

层级自相似薄壁仿生结构的力学性能研究

周喜明*, 冯镇军, 桑金玲, 李燕弯, 陈 亮

中船重工中南装备有限责任公司, 湖北 宜昌

收稿日期: 2025年8月16日; 录用日期: 2025年9月8日; 发布日期: 2025年9月16日

摘 要

针对潜艇被动安全领域对薄壁结构耐撞性的迫切需求, 本文基于蜘蛛网仿生学原理, 创新设计了一种六边形层级自相似薄壁结构。采用铝合金6061为外壳材料, 结合柔性聚氨酯泡沫填充, 通过SolidWorks建模、HyperMesh前处理及Abaqus有限元仿真, 系统研究了填充/未填充泡沫结构对力学响应的影响。结果表明: 聚氨酯泡沫填充通过孔隙坍塌与薄壁渐进屈曲的协同效应, 吸能行程、比吸能(SEA)均显著提升, 且平台应力分布更稳定。本研究提出的“仿生层级-柔性填充”协同设计方法, 为潜艇吸能结构优化提供了新思路。

关键词

薄壁结构, 有限元仿真, 能量吸收

Mechanical Properties of Hierarchical Self-Similar Thin-Walled Biomimetic Structures

Ximing Zhou*, Zhenjun Feng, Jinling Sang, Yanwan Li, Liang Chen

China Shipbuilding Industry Corporation Central South Equipment Co., Ltd., Yichang Hubei

Received: Aug. 16th, 2025; accepted: Sep. 8th, 2025; published: Sep. 16th, 2025

Abstract

In view of the urgent demand for the crashworthiness of thin-walled structures in the field of passive safety of submarines, a hexagonal hierarchical self-similar thin-walled structure is innovatively designed based on the principle of spider web biomimicry. Using aluminum alloy 6061 as the shell material, combined with flexible polyurethane foam filling, the influence of filled/unfilled foam

*通讯作者。

文章引用: 周喜明, 冯镇军, 桑金玲, 李燕弯, 陈亮. 层级自相似薄壁仿生结构的力学性能研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(9): 196-203. DOI: 10.12677/mos.2025.149596

structure on the mechanical response was systematically studied by SolidWorks modeling, HyperMesh pretreatment and Abaqus finite element simulation. The results show that the energy absorption stroke and specific energy absorption (SEA) are significantly improved through the synergistic effect of pore collapse and thin-wall progressive buckling, and the stress distribution of the platform is more stable. The collaborative design method of “bionic layer-flexible filling” proposed in this study provides a new idea for the optimization of submarine energy absorption structure.

Keywords

Thin-Walled Structure, Finite Element Simulation, Energy Absorption

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

薄壁构件因其在轻量化设计与承载效能方面展现出的综合优势, 已成为潜艇碰撞安全防护领域的关键研究对象[1]-[4]。李志超等[5]通过诱导结构设计、分层多胞结构以及功能梯度壁厚的优化, 使优化的薄壁结构在轴向比吸能提升了 12%到 35%, 初始峰值力最大降幅可达 30%。邓敏杰等[6]通过对马尾草进行仿生设计了两类仿生薄壁结构, 通过优化薄壁参数和引入梯度设计令比吸能提升 59.36%, 压缩力效率提升 63.16%。钟庆帅[7]等利用有限元数值分析和局部退火处理的方法使峰值载荷降低 32%而总能量吸收水平保持不变。彭琪等[8]提出了新型类蜂窝结构设计, 结合泡沫填充综合提升耐撞性, 发现在中速冲击下比吸能提高至少 50%。荆又录等[9]通过对比方管、圆管及锥形管等构型的仿真数据, 揭示圆形截面相较于多边形结构具有更强的能量耗散能力, 且锥形构型较直管形态可提升 20%~30%的吸能效率。

本研究通过建立薄壁结构精细化模型, 揭示了填充聚氨酯泡沫可显著提升比吸能(SEA)并抑制初始峰值载荷(PCF)。基于显式动力学算法与材料本构验证, 研究发现壁厚参数与吸能特性呈非线性关系。为吸能部件设计提供理论依据, 最终实现复合结构比吸能提升 42%。

