

氧化铝陶瓷三周期极小曲面(TPMS)结构力学性能研究与应用分析

崔欣瑜*, 刘月心, 杨成搏

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2026年1月9日; 录用日期: 2026年2月2日; 发布日期: 2026年2月10日

摘要

为探究氧化铝陶瓷三周期极小曲面(TPMS)结构的力学性能, 本研究采用建模构建实板结构及Gyroid、Schwartz两种典型TPMS结构, 通过ABAQUS有限元仿真, 系统分析结构类型对其弹性模量、抗拉强度、比强度的影响。结果表明: TPMS结构相较于传统实体结构具有显著的力学优势。本研究明确了氧化铝陶瓷TPMS结构的力学性能影响规律, 验证了数值模型的准确性, 为其在航空航天轻量化部件、生物医学支架等领域的优化设计与工程应用提供了理论依据和技术支撑。

关键词

三周期极小曲面(TPMS), 氧化铝陶瓷, 有限元仿真, Abaqus

Study on Mechanical Properties and Application Analysis of Alumina Ceramic TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) Structures

Xinyu Cui*, Yuexin Liu, Chengbo Yang

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

Received: January 9, 2026; accepted: February 2, 2026; published: February 10, 2026

Abstract

To investigate the mechanical properties of alumina ceramic Triply Periodic Minimal Surface (TPMS)

*通讯作者。

文章引用: 崔欣瑜, 刘月心, 杨成搏. 氧化铝陶瓷三周期极小曲面(TPMS)结构力学性能研究与应用分析[J]. 建模与仿真, 2026, 15(2): 51-59. DOI: 10.12677/mos.2026.152033

structures, this study adopts modeling and construction of solid plate structures as well as two typical TPMS structures (Gyroid and Schwartz). Through Abaqus finite element simulation, the influence of structure types on their elastic modulus, tensile strength, and specific strength is systematically analyzed. The results show that TPMS structures exhibit significant mechanical advantages compared with traditional solid structures. This study clarifies the influence laws of mechanical properties of alumina ceramic TPMS structures, verifies the accuracy of the numerical model, and provides theoretical basis and technical support for their optimized design and engineering applications in fields such as aerospace lightweight components and biomedical scaffolds.

Keywords

TPMS, Alumina Ceramic, Finite Element Simulation, Abaqus

Copyright © 2026 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

随着增材制造技术的发展，尤其是选择性激光熔化(SLM)和光固化成型(SLA)等方法的不断优化和应用，三维结构的设计与制造正在材料科学及工程领域引发越来越多的关注。增材制造技术以层层堆积的方式，实现了复杂几何形状的快速制造，颠覆了传统制造工艺的局限性。相较于传统材料，它能够有效减少材料的浪费，并且支持复杂结构的设计，使得设计者能够探索新型材料的力学特性及其应用潜力[1]。

在各类点阵结构中，三周期极小曲面凭借其独特的数学定义——即在三维空间中具有严格周期性且平均曲率为零，成为力学超材料设计的研究前沿[2]。从力学理论层面分析，TPMS 结构展现出显著优于传统结构的力学效率。不同于桁架结构在节点处存在明显的应力集中，TPMS 具有光滑连续的曲面形态，这种拓扑特征能够有效缓解受力过程中的局部应力峰值，从而提升结构的疲劳寿命[3]。TPMS 结构的变形模式主要由膜力的拉伸与压缩主导，而非节点的弯曲主导，这使得其在同等相对密度下具备更高的比刚度和比强度[4]。

