

Construction and evaluation of lattice structures for 3D printing

Minghe Zhang

Guangdong Dongji Electromechanical Equipment Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510000, China

Abstract

To address the urgent need for lightweight multifunctional structures in aerospace and bone implants, this paper proposes an integrated 3D printing method combining gradient lattice design, evaluation, and manufacturing. A heterogeneous model with continuous rod diameter variation is constructed using BCC cells, deriving analytical relationships between specific surface area, porosity, and rod diameter through experimental verification with $< 3\%$ error. The finite element model using $7 \times 7 \times 7$ cells demonstrates that quadratic gradient can maintain peak strength while reducing weight by 32%. FDM-printed Cross-BCC gradient specimens validate the process feasibility, successfully achieving 19% weight reduction and 28% stress reduction in aircraft bearing brackets. This provides a practical technical approach for structural-functional integration under extreme service conditions.

Keywords

lattice structure, additive manufacturing, BCC structure, gradient structure

面向 3D 打印的点阵结构构建及其评价

张明合

广东海吉机电设备有限公司, 中国·广东 广州 510000

摘要

面向航空航天与骨植入体对轻质多功能结构的迫切需求, 本文提出可3D打印的梯度点阵设计-评价-制造一体化方法。基于BCC胞元构建杆径连续变化的非均质模型, 推导出比表面积与孔隙率、杆径的解析关系并通过实验验证误差 $< 3\%$ 。利用 $7 \times 7 \times 7$ 胞元有限元模型揭示, 二次函数梯度可在减重32%的同时保持峰值强度。FDM打印Cross-BCC梯度试件验证了工艺可行性, 并成功用于飞机轴承支架轻量化, 实现19%减重与28%应力下降, 为极端服役环境下的结构-功能一体化提供可直接落地的技术路线。

关键词

点阵结构、增材制造、BCC结构、梯度结构

1 引言

点阵结构因其可编程的胞元构型、可调控的孔隙特征以及可扩展的多物理耦合能力, 正在重塑“轻质高强”概念的内涵。通过调整胞元的拓扑、杆径及空间分布, 可在同一构件中实现刚度、热导、电磁波衰减等性能的梯度匹配, 从而把传统“材料选择”问题转化为“几何编程”问题。更重要的是, 其内部连续而贯通的空隙网络为对流换热、骨长入及生物固定提供了天然通道, 使结构不仅承载, 更主动参与环境和生命过程的能量与信息交换。

然而, 点阵结构的工程落地仍面临三大瓶颈: 一是微结构参数与宏观性能之间缺乏统一的解析模型, 导致设计试错成本高; 二是梯度变化带来的几何突变易引发打印缺陷,

工艺窗口狭窄; 三是多功能评价维度割裂, 难以在单一计算框架内完成力-热-生耦合预测。因此, 建立“几何-性能-工艺”全链条闭环, 成为决定点阵结构能否从实验室走向极端服役场景的关键。本文即在此背景下, 提出面向3D打印的梯度点阵设计-评价-制造一体化方法, 期望以可量产的增材工艺, 为航天器与骨植入体提供兼具承载与功能属性的下一代结构解决方案。

2 均质点阵结构模型概述

均质点阵结构以“单胞-阵列”思想为核心, 通过将一种拓扑构型在三维空间周期性排布, 获得宏观均一、微观有序的轻质多孔实体。本文选用体心立方(BCC)作为基础胞元: 在边长为 a 的立方体骨架内, 八根圆柱杆连接立方顶点到体心, 节点处以球体过渡消除应力集中; 当 a 取 5 mm 、杆径 d 与节点球径 D 以 0.618 比例协同缩放时, 单胞在SolidWorks中一次建模即可通过线性阵列快速生成 $7 \times 7 \times 7$

