈现压溃皱褶的破坏模式,夹芯结构单元压缩刚度出现下降。结合数值模型分析可知,结构单元上下加载端面区域与压头相接处产生压缩应力较大,导致复合材料出现纤维压缩损伤和树脂基体断裂破坏。随着载荷和变形的继续增大,结构进入渐进损伤阶段,在压缩载荷和浮力芯材横向膨胀效应的共同作用下,结构承载能力继续上升,表层缠绕复合材料的损伤模式相较于轴压纤维缠绕复合材料圆柱壳结构发生了较大变化,由横向剪切载荷作用下的层束弯曲破坏模式转变为芯材横向膨胀变形作用下的层束拉伸断裂破坏,直到纤维缠绕复合材料表层结构完全破坏,固体浮力芯材失去约束效应,整体结构丧失承载能力。纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体结构单元的最终破坏模式如图9(c)所示。

3.2 能量吸收特性

固体浮力芯材、纤维缠绕复合材料圆柱壳和纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体结构的能量-位移曲线和比吸能-应变曲线如图 10 所示。

分析可知，由于浮力芯材与复合材料圆柱壳复合协同承载和复合效应作用，压缩载荷作用下复合

夹芯结构吸收的总能量远高于单独承载状态下吸收能量之和，且随着加载位移的增加呈上升趋势；当加载位移达到 13 mm 时，与单独承载吸能总和相比，复合结构的能量吸收能力提高约 52%；进一步对结构的比吸能特性进行分析可知，复合夹芯结构相较于传统的复合材料圆柱壳结构，比吸能效率提高了 1.1 倍。

结合 ABAQUS 数值模拟分析结果，对准静态压缩结束后结构不同组成部分的能量吸收总值进行输出并进行对比分析，如表 3 所示。整体模型的能量平衡可表示为

$$E_1 + E_V + E_{FD} + E_{KE} - E_W = E_{total}$$
 (12)

其中： E_1 为内能； E_V 为粘性耗散能； E_{FD} 是摩擦耗散能； E_{KE} 是动能； E_W 是外加载荷所做的功；这些能量分量的总和为 E_{total} ，它必须是个常数。在数值分析模型中，只是近似的常数，一般有小于 1% 的误差。

$$E_1 = E_E + E_P + E_{CD} + E_A$$
 (13)

内能是能量的总和，包括可恢复的弹性应变能 E_E 和非弹性过程的能量耗散，例如塑性耗散能 E_P 、黏弹性或者蠕变过程的能量耗散 E_{CD} 和伪应变能 E_A 。伪应变能包括储存在沙漏阻力以及在壳和梁单元的横向剪切中的能量。出现大量的伪应变能表明必须对网格进行细划或其他的修改。伪应变能 ALLSE < 5%，说明沙漏可以控制。

对表 3 分析可知，整个加载过程中，外力对固体浮力芯材所做的功绝大部分转化为内能，内能中的绝大部分为非弹性不可恢复的塑性耗散能，吸能的主要区间段为固体浮力芯材的塑性变形过程区间。而在纤维缠绕复合材料圆柱壳的整个加载过程中，外力所做的功绝大部分转化为内能、摩擦耗散

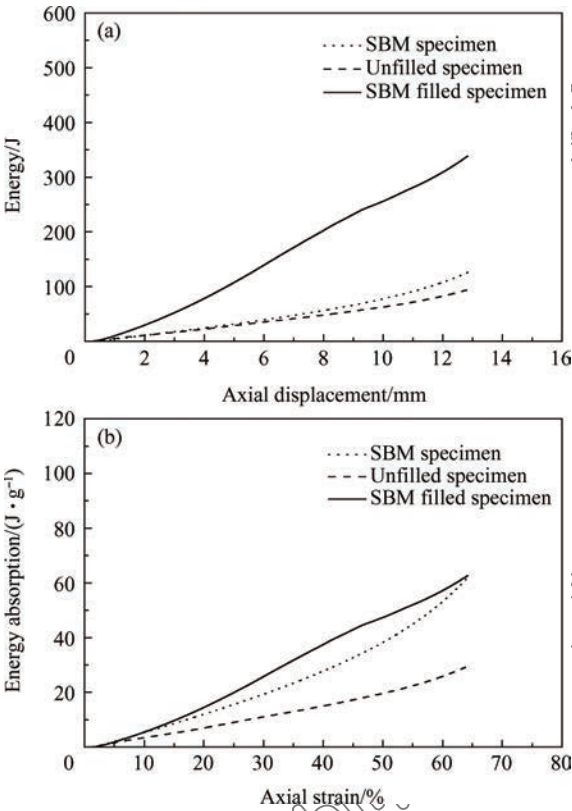


图 10 固体浮力芯材、纤维缠绕复合材料圆柱壳及纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体试件能量-位移曲线及比能量-应变曲线
Fig. 10 Energy-axial displacement curves and specific energy-strain curves of solid buoyant core, filament wound composite shell and filament wound composite sandwich cylinder specimens