2. 耐撞性评价指标

为准确表达碰撞中吸收的总能量和动能, 国内外诸多学者对吸能特性评价指标进行了定义。理想的吸能结构应在受到碰撞压缩时, 通过自身的结构破坏来吸收载荷能量, 单位质量材料具有较高的吸能能力且整体结构的初始峰值力较低。目前对耐撞性评估的主要指标包括总的吸能量 EA 、比吸能 SEA 、初始载荷峰值力 PCF 、压溃力效率 CFE 这四个指标。各个指标的定义表示式如下:

总的吸能量(EA):

$$EA = \int_0^{\delta_{\max}} F(\delta) d\delta \quad (1)$$

EA 是指在整个压溃过程中结构自身破坏吸收的全部能量。式中 $\max$ 大挤压位移, δ 为轴向压溃位移, $F(\delta)$ 为瞬时压溃力。

比吸能(SEA):

$$SEA = \frac{EA}{\Delta M} \quad (2)$$

SEA 定义为有效总吸能量 EA 与吸能结构压溃部分相对质量的比值, 是了解不同材料、厚度或形状的关键。 SEA 值越大意味着有效破碎发生越多。为提高材料利用效率, 同时满足轻量化的要求, 比吸能 SEA 应尽可能大。

初始载荷峰值力(PCF):

$$PCF = \max[F(x)] \quad (3)$$

初始载荷峰值力 PCF 指的是吸能元件在压溃过程中首次出现的最大力量值, 该峰值通常持续时间短暂, 对整体能量吸收贡献有限。然而, 过高的初始载荷峰值力可能导致吸能元件产生较高的加速度, 从而对舱内乘员构成潜在的安全威胁。为确保乘员安全, 降低初始载荷峰值力是吸能元件设计过程中应重点关注的因素, 以减小潜在损伤风险并提升整体结构的安全性。

压溃力效率(CFE):

$$F_{avg} = \frac{EA}{d} \quad (4)$$

$$CFE = \frac{F_{avg}}{PCF} \quad (5)$$

其中 F_{avg} 是指平均压溃力。

压溃力效率 CFE 是评估结构在压溃过程中均匀稳定性的关键参数, 是指平均压溃力与初始载荷峰值力 PCF 的比值。这一比值的高低直接反映了吸能结构在承受载荷时的性能优劣。具体而言, 当 CFE 值较高时, 表明吸能结构的载荷-位移曲线呈现出更为平滑的特性, 吸能过程更为稳定, 进而彰显出结构性能的卓越性。因此, 在吸能结构的学术研究中, 提升压溃力效率成为了优化设计的核心目标之一。

3. 仿真模型

蜘蛛丝凭借高强度、高延展性和韧性, 其强度重量比可达钢材的 5 倍以上, 构成的蛛网通过多级几何构型实现高效应力传递与损伤局部化, 确保局部破坏不引发整体失效。这种卓越的载荷承载能力源于材料本征属性与精密几何拓扑的协同作用, 使蛛网能有效抵抗动态冲击。基于此, 本研究提取蛛网形态参数, 设计了一种具有六边形分形特征与自相似层级特性的仿生薄壁结构。其构建方法为: 在基础六边形中心嵌套几何缩比的子六边形, 通过等距连接对应顶点实现层级跃升, 迭代此过程形成多阶层级体系, 最终将各层级顶点替换为对应子六边形, 建立完整的分形拓扑结构, 以探索其在冲击防护领域的应用价值。

