

不同承载角度下梯度 Gyroid 结构的能量吸收分析

邱绪哲^{1,2}, 李涛³, 周生俊⁴, 何涛⁴, 夏阳^{1,2}, 吕永涛^{1,2}

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 力学与航空航天学院, 辽宁 大连 116024; 3. 中船双瑞(洛阳)特种装备股份有限公司, 河南 洛阳 471027;

4. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430205)

摘要: Gyroid 型三周期极小曲面 (TPMS) 能够有效避免局部应力集中现象, 有效提高能量吸收性能。为了提升管路系统的能量吸收性能, 通过对 Gyroid 梯度结构的分析, 设计了梯度吸能结构, 并研究了不同承载角度下梯度 Gyroid 结构的能量吸收规律。研究表明: 轴向梯度 Gyroid 结构在压溃过程中呈现出分层逐步破坏的特性; 相比于均匀 Gyroid 结构, 梯度 Gyroid 结构提升了其在压缩阶段的平台应力, 其结构的比能量吸收性能在 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° 和 90° 承载角度时分别提高了 1.59%, 4.58%, 10.74%, 30.66%, 18.44%, 7.75% 和 1.54%, 所有角度的平均比吸能提高了 10.67%; 梯度 Gyroid 结构孔隙率线性梯度的变化未对承受压缩载荷时的变形响应造成显著影响; 轴向梯度 Gyroid 结构可保证压溃变形不变的情况下, 提高结构的能量吸收能力。

关键词: 三周期极小曲面; 梯度结构; 能量吸收; 有限元

中图分类号: TG146

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.06.005

[引用本文格式] 邱绪哲, 李涛, 周生俊, 等. 不同承载角度下梯度 Gyroid 结构的能量吸收分析[J]. 热能动力工程, 2025, 40(6): 49-56. QIU Xuzhe, LI Tao, ZHOU Shengjun, et al. Analysis of energy absorption of gradient Gyroid structures at different load-bearing angles[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(6): 49-56.

Analysis of Energy Absorption of Gradient Gyroid Structures at Different Load-Bearing Angles

QIU Xuzhe^{1,2}, LI Tao³, ZHOU Shengjun⁴, HE Tao⁴, XIA Yang^{1,2}, LYU Yongtao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian, China, Post Code: 116024; 2. School of Mechanics and Aerospace Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, Post Code: 116024; 3. CSSC Sunrui (Luoyang) Special Equipment Co., Ltd., Luoyang, China, Post Code: 471027; 4. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan, China, Post Code: 430205)

Abstract: Triply periodic minimal surface (TPMS) of Gyroid structure can avoid localized stress concentration phenomena and effectively improve energy absorption performance. In order to enhance the energy absorption performance of the piping system, by analyzing the gradient Gyroid structure, the gradient energy absorption structure was designed and the energy absorption rule of the gradient Gyroid structure was investigated at different load-bearing angles. The research results show that the axial gradient Gyroid structure exhibits a hierarchical gradual destruction characteristic during the compression collapse process, which elevates its platform stress in the compression stage compared with the uniform Gyroid structure, thereby increasing the specific energy absorption performance of the structure by 1.59%, 4.58%, 10.74%, 30.66%, 18.44%, 7.75% and 1.54% at load-bearing angles of 0° , 15° , 30° ,

收稿日期: 2024-12-23; 修订日期: 2025-02-13

基金项目: 热能动力技术重点实验室开放基金资助项目 (TPI2022A01)

Fund-supported Project: Open Fund of Science and Technology on Thermal Energy and Power Laboratory (TPI2022A01)

作者简介: 邱绪哲 (2000-), 男, 大连理工大学硕士研究生。

通信作者: 吕永涛 (1982-), 男, 大连理工大学副教授。

45°, 60°, 75° and 90°, respectively, and the average specific energy absorption for all angles increases by 10.67%; the change in the linear gradient of the porosity of the gradient Gyroid structure will not significantly affect the deformation response when subjected to compressive loading. Therefore, the axial gradient Gyroid structure can ensure that the energy absorption capacity of the structure can be improved with no change in the compression and collapse deformation.