表 3 固体浮力芯材、纤维缠绕复合材料圆柱壳及纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体结构能量吸收分布
Table 3 Energy absorption distribution of solid buoyant core, filament wound composite shell and filament wound composite sandwich cylinder specimens

Energy type	Specimen		
	Solid buoyant core	Filament wound composite cylindrical shell	Filament wound composite sandwich cylinder
Total energy/J	126	95	335
Fricitional dissposational energy/J	5	16	20
Viscous dissposational energy/J	1	6	9
Kinetic energy/J	0.000 7	0.000 8	0.022
Internal energy/J	120	73	306
Damage dissposational energy/J	0	50	132
Plastic dissposational energy/J	106	0	126
Creep dissposational energy/J	0	0	0
Elastic strain energy/J	12	20	36
Artificial strain energy/J	2	3	12

能和粘性耗散能三部分,内能中主要由复合材料损伤耗散能和储存的可恢复的线弹性应变能。吸能的主要区间段为复合材料损伤区间。由于浮力芯材和纤维缠绕复合材料圆柱壳协调承载作用和复合损伤特性,纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体结构的能量吸收效率得到大幅度上升,固体浮力芯材的塑性损伤吸能和纤维缠绕复合材料圆柱壳结构的损伤吸能总量相较于单独承载阶段均得到了提高。

4 结 论

(1) 纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体结构单元在轴向准静态压缩载荷作用下的吸能过程分为三个阶段,分别为初始弹性压缩阶段、渐进损伤阶段和结构破坏阶段。其中纤维缠绕复合材料表层和内部固体浮力芯材相互协调承载作用下的渐进损伤阶段是结构吸能的主要阶段,复合损伤机制使固体浮力芯材和纤维缠绕复合材料表层的吸能效率得以充分的发挥。

(2) 采用的数值模型可以有效地模拟纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体结构单元在准静态压缩载荷作用下结构损伤的演变规律,具有一定的工程价值。

(3) 纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体结构单元的后期设计应重点开展表层复合材料缠绕厚度与角度优化设计以及与内部浮力芯材的刚度匹配性设计。

参考文献:

- [1] LIM J Y, BART-SMIT H 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] 陈立明,戴政,范华林,等. 轻质点阵夹层圆柱壳的设计与分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2012, 52(4): 489-493.
CHEN Liming, DAI Zheng, FAN Hualing, et al. Design and analysis of lightweight lattice sandwich cylinders[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2012, 52(4): 489-493 (in Chinese).
- [3] 同光,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 Xiaojing, 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).
- [4] LI X, WANG Z H, ZHU F, et al. Response of aluminium corrugated sandwich panels under air blast loadings: Experiment and numerical simulation[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 65: 79-88.
- [5] YAN L L, YU B, HAN B, et al. Compressive strength and energy absorption of sandwich panels with aluminum foam filled corrugated cores[J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 86: 142-148.
- [6] 卢天健,何德坪,陈常青,等. 超轻多孔金属材料的多功能

- 特性及应用[J]. *力学进展*, 2006, 36(4): 517-535.
LU Tianjian, HE Deping, CHEN Changqing, et al. The multi-functionality of ultra-light porous metals and their applications[J]. *Advances in Mechanics*, 2006, 36(4): 517-535 (in Chinese).
- [7] 范华林,杨卫. 轻质高观点阵材料及其力学性能研究进展[J]. *力学进展*, 2007, 37(1): 99-112.
FAN Hualing, YANG Wei. Development of lattice materials with high specific stiffness and strength[J]. *Advances in Mechanics*, 2007, 37(1): 99-112 (in Chinese).
 - [8] 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).
 - [9] 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.
 - [10] JIN F N, CHEN H L, ZHAO L, et al. Failure mechanisms of sandwich composites with orthotropic integrated woven corrugated cores: Experiments[J]. *Composite Structures*, 2013, 98: 53-58.
 - [11] XIONG J, GHOSH R, MA L, et al. Bending behavior of lightweight sandwich-walled shells with pyramidal truss cores[J]. *Composite Structures*, 2014, 116: 793-804.
 - [12] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 107-110.
XU Zhilun. Elastic mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 107-110 (in Chinese).
 - [13] REANY J, GRENESTEDT J L. Corrugated skin in a foam core sandwich panel[J]. *Composite Structures*, 2009, 89(3): 345-355.
 - [14] 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.
 - [15] 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.
 - [16] 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.
 - [17] ABAQUS Inc Ltd. Abaqus theory manual[M]. Version 6.12. Rhode Island: ABAQUS Inc Ltd, 2012.
 - [18] 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.
 - [19] 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.
 - [20] DESHPANDE V S, FLECK N A. Isotropic constitutive models for metallic foams[J]. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 2000, 48(6-7): 1253-1283.
 - [21] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 219-223.
ZHUANG Zuo, YOU Xiaochuan, LIAO Jianhui, et al. Finite element analysis and application based on ABAQUS[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 219-223 (in Chinese).