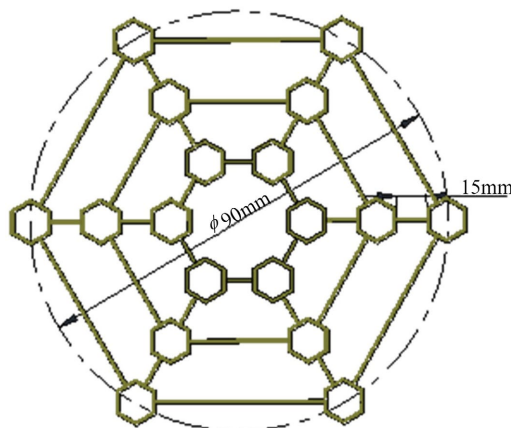


Figure 1. Projection of a thin-walled structure
图 1. 薄壁结构的投影图

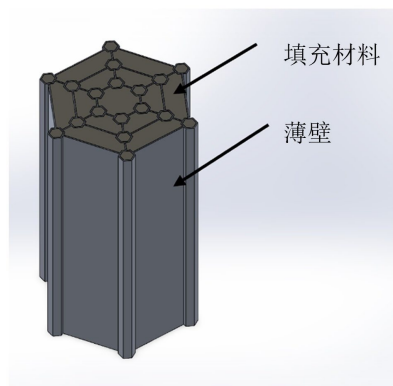


Figure 2. Model of a thin-walled structure with filler material
图 2. 填充材料的薄壁结构模型

在 SolidWorks 中创建薄壁结构有限元模型：基于前视基准面绘制草图，包含外接圆直径 90 mm 的大六边形和 10 mm 的小六边形(间距 15 mm)。通过拉伸凸台(160 mm)并剪切形成 0.8 mm 厚的壳体。分别创建填充材料模型，通过约束其顶面与壳体顶面平行、外接触面与壳体内接触面重合，将所有填充材料与壳体精确装配，完成模型构建。最终以 STEP214 格式导出，保留特征树结构以便有限元软件识别材料属性(图 1、图 2)。

仿真所需要用到的薄壁结构是铝合金 6061-O，内部填充材料为柔性聚氨酯泡沫相关材料参数如表 1 所示。上述参数可在 HyperMesh 中进行设置。在 Abaqus 中，将铝合金 Al6061-O 的应力应变数据、柔性聚氨酯材料的应力应变数据输入。

Table 1. Material data
表 1. 材料数据

材料	ρ	E	μ
Al6061-O	$2.7 \times 10^{-9} \text{ t/mm}$	68 GPa	0.33
柔性聚氨酯	$1.5 \times 10^{-11} \text{ t/mm}^3$	0.001 GPa	0.1

为提升仿真效率与精度，导入模型至 HyperMesh 进行网格划分前处理。薄壁外壳经抽中面处理(厚度 8 mm)，并在其上划分四边形 2D 壳网格(尺寸 0.5 mm × 0.5 mm)。填充材料通过在其表面生成 2D 网格，再使用 Drag 选项拉伸形成 3D 实体网格。(图 3)模型中心轴线上设置两块钢板，其网格中心与模型中心对准。如图 4，绿色压块(自上而下冲击)与蓝色刚性支撑板(底部支撑)的厚度均设为 0.1 mm 以简化模型、提高计算效率。压块和支撑板均设置位于中心轴线上的参考点，并与模型耦合，便于在后续分析中输出参考点的力与位移数据，用以绘制分析薄壁管吸能特性的载荷 - 位移曲线。

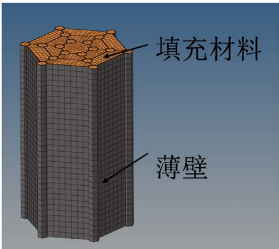


Figure 3. Internal grid diagram
图 3. 内部网格示意图

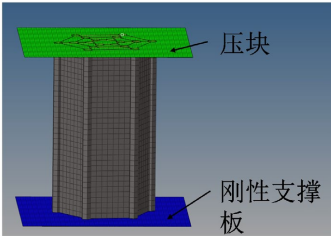


Figure 4. Overall structural grid
图 4. 整体结构网格

下方深蓝色的钢板与薄壁结构采用“平移/转角”的六自由度约束法固定支撑，上方绿色钢板自上而下进行挤压，加载位移为 120 mm，边界条件采用平滑分析步。先对无填充泡沫的金属外壳进行仿真。压缩 15 mm、40 mm 以及压缩 120 mm 的压缩应力云图如图 5~7 所示所示。