Key words: triply periodic minimal surface (TPMS), gradient structure, energy absorption, finite element

引 言

管道系统是船舶抗冲击性能的“短板”,受到爆炸冲击损坏后,不但会漏油、漏气,还可能产生次生爆炸,严重危害船舶安全。因此,管路系统的抗冲击性能是管路设计的重点^[1-4]。

三周期极小曲面 (TPMS) 是一种平均曲率为零的周期性光滑隐式曲面^[5-7]。基于 TPMS 结构设计的能量吸收器能够避免局部应力集中现象,这是因为 TPMS 的零平均曲率特性有助于分散应力,减少应力集中点^[8-9],其结构能够实现对外来能量的高效吸收,从而达到抗冲击的目的^[10-12]。TPMS 结构通过控制方程生成,最常见的包括 Primitive、Gyroid、Diamond、IWP (I-graph and Wrapped Package-graph) 等, Yu 等人^[13]研究了梯度 TPMS 结构的能量吸收特性,发现能量吸收能力随着单胞尺寸的增加而减少。梯度 Primitive 结构相比均匀结构能够吸收更多能量。为了进一步说明 TPMS 在能量吸收方面的优异表现, Al-Ketan 等人^[14]对梁基 TPMS、壳基 TPMS 的力学性能进行了分析和比较,发现壳基 TPMS 结构表现出接近拉伸主导的变形行为,梁基 TPMS 表现出弯曲主导的行为,壳基 TPMS 结构性能更优越。

尽管国内外对于 TPMS 的能量吸收性能和机械性能有广泛的研究,但现有研究主要集中于相对简单的几何形状,在复杂应用场景中的性能表现仍需进一步探究。Gyroid 结构做为典型的 TPMS 结构,因其控制方程简单和吸能性能优异而受到关注。本文选取 Gyroid 结构作为研究对象进行单胞收敛性分析,引入沿轴向的线性梯度变化,对不同承载角度的结构进行准静态压缩模拟,分析了结构的能量吸收性能。

1 Gyroid 结构几何建模及吸能效果评估

1.1 Gyroid 结构的建模方法

本研究选择在吸能方面表现较为优异的 Gyroid

进行建模和分析。公式(1)为 Gyroid 曲面的水平集方程,方程中 c 值可以控制曲面的厚度,曲面从 $f(x, y, z) = 0$ 向两个相反方向偏移距离为 c 便可得到 Gyroid 结构,即结构壁厚为 $2c$ 。

$$\sin(x)\cos(y) + \sin(z)\cos(x) + \sin(y)\cos(z) = c \quad (1)$$

TPMS 结构的孔隙率是影响其吸能性能的重要因素,可通过调整结构壁厚控制结构的孔隙率^[15]。当孔隙率过小时,结构更接近于实体材料,不能充分体现结构的优良吸能性能;当孔隙率过大时,则会使结构连接节点处过细从而容易发生结构失效,同样不能发挥其优良的吸能性能。目前针对 TPMS 结构的吸能研究主要集中在孔隙率为 50% ~ 80% 的范围内。本文利用 Maskery 等人^[16]开发的 Flatt pack 程序,建立 Gyroid 结构进行建模和分析。

1.2 Gyroid 结构的线性梯度设计

使用 Flatt pack 程序生成计算模型,如图 1 所示,将 Gyroid 结构沿 X 轴分别旋转 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° 和 90°,得到了不同承载角度的 Gyroid 模型。如图 2 所示,通过对不同承载角度的 Gyroid 结构沿轴向施加 60% ~ 80% 的孔隙率梯度,获得了 Gyroid 梯度结构。

