

基于应力场驱动的TPMS梯度晶格结构拓扑优化及抗压性能验证

王 艳

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年4月14日; 录用日期: 2025年5月7日; 发布日期: 2025年5月14日

摘 要

本研究提出一种面向抗压结构优化的场驱动拓扑设计方法。基于ABAQUS建立 $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ 立方体基准模型, 通过对比面心立方、开口杆状、柱状、中心球及TPMS (P型)等五种晶格结构的压缩应力场特征, 验证TPMS结构的应力分布优势。创新性地将实心立方体应力场数据导入nTopology平台, 生成梯度化TPMS优化构型。通过准静态压缩仿真复现万能试验机工况, 系统分析优化结构的应力集中特征与应变响应曲线。结果显示: 梯度TPMS相较传统均质晶格最大应力降幅达8.6%, 验证了场驱动方法在抗压结构优化中的有效性。本研究为承压部件轻量化设计提供了新的数字化解决方案。

关键词

结构优化, 三周期极小曲面(TPMS), 有限元仿真, 场驱动设计

Topology Optimization and Compressive Performance Verification of TPMS Gradient Lattice Structure Based on Stress Field Driven

Yan Wang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 14th, 2025; accepted: May 7th, 2025; published: May 14th, 2025

Abstract

This study proposes a field-driven topology design method for compressive structure optimization.

文章引用: 王艳. 基于应力场驱动的 TPMS 梯度晶格结构拓扑优化及抗压性能验证[J]. 建模与仿真, 2025, 14(5): 315-324.
DOI: 10.12677/mos.2025.145396

Based on ABAQUS, a $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ cube benchmark model is established. By comparing the compressive stress field characteristics of five lattice structures, such as face-centered cubic, open rod, columnar, central sphere, and TPMS (P-type), the stress distribution advantages of the TPMS structure are verified. The solid cube stress field data is innovatively imported into the nTopology platform to generate a gradient TPMS-optimized configuration. The working conditions of the universal testing machine are reproduced by quasi-static compression simulation, and the stress concentration characteristics and strain response curves of the optimized structure are systematically analyzed. The results show that the maximum stress drop of the gradient TPMS compared with the traditional homogeneous lattice is 8.6%, which verifies the effectiveness of the field-driven method in the optimization of the compressive structure. This study provides a new digital solution for the lightweight design of pressure components.

Keywords

Structural Optimization, Triply Periodic Minimal Surface (TPMS), Finite Element Simulation, Field-Driven Design

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

随着航空航天、生物医学和能源防护等领域对轻量化高强结构的需求日益增长, 拓扑优化设计与增材制造技术的结合为复杂多孔结构的开发提供了全新途径[1] [2]。其中, 三周期极小曲面(Triply Periodic Minimal Surface, TPMS)结构因其光滑连续的几何特征、高比表面积以及优异的力学性能, 在抗压承载、能量吸收等领域展现出显著优势[3] [4]。然而, 传统均质 TPMS 结构在复杂载荷下的应力集中问题, 以及增材制造过程中因工艺缺陷导致的性能偏差[5], 限制了其在高精度工程场景中的应用。如何通过梯度化设计与场驱动优化方法提升 TPMS 结构的抗压性能与可靠性, 成为当前研究的关键挑战。

TPMS 结构的梯度设计已被证明能够有效调控力学性能。例如, 通过孔隙率或相对密度的梯度分布, 可显著降低初始峰值应力并提升能量吸收效率[6]。张明康等[7]通过模仿竹子梯度结构设计 Gyroid 曲面, 验证了梯度分布对弯曲强度与韧性的提升作用; Shi 等[8]结合拓扑优化与多形态 TPMS 单元填充, 实现了刚度定向增强。这些研究表明, 梯度设计可通过应力场重分布优化结构承载性能。然而, 现有研究多聚焦于几何参数的线性梯度调控[9] [10], 而基于物理场(如应力场、应变场)驱动的自适应梯度设计仍缺乏系统性探索。此外, 多数研究通过实验试错或静态拓扑优化生成梯度结构[11], 未能充分利用仿真数据与场驱动算法的协同优势。