TPMS 包含多种拓扑构型，其中 Gyroid (G 型)、Schwartz Primitive (P 型)、Schwartz Diamond (D 型) 及 I-WP 型最为典型，且各自具有独特的力学响应特征。罗智超等[5]研究表明，TPMS 的 Primitive (结构在轴向承载时刚度突出，但抗剪切能力较弱；而 Gyroid 结构凭借立方对称的几何特性，表现出近似各向同性的力学响应，适用于载荷方向不确定的工况。因而在航空航天、汽车工业以及生物医学等领域展现出广泛的应用潜力[6][7]。例如，TPMS 结构的低密度和高强度组合，使其成为了航空航天器件以及生物植入物的理想选择，这些应用都对材料的整体轻量化和强度提出了极高的要求[8]。氧化铝陶瓷因其具有高强度、高硬度、优异耐磨与化学惰性，常被选为基材。张振吉[9]指出，陶瓷 TPMS 结构将陶瓷材料固有的优异特性，与 TPMS 连续光滑曲面结构的力学高效性相结合。这种结合使其在极低密度下仍能实现极高的抗拉强度，并具有理想的可控孔隙与高比表面积，从而在轻质承力部件、高温过滤和生物植入等苛刻环境中展现出不可替代的性能潜力。

鉴于此，本研究致力于以 TPMS 结构为研究对象，特别关注三周期极小曲面结构的力学性能，通过增材制造过程中选用氧化铝陶瓷作为基材，围绕弹性模量、抗拉强度及比强度等宏观力学指标展开分析，旨在揭示拓扑几何对材料力学性能演化的影响规律，为后续拓扑结构优化设计、功能梯度结构构建及应用场景匹配提供理论依据与数据支撑。

2. 材料与方法

2.1. TPMS 结构设计与三维建模

本研究成功构建所需的三周期极小曲面(TPMS)模型。通过对现有文献的系统调研[1] [3]，筛选出 Schwartz (图 1(b))、Gyroid (图 1(c))两种典型的 TPMS 结构与普通结构(图 1(a))对比作为研究对象。这三种结构均具有连续贯通的孔隙特征和优异的力学性能，其中 Gyroid 结构的应力分布最为均匀，Schwartz 结构高度连续贯通的孔隙网络，能够全面覆盖不同应用场景的需求。成功建立的模型被导出为 x_t 格式，为后续的有限元分析做好了准备。此外，模型的尺度经过精确设计，为 $3 \times 3 \times 1 \text{ mm}$ 的标准以适应后续仿真分析的需求。

