

DOI : 10.3901/JME.2019.08.065

基于拓扑优化的变密度点阵结构体优化设计方法^{*}

廖中源¹ 王英俊¹ 王书亭²

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院聚合物新型成型装备国家工程研究中心 广州 510641 ;

2. 华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074)

摘要：点阵材料是一种超轻高强的高性能多孔材料，目前主要以等密度构建点阵结构体。在实际情况下，点阵材料的各部分承受着不同的载荷，等密度点阵材料存在性能不能充分发挥的问题。针对上述问题，将拓扑优化引入点阵材料设计中，提出一种基于均匀化方法的多尺度拓扑优化方法，实现了变密度点阵结构体的优化设计，可根据实际载荷设计出最优的变密度点阵结构体，以达到最优性能。以汽车连杆为例，与现有商业软件 HyperWorks 采用的梁模型点阵优化方法进行对比验证。结果表明，所提出方法优化所得连杆的轻量化效果更好，应力分布更合理。该方法生成的变密度点阵结构有着更优异的性能，更适合变密度点阵结构体的优化设计。

关键词：点阵结构；变密度；拓扑优化；有限元分析；3D 打印

中图分类号：TH140

Graded-density Lattice Structure Optimization Design Based on Topology Optimization

LIAO Zhongyuan¹ WANG Yingjun¹ WANG Shuting²

(1. National Engineering Research Center of Novel Equipment for Polymer Processing,

School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641;

2. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430074)

Abstract : Lattice material is an ultra-light, high-strength, high-performance porous material. At present, the lattice structure is mainly constructed with uniform density. Different parts made of the lattice material are subjected to different loads, which results in a problem that the optimal performance of the lattice material with uniform density cannot be fully achieved. In view of the above problems, a multiscale topology optimization method based on homogenization method is proposed, which realizes the graded-density lattice structure, and the optimal graded-density lattice structure can be obtained according to the actual load to achieve optimal performance. Taking the automobile connecting rod as an example, comparing with the method of beam-model-based lattice optimization from the commercial software HyperWorks, the proposed method has better performance on mass reduction and the stress distribution. Therefore, the method obtains a better-property design, which is more suitable for the optimal design of graded-density lattice structures.

Key words : lattice structure ; graded-density ; topology optimization ; FEA ; 3D printing

0 前言

点阵材料是一种新型的轻质高强材料，由多孔单胞规整排列组成，具有超轻、高孔隙率、高强韧性、高比强度、高比刚度、高能量吸收性等一些优良的力学性能，以及减振、电磁屏蔽、吸声、散热、

渗透等特殊性能^[1]。在航空航天^[2]、汽车的能量吸收保险杠^[3]、土木工程的隔热层^[4]以及医疗器械行业^[5]都有着重要作用。

传统点阵材料微结构都是等密度分布的^[6-7]，在实际情况下，结构各个部分承受着不同的载荷。为了使材料性能得到充分发挥，应该根据各区域承载力的大小确定材料的密度分布。所以在相同的受力情况下，变密度点阵结构比等密度点阵结构有着更好的材料分布，更小的相对密度，更轻的重量。为

^{*} 国家自然科学基金(51705158, 51675197)和中央高校基本科研业务费专项(2018MS45)资助项目。20180702 收到初稿，20181206 收到修改稿

了解决等密度点阵材料性能不能充分发挥的问题, 本文将拓扑优化引入点阵结构设计中, 获取最优的点阵材料密度分布, 从而设计出变密度的高性能点阵结构体。拓扑优化是在特定的条件约束下, 寻找给定设计域最优材料分布的一种方法^[8]。拓扑优化方法中, 应用范围最广的为密度法(SIMP)^[9], 该方法假设每个单元拥有一个范围在 0~1 的相对密度, 通过更新单元相对密度获得最优的材料分布。密度法拓扑优化的单元密度与点阵体胞元的相对密度可一一对应, 因此本文将采用该方法进行变密度点阵结构体的优化设计。

在变密度点阵结构体的拓扑优化设计研究上, COELHO 等^[10]提出了一种对 3D 点阵结构的拓扑优化方法, 其中优化方案由两个主回路组成。其中外回路解决材料的宏观设计, 内回路使用均匀化方法来进行单元的拓扑优化。WANG 等^[11]提出了一种基于点阵材料的多尺度等几何拓扑优化方法, 将渐进均匀化方法应用在点阵结构的拓扑优化中, 证明了胞元拓扑结构在点阵的最优密度分布中的作用。欧阳佳琛^[12]基于改进变密度法, 设计出材料属性呈梯度变化的点阵材料。赵芳垒等^[13]提出了基于局部相对密度映射的结构设计方法, 成功实现了多孔结构的变密度分布。