在抗压结构优化领域, 场驱动设计方法通过将力学响应数据直接映射为材料分布, 可实现更高效的性能调控。Yang 等[12]提出基于应力场修正的数学预测模型, 成功预测梯度 Gyroid 结构的平台应力; Qi 等[13]利用有限元仿真数据优化椎间融合器内部孔结构, 证明场驱动方法在医学植入体设计中的可行性。然而, 当前场驱动设计多局限于单一软件平台, 跨平台数据交互尚未形成标准化流程, 且针对抗压结构的验证多依赖简化模型[14], 缺乏对复杂梯度构型的系统分析。

尽管 TPMS 梯度结构在抗压性能优化中潜力显著, 现有方法仍存在以下局限性: 1) 梯度设计多依赖经验公式或均匀载荷假设, 难以适配实际非均匀应力场; 2) 优化过程与仿真验证脱节, 缺乏从场数据到结构重构的闭环验证。

针对上述问题,本研究以立方体为基准模型,选取面心立方、开口杆状、柱状、中心球及 TPMS (P 型)五种单元结构,通过 ABAQUS 仿真对比其在压缩载荷下的应力分布特性。基于仿真结果,将实心立方体应力场数据导入 nTopology 平台,生成梯度 TPMS 优化构型,并通过二次仿真验证其抗压性能提升效果。进一步结合应力-应变曲线与脆弱点分析,阐明场驱动设计在抗压结构优化中的机理。本文旨在为承压部件轻量化设计提供一种数据驱动的拓扑优化方法,并为跨平台场驱动技术的工程化应用奠定理论基础。

2. 场驱动优化方法

2.1. 研究流程框架

本研究采用“仿真-优化-验证”闭环流程,其技术路线如图 1 所示。包含以下关键步骤: 1) 在仿真软件中对基础结构进行相应的数值仿真分析。2) 数据预处理: 将基础结构的节点坐标以及 ABAQUS 准静态压缩仿真输出的应力场数据导出为 CSV 格式的文件,并导入 nTopology,通过坐标匹配建立空间应力场与几何模型的对应关系。3) 场域映射: 将应力场归一化为 0~1 的标量场,作为驱动 TPMS 结构参数变化的控制变量。4) 参数化建模: 根据标量场分布调整 TPMS 单元的相对密度、厚度等参数,生成梯度过渡的拓扑结构。5) 网格划分: nTopology 中参数化建模得到的是隐式体,对隐式体结构进行面网格划分,转换为体网格,最终以 FE 网格的形式输出为可以导入到数值仿真软件(如 ABAQUS)中的 INP 文件,进行后续的验证与分析。

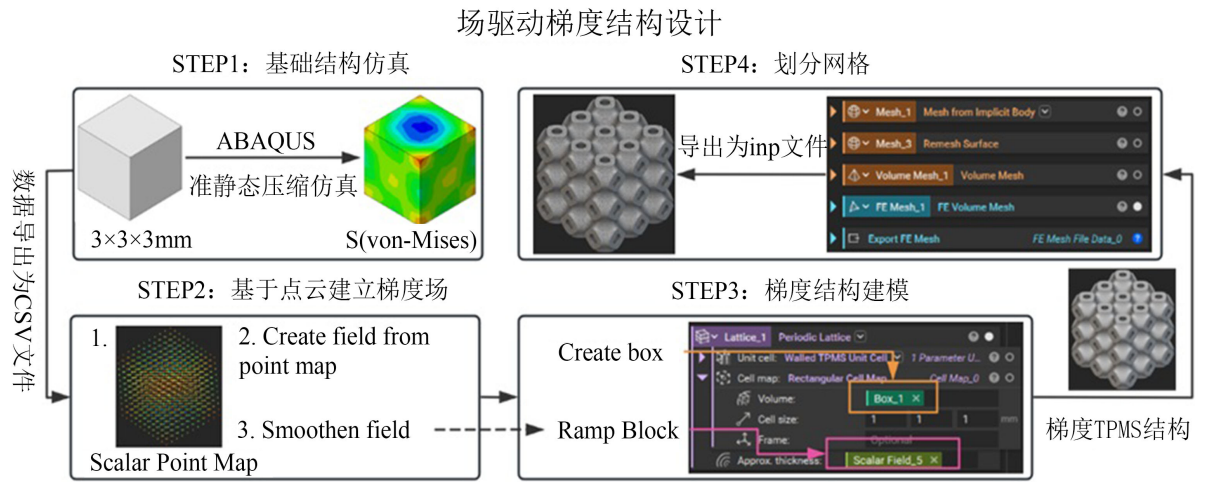


Figure 1. Simulation-optimization-validation process

图 1. 仿真-优化-验证流程

以立方体为基准模型,选取面心立方、开口杆状、柱状、中心球及 TPMS (P 型)五种单元结构(图 2(a)),通过 ABAQUS 仿真对比其在压缩载荷下的应力分布特性。材料选用 TC4 钛合金,材料参数如表 1、表 2 所示。