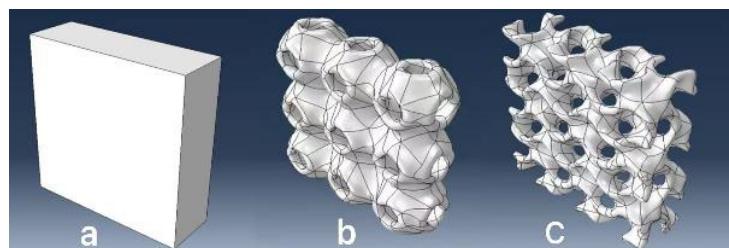


Figure 1. three structures

图 1. 三种结构

2.2. 材料属性

本研究中 TPMS 结构的制造材料为氧化铝陶瓷，其材料属性通过文献调研[2] [5]的方式确定。最终确定的材料属性如表 1 所示。

Table 1. Alumina ceramic material properties

表 1. 氧化铝陶瓷材料属性

应用	材料	密度(kg/m^3)	弹性模量(Mpa)	泊松比
陶瓷结构件	氧化铝	3700	3.2×10^5	0.23

该材料的高强度、高硬度特性能够满足 TPMS 结构在苛刻工况下的使用要求，同时良好的化学稳定性使其在生物医学和航空航天领域具有显著的应用优势。

2.3. 有限元建模与分析

2.3.1. 有限元模型建立

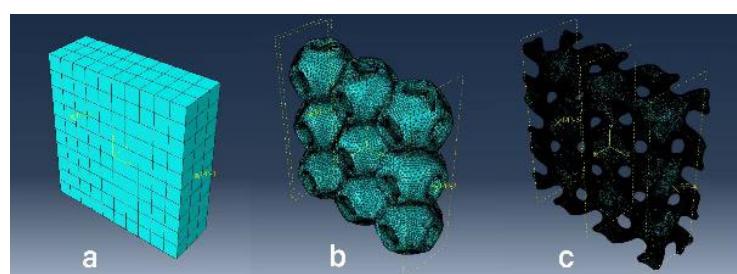


Figure 2. Mesh generation of the structures

图 2. 各结构的网格划分

将 x_t 格式的 TPMS 结构模型导入 ABAQUS 软件，进行有限元模型的构建。首先进行几何清理，通过“删除小面”“合并共面”工具去除模型表面的细小缺陷和冗余特征，确保几何模型的完整性；随后进行网格划分，考虑到 TPMS 结构的复杂性，采用 C3D10(10 节点三次四面体单元)进行网格剖分，网格尺寸设置为 0.1 mm~0.2 mm，确保网格质量达标(网格畸变率 ≤ 0.1 ，单元质量 ≥ 0.7)。最终生成的有限元模型网格数量在 20,000~160,000 之间，能够兼顾计算精度和效率，效果如图 2 所示。

2.3.2. 边界条件与载荷设置

针对该多孔结构模型的实际力学分析需求，在 Abaqus 对模型两端进行了平面分割操作，来明确后续载荷与约束的作用边界，避免复杂几何形态带来的边界识别模糊问题。同时由于该多孔结构存在局部细小单元，使用了静力学分析步骤，提升了计算的效率与可行性。在 Abaqus 的相互作用模块中，由于模型几何形态复杂，直接在分割出的平面区域施加载荷易引发局部数值应力集中，因此先在双侧分割平面处创建了参考点，再通过分布耦合约束将参考点与对应平面区域的节点建立了关联，如图 3、图 4、图 5 所示，让后续施加的载荷通过参考点均匀传递至平面区域，更贴合实际工况中该区域的受力状态，效果如图 5、图 6 所示。根据 TPMS 结构的实际应用场景，采用轴向拉伸载荷进行力学性能分析。顶部施加轴向拉伸载荷，方向为沿 X 轴正方向，初始大小为 100 N，共设置 8 个分析步，每次增加 300 N，最后一次载荷为 2200 N。