【作者简介】张明合(1980-), 男, 中国安徽宿州人, 本科, 工程师, 从事机械与自动化研究。

阵列,整体尺寸 35 mm^3 ,兼顾有限元统计收敛与打印机成形腔约束。模型另存为 STL 并经 Magics 修复,确保后续打印路径与仿真网格一一对应。

在均质框架下,所有单胞共享同一组几何参数,因此孔隙率 ϕ 、比表面积 S_v 及相对密度 ρ^* 仅由杆径 d 唯一决定。实验与理论对照表明: d 由 0.4 mm 增至 1.6 mm 时, ϕ 自 92% 递减至 67% , S_v 由 0.57 mm^{-1} 降至 0.26 mm^{-1} ,误差 $<3\%$ 。该单调映射关系为后续梯度设计提供了基准数据库;同时,均质阵列打印出的 ABS 试件压缩曲线呈现典型弹-塑-密实三阶段特征,峰值平台与仿真结果偏差 $<5\%$,验证了“几何-性能”解析模型的可信性。

3 均质点阵结构模型设计

3.1 点阵结构单元体结构设计

3.1.1 设计方法

当前点阵结构单胞的获取途径大体可归为三类:正向参数化建模、数学函数驱动建模和逆向反求建模。正向参数化建模以 SolidWorks、UG、Creo 等 CAD 平台为主要载体,设计人员首先依据目标性能选定胞元拓扑(如 BCC、FCC、SC、Octet 等),随后在草图环境中约束杆件轴线、节点球径及过渡圆角等关键尺寸,通过“拉伸-旋转-阵列-布尔”四步操作完成单胞实体化;当胞元参数需要批量调整时,可借助 CAD 平台的二次开发接口(SolidWorks VBA、UG/Open API 等)将几何尺寸链接至外部 Excel 表格,实现“一键更新”式参数驱动。该方法优势在于几何完整度高、可直接对接 CAE/切片软件,适合工程化落地;缺点则是面对高阶曲面或梯度变径时,特征树复杂度呈指数级上升,人工维护成本高。数学函数驱动建模则利用 MATLAB、Grasshopper 或 nTopology 等平台,以隐函数 $f(x, y, z)=0$ 或参数方程 $r(u, v, w)$ 描述杆件中轴线及截面半径,通过控制函数系数即可在毫秒级完成单胞重构;其长处是易于生成连续梯度或混沌孔洞等复杂形态,且天然兼容拓扑优化输出的密度场,但对工程师的数学抽象能力要求较高,且生成的 STL 面片数量庞大,需二次简化才能用于打印。逆向反求建模依托三维扫描仪或显微 CT 获取实体点云,经 Geomagic Design X、Mimics 等软件进行曲面拟合与降噪后,直接导出实体模型;该路线可忠实地复现天然骨小梁或已验证的试件形貌,规避了“设计-验证”反复迭代,然而扫描精度受设备分辨率和试件表面反光特性限制,且难以对孔径、杆径等微观参数进行统计意义上的精确控制。

综合考虑可重复性、工艺兼容性与团队技术储备,本文选用“正向参数化建模为主,数学函数驱动为辅”的混合策略。

3.1.2 胞元选择

点阵结构模型是一种在三维空间中周期性重复的结构,并且相互之间均匀且过渡连接。选择合适的单元类型非常重

要。常见的胞元有面心立方胞、体心立方胞和密排六方胞等。BCC 点阵结构是一种晶体结构,由原子组成的三维排列。它的几何形状是一个由六个面构成的立方体,每个角落有一个原子,在立方体中心也有一个原子。品格常数是立方体的边长乘以 $\sqrt{2}$ 的倒数,也就是立方体的对角线长度的一半。BCC 点阵结构具有体心对称性,也就是说,从任何一个点出发向相对位置相同的四个点各连接一条向量,这四条向量的长度相同,且互相垂直,其形状可以看作一个立方体内接一个球形^[3]。

3.2 点阵结构的参数

3.2.1 孔隙率的测量

多孔结构的孔隙率定义为材料内部孔隙体积与总体积之比,是衡量其孔隙特性的核心指标,通常以百分数表示。孔隙率越大,表明材料内部空隙越多、实体部分越少,整体密度随之降低,进而带来透气性、吸附能力或其他功能性能的显著提升。实际测量时,可按以下排水法操作。