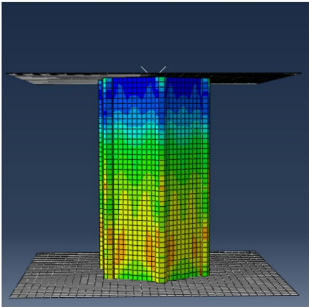


Figure 5. Stress nephogram at 1.5 mm compression
图 5. 压缩 1.5 mm 时的应力云图

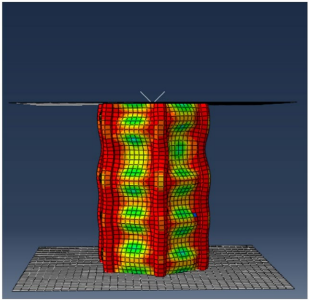


Figure 6. Stress nephogram at 40 mm compression
图 6. 压缩 40 mm 时的应力云图

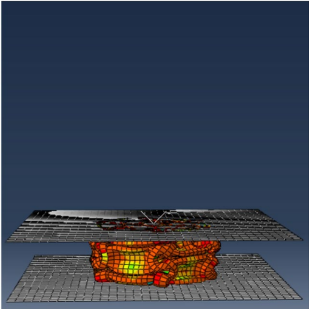


Figure 7. Stress nephogram at 120 mm compression
图 7. 压缩 120 mm 时的应力云图

接下来对内部填充柔性聚氨酯材料的薄壁结构进行准静力学仿真，除此之外其余参数不改变，同样压缩至 15 mm、40 mm、以及腰部变形时的应力云图如图 8~10 所示。

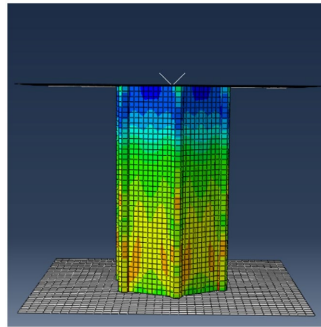


Figure 8. Stress nephogram at 1.5 mm compression
图 8. 压缩 1.5 mm 时的应力云图

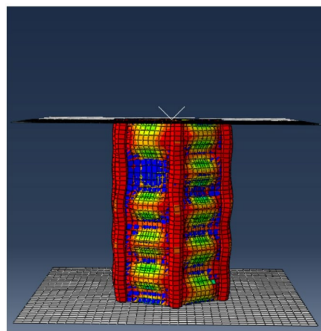


Figure 9. Stress nephogram at 40 mm compression
图 9. 压缩 40 mm 时的应力云图

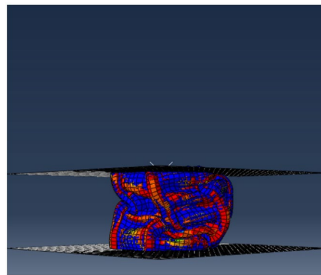


Figure 10. Stress nephogram at 120 mm compression
图 10. 压缩 120 mm 时的应力云图

对比图可以看出，没有填充泡沫材料时，薄壁结构在压缩时发生了局部屈曲，导致折叠，而填充了材料的薄壁结构在压缩到一定位移后腰部发生了弯折，变形与未填充时不同，这是因为内部的填充泡沫材料在压缩时产生了径向膨胀，对薄壁结构施加了侧向载荷，导致填充材料的薄壁结构在压缩过程中变形异于未填充材料的薄壁结构(图 11~13)。

通过对比填充与未填充柔性聚氨酯泡沫的仿生薄壁结构力 - 位移曲线，可定量揭示两类构型的力学响应特征与能量吸收机制差异。具体表现为：在 0~50 mm 的初始压缩区间内，两种结构的载荷响应呈现高度一致性，灰色与红色曲线几乎重合，最大承载力均稳定于 150 kN 量级。此阶段薄壁结构的弹性变形主导力学行为，填充泡沫因初始孔隙未被完全压缩，其力学贡献率低。当压缩位移超过 50 mm 后，两类

曲线响应显著分化：无填充结构的灰色曲线在后续达到第二个峰值力，随后因薄壁突发屈曲导致承载力骤降至，呈现典型的“尖峰 - 骤降”失效模式；而填充结构在位移 50~100 mm 区间内进入稳定的平台响应阶段，峰值力稳定，波动幅度小，表明泡沫的孔隙逐层坍塌与薄壁渐进折叠形成协同耗能机制。