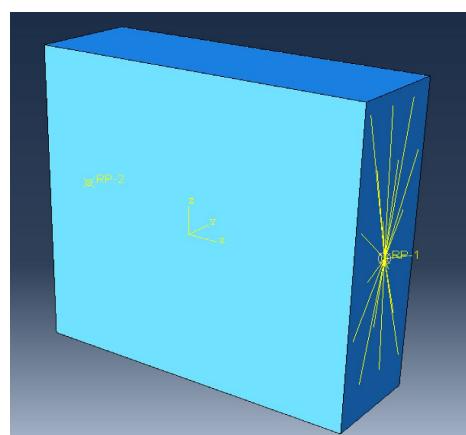


Figure 3. Coupling constraint for the conventional structure
图 3. 实板结构耦合约束

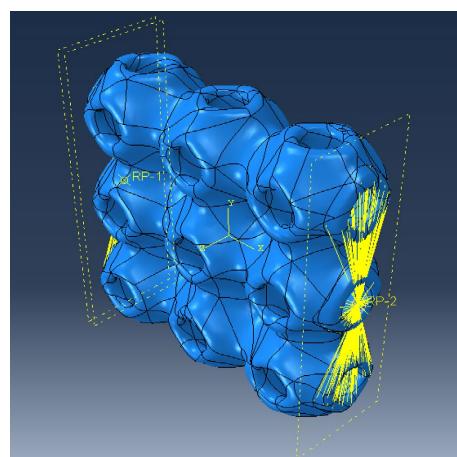


Figure 4. Coupling constraint for the Schwartz structure
图 4. Schwartz 结构耦合约束

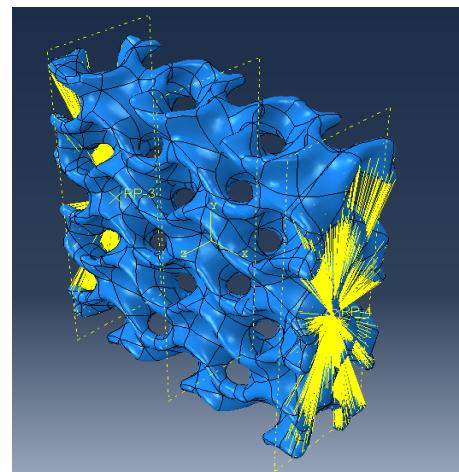


Figure 5. Coupling constraint for the Gyroid structure
图 5. Gyroid 结构耦合约束

3. 有限元仿真结果与分析

3.1. Mises 应力云图分析

应力云图分析(Mises 应力为核心指标), 进入可视化模块, 选择最后一步载荷帧, 加载 Mises 应力云图, 对比三种结构的最大应力值、应力集中区域、应力分布均匀性。

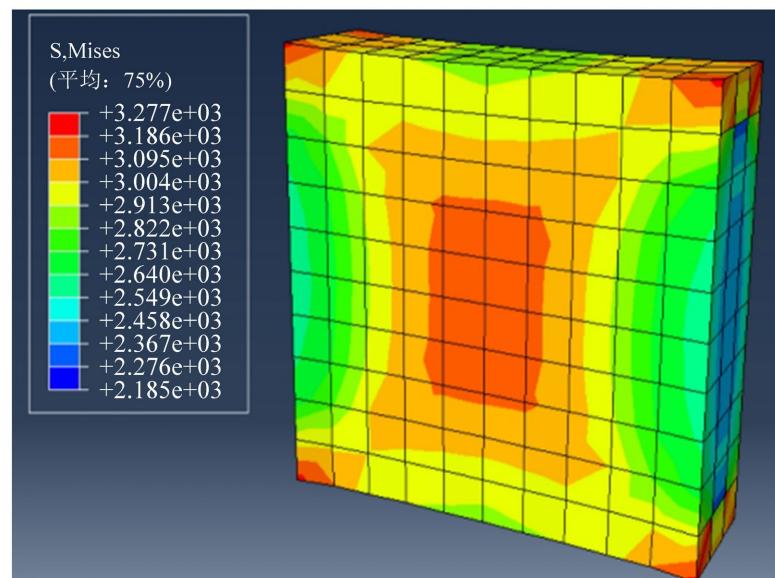


Figure 6. von Mises stress contour plot of the conventional model
图 6. 普通模型 Mises 应力云图

为系统分析普通结构与两种典型 TPMS 结构(Schwartz 结构、Gyroid 结构)的力学性能差异, 根据 Mises 应力云图分析(图 6、图 7、图 8)从最大应力、应力集中区域及应力分布均匀性三个维度展开对比: 普通结构的最大应力值为 3277 MPa, 远低于 TPMS 结构, 而且其应力集中现象较为明显, 尤其在结构的角落和连接部位, 且整体应力分布不均匀, 高应力集中区域与低应力区域形成显著差异; Schwartz 结构的最大应力值达 148,100 MPa, 应力集中主要集中在模型中间区域, 存在局部应力集中现象, 但整体应力分布

相对均匀; Gyroid 结构的最大应力值为 113,900 MPa, 同样在结构连接部位表现出一定的应力集中, 整体应力分布较均匀, 但局部高应力区域的存在表明这些部位承载能力相对较弱。从对比结果来看, 最大应力值方面, Schwartz 结构明显高于 Gyroid 结构和普通结构, 印证了 TPMS 结构, 尤其是 Schwartz 结构, 具备更优异的抗拉强度; 应力集中区域方面, Schwartz 结构和 Gyroid 结构的应力集中范围更小, 而普通结构的应力集中区域更大, 暴露了其结构设计上的薄弱环节; 应力分布均匀性方面, 两种 TPMS 结构在整个模型中的应力传递更均衡, 而普通结构的应力分布不均问题显著影响了其整体力学性能, 充分体现了 TPMS 结构在优化应力传递、提升结构承载效率上的核心优势。