Table 1. Density and elastic parameters of TC4 titanium alloy

表 1. TC4 钛合金的密度及弹性参数

密度(kg/m ³)	弹性模型(GPa)	泊松比
4430	110	0.34

Table 2. Plasticity parameters of TC4 titanium alloy
表 2. TC4 钛合金的塑性参数

塑性应变	屈服应力(MPa)
0	825 (初始屈服强度)
0.01	850
0.03	900
0.05	950
0.07	1000
0.1	1050

2.2. nTopology 场驱动算法原理

在 ABAQUS 中建立 $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ 立方体模型，下表面完全约束，上表面施加位移载荷，使其沿着 Y 轴负方向下压 1 mm，输出应力场云图(.odb 文件)；基于仿真结果，将实心立方体应力场数据导入 nTopology 平台，将应力场数据转换为 CSV 格式，提取节点坐标(x_i, y_i, z_i)与等效米塞斯应力值(σ_{vm}^i)。通过归一化处理生成无量纲应力权重场，其归一化处理遵循以下原则：1) 张量保形原则：保持原始应力场的拓扑特征不变；2) 量纲一致性：消除不同量纲参数对映射过程的影响；3) 边界守恒：确保场域边界条件满足(为误差阈值)。通过最小 - 最大归一化法(Min-Max Normalization)将应力场约束至[0, 1]区间，归一化标量场定义为：

$$\omega_i = \frac{\sigma_{vm}^i - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}} (0 \leq \omega_i \leq 1) \quad (1)$$

其中， $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$ 分别为模型最大、最小应力值。

将权重场导入 nTopology，基于 P 型 TPMS 隐函数构建初始均质结构，利用场映射算法将权重场 ω_i 映射为相对密度分布函数：

$$\rho(x, y, z) = \rho_{\text{base}} + \alpha \cdot \omega_i \cdot (\rho_{\max} - \rho_{\text{base}}) \quad (2)$$

式中， $\rho_{\text{base}} = 0.3$ 为基体密度， $\rho_{\max} = 0.8$ 为最大密度， $\alpha = 0.7$ 为场耦合系数。

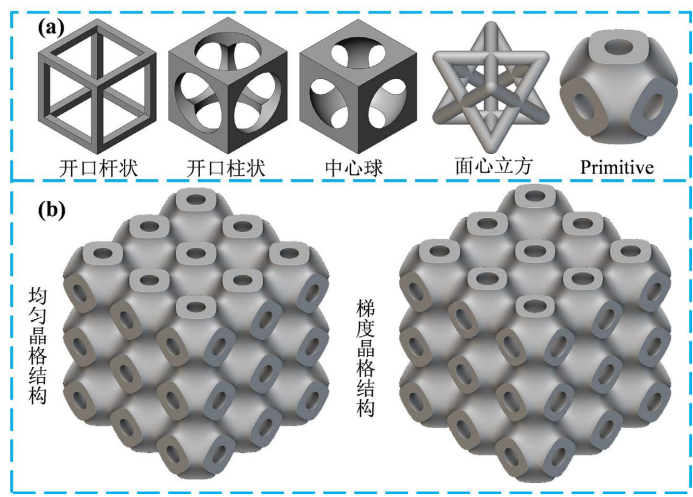


Figure 2. Common lattice unit types and uniform/graded TPMS structures
图 2. 常见的晶格单元类型以及均匀/梯度 TPMS 结构