本文提出一种新的变密度点阵结构的拓扑优化方法, 联合 Matlab 与 ANSYS, 基于均匀化方法, 实现多尺度点阵结构体拓扑优化设计。以汽车连杆为例, 与现有商业软件 HyperWorks 采用的梁模型点阵优化方法进行对比验证, 最后通过 3D 打印制造出具有变密度点阵结构的汽车连杆。

1 基于均匀化方法的多尺度点阵结构拓扑优化模型

1.1 点阵结构等效力学性能计算

将连续体划分为周期阵列均匀的点阵微结构, 其等效力学性能可通过均匀化方法求得^[14]。以汽车连杆为例, 采用四面体组合(由 12 个四面体组成)作为微结构点阵胞元, 如图 1 所示。

它的相对密度可表示为点阵胞元的体积分数, 范围是 0~1。

$$x_e = V_s / V \quad (1)$$

式中 x_e ——点阵胞元的相对密度(体积分数);
 V_s ——点阵胞元实心部分的体积;
 V ——点阵胞元的体积。

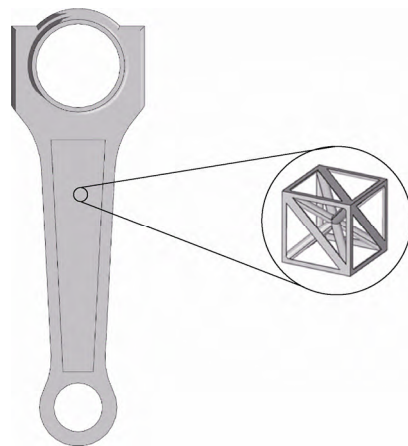


图1 四面体组合点阵胞元

点阵结构的等效弹性模量 E_{ijkl}^H 可由式(2)计算

$$E_{ijkl}^H = \frac{1}{|V|} \int_{V_s} E_{ijmn} M_{mnkl} dV \quad (2)$$

式中 E_{ijkl} ——局部弹性模量, 其等于点阵胞元的实心部分材料的弹性模量;
 M_{ijkl} ——与宏观应变 $\bar{\epsilon}_{ij}$ 和微观应变 ϵ_{ij} 有关的局部结构张量。

$$\epsilon_{ij} = M_{ijkl} \bar{\epsilon}_{kl} \quad (3)$$

式中, M_{ijkl} 可以通过如下公式计算

$$M_{ijkl} = \frac{1}{2} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) - \epsilon_{ij}^{*kl} \quad (4)$$

式中 δ_{ij} ——克罗内克函数(Kronecker delta);
 ϵ_{ij}^{*kl} ——相对于宏观应变张量 $\bar{\epsilon}_{kl}$ 的分量 kl 的微结构应变, 关于 ϵ_{ij}^{*kl} 更详细的介绍可参见文献[15]。

微观应力可以表示为

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} M_{klmn} \bar{\epsilon}_{mn} = E_{ijkl} M_{klmn} [(E_{pqmn}^H)^{-1} \bar{\sigma}_{pq}] \quad (5)$$

利用均匀化方法求解材料等效属性, 既需要积分运算, 又需要求解方程组。为得到不同相对密度下点阵胞元的材料属性, 需要对不同相对密度的点阵胞元进行均匀化方法分析。当点阵胞元相对密度不确定时, 每次拓扑优化迭代计算都需要为每个点阵胞元进行均匀化方法分析, 反复进行均匀化方法求解点阵胞元等效属性极其耗时, 使拓扑优化难以实现。

为了避免重复使用均匀化方法和加快迭代速度, 本文将通过对密度采样, 计算不同采样点的点阵胞元等效力学性能, 拟合出点阵胞元的等效力学性能和相对密度之间的函数关系。其具体操作如下: 在相对密度 0~1 等密度间距采样, 利用均匀化方法计算得到相应的等效力学性能, 通过多项式插值公式将点阵胞元属性与相对密度关系的拟合为函数公式。图 2 是等效弹性模量 $\bar{E}_{ii}$ 、切变模量 $\bar{G}_{ii}$ 和泊松

比 $\bar{v}_{ij}$ 与胞元相对密度 x_e 的函数关系图, 其中 E_s 是实体材料的弹性模量, ν_s 是实体材料的泊松比。图中的立方体是点阵微结构胞元, 由 12 个四面体组成。图中函数曲线是通过最小二乘法拟合得到的, 弹性模量、切变模量用 2 次多项式拟合, 泊松比用 3 次多项式拟合。拟合函数的相关参数如表 1 所示, 其中 R^2 表示拟合精度, R^2 越趋近 1, 拟合精度越高; R^2 越趋向 0, 拟合精度越低。在拓扑优化的迭代过程中, 可直接调用拟合函数, 避免每次迭代重复使用均匀化方法的繁琐, 加快迭代速度。