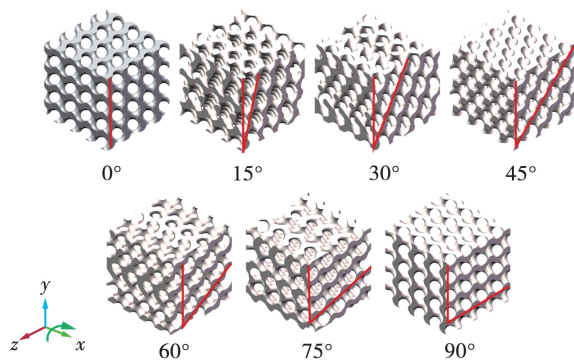


图 1 不同承载角度的 Gyroid 结构

Fig. 1 Gyroid structure at different load-bearing angles

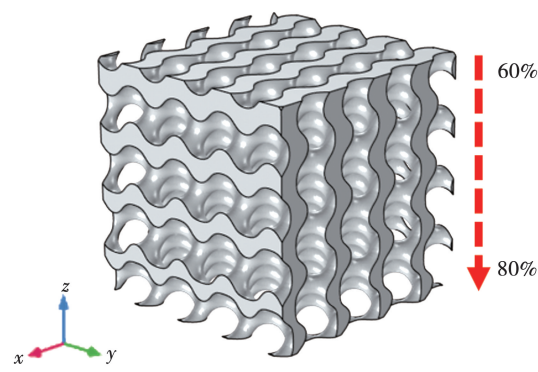


图 2 轴向的线性孔隙率 Gyroid 梯度结构

Fig.2 Linear porosity gradient Gyroid structure
in axial direction

1.3 能量吸收能力评估

比能量吸收能力,又称比吸能,是评价吸能结构的重要指标,其含义为单位质量结构所吸收的能量。结构的比吸能可以体现其受到外界载荷或冲击时所吸收的能量,能够直观说明结构能量吸收的能力。比吸能和总吸能的表达式如式(2)所示^[17-18]:

$$\begin{cases} \text{SEA} = \frac{w_v}{M} \\ w_v = \int_0^{\varepsilon_e} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \end{cases} \quad (2)$$

式中:SEA—结构的比吸能,kJ/kg; M —单位体积结构的质量,kg; w_v —单位体积结构在进入致密状态前吸收的总能量,MJ/m³; ε_e —致密应变; ε —结构应变; $\sigma(\varepsilon)$ —与应变相对应的应力,MPa。

1.4 结构能量吸收评估流程

计算分析流程如图 3 所示。计算首先设计了承载角度各异且轴向孔隙率呈梯度分布(60%~80%)的 Gyroid 结构。随后,对其单胞的收敛性进行了深入分析,并最终选定单胞数量合适的模型开展有限元准静态压缩仿真。在此基础上,对单胞进行准静态压缩试验,将实验数据与仿真结果进行对比,验证了有限元计算的可靠性。此后进行了网格无关性验证。通过对仿真结果进行后处理,得到了应力应变曲线、比吸能、致密应变和平台应力等参数,并观察了结构在压缩过程中的变形与损伤模式。

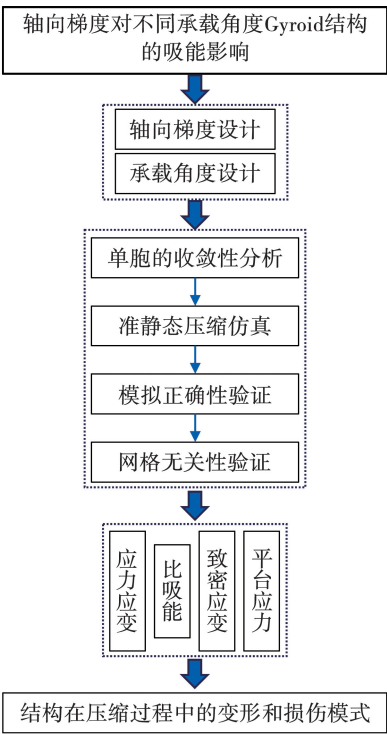


图 3 计算分析流程图

Fig.3 Calculation and analysis flowchart

2 数值仿真方法

2.1 Gyroid 结构的单胞收敛性分析

Gyroid 结构网格由 Flatt pack 程序生成,此程序的网格生成采用体素识别方法,生成的网格类型为八节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R),模型的离散度决定了所生成单元总数。由于该模型网格采用体素识别方法,因此该网格单元的形状为六面体,网格质量如表 1 所示。

表 1 网格质量

Tab.1 Mesh quality

类 别	C3D8R
纵横比	1
翘曲系数	0
雅可比值	1
扭曲度	0
单元最大内角	90°
单元最小内角	90°

采用 Explicit 求解器的显示动力学进行 Gyroid 结构的准静态压缩模拟。收敛精度为二阶,收敛速度较快。同时,准静态过程中系统的动能 KE 与系统的总内能 IE 的比值小于等于 5%,这样能够确保

动力学模拟结果不发生失真。分别建立 $1 \times 1 \times 1$, $2 \times 2 \times 2$, $3 \times 3 \times 3$, $4 \times 4 \times 4$, $5 \times 5 \times 5$ 单胞数量的模型,其长宽高均为 $L = 12\text{ mm}$,如图 4 所示。

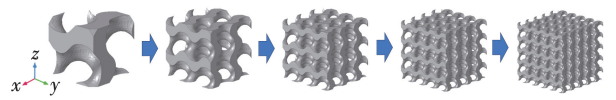


图 4 不同数量单胞阵列的 Gyroid 结构
Fig. 4 Gyroid structure with different numbers of cell arrays