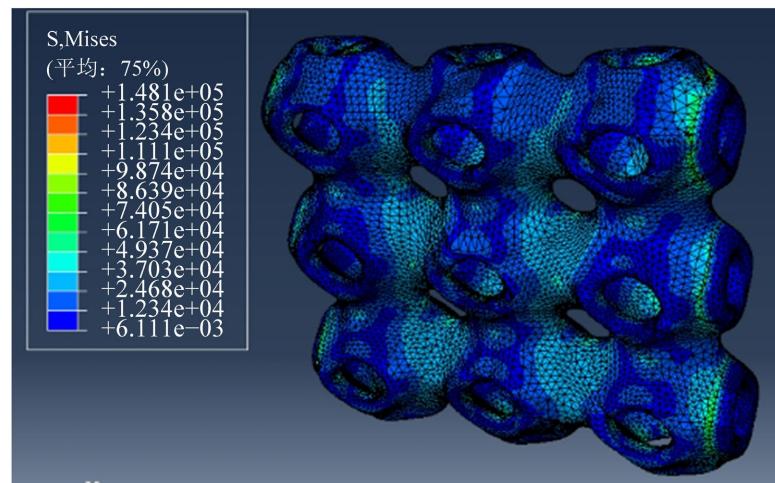


Figure 7. von Mises stress contour plot of the Schwartz structure
图 7. Schwartz 结构模型 Mises 应力云图

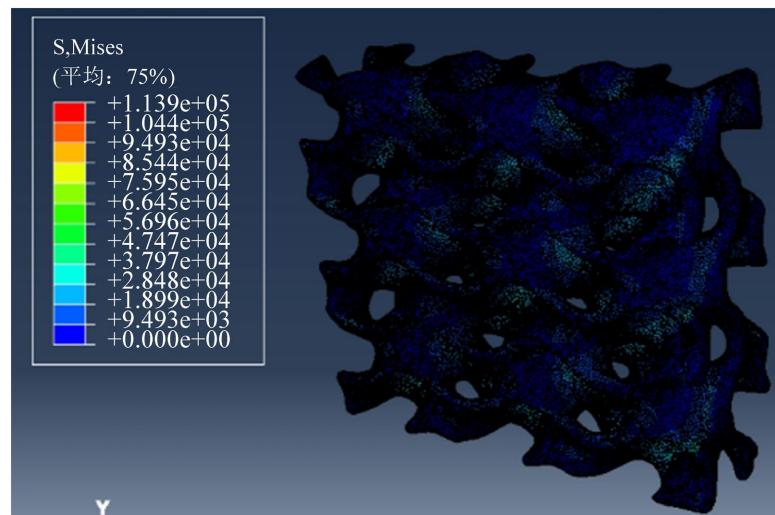


Figure 8. von Mises stress contour plot of the Gyroid structure
图 8. Gyroid 结构模型 Mises 应力云图

从微观力学机制来看, 普通实体结构的受力模式以局部区域的弯曲主导, 缺乏连续贯通的力流传递路径, 应力易在几何突变处(如角落、边缘)聚集, 导致局部应力峰值过高且分布不均; 而 TPMS 结构凭借光滑连续的曲面拓扑特征, 受力模式以膜力的拉伸与压缩为主导, 避免了传统结构中节点弯曲引发的应力集中问题。其中 Schwartz 结构的空间骨架呈现更密集的连续承载路径, 力流传递效率更高, 局部应力