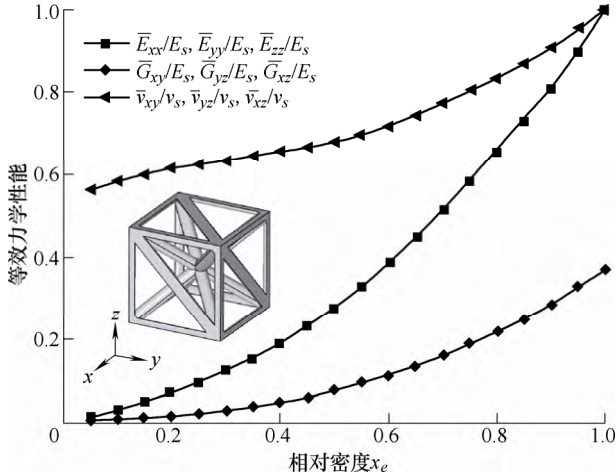


图 2 点阵结构胞元的等效力学性能

表 1 点阵结构胞元的等效力学性能与相对密度 x_e 的函数关系

等效力学性能	拟合函数	拟合精度(R^2)
$\frac{\bar{E}_{xx}}{E_s} = \frac{\bar{E}_{yy}}{E_s} = \frac{\bar{E}_{zz}}{E_s}$	$0.886x_e^2 + 0.093x_e + 0.013$	0.999 80
$\frac{\bar{G}_{xy}}{E_s} = \frac{\bar{G}_{yz}}{E_s} = \frac{\bar{G}_{xz}}{E_s}$	$0.452x_e^2 - 0.104x_e + 0.015$	0.998 40
$\frac{\bar{\nu}_{xy}}{\nu_s} = \frac{\bar{\nu}_{yz}}{\nu_s} = \frac{\bar{\nu}_{xz}}{\nu_s}$	$0.535x_e^3 - 0.431x_e^2 + 0.347x_e + 0.553$	0.998 80

1.2 多尺度拓扑优化

密度法(SIMP)是在均匀化方法的基础上提出的, 从本质上看, 传统的密度法生成的模型密度是“0”和“1”的分布, 属于宏观结构优化。点阵结构的拓扑优化设计除宏观尺度外, 还包括微观尺度, 涉及微结构的属性。

在密度法迭代过程中, 点阵胞元与有限单元一一对应, 先根据表 1 的拟合公式快速算出点阵结构胞元的等效弹性模量 E_e (即单元弹性模量), 再依据式(6)进行数值求解^[16]

$$\text{Find } \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$$

$$\text{Min } \mathcal{Z}(\mathbf{x}) = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_{e=1}^N E_e(x_e) \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_e \mathbf{u}_e$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \frac{v(\mathbf{x})}{v_0} = f \\ \mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{U} \\ 0 < x_{\min} \leq x_e \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中 x_e ——设计变量(单元相对密度), 其取值范围(0,1);

$x_{\min}$ ——最小相对密度(避免出现奇异);

$\mathbf{x}$ ——设计变量的矢量;

N ——设计变量的个数;

c ——总体柔度;

E_e ——单元弹性模量(胞元等效弹性模量);

$\mathbf{U}$ ——总体位移矩阵;

$\mathbf{F}$ ——总体受力矩阵;

$\mathbf{K}$ ——总体刚度矩阵;

$\mathbf{k}_e$ ——单元刚度矩阵;

$\mathbf{u}_e$ ——单元位移矩阵;

$V(\mathbf{x}), V_0$ ——实体体积和设计域总体积;

f ——体积分数。

求解优化结果有着不同的方法, 优化准则算法(OC)为比较常用的一种。在求解过程中, 设计变量可以不断迭代, 迭代过程依赖于如下的启发性算法

$$x_e^{\text{new}} = \begin{cases} \max(x_{\min}, x_e - m) & \text{若 } x_e B_e^\eta \leq \max(x_{\min}, x_e - m) \\ x_e B_e^\eta & \text{若 } \max(x_{\min}, x_e - m) < x_e B_e^\eta < \min(1, x_e + m) \\ \min(1, x_e + m) & \text{若 } \min(1, x_e + m) \leq x_e B_e^\eta \end{cases} \quad (7)$$

式中 m ——最大变化量;