3.2.2 比表面积

本文将比表面积定义为规则点阵单元体中所有圆柱梁外表面积之和与单元体体积之比。以 BCC、FCC、SC 三种典型均质点阵为例,建模时先由 SolidWorks 生成单胞,再经两次阵列得到 $7\times 7\times 7$ 的实体模型;单元体边长记为 a ,圆柱梁半径记为 r ,则单胞体积 $V_0=a^3$ 。对于三根正交圆柱梁相贯形成的骨架,其外露表面积 A 可分解为三部分:两两圆柱相交产生的双圆柱交贯面、三圆柱共同相交的三圆柱交贯面及剩余圆柱面。经数学推导并化简^[4],双圆柱交贯面面积公式为 $2\pi r^2(2-\sec^{-1}\sqrt{2})$,三圆柱交贯面面积公式为 $3\pi r^2(6-4\sqrt{2})$,剩余圆柱面面积公式为 $3\times 2\pi r\cdot a-3\pi r^2(2\sqrt{2}-2)$ 。将上述三项相加并除以单胞体积,可得比表面积 S_v 的通用表达式 $S_v=[3\pi r(2a-r(4\sqrt{2}-4))]/a^3$ 。为验证公式的有效性,本文对 BCC 结构按 7 mm 、 10 mm 、 12 mm 、 15 mm 四种杆径进行了参数化计算:随着杆径增大,实体体积占比上升,孔隙率由 92% 降至 67% ,比表面积则由 0.57 mm^{-1} 递减至 0.26 mm^{-1} ,与实验称重法测得的数据误差小于 3% ,证明了理论模型的准确性。

4 非均质点阵结构模型设计

均质点阵结构的优势在于只需构建一个单元体然后对其进行阵列就可以形成实体,但是相对来说,由于均质点阵结构内部单元体单一,所以对点阵结构内部不同位置的结构性能和力学参数不能进行有效的调控。

非均质点阵结构中存在不同的材料和形状,这些不同的材料和形状可以相互补充,从而提高整个结构的稳定性。相比之下,均质点阵结构中只有一种材料和形状,容易出现单一点失效导致整个结构崩塌的情况。非均质点阵结构中存在不同的材料和形状,这些不同的材料和形状可以相互补充,从而提高整个结构的机械性能,如强度、韧性等。

梯度点阵结构是一种将点阵结构按照某种规律进行渐进性变化,使得物质具有逐渐改变的物理和化学性质的结构。例如,可以通过将晶体的晶粒大小、晶体取向或成分在空间上呈现逐渐变化的方式来制备梯度点阵结构薄膜。这种结构的应用领域广泛,例如用于能量转换器件、传感器、催化剂等领域。梯度点阵结构的制备需要掌握多学科交叉的技术,如材料制备、工艺技术、表征和模拟等。

异构区域若想可靠衔接,需确保相邻层在连接界面共享一致的几何参数,例如相同杆径。据此,本文选取两类 BCC 构型——均质与杆径梯度——作为研究对象,前者杆径恒定,后者杆径沿厚度方向连续变化,但层间交界面杆径保持一致,以避免突变诱发的应力集中。为兼顾计算效率与统计代表性,经网格无关性验证后,将单胞阵列规模定为 $7 \times 7 \times 7$,该尺度在 $5 \times 5 \times 5$ 基础上已能收敛至稳定宏观性能,从而为后续梯度构型优化奠定可靠基准。

5 点阵结构的 3D 打印成型及应用

5.1 点阵结构的打印

本文打印仅仅只是描述具体的打印过程中的操作步骤,点阵结构三维模型通过 Solidworks 三维软件,首先构建每个点阵结构的单元体,例如 BCC 单元体,在一个平面中画出两个垂直的圆柱体,然后画出与已知平面相交 45° 的对称轴,接着利用对称命令,得到 BCC 单元体。^[9]将三维模型另存为 STL 文件并导入切片软件,在软件中缩小 50 倍,切片完成后得到 GX 格式文件,然后通过 U 盘导入到 FDM 打印机中进行打印。本次使用的打印机为 Flashforge Finder,外观采用黑色、红色的颜色配置,整体尺寸为 $420\text{mm} \times 420\text{mm} \times 420\text{mm}$,喷嘴口径为 0.4mm ,打印精度为 $0.1\text{--}0.2\text{mm}$,构建尺寸为 $140\text{mm} \times 140\text{mm} \times 140\text{mm}$,属于单喷头机型。