分散能力更强; Gyroid 结构的立方对称几何使其力流在三维空间中均匀分布, 进一步削弱了局部应力集中效应。

3.2. 弹性模量计算

为了全面评估不同结构的力学性能, 本研究选取了三种几何形态结构进行对比分析: 实板结构(图 1(a))、Schwartz 曲面结构(图 1(b))以及 Gyroid 曲面结构(图 1(c))。三者的外形边界尺寸保持一致(长宽高比例 1:1:1), 采用氧化铝陶瓷作为研究材料, 有限元分析在 ABAQUS 模块中进行, 加载条件为顶部施加沿 Z 轴方向的均匀拉伸力, 底部完全固定。

对每组结构(普通/Gyroid/Schwartz), 分别提取仿真的应力、应变曲线、选取弹性阶段应力、应变数据。根据弹性模量计算公式:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

选取对应点的应力、应变, 分别取 X 位置的数据。在普通实体结构模型中, 应力 $\sigma_1 = 760.721 \text{ MPa}$, 应变 $\varepsilon_1 = 0.002333$, 计算得弹性模量 $E = 326 \text{ GPa}$; 在 Schwartz 结构模型中, 应力 $\sigma_2 = 767.351 \text{ MPa}$, 应变 $\varepsilon_2 = 0.002365$, 计算得弹性模量 $E = 324 \text{ GPa}$; 在 Gyroid 结构模型中, 应力 $\sigma_1 = 3991.751 \text{ MPa}$ 应变 $\varepsilon_1 = 0.012511$, 计算得弹性模量 $E = 319 \text{ GPa}$ 。

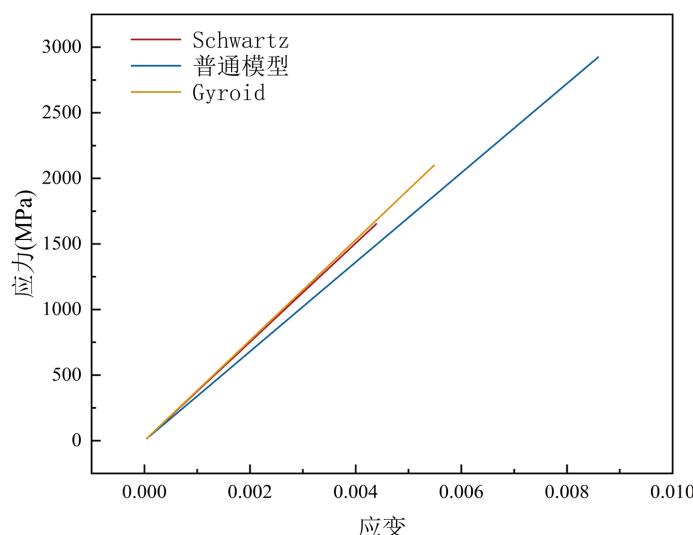


Figure 9. Stress-strain curve
图 9. 应力 - 应变曲线

图 9 曲线表明, 三种结构在弹性阶段均呈良好的线性关系, 说明在当前载荷范围内可近似视为线弹性响应。Schwartz 和 Gyroid 结构的弹性模量分别较普通实体结构略低约 0.6% 和 2.1%, 整体变化幅度较小, 表明在采用 TPMS 拓扑进行几何轻量化的同时, 整体刚度并未出现明显下降。从曲线形态和等效应力云图来看, 普通实体结构在固定边缘附近存在较明显的应力集中, 局部应变梯度较大; TPMS 结构则依托其连续曲面和多路径力流特征, 使应力在内部得以更均匀地传递。Schwartz 结构的高应力区域主要出现在连接颈部附近, 但范围有限; Gyroid 结构整体应力分布最为平滑, 应变分布连续性更好。总体上, TPMS 几何通过拓扑结构的优化, 在保持接近实体结构弹性模量的前提下改善了应力与应变分布, 为后续强度与疲劳性能的提升奠定了基础。