η ——数值阻尼系数(取 0.5)。

B_e 可以用如下方法求得

$$B_e = \frac{-\frac{\partial c}{\partial x_e}}{\lambda \frac{\partial V}{\partial x_e}} \quad (8)$$

式中 λ ——拉格朗日算子。

不同于传统的密度法, 新方法不存在惩罚因子, 目标函数的敏感度是基于表 1 的拟合公式推导所得

$$\frac{\partial c}{\partial x_e} = (1.772x_e + 0.093) \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_e \mathbf{u}_e \quad (9)$$

每个单元都是单位体积时, 体积的敏感度如下

$$\frac{\partial V}{\partial x_e} = 1 \quad (10)$$

综上所述, 基于均匀化方法的点阵结构拓扑优

化的基本思路如下：在均匀化方法的基础上，计算拟合得到四面体组合点阵胞元等效力学性能的拟合函数，然后结合密度法，建立体积约束下的最小柔顺度问题的结构拓扑优化模型。与传统密度法不同的是，新方法的单元力学性能是通过均匀化方法所得，不存在惩罚因子，敏感度是由拟合函数公式推导所得，因此优化结果通常存在一系列相对密度介于 0~1 的灰度单元，这些灰度单元最终会生成变密度的点阵结构。

1.3 变密度点阵结构的参数化建模

基于离散单元构建点阵结构体，需要提取关键位置信息用以辅助建模。如图 3 所示，通过提取单元的节点坐标，可定位各点阵胞元的空间位置，对于等密度点阵结构(图 3 b)，便可直接根据胞元的几何参数直接阵列建模。对于变密度点阵结构，仅提取节点位置坐标，不考虑不同密度胞元之间的过渡，会出现胞元连接处不平滑的问题，以“X”形胞元为例，如图 3c，此时，连接点的强度由最薄弱的胞元决定。因此，为解决不平滑连接问题，除提取节点信息外，还需要提取各单元的邻接关系，以及单元节点的连接关系，把单元密度转换为节点密度，并根据节点密度构建平滑变密度点阵模型，如图 3d 所示。

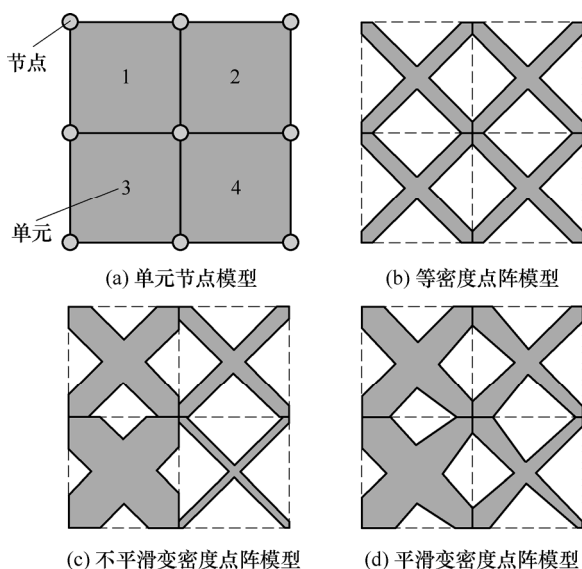


图 3 基于离散单元的点阵模型示例

变密度点阵几何模型的自动生成主要包括以下 4 个部分(图 4)：优化后单元密度分布获取；节点密度计算；胞元几何模型构建；点阵几何模型生成。

优化后单元密度分布的获取可直接从拓扑优化结果中提取，节点密度计算采用下列加权平均式

$$\rho_{nj} = \frac{\sum_i x_{ei} V_{ei}}{\sum_i V_{ei}} \quad (11)$$

式中， ρ_{nj} 表示第 j 个节点的密度， x_{ei} 和 V_{ei} 分别表示 j 节点邻接的第 i 个单元的密度与体积。

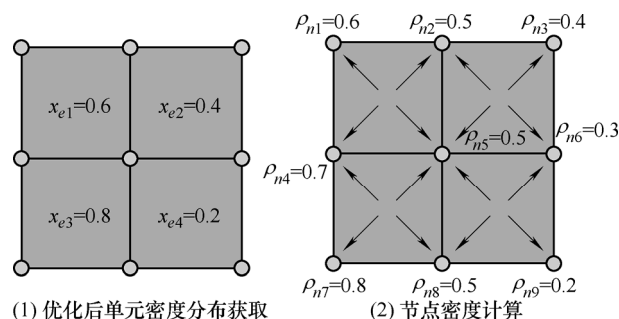


图 4 变密度点阵模型生成示意图

当今 CAD 主流系统主要采用的非均匀有理 B 样条(Non-uniform rational basis spline, NURBS)描述模型，其本质是张量积形式表示的单元，这种单元在表达复杂几何形状的模式时，在拓扑上往往通过边界表示(B-Rep)和构造实体几何(CSG)格式进行表达。