通过 nTopology 的条件滤波与平滑过渡模块消除局部突变,生成连续梯度 TPMS 结构(图 2(b)),将优化结构重新导入 ABAQUS,在相同边界条件下进行准静态压缩仿真,对比应力分布与抗压强度提升效果。这个流程突破了传统均匀梯度设计的局限性,实现应力场数据到材料分布的定向映射。

nTopology 的场驱动设计核心在于物理场与几何参数的动态耦合。其算法流程包括:场数据插值、隐函数调控和几何光顺。场数据插值采用三次样条插值法将离散节点应力权重 ω_i 重构为连续标量场 $W(x, y, z)$, 确保空间连续性。基于 P 型 TPMS 隐函数表达式:

$$\Phi_p(x, y, z) = \cos(2\pi x) + \cos(2\pi y) + \cos(2\pi z) + d \quad (3)$$

通过引入场耦合项 $d = d_0 + \beta W(x, y, z)$, 动态调整局部密度阈值。几何光顺应用拉普拉斯平滑算子: $\nabla^2 \rho(x, y, z) = 0$ 消除梯度突变,保障结构可制造性。该算法通过物理场与隐函数的非线性耦合,实现高应力区域材料富集、低应力区域轻量化,显著提升抗压效率。

2.3. 分析评价指标

为量化评估优化效果,定义以下指标:

1) 应力均匀性系数(C_u):

$$C_u = 1 - \frac{\sigma_\sigma}{\bar{\sigma}} \quad (4)$$

其中, σ_σ 为模型应力标准差, $\bar{\sigma}$ 为平均应力, 值越接近 1 表明应力分布越均匀。

2) 脆弱点密度(D_w):

$$D_w = \frac{N_{\sigma \geq 0.9\sigma_{\max}}}{N_{\text{total}}} \quad (5)$$

其中, $N_{\sigma \geq 0.9\sigma_{\max}}$ 为应力超过 90%最大值的节点数, 反映应力集中风险。

3) 抗压强度增益(G_s):

$$G_s = \frac{\sigma_{\text{opt}} - \sigma_{\text{base}}}{\sigma_{\text{base}}} \quad (6)$$

其中, σ_{opt} 、 σ_{base} 分别为梯度结构与均质结构的屈服强度。

3. 结果与讨论

3.1. 不同单元类型的应力分布特性

Table 3. Maximum stress of different units

表 3. 不同单元的最大应力

单元类型	开口杆状	开口柱状	中心球	面心立方	Primitive
最大应力/MPa	1945	1709	1700	2028	1056

为系统评估不同拓扑构型在压缩载荷作用下的力学响应特性,选取面心立方(Face-Centered Cubic, FCC)、开口杆状(Open Rod)、开口柱状(Open Column)、中心球(Central Sphere)及三周期极小曲面(Triply Periodic Minimal Surface, TPMS-P)五种典型多孔单元作为研究对象。基于 ABAQUS/Standard 求解器建立 $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ 立方体有限元模型,采用八节点线性减缩积分单元(C3D8R)进行网格划分,单元尺寸经收敛性验证后统一设定为 0.15 mm。边界条件设定如下:模型下表面施加完全固定约束(ENCASTRE),上表面

通过参考点(RP-1)采用位移控制模式沿 Y 轴方向施加准静态压缩载荷,加载速率设定为 0.1 mm/s (参照 ASTM E9 标准)。仿真过程中输出各单元的米塞斯应力(von Mises Stress)分布云图及节点应力数据如表 3 所示,用于后续定量对比分析。

仿真结果如图 3 所示,其中图 3(a)~(e)分别展示了面心立方(FCC)、开口杆状、开口柱状、中心球及 TPMS-P 型结构的 von Mises 应力分布云图。从图 3(a)的孤立单元压缩仿真结果可以看出,曲面特征的增加可以提高应力分布的均匀性,降低应力集中的风险。定量分析表明,具有连续光滑隐式曲面拓扑构型的 TPMS-P 型单元(图 3(e))展现出最优的应力分布特性,其应力均匀性系数 C_u 达到 0.82,较开口杆状结构(0.51)提升 60.8%。开口杆状和开口柱状结构由于杆件间直角连接,导致应力集中,高应力区域沿加载方向杆件呈条带状分布,交汇节点处出现应力奇异性。中心球结构应力沿球体空腔的外围环状分布,但球体空腔与支撑杆连接处仍存在局部应力集中,最大应力出现在球体与垂直支撑杆过渡区域(曲率突变处),该现象验证了 Hertz 接触理论中曲率不连续导致的局部应力增强效应。相较于前三种构型,其节点应力集中现象有所缓解,但支杆交汇处仍存在明显的应力梯度突变,这与 FCC 结构固有的几何非连续性密切相关。得益于隐式曲面的零平均曲率特性,Primitive 结构应力沿光滑曲面均匀扩散,光滑曲面在应力重分布方面具有独特优势。