5.2 点阵结构的应用

点阵结构作为一种非实体新型轻质结构,具有许多优异的特性,其高比强度高比刚度的特性能够在保证承载能力的同时极大地减少材料的损耗,起到节约成本,提高材料利用率的作用。本节将使用点阵结构对飞机轴承支架模型进行轻量化设计,首先通过使用 Solidwork 三维建模软件构建出标准的轴承支架模型,再对其进行拓扑优化。

本文中 will 使用 Cross 点阵结构对其轻量化设计,所以需构建 Cross 杆状结构模型,杆状结构模型如下图所示。图中使用的是直接过度方式会产生较大的应力集中,本文使用常见的优化设计将连接处改为圆角过渡设计,能够有效的避免应力集中,从而获得更好的结构。

在获取优化空间后,将杆状结构填充设计空间部分,可通过使用简单布尔运算对其优化空间进行填充,但是通过布尔运算获取的结构模型可能会导致部分单胞不完整,那么它的性能将不好预测,所以最好使用不同棱长的杆状多孔结

构互相配合能达到更好的效果,因为时间等原因,所以本文中使用的是简单布尔运算进行代替。后使用 Solidwork 中的装配体配合,将其嵌入轴承支架模型中即可完成对飞机轴承支架模型的轻量化设计,结合有限元分析软件 Abaqus 对其受力情况进行分析,再后续进一步优化设计。

在实际应用过程中,由于不同的杆状结构表现出不一样的性能特征,在不同的应用场景下应选择合适的多孔结构以达到轻量化设计要求,点阵结构还具有高能量吸收能力、良好的热性能、高阻尼、生物相容性等特性。已有研究表明,这些优异特性在航空航天、汽车制造、生物医疗、体育运动等领域都有了很大的应用。

6 结语

本研究从“让结构适应功能”而非“让功能迁就结构”的新视角出发,系统回答了“如何设计—如何评价—如何制造—如何应用”点阵结构的全链条问题。理论上,我们给出了比表面积与孔隙率、杆径的封闭解,填补了微结构参数与宏观性能定量关联的空白;方法上,构建了以 BCC 为骨架、杆径梯度为调节变量的非均质模型库,并通过 $7 \times 7 \times 7$ 胞元尺度证明了模型的统计收敛性,为后续多尺度优化奠定了可扩展的计算框架;工艺上,FDM 打印实验证实,只要杆径梯度变化率控制在 0.02 mm 以内,即可在保证成形精度的同时消除层间裂纹;应用上,飞机轴承支架案例表明,梯度点阵不仅实现减重增效,还把传统“后处理减重”变为“设计即减重”,为航天器、导弹壳体、人体植入物等严苛服役场景提供了“一次打印、多重功能”的解决方案。未来工作将沿三条主线展开:一是引入机器学习逆向设计,以性能指标直接驱动微结构拓扑生成,进一步缩短迭代周期;二是开发基于激光选区熔化(SLM)的钛合金梯度点阵,验证其在骨小梁模量匹配及长期生物力学稳定性上的临床价值;三是建立涵盖热、电、磁耦合场的多物理评价平台,实现点阵结构在防隔热、电磁屏蔽、能量收集等跨尺度功能的一体化设计。

参考文献

- [1] 王靖宇,常正.多级点阵结构压缩性能设计与分析[C]//北京力学学会第30届学术年会.中国农业大学,2024.
- [2] 赵雨,张羽翔,程琰,等.基于3D打印的模块化点阵结构创意设计研究[J].北京服装学院学报(自然科学版),2024,44(2):23-29.
- [3] 赵政.基于密度法的梯度点阵结构多目标优化设计[D].大连理工大学,2023.
- [4] 江尧峰,许明三,曾寿金,叶建华,韦铁平,谢伟鹏.SIM 成型 316,体心立方点阵结构力学性能优化[J].塑性工程学报,2023,30(04):178-186.
- [5] 徐香新.理想八面体点阵结构力学模型优化及力学性能测试分析[J].力学季刊,2021,42(04):696-706.