胞元的几何模型基于 B-Rep 方法进行构建，按照点、线、面由下往上参数化构建模型的几何信息及拓扑信息。以图 4 中的“X”形胞元为例，其 B-Rep 表达如图 5 所示。当胞元的 B-Rep 结构得到之后，便可从下往上，按照 B-Rep 结构中的形体拓扑信息，实现点、边、面为基础的各种几何模型参数化构建与操作。

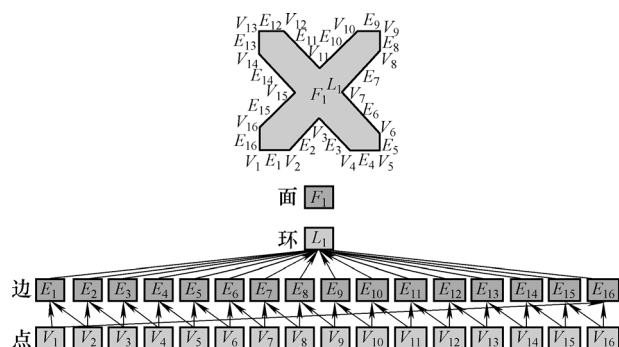


图 5 “X”形胞元 B-Rep 表达示意图

对于变密度点阵结构, 需要根据节点密度, 对胞体顶点的坐标位置进行调整, 然后根据 B-Rep 关系构建边和面, 实现变形胞体的几何模型构建。各单元对应的变形胞体构建完成之后, 可采用 CSG 通过交、并、差等运算实现复杂点阵结构的参数化模型构建。CAD 系统中几何模型都是通过边界表达, 三维实体模型是通过其表面描述, 因此, 上述方法可应用于三维模型的表面参数化构建, 实现复杂三维变密度点阵模型的自动生成。

2 算法实现

基于均匀化方法的多尺度点阵结构拓扑优化算法基本流程如图 6 所示。

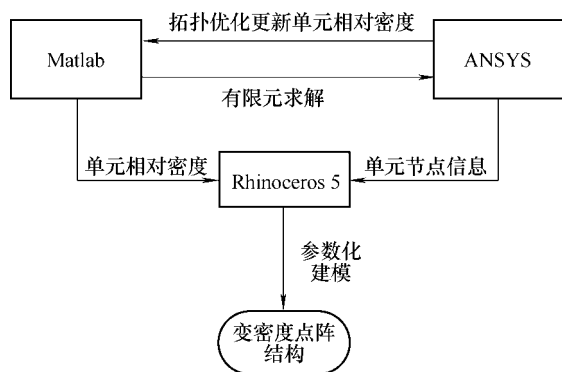


图 6 流程图

该方法的基本思路主要基于均匀化方法和密度法(SIMP)。首先基于均匀化方法得到点阵胞元等效力学性能, 并拟合为与胞元相对密度的函数。

接着运用密度法, 以微结构胞元的相对密度作为设计变量, 以最小柔度为目标函数, 通过 Matlab 实现迭代优化。根据表 1 的拟合公式算出胞元等效力学性能, 运用等效体积单元方法, 将点阵胞元等效成致密的实体单元, 调用 ANSYS 进行有限元求解。在 Matlab 和 ANSYS 的交互计算完成后, 得到了单元相对密度分布以及单元节点等信息。

最后通过相对密度在单元和点阵结构胞元之间建立一一对应的关系, 对犀牛软件(Rhinoceros 5)进行二次开发, 基于单元节点信息参数化生成变密度的点阵结构。

3 连杆边界条件分析

为了验证本文所提方法, 以汽车连杆为优化对象进行变密度点阵结构拓扑优化设计。汽车连杆位于发动机内部, 工作环境恶劣, 承受着复杂的交变应力, 故需要对其边界条件进行简化处理。

连杆的运动情况如图 7 所示, 主要受到载荷有两种——活塞销传来的气体作用力和活塞往复运动的惯性力。在膨胀行程的上止点附近出现最大压缩载荷, 在进气行程的下止点附近出现最大拉伸载荷^[17]。

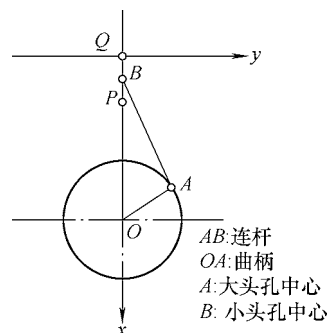


图 7 连杆运动简图

3.1 连杆的极限工况

根据文献[17]计算得到连杆极限工况受力情况如下: 最大拉力 6 085 N, 最大压力 41 290 N。可以看出, 最大载荷是压缩过程的最大压力, 故本文只分析最大压力的情况。