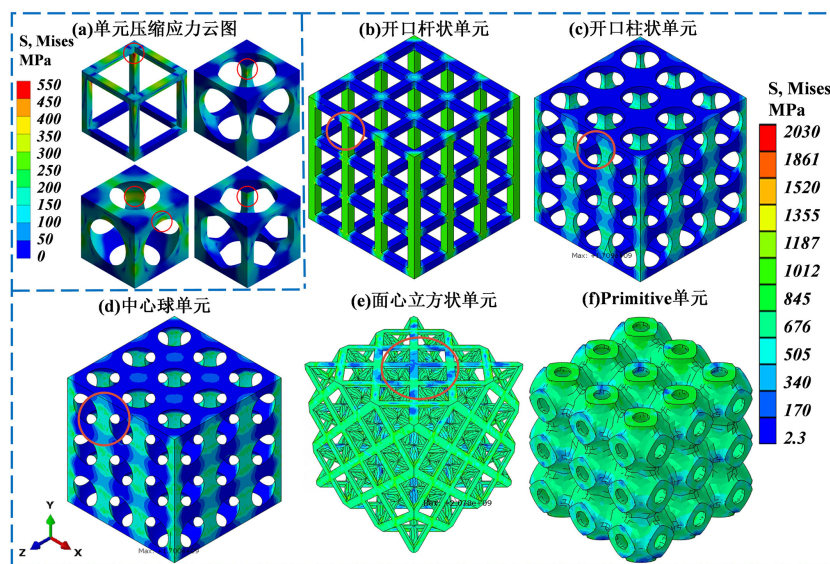


Figure 3. Equivalent stress contour maps from compression simulation

图 3. 压缩仿真等效应力云图

TPMS 结构的光滑曲面特性是其抗应力集中优势的核心原因。根据隐函数曲面几何特征, TPMS 单元无尖锐连接或突变曲率, 载荷沿曲面连续传递, 避免了传统桁架结构中应力在节点处的突变积累。此外, TPMS 的高比表面积特性使其在轻量化的同时, 通过多孔拓扑实现载荷分散。相较而言, 开口杆状结构的直角连接处曲率半径趋近于零, 导致局部应力奇异性, 易引发裂纹萌生。

3.2. 梯度 TPMS 结构优化与验证

3.2.1. 梯度结构生成与力学响应

基于前文提出的场驱动优化方法, 将实心立方体压缩仿真输出的 von Mises 应力场归一化为权重场, 权重值 $\omega_i \in [0,1]$ 与局部应力呈正相关。在 nTopology 中, 权重场与 TPMS-P 隐函数动态耦合调控局部相对密度分布:

$$\Phi_p(x,y,z)=\cos(2\pi x)+\cos(2\pi y)+\cos(2\pi z)+d_0+\beta W(x,y,z)$$

(7)

式中， β 为场敏感系数，控制应力权重对密度分布的调控强度， $\beta=1.5$ ， $d_0=0.5$ 。

通过 Marching Cubes 算法生成隐式曲面几何模型，并施加拉普拉斯平滑消除非物理振荡，最终生成的梯度 TPMS 结构在高应力区域呈现致密化特征，低应力区域则保持轻量化。

为评估梯度设计的优化效果，图 4 对比了梯度 TPMS 与均质 TPMS 在准静态压缩载荷下的力学响应。均匀结构(图 4(a))的最大应力集中于曲面曲率突变区域；梯度结构(图 4(b))最大应力降幅 15.1%，且高应力区面积占比缩减至 9.8%，应力沿密度梯度方向呈现平滑过渡。均匀结构在屈服阶段出现局部屈曲，导致应力骤升；梯度结构因密度梯度匹配载荷传递路径，变形呈现逐层压实特征(图 4(c))，塑性平台阶段应力波动幅度降低 37%。