通过有限元软件的静力学模块分别求解以上 5 种单胞数量阵列模型的等效弹性模量和剪切模量。通过比较有限元结果与理论值之间的误差,可以评估模型的准确性和收敛性。通过计算不同数量单胞阵列的等效弹性模量,发现当单胞阵列数量为 4 个及以上时,其等效弹性模量与实际弹性模量误差均小于 0.2%,等效剪切模量与渐近线的差值保持在 5% 以下,此时的误差处于合理范围。考虑到仿真时计算成本会随着单胞数量增加,本研究采用 $4 \times 4 \times 4$ 阵列的结构进行后续分析研究。

2.2 有限元准静态压缩模拟设置

采用 ABAQUS 软件 (v2020, Dassault Systèmes Simulia Corp., Rhode Island, USA) 进行模拟计算,选择 316L 不锈钢作为 Gyroid 多孔结构的基材。该材料的属性如表 2 所示,表 3 为引用参考文献[19]中的塑性曲线参数。

表 2 材料属性参数
Tab. 2 Material property parameters

密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
7 980	176	0.3	480

表 3 塑性曲线参数^[19]
Tab. 3 Plasticity curve parameters^[19]

塑性应变	塑性应力/MPa
0	480
0.005 7	495
0.049 8	516
0.100 4	536
0.150 9	558
0.201 4	582
0.251 8	608
0.295 6	644

在准静态压缩模拟中,Gyroid 结构被装配在上下两个刚性板之间,装配体如图 5 所示。上下两个刚性板分别与参考点 RP-1 和 RP-2 耦合。RP-1 完全绑定,RP-2 仅允许 Z 方向的位移。结构采用通用自接触方法,并设置摩擦因数为 0.08。此外,对上刚性板施加 Z 轴负方向的位移荷载,考虑到结构高度为 12 mm,施加的位移荷载为 60% 应变,即 7.2 mm 的位移。

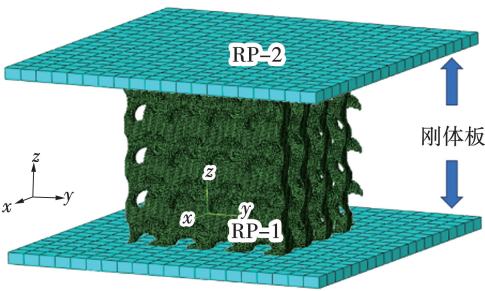


图 5 准静态压缩模拟示意图
Fig. 5 Schematic diagram of a quasi-static compression simulation

2.3 有限元结果的正确性验证

为了确保所使用材料属性数据的正确性,需对仿真参数进行验证。对承载角度为 0° 时孔隙率为 70% 的 Gyroid 结构进行准静态压缩试验,并将试验数据与仿真结果进行了比较。对比所得的应力应变曲线如图 6 所示,试验均值与仿真结果具有较好的一致性。

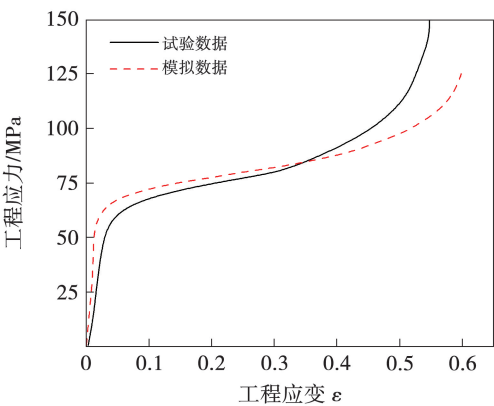


图 6 模拟与试验工程应力应变曲线对比图
Fig. 6 Comparison of simulated and experimental stress-strain curves

2.4 网格无关性验证

对孔隙率为 70% 的 Gyroid 结构有限元模型进

行网格无关性验证。由图 7 可知,当网格尺寸为 0.075 和 0.100 mm 时,力 - 位移曲线趋于重合。因此,Gyroid 结构的整体网格尺寸选取为 0.075 mm。

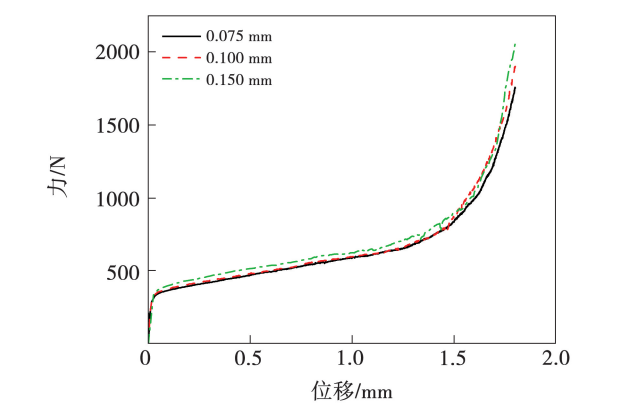


图 7 不同网格尺寸下 Gyroid 结构的力 - 位移曲线
Fig. 7 Force-displacement curves of Gyroid structures under different mesh sizes