3.2 连杆的加载方式

连杆在最大压力情况下, 受力情况可简化为大头的下半圆周边和小头的上半圆周边受力; 连杆的约束方式简化为连杆大头的销孔完全固定^[17-18], 如图 8 所示。值得注意的是, 连杆只是验证本文所提方法的一个算例, 即使连杆的简化边界条件跟实际有所差距, 也不会影响该算例对我们所提出方法正确性的验证。

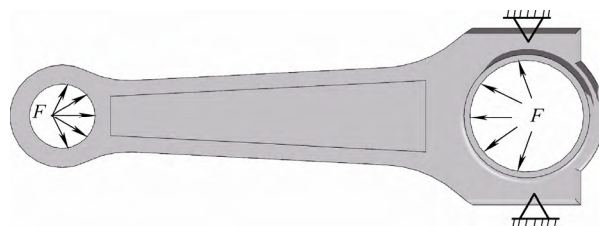


图 8 连杆加载方式

3.3 连杆的强度条件

连杆材料为 40Cr, 属于塑性材料。根据第四强度理论, 其破坏条件如下

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (12)$$

$$\sigma_{max} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_s}{n} \quad (13)$$

式中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——第一、第二、第三主应力;
 σ_s ——材料的屈服强度(又称为 von Mises 应力);
 $[\sigma]$ ——许用应力;

n ——材料的安全系数。

本文的安全系数选为 1.5, 连杆的材料 40Cr 屈服强度 $\sigma_s = 785 \text{ MPa}$, 故许用应力 $[\sigma]$ 的数值为 523.3 MPa。

4 数值算例验证

为了验证本文所提出的基于均匀化方法的多尺度变密度点阵拓扑优化方法, 并与基于 HyperWorks 的梁模型变密度点阵优化方法比较, 本节对两种方法的优化结果模型进行有限元分析, 并对比两者的优化效果。

HyperWorks 的特殊求解器——Lattice, 可以将高密度的单元转化为实体, 中间密度的单元转化为点阵结构, 低密度的单元直接抛弃, 最后得到混杂着点阵结构和实体的连杆模型, 如图 9 所示。本文所提出的基于均匀化方法的多尺度变密度点阵拓扑优化方法得到的结果模型如图 10 所示。

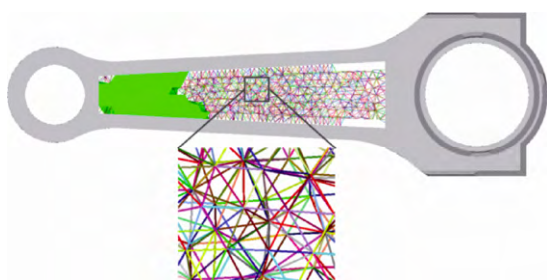


图 9 基于 HyperWorks 的梁模型变密度点阵优化方法结果模型

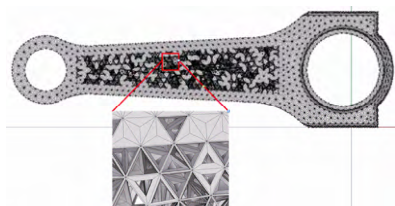


图 10 基于均匀化方法的多尺度变密度点阵拓扑优化方法结果模型

对两种方法优化前后的模型进行有限元分析, 其中基于 HyperWorks 的梁模型变密度点阵优化方法结果模型直接使用 HyperWorks 进行有限元分析, 如图 11 所示; 基于均匀化方法的多尺度变密度点阵拓扑优化方法结果模型使用 ANSYS 进行有限元分析, 得到的应力云图和位移云图如图 12 所示。

由于 HyperWorks 的点阵结构是由一根根梁模型组成, 其应力类型与实体不同, 故分别列出。而本文所提方法通过等效体积单元, 将点阵结构等效成致密的实体单元, 通过 ANSYS 求解。最后得到的数据如表 2 所示。