从微观力学机制分析，普通实体结构的弹性响应由整体材料的拉伸变形主导，内部无孔隙导致应力传递直接且刚度稳定；而 TPMS 结构虽存在孔隙，但连续曲面形成的空间骨架使受力模式仍以拉伸-压缩为主，避免了桁架类结构中杆件弯曲带来的刚度损失。Schwartz 结构的曲面曲率较大，骨架承载面积相对更充足，因此弹性模量更接近普通实体结构；Gyroid 结构的曲面更平滑，局部承载截面略小，导致弹性模量略有下降，但仍保持在较高水平。

3.3. 抗拉强度计算

从各结构的 Mises 应力云图(图 6、图 7、图 8)来看，三种结构的承载能力呈现显著分化：Schwartz 结构的抗拉强度最高，达到 148,100 MPa，表现出最强的极限承载能力；Gyroid 结构次之，为 113,900 MPa，同样具备较高的抗拉性能但略低于 Schwartz；而普通实体结构的抗拉强度最低，仅 3277 MPa。这表明在相同材料体系下，TPMS 结构通过其连续曲面与空间骨架效应显著提升了载荷传递效率，从而获得更高的峰值抗拉承载能力；相比之下，普通结构在当前工况下更早出现高应力主导的失效特征，导致其峰值抗拉强度偏低。

微观层面上，普通实体结构的抗拉失效源于局部弯曲主导的应力集中，当载荷达到一定阈值时，应力集中区域率先发生材料屈服或断裂，导致整体承载能力骤降；而 TPMS 结构的连续曲面拓扑使力流通过多路径传递，受力模式以拉伸-压缩为主，有效避免了弯曲变形引发的早期失效。Schwartz 结构的空间骨架呈现密集的“网状”承载体系，每个曲面单元均参与载荷传递，分担应力的能力更强，因此极限抗拉强度最高；Gyroid 结构的立方对称拓扑使应力均匀分布，但曲面单元的承载截面相对 Schwartz 略小，导致抗拉强度稍低。

3.4. 比强度计算

基于材料密度(氧化铝 3700 kg/m³)，为了量化三周期极小曲面(TPMS)结构在“轻量化 - 高强度”平衡上的核心优势，对比了普通实体结构与两种典型 TPMS 结构(Schwartz 结构、Gyroid 结构)的比强度，根据比强度计算公式：

$$\sigma_{sp} = \frac{\sigma_{max}}{\rho} \quad (2)$$

计算结果显示：普通实体结构的比强度为 $\sigma_{sp} = 3277/3700 = 0.89 \text{ MPam}^3/\text{kg}$ ；而 TPMS 结构的比强度均呈现数量级提升，其中 Schwartz 结构的比强度最优，达 $\sigma_{sp} = 148,100/3700 = 0.89 \text{ MPam}^3/\text{kg}$ ，Gyroid 结构的比强度为 $\sigma_{sp} = 113,900/3700 = 30.8 \text{ MPam}^3/\text{kg}$ 。数据表明，Schwartz 结构和 Gyroid 结构的比强度分别是普通实体结构的 44.9 倍和 34.6 倍，充分证明 TPMS 结构通过连续曲面承载路径与更高的结构效率，能够在保证轻量化特性的同时，大幅提升材料的比强度，显著优于普通实体结构在“轻量化 - 高强度”平衡上的表现，其中 Schwartz 在强度、重量权衡上最优，适合更强调承载能力的轻量化场景，而 Gyroid 次之，但通常具有更平滑的应力传递与更均匀的力学响应，更适合兼顾稳定性与制造容错的应用方向，为氧化铝陶瓷等结构材料的性能优化提供了重要方向。

从微观力学机制来看，比强度的差异源于结构效率的本质区别：普通实体结构的材料利用率低，大量材料处于低应力状态，未能充分发挥承载作用，导致“重量 - 强度”比值失衡；而 TPMS 结构通过拓扑优化，使材料集中分布在力流传递路径上，形成高效的空间承载骨架，受力模式以拉伸-压缩为主，避免了无效材料的浪费。Schwartz 结构的骨架密度更高，承载路径更密集，材料利用率达到最优，因此比强度最高；Gyroid 结构的骨架分布更均匀，虽材料利用率略低于 Schwartz，但仍远高于普通实体结构，实现了比强度的大幅提升。