3 计算结果及分析

3.1 轴向梯度对 Gyroid 结构吸能效果的影响

通过有限元求解得到了不同承载角度下的轴向 Gyroid 梯度结构的力位移曲线,将其转化为应力应变曲线如图 8 所示。由图可知,轴向梯度结构在受压过程中的应力增加迅速,但没有表现出明显的应力平台区域。文献[20]中,均匀 Gyroid 结构的屈服强度均在 70 MPa 及以上。本研究轴向梯度 Gyroid 结构的屈服强度为 50 MPa。

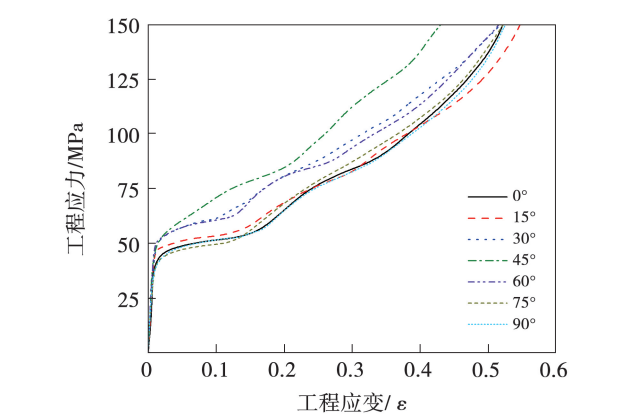


图 8 轴向 Gyroid 梯度结构的工程应力应变曲线
Fig. 8 Stress-strain curve of axial gradient Gyroid structures

为了进一步分析轴向梯度对结构吸能性能带来的影响,提取结构在进入致密阶段前的 SEA,如图 9

所示。与文献[20]研究的均匀 Gyroid 结构相比,本研究的轴向梯度 Gyroid 结构的 SEA 均有一定程度的升高,在 0°,15°,30°,45°,60°,75°和 90°时轴向梯度 Gyroid 结构的 SEA 分别提高了 1.59% ,4.58% ,10.74% ,30.66% ,18.44% ,7.75% 和 1.54% ,所有角度的平均比吸能提高了 10.67% ,而且不同承载角度下轴向梯度设计的 SEA 并未出现很大差异。

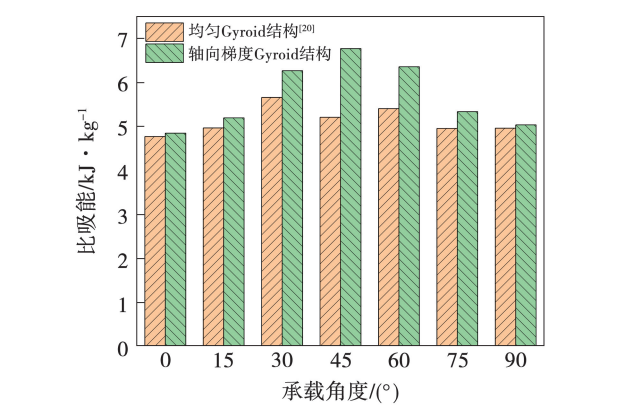


图 9 均匀 Gyroid 结构和轴向梯度 Gyroid 结构的 SEA 对比图
Fig. 9 SEA comparison chart of uniform Gyroid structure and axial-gradient Gyroid structure

对结构致密应变和平台应力进行提取,可以揭示结构在受到压缩时的应力响应特性,结果如表 4 所示。通过将轴向梯度 Gyroid 结构与文献[20]研究的均匀 Gyroid 结构进行比较能够发现,尽管在 Gyroid 结构中引入轴向线性梯度并不会改变结构进入致密状态的时刻,但是却能够在一定程度上提高平台应力水平。

表 4 轴向梯度 Gyroid 结构的能量吸收性能
Tab. 4 Energy absorption performance of axial gradient Gyroid structure

承载角度	致密应变	平台应力/MPa
0°	0.498	88.87
15°	0.516	86.12
30°	0.534	99.56
45°	0.479	107.55
60°	0.540	98.25
75°	0.517	87.15
90°	0.506	89.42