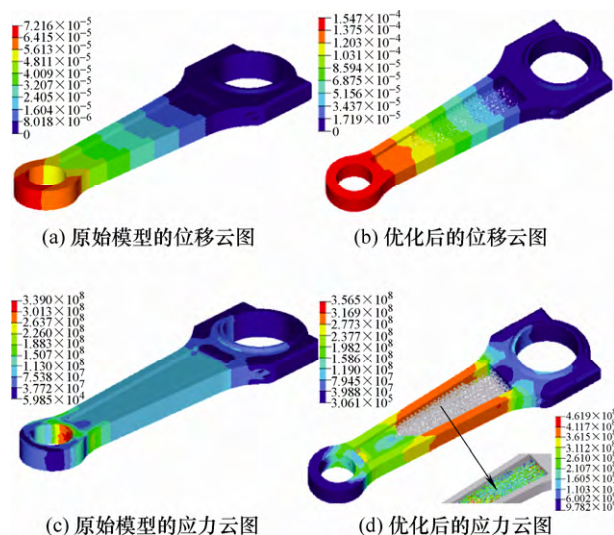


图 11 基于 HyperWorks 的梁模型变密度点阵优化方法优化前后的有限元分析结果

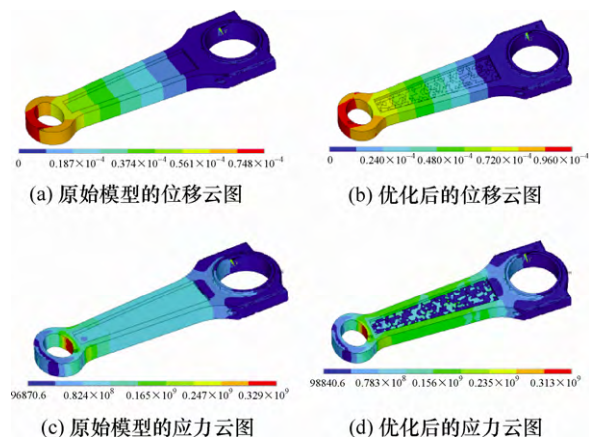


图 12 基于均匀化方法的多尺度变密度点阵拓扑优化方法优化前后的有限元分析结果

表 2 连杆模型优化前后的数据

属性	基于 HyperWorks 的 梁模型变密度点阵 优化方法		基于均匀化方法的 多尺度变密度点阵 拓扑优化方法	
	优化前	优化后	优化前	优化后
质量/g	440	409	440	386
单元最大位移/mm	0.072	0.154	0.084	0.108
单元最大应力/MPa	339	356(点阵结构为 462)	371	352

从优化前后对比可看出, 基于 HyperWorks 的梁模型变密度点阵优化方法优化后的最大应力和位移都有所上升, 但都在许用应力范围之内。而且连杆的质量减少了 9%, 实现了轻量化要求。

基于均匀化方法的多尺度点阵结构拓扑优化方法优化后的最大位移有所上升, 但是最大应力反而降低了, 说明变密度的点阵结构减少了应力集中, 而且连杆的重量减轻了 12%。从结果对比看出, 其轻量化效果比基于 HyperWorks 的梁模型点阵拓扑

优化更优秀，应力分布更合理。

值得注意的是，基于 HyperWorks 的梁模型拓扑优化从严格意义上来说并不是真正的变密度点阵拓扑优化，它并不能实现点阵结构属性随着单元密度变化而变化。也就是说，当单元密度处于中间密度范围时，单元将转化成由梁模型组成的点阵结构。此时，点阵结构属性只取决于划分的网格属性，与单元相对密度无关。

本文提出多尺度点阵结构拓扑优化方法能真正实现变密度的拓扑优化，不仅轻量化效果更好，还获得了更优的应力分布，使得点阵结构性能得到了更加充分的发挥。

5 变密度点阵连杆制造

对于复杂的变密度点阵结构，一般用 3D 打印技术制造。3D 打印作为一种新兴的制造方式，对于小批量生产或者新产品前期开发的样品制造有明显优势，不仅仅能够缩短时间，还能节约成本。

从上文的研究得知，基于均匀化方法的多尺度点阵结构拓扑优化模型具有更优秀的轻量化效果，本文使用的 3D 打印机为 Form2 SLA 3D 打印机打印该变密度点阵结构模型。最终打印出来的模型如图 13 所示，可以看到清晰的变密度点阵结构，验证了基于拓扑优化的高性能变密度点阵连杆设计的制造可行性。



图 13 3D 打印结果

6 结论

提出一种基于均匀化方法的多尺度点阵结构拓扑优化方法，并与商业软件 HyperWorks 采用的梁模型点阵优化方法进行对比验证，可得到以下结论。

(1) 基于均匀化方法计算拟合得到了胞元等效力学性能函数，可加快计算速度，避免重复运用均匀化方法求解。

(2) 成功实现了基于拓扑优化的变密度点阵结

构设计，为点阵结构设计提供新的思路。相比于目前最先进的拓扑优化商业软件 HyperWorks，所提方法使得点阵材料性能得到了更充分的发挥，性能更优秀。

(3) 所提方法可结合 3D 打印进行制造，可以用于航空航天、个性化医疗等小批量高性能点阵结构体生产，也可以用于汽车的高性能点阵样件开发，可缩短产品研发周期并节约成本。