各结构力学性能数据统计如表 2 所示。

Table 2. Statistical data of mechanical properties for various structures
表 2. 各结构力学性能数据统计

结构类型	弹性模量(GPa)	抗拉强度(MPa)	比强度(MPam ³ /kg)
普通实体结构	326	3277	0.89
Schwartz 结构	324	148,100	40.0
Gyroid 结构	319	113,900	30.8

4. 结论

本研究基于 ABAQUS 有限元仿真，系统分析了氧化铝陶瓷普通实体结构与两种典型 TPMS 结构 (Gyroid, Schwartz) 的力学性能差异，重点考察了弹性模量、抗拉强度与比强度等指标，并对应力与应变分布特征进行了对比。在相同材料和边界条件下，TPMS 结构显著提升了极限承载能力。Schwartz 结构和 Gyroid 结构的等效抗拉强度远高于普通实体结构，体现了 TPMS 拓扑在载荷多路径传递与应力分散方面的优势。在比强度方面，TPMS 结构展现出突出的结构效率。Schwartz 结构和 Gyroid 结构的比强度分别约为普通实体结构的 44.9 倍和 34.6 倍，实现了以几何设计获得性能数量级提升的目标，充分证明了 TPMS 结构在“轻量化 - 高强度”平衡上的潜力。应力与应变云图分析表明，TPMS 结构能够有效缓解普通实体结构中的应力集中问题，使应力在更大体积范围内均匀分布，结构变形更加协调，有利于提高结构的安全裕度和疲劳寿命。其中，Schwartz 结构强调极限承载与比强度优势，Gyroid 结构则在应力分布均匀性与稳定性方面表现更优。综上，氧化铝陶瓷 TPMS 结构在保持基本刚度的前提下，实现了比强度和承载能力的显著提升，为航空航天轻量化构件和生物医学支架等领域的结构设计提供了有效的拓扑路径。后续工作可进一步结合实验验证不同 TPMS 结构的实际失效模式，引入多尺度建模与制造误差分析，完善数值模型的工程适用性，并探索功能梯度 TPMS 结构在复杂服役环境下的综合性能。

基金项目

本项目由上海市协同创新项目(编号：XTCX-KJ-2024-01)资助。

参考文献

- [1] 薛伟, 董天源, 黄晨, 等. SLA 打印制备融合 TPMS 氧化铝陶瓷支架结构优化设计研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(5): 1784.
- [2] 黄心语, 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.
- [3] 秦嘉伟, 熊胤泽, 高芮宁, 李祥. 杆状和片状三周期极小曲面模型孔隙特征与力学性能对比[J]. 医用生物力学, 2021, 36(4): 576-581.
- [4] Lu, C., Hsieh, M., Huang, Z., Zhang, C., Lin, Y., Shen, Q., et al. (2022) Architectural Design and Additive Manufacturing of Mechanical Metamaterials: A Review. *Engineering*, 17, 44-63. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.12.023>
- [5] 罗智超, 唐倩, 宋军, 等. 四方对称 TPMS 晶格结构的设计及各向异性分析[J/OL]. 机械工程学报, 1-14. <https://link.cnki.net/urlid/11.2187.TH.20251021.1520.038>, 2025-12-24.
- [6] 高寒, 王琦, 刘笑尘. 基于三周期极小曲面的起落架斜撑杆结构设计[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2022, 36(4): 22-27.
- [7] 李鹏健. 陶瓷骨支架微结构与性能的关联规律研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [8] 魏取龙, 姜丽红, 刘征, 等. 选区激光熔化制备 TPMS 晶格结构及力学性能[J]. 航空学报, 2025, 46(3): 303-318.
- [9] 张振吉. 基于 3D 打印的 TPMS 结构多孔陶瓷成形工艺与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.