3.2 轴向梯度对 Gyroid 结构变形能力的影响

提取沿轴向方向孔隙率梯度为 60% ~ 80% 的轴向梯度 Gyroid 结构在 15% ,30% ,45% 及 60% 应

变时刻的应力分布云图,并对结构的变形行为进行分析。模拟结果的图例尺度被统一设置。

轴向梯度 Gyroid 结构的有限元模拟应力分布结果图如图 10 所示。

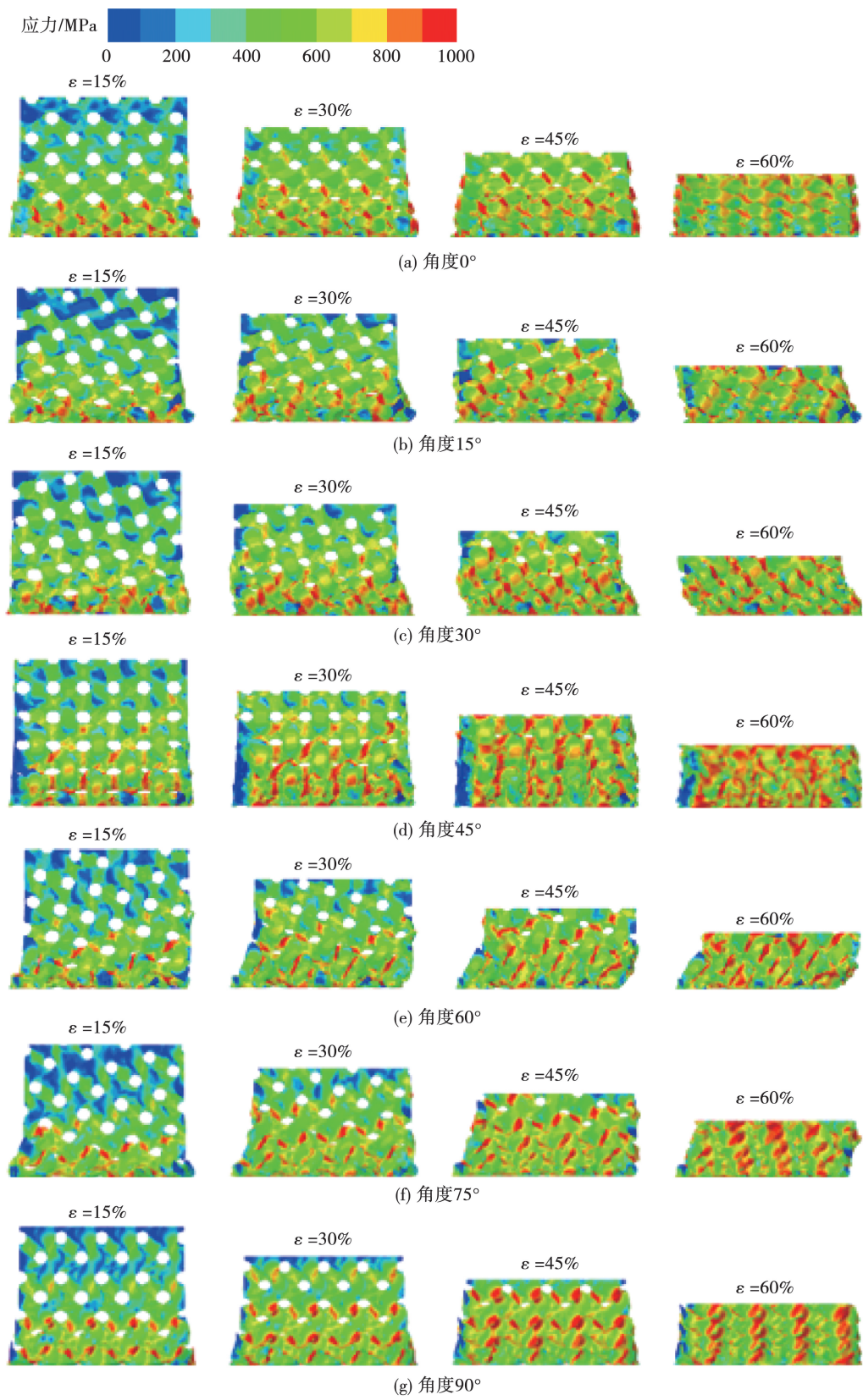


图 10 轴向梯度 Gyroid 结构的有限元模拟结果图

Fig. 10 Finite element simulation results of axial gradient Gyroid structure

由图 10 可知,在压缩过程中,结构内部的应力分布并不均匀,往往会优先集中在孔隙率较大的一侧。随着压缩的进行,这一侧首先出现结构的压溃破坏,并且这种破坏会逐层向上蔓延,直至影响到最上端孔隙率较小的一侧。