(4) 点阵结构还具备高散热、高吸能等特殊性能，所提出方法可进一步扩展到散热、吸能等其他具体应用中，实现高性能点阵结构件的优化设计。

参 考 文 献

- [1] 杜义贤, 李涵钊, 田启华, 等. 基于能量均匀化的高剪切强度周期性点阵结构拓扑优化[J]. 机械工程学报, 2017, 53(18): 152-160.
DU Yixian, LI Hanzhao, TIAN Qihua, et al. Topology Optimization of periodic lattice structure with high shear strength using energy-based homogenization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(18): 152-160.
- [2] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.
- [3] ZHOU O, MAYER R R. Characterization of aluminum honeycomb material failure in large deformation compression, shear, and tearing[J]. Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the Asme, 2002, 124(4): 412-420.
- [4] ALHOMOD M S. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials[J]. Building And Environment, 2005, 40(3): 353-366.
- [5] KHANOKI S A, PASINI D. Fatigue design of a mechanically biocompatible lattice for a proof-of-concept femoral stem[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2013, 22: 65-83.
- [6] SMITH M, GUAN Z, CANTWELL W J. Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 67(1): 28-41.
- [7] 柏龙, 熊飞, 陈晓红, 等. SLM 制备的 Ti6Al4V 轻质点阵结构多目标结构优化设计研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(5): 156-165.
BAI Long, XIONG Fei, CHEN Xiaohong, et al. Multi-objective structural optimization design of Ti6Al4V

- lattice structure formed by SLM[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(5): 156-165.
- [8] 周克民,李俊峰,李霞. 结构拓扑优化研究方法综述[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 69-76.
ZHOU Kemin, LI Junfeng, LI Xia. A review on topology optimization of structures[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 69-76.
- [9] ROZVANY G. The SIMP method in topology optimization-Theoretical background advantages and new applications[C]//8th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Multidisciplinary Analysis Optimization Conferences. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Long Beach, CA, U.S.A 2006.
- [10] COELHO P G, FERNANDES P R, GUEDES J M, et al. A hierarchical model for concurrent material and topology optimisation of three-dimensional structures[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2008, 35(2): 107-115.
- [11] WANG Y, XU H, PASINI D. Multiscale isogeometric topology optimization for lattice materials[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2016, 316: 568-585.
- [12] 欧阳佳琛. 基于改进变密度法的功能梯度材料拓扑优化设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
OUYANG Jiachen. Topology optimization design of functionally graded materials based on modified variable density method[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [13] 赵芳垒,敬石开,刘晨燕. 局部相对密度映射的变密度多孔结构设计方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(19): 121-128.
ZHAO Fanglei, JING Shikai, LIU Chenyan. Variable density cellular structure design method base on local relative density mapping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(19): 121-128.
- [14] ARABNEJAD S, PASINI D. Mechanical properties of lattice materials via asymptotic homogenization and comparison with alternative homogenization methods[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 77(4): 249-262.
- [15] HOLLISTER S J, KIKUCHI N. A comparison of homogenization and standard mechanics analyses for periodic porous composites[J]. Computational Mechanics, 1992, 10(2): 73-95.
- [16] SIGMUND O. A 99 line topology optimization code written in Matlab[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2001, 21(2): 120-127.
- [17] 山其新. 汽车发动机连杆有限元分析与改进设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
SHAN Qixin. Finite element analysis and improved design of connecting rod of automobile engine[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [18] 苏铁熊,吕彩琴,张翼,等. 接触问题对连杆有限元分析的影响[J]. 内燃机学报, 2002, 20(1): 79-83.
SU Tiexiong, LÜ Caiqin, ZHANG Yi, et al. The contact affection to fea of connection rod[J]. Transactions of Csice, 2002, 20(1): 79-83.
-
- 作者简介: 廖中源,男,1995 年出生。主要研究方向为拓扑优化,多功能点阵材料设计。
E-mail: liaozhuan@foxmail.com
王英俊(通信作者),男,1984 年出生,博士,副教授,硕士研究生导师。主要研究方向为拓扑优化,多功能点阵材料设计,有限元法,等几何分析。
E-mail: wangyj84@scut.edu.cn
王书亭,男,1968 年出生,博士,教授,博士研究生导师。主要研究方向为复杂机电装备数字化设计,结构拓扑优化技术。
E-mail: wangst@hust.edu.cn