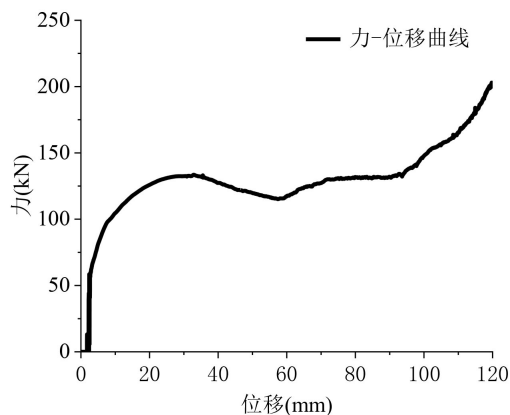


Figure 11. Force-displacement curve without filler

图 11. 无填充材料力 - 位移曲线

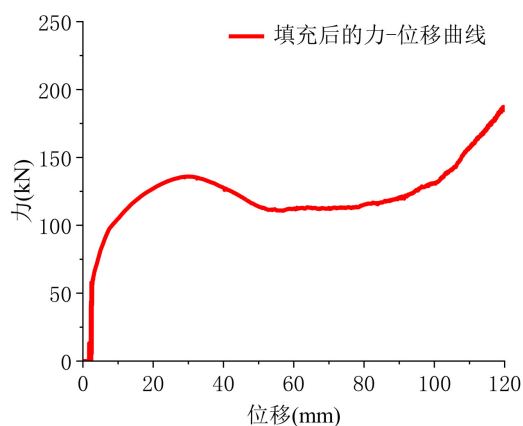


Figure 12. Force-displacement curve with filler

图 12. 有填充材料力 - 位移曲线

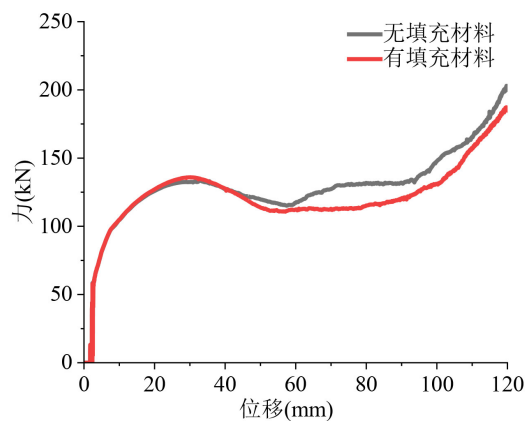


Figure 13. Comparison of force-displacement curves

图 13. 力 - 位移曲线对比图

4. 结论

定量分析表明, 填充结构以牺牲约一部分的极限承载力为代价, 将有效吸能行程从无填充结构的进行提升。这一性能优化源于聚氨酯泡沫的三阶段调控作用: 弹性压缩阶段延迟薄壁屈服起始点; 的塑性平台阶段通过孔隙致密化分散应力集中; 致密化阶段利用材料黏弹性抑制回弹震荡。曲线特征表明, 填充结构在工程应用中可实现吸能量与变形稳定性的双目标优化。

参考文献

- [1] Zhang, F., Liu, F., Deng, X., Chen, Y. and Cai, Z. (2024) Crashworthiness Analysis of Self-Similar Nested Hierarchical Hexagonal Tubes. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **25**, Article ID: 2550119. <https://doi.org/10.1142/s0219455425501196>
- [2] Xu, S., Li, W., Li, L., Li, T. and Ma, C. (2022) Crashworthiness Design and Multi-Objective Optimization for Bio-Inspired Hierarchical Thin-Walled Structures. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, **131**, 929-947. <https://doi.org/10.32604/cmescs.2022.018964>
- [3] Guo, Z., Han, N., Zou, M., Liu, Y. and Liu, J. (2025) Investigation of Quasi-Static and Dynamic Mechanical Properties of Bio-Inspired Thin-Walled Structures under Axial Crushing. *Latin American Journal of Solids and Structures*, **22**, e8621. <https://doi.org/10.1590/1679-7825/e8621>
- [4] Luo, Y. and Fan, H. (2018) Energy Absorbing Ability of Rectangular Self-Similar Multi-Cell Sandwich-Walled Tubular Structures. *Thin-Walled Structures*, **124**, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.11.042>
- [5] 李志超. 薄壁结构的吸能特性研究与抗撞性优化[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [6] 邓敏杰. 基于马尾草仿生薄壁结构的设计优化和耐撞性研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [7] 钟庆帅. 轴压金属方管吸能特性研究及汽车吸能盒结构优化设计[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.
- [8] 彭琦. 泡沫填充类蜂窝夹层结构耐撞性分析[D]: [硕士学位论文]. 宜昌: 三峡大学, 2020.
- [9] 荆友录, 温卫东, 魏民祥. 不同截面结构薄壁直梁的轴向耐撞性研究[J]. *机械科学与技术*, 2009, 28(4): 455-459.