在逐层压溃的过程中,轴向梯度 Gyroid 结构展现出了不同程度的侧向倾斜变形现象。由图 10(b)、(c)所示,由当承载角度为 15°和 30°时,结构向左倾斜。由图 10(e)、(f)所示,当承载角度为 60°和 75°时,结构向右倾斜。由图 10(a)、(d)、(g)所示,当承载角度为 0°、45°和 90°时,结构未发生明显倾斜。这些侧向倾斜变形与均匀 Gyroid 结构保持了一致性。这一现象表明,Gyroid 结构在不同承载角度下的侧向倾斜变形主要由其单胞类型所决定,而轴向梯度的施加对结构的变形影响相对较小。

综上所述,轴向梯度 Gyroid 结构能够在不牺牲均匀 Gyroid 结构平台阶段持续时间的前提下,通过增强结构的承载力以提高比能量吸收能力。这一结构的设计思路在于通过精细控制结构的密度和布局来实现承载力的增强,而其逐层压溃的破坏机制进一步增大了结构面对外力时的正向承载能力,从而在能量吸收方面提供了显著的优势。然而,引入轴向梯度的设计同时也可能会导致结构的屈服应力和吸能效率在一定程度上降低。这是因为轴向梯度的设计可能会使得结构的一部分区域在承受相同外力时较为容易发生形变,进而影响整体的屈服特性和能量吸收表现。因此,在设计轴向梯度 Gyroid 结构时,需要仔细权衡其结构优化带来的正面效应与可能引发的屈服性能降低之间的关系。

4 结 论

针对 Gyroid 结构的能量吸收特性,系统地评估了梯度 Gyroid 结构在不同承载角度下的能量吸收效能,通过准静态压缩模拟,得到了如下结论:

(1) 轴向梯度 Gyroid 结构在压溃过程中呈现出分层逐步破坏的特性,相比于均匀 Gyroid 结构,提升了其在压缩阶段的平台应力,结构的比能量吸收性能在 0°,15°,30°,45°,60°,75°和 90°时分别提高了 1.59%,4.58%,10.74%,30.66%,18.44%,7.75%和 1.54%,所有角度的平均比吸能提高了

10.67%。

(2) Gyroid 结构孔隙率线性梯度的变化对于承受压缩载荷时的变形响应并无显著影响。

(3) Gyroid 结构可保证压溃变形不变的情况下,提高结构的能量吸收能力。

参考文献:

[1] GAO X,SHAO Y,CHEN C,et al. Experimental and numerical investigation on transverse impact resistance behaviour of pipe-in-pipe submarine pipelines after service time[J]. Ocean Engineering,2022,248:110868.

[2] XUE X,GE S,CHEN Y,et al. Impact resistance characteristics of pipeline system covered with W-shape elastic-porous metallic damper[J]. Engineering Structures,2025,323:119302.

[3] 季乐乐,刘 倩,王 璐. 高炉粗煤气系统轻量化技术的研究与应用[J]. 云南冶金,2024,53(6):140-143.

Ji Lele,LIU Qian,WANG Lu. Study and application on lightweight technical research of coarse gas system of blast furnace[J]. Yunnan Metallurgy,2024,53(6):140-143.

[4] 张海帆,王梓丞,史 瑶,等. 非等温二氧化碳管道稳态和瞬态运行仿真方法[J]. 科学技术与工程,2024,24(35):15014-15022.

ZHANG Haifan,WANG Zicheng,SHI Yao,et al. Steady-state and transient-state operation simulation method of non-isothermal carbon dioxide pipeline system[J]. Science Technology and Engineering,2024,24(35):15014-15022.

[5] LOH G H,PEI E,HARRISON D,et al. An overview of functionally graded additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing,2018,23:34-44.

[6] POPOVICH V A,BORISOV E V,POPOVICH A A,et al. Functionally graded Inconel 718 processed by additive manufacturing: Crystallographic texture,anisotropy of microstructure and mechanical properties[J]. Materials & Design,2017,114:441-449.

[7] LIU Z,GONG H,GAO J,et al. Bio-inspired design,mechanical and mass-transport characterizations of orthotropic TPMS-based scaffold[J]. Composite Structures,2023,321:117256.