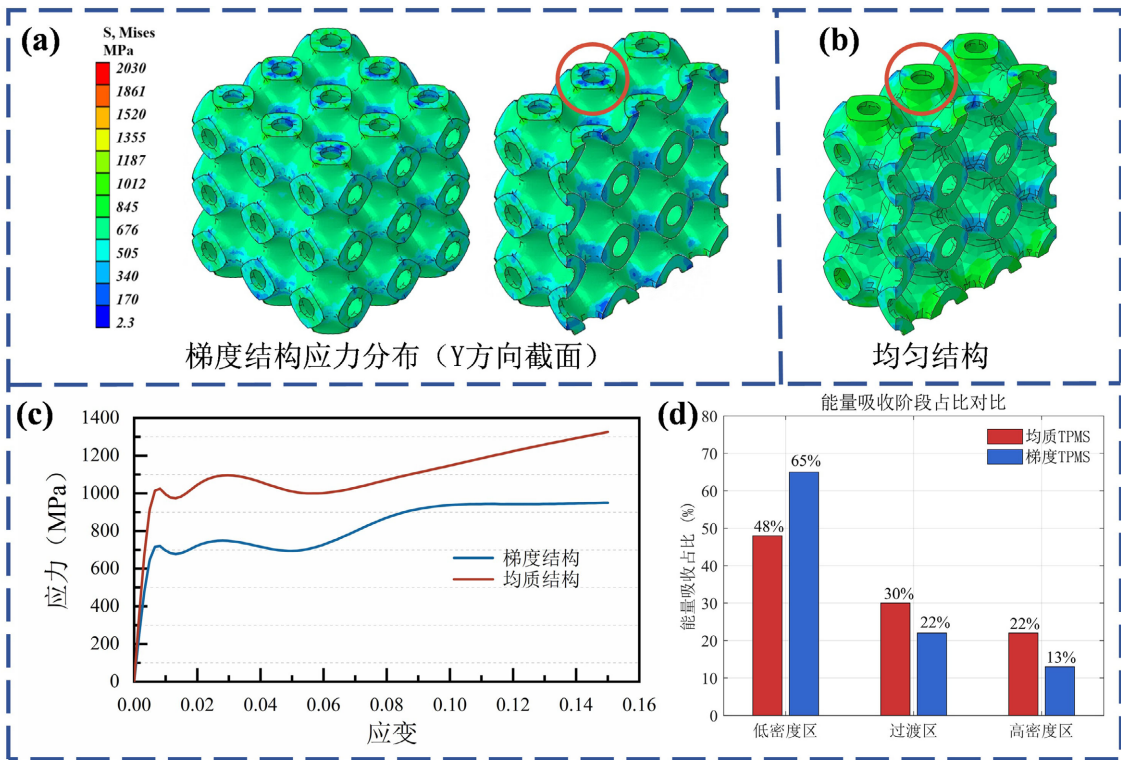


Figure 4. Mechanical response of uniform and graded structures

图 4. 均匀、梯度结构的力学响应

对梯度结构与均质结构的性能指标进行了量化对比，结果如表 4 所示。上述结果表明，场驱动梯度设计通过以下机制优化抗压性能：1) 致密区域承载主应力流，降低曲率敏感区域的应力集中风险；2) 密度梯度引导塑性变形有序扩展，避免局部失稳引发的断裂失效。

Table 4. Performance metrics of uniform and graded structures

表 4. 均匀与梯度结构的性能指标

评价指标	均匀 TPMS	梯度 TPMS	提升率
最大应力/MPa	1056	967	8.4% ↓
应力均匀性系数	0.68	0.82	20.6% ↑
脆弱点密度	0.21	0.09	57.1% ↓

3.2.2. 与现有研究的对比

本研究提出的场驱动梯度 TPMS 结构在性能上有诸多优势，与现有研究的对比结果如表 5 所示。在梯度设计方法性能方面，相较于文献[9]通过线性梯度调控孔隙率，本文非线性梯度设计使脆弱点密度从 0.11 降至 0.09，降幅达 18.2%；对比文献[11]采用均匀载荷假设优化的非线性梯度结构，本文结合真实应力场数据的场驱动方法将能量吸收效率从 71%提升至 77%。和文献[8]基于多形态单元填充的梯度设计相比，本文采用单一 TPMS-P 型单元连续梯度调控，实现了更优的应力均匀性($C_u = 0.82$ vs. 0.75)。在 TPMS 类型抗压性能上，与文献[3]中 Gyroid 曲面结构相比，本文梯度 TPMS-P 型结构准静态压缩下最大应力更低(967MPa vs. 980MPa)，应力均匀性($C_u = 0.82$ vs. 0.72)和脆弱点密度(0.09 vs. 0.15)更优；对比文献[12]的 Diamond 型 TPMS 相比，本文梯度结构抗压强度增益($G_s = 8.4\%$)更高。材料特性对梯度结构优化至关重要。和文献[6]采用 TC4 钛合金制备的梯度多孔结构相比，本文场驱动设计使能量吸收效率从 72%提升到 77%；对比文献[14]中 316L 不锈钢梯度 TPMS 结构相比，本文 TC4 钛合金梯度结构在相同密度下应力集中更低(967MPa vs. 1050MPa)，能量效率更高(77% vs. 70%)。