[8] YÁNEZ A,CUADRADO A,MARTEL O,et al. Gyroid porous titanium structures:A versatile solution to be used as scaffolds in bone defect reconstruction[J]. Materials & Design,2018,140:21-29.

[9] 何明洋,傅 广,靳尚坤,等. 基于机器学习的多孔材料力学性能预测研究进展[J]. 复合材料学报,2024,43:1-27.

HE Mingyang,FU Guang,JIN Shangkun,et al. Research progress in prediction of mechanical properties of porous materials based on machine learning[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2024,43:1-27.

[10] FAN X,TANG Q,FENG Q,et al. Design,mechanical properties and energy absorption capability of graded-thickness triply period-

ic minimal surface structures fabricated by selective laser melting [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 204:106586.

[11] 黄心语,汤华远,王磊. 基于增材制造的三周期极小曲面结构关键力学性能研究进展 [J]. 力学学报, 2024, 56 (11): 3099 – 3115.

HUANG Xinyu, TANG Huayuan, WANG Lei. Recent progress on some fundamental mechanical properties of TPMS structures based on additive manufacturing [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2024, 56 (11): 3099 – 3115.

[12] 吴耀中,王亚辉,李学鹏,等. 不同参数三周期极小曲面夹层结构三点弯曲性能的有限元模拟 [J]. 机械工程材料, 2024, 48 (12): 106 – 111.

WU Yaozhong, WANG Yahui, LI Xuepeng, et al. Finite element simulation of three-point bending properties of triply periodic minimal surface sandwich structures with different parameters [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2024, 48 (12): 106 – 111.

[13] YU S, SUN J, BAI J. Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing [J]. Materials & Design, 2019, 182:108021.

[14] AL-KETAN O, REZGUI R, ROWSHAN R, et al. Microarchitected stretching-dominated mechanical metamaterials with minimal surface topologies [J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20 (9): 1800029.

[15] WALLAT L, ALTSCHUH P, REDER M, et al. Computational design and characterisation of gyroid structures with different gradient functions for porosity adjustment [J]. Materials, 2022, 15 (10): 3730.

[16] MASKERY I, PARRY L A, PADRÃO D, et al. FLatt Pack: A research-focussed lattice design program [J]. Additive Manufacturing, 2022, 49:102510.

[17] ZHU H, WANG P, WEI D, et al. Energy absorption of diamond lattice cylindrical shells under axial compression loading [J]. Thin-Walled Structures, 2022, 181:110131.

[18] QIU N, WAN Y, SHEN Y, et al. Experimental and numerical studies on mechanical properties of TPMS structures [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 261:108657.

[19] YIN H, LIU Z, DAI J, et al. Crushing behavior and optimization of sheet-based 3D periodic cellular structures [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 182:107565.

[20] LYU Y, GONG T, HE T, et al. Study on the energy absorption performance of triply periodic minimal surface (TPMS) structures at different load-bearing angles [J]. Biomimetics, 2024, 9 (7): 392.

(姜雪梅 编辑)

(上接第 48 页)

[17] 曾伟. 汽轮机内湿蒸汽凝结流动特性及除湿方法研究 [D]. 北京:华北电力大学, 2020.

ZENG Wei. Characteristic analysis and dehumidification method of wet steam condensing flow in steam turbine [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.

[18] 韩旭,王昌欣,姚博川,等. 汽轮机静叶栅内平行通道除湿特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2021, 42 (12): 3151 – 3155.

HAN Xu, WANG Changxin, YAO Bochuan, et al. Study on dehumidification characteristics of parallel channel in turbine stator cascade [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42 (12): 3151 – 3155.

[19] 李意民,王保明,周忠宁,等. 汽轮机静叶尾部喷射除湿方法的数值研究 [J]. 华电技术, 2017, 39 (11): 1 – 4, 32.

LI Yimin, WANG Baoming, ZHOU Zhongning, et al. Steam turbine static blade tail spray dehumidification numerical investigation [J]. Huadian Technology, 2017, 39 (11): 1 – 4, 32.

[20] 姚金玲,王新军,李曦滨,等. 核电汽轮机低压级内水滴沉积与疏水槽除湿性能研究 [J]. 东方汽轮机, 2014 (1): 13 – 18.

YAO Jinling, WANG Xinjun, LI Xibin, et al. Research on deposition of water droplets and moisture removal in LP last three stages of nuclear steam turbine [J]. Dongfang Turbine, 2014 (1): 13 – 18.

(姜雪梅 编辑)