Table 5. Performance comparison of existing gradient TPMS research
表 5. 现有梯度 TPMS 研究性能对比

文献来源	梯度设计方法	TPMS 类型	材料	最大应力(MPa)	能量吸收效率(%)	脆弱点密度
本文	场驱动非线性梯度	Primitive	TC4 钛合金	967	77	0.09
文献[3]	线性孔隙率梯度	Gyroid	TC4 钛合金	980	65	0.15
文献[9]	线性密度梯度	Primitive	AlSi10Mg	1020	71	0.11
文献[11]	均匀载荷非线性梯度	Diamond	316L 不锈钢	1050	70	0.13
文献[12]	动态冲击梯度	Diamond	TC4 钛合金	995	68	0.10

3.3. 抗压性能提升机理分析

3.3.1. 应力传递路径优化

梯度 TPMS 结构的抗压性能提升源于其通过场驱动优化实现的密度梯度分布，有效调控了载荷传递路径。均质 TPMS 结构的应力集中主要分布于曲面曲率突变区域(如隐式曲面交汇处)，而梯度结构通过高密度区域(相对密度 $\rho_{max} = 0.8$)的局部材料富集，显著分散了主应力流。仿真结果表明，高密度区域的等效米塞斯应力较均质结构降低 23.5% (从 1056 MPa 降至 808 MPa)，验证了材料梯度对高应力区的强化作用。

进一步分析表明，梯度 TPMS 的密度分布与原始应力场呈现正相关，即高应力区域对应更高相对密度。这种自适应匹配使得载荷沿隐式曲面的光滑几何特征传递时，避免了传统桁架结构中因直角连接导致的应力奇异性。结合 Hertz 接触理论，曲率连续性的增强显著降低了局部接触应力，从而抑制了裂纹萌生风险。此外，密度梯度引导应力沿加载方向(Y 轴)逐层扩散，形成主应力通道，使整体应力均匀性系数提升 20.6%。

3.3.2. 能量吸收机制

梯度 TPMS 的能量吸收效率提升源于其分级变形特性与稳定的应力平台，可通过应力 - 应变曲线与能量阶段占比图定量解析。均质 TPMS 结构在压缩初期(应变 < 10%)即出现应力骤升(峰值 1056 MPa)，对应局部杆件屈曲。而梯度结构的曲线呈现三阶段特征：1) 低密度区压实阶段：应力平缓上升至 650 MPa，能量吸收效率达 65%；2) 过渡阶段：应力波动幅度较均质结构降低 37%，表明密度梯度协调了变形传播；

3) 高密度区承载阶段：应力稳定在 950 MPa (波动 < 5%)，平台稳定性(95%)显著优于均质结构(82%)。

梯度结构的能量吸收分布呈现“低密度主导”特征：低密度区占比 65%，过渡区占 22%，高密度区占 13%。相较之下，均质结构的能量吸收集中于屈曲阶段(低密度区占 48%)，后续阶段因结构失稳导致效率骤降。这种差异表明，梯度设计通过优先牺牲低密度区，延长了塑性变形持续时间，从而提升整体能量耗散能力。

能量吸收关键参数对比结果如表 6 所示，梯度结构的能量吸收效率(77%)较均质结构(62%)提升 24.2%，且平台应力稳定性(95%)与文献[3]中 Gyroid 结构(88%)相比更具优势。结合文献[8]的动态冲击数据(效率 68%)，本文的准静态场驱动设计在可控变形与能量分配上展现出独特潜力。

Table 6. Comparison table of key parameters of energy absorption

表 6. 能量吸收关键参数对比表

参数	均质 TPMS	梯度 TPMS
能量吸收效率(%)	62	77
应力波动幅度(MPa)	±120	±75
平台应力稳定性(%)	82	95

4. 结论

本文提出了一种基于 nTopology 场驱动设计的梯度 TPMS 结构优化方法，通过应力场数据映射与隐函数动态调控，实现了抗压性能的定向提升。主要结论如下：

将 ABAQUS 压缩仿真获得的应力场数据导入 nTopology，通过场映射算法生成自适应梯度 TPMS 结构，突破传统均匀梯度设计的局限性；建立“仿真 - 优化 - 再仿真”的闭环流程，通过准静态压缩实验模拟万能试验机工况，系统分析梯度结构的应力分布与应变响应；引入应力均匀性系数、脆弱点密度等指标，对比均质与梯度 TPMS 的抗压强度与能量吸收效率。

1) 建立的“仿真 - 场驱动优化 - 再验证”跨平台协同框架，解决了传统梯度设计依赖经验公式的局限性。通过应力权重场与 TPMS 隐函数的非线性耦合实现了密度梯度分布与局部应力场的自适应匹配。

2) 梯度 TPMS 结构的最大应力(96.7 MPa)较均质结构降低 8.4%，应力均匀性系数(0.82)提升 20.6%。其渐进压实变形模式有效抑制了局部屈曲引发的脆性失效。

本研究为抗压结构设计提供了数据驱动的拓扑优化方法论，其跨平台场映射技术与量化评价体系(应力均匀性系数、脆弱点密度)可推广至航空航天支架、医学植入体等领域，具有显著的工程应用潜力。

参考文献

[1] 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.

[2] 张志, 宋波, 王晓波, 等. 吸能的力学超材料设计与增材制造研究现状及趋势[J]. 中国激光, 2022, 49(14): 188-201.

[3] 丁佳伟. 功能梯度 TPMS 支架的结构设计及性能研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2023.

[4] 尹骏. 基于三重周期极小曲面超材料结构的能量吸收特性研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2024.

[5] 陈轲, 云忠, 周俊. TC4 钛合金仿生骨植入体单元结构力学性能分析[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(8): 1277-1282.

[6] 王元晶, 陈荐, 周立波, 等. 梯度多孔 Ti-15Mo 合金材料的制备与压缩变形行为[J]. 机械工程材料, 2023, 47(10): 16-25.

[7] 张明康, 邓铭坚, 张颖, 等. 激光粉末床熔融成形仿生梯度多孔结构弯曲性能[J]. 航空制造技术, 2023, 66(17): 26-35.

[8] Shi, X., Liao, W., Liu, T., Zhang, C., Li, D., Jiang, W., et al. (2021) Design Optimization of Multimorphology Surface-

-
- Based Lattice Structures with Density Gradients. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **117**, 2013-2028. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07175-3>
- [9] Chen, C., Ma, J., Liu, Y., Lian, G., Chen, X. and Huang, X. (2023) Compressive Behavior and Property Prediction of Gradient Cellular Structures Fabricated by Selective Laser Melting. *Materials Today Communications*, **35**, Article ID: 105853. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105853>
- [10] Zhang, M., Li, J., Liao, X., Xu, M. and Shi, W. (2022) Influence of Cycle Number on the Compression Behavior of Nonlinear Periodically Gradient Porous Structures Produced by Laser Powder Bed Fusion. *Materials & Design*, **223**, Article ID: 111257. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111257>
- [11] 曾元辉, 赵淼, 张正文, 等. TPMS 点阵结构的密度梯度杂交优化设计[J]. 重庆大学学报, 2024, 47(5): 76-86.
- [12] Yang, L., Li, Y., Wu, S., Chen, P., Wu, H., Su, J., *et al.* (2022) Tailorable and Predictable Mechanical Responses of Additive Manufactured TPMS Lattices with Graded Structures. *Materials Science and Engineering: A*, **843**, Article ID: 143109. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143109>
- [13] Qi, J., Gong, Y., Chen, H., He, J., Qiao, Z., Chen, Y., *et al.* (2021) Design and 3D Printing of Interbody Fusion Cage Based on TPMS Porous Structure. *Applied Sciences*, **11**, Article 11149. <https://doi.org/10.3390/app112311149>
- [14] Wan, M., Hu, D., Zhang, H., Pi, B. and Ye, X. (2024) Crashworthiness Study of Tubular Lattice Structures Based on Triply Periodic Minimal Surfaces under Quasi-Static Axial Crushing. *Composite Structures*, **327**, Article ID: 117703. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117703>