

引文格式:韩昌骏,汪云徽,李利,等. 梯度Voronoi 多孔结构设计与增材成形性能研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(19): 47-54.

HAN Changjun, WANG Yunhui, LI Li, et al. Research on gradient porous structure design and additive forming performance based on Voronoi[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(19): 47-54.

梯度 Voronoi 多孔结构设计与增材成形性能研究*

韩昌骏¹,汪云徽¹,李利¹,黎凯¹,蒋睿哲²,杨永强¹

(1. 华南理工大学, 广州 510641;

2. 航空工业成都飞机设计研究所, 成都 610041)

[摘要] 基于 Voronoi 的多孔结构在抗冲击和吸能减振等方面表现优异,但其力学性能受到孔隙梯度变化的影响,因此本文研究了梯度参数对 Voronoi 多孔结构力学性能的影响规律,实现 Voronoi 多孔结构的力学性能提升。通过控制 Voronoi 的种子分布设计了 3 种不同跨度尺寸(G-2、G-3、G-4)的梯度 Voronoi 多孔结构,采用激光选区熔化技术(SLM)制备了 70% 孔隙率的梯度 Voronoi 多孔结构试样,通过试验和有限元仿真的结合研究了梯度参数对梯度 Voronoi 多孔结构力学性能的影响规律,分析了其内在结构的变形机制。结果表明,梯度 Voronoi 多孔结构的屈服强度随着跨度尺寸的增加而提升。此外, G-3 梯度 Voronoi 多孔结构表现出最强的能量吸收能力,适中的跨度尺寸使梯度 Voronoi 多孔结构在应变平台阶段和致密化阶段都具有较高的流动应力,从而表现出更强的能量吸收能力。更小的跨度尺寸使得结构中形成更多的局部致密化区域,小孔隙和高孔隙密度使得内部的支杆结构变形更剧烈,加剧了结构内部的致密化行为。

关键词: 激光选区熔化(SLM); 增材制造; Voronoi; 多孔结构; 能量吸收

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.19.047



韩昌骏

副教授,博士,研究方向为金属增材制造。

金属多孔结构具有轻质^[1]、比表面积大^[2]、比强度高^[3]、热/声学性能良好^[4-5]及可设计性高^[6]等特点,被广泛应用于航空航天等领域关键零部件中^[7],如机翼、热交换器等。在服役过程中,金属多孔结构往往承受较复杂的载荷,不仅要满足轻量化的要求,还须具有优异的隔热性能^[8]。与规则多孔结构相比,梯度多孔结构能结合不同孔隙率、孔隙尺寸、孔隙分布等特征,获得更优异的性能(如高强度^[9]、高能量吸收^[10]和电磁吸收特性^[11])以适应不同的工况条件。传统加工方法(如发泡等)在梯度多孔结构成形时存在难以实现复杂结

构、形状、尺寸可变性受限,以及生产效率较低等问题^[12]。激光选区熔化(Selective laser melting, SLM)增材制造技术成形的复杂零件具有高精度、高密度、高表面质量等优点^[13],因此特别适合制造高几何自由度^[14]、特殊晶胞类型和可控尺寸的梯度多孔结构^[15]。

基于 Voronoi 分割法的梯度多孔结构可以通过调整种子的位置、数量或其他参数,使结构根据不同情况自适应地调整自身的荷载和边界条件,从而实现性能优化^[16]。基于 Voronoi 的梯度多孔结构研究主要集中在力学性能方面。Ajdari 等^[17]

* 基金项目: 广东省自然科学基金面上项目(2022A1515010304); 中国科协青年人才托举工程(2023QNRC001); 广州市青年科技人才托举工程(QT-2023-001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2024ZYGXZR079)。

构建了分层密度梯度 Voronoi 模型并进行了力学性能仿真研究,与均匀 Voronoi 多孔结构相比,梯度 Voronoi 多孔结构的屈服强度提高了 62%,梯度结构的整体有效弹性模量和屈服强度均有所提升。林伟等^[18]设计了“向内”梯度结构和“向外”梯度结构,发现基于 Voronoi 方法设计的梯度点阵结构具有高强度、抗冲击和吸能减振等良好的力学性能。Wang 等^[19]提出了一种自上而下的概率球设计方法构建 Voronoi 多孔支架,并通过 SLM 制备多孔试样,该试样表观弹性模量范围为 0.14~2.37 GPa,抗压强度范围为 1.94~116.61 MPa。Guo 等^[20]聚焦孔隙率控制准则,研究了不同冲击速度和方向下,不同孔隙度梯度的 Voronoi 梯度多孔结构的冲击性能响应。Zhao 等^[21]通过 SLM 制造了 7 种密度分级的 Voronoi 蜂窝夹层结构,通过在蜂窝芯层的跨度中分配更高的相对密度单元,同时逐渐降低密度,实现了材料良好的抗弯阻力、比能量吸收和更高的承载能力。Liu 等^[22]结合拓扑优化方法和 Voronoi 多孔结构设计技术,引入了一种新的梯度密度非均匀多孔结构设计方法,拓扑优化后的梯度 Voronoi 多孔结构表现出更高的强度和稳定性。

目前基于 Voronoi 的梯度多孔结构设计的梯度变化方式单一,对不同变化方式的梯度 Voronoi 多孔结构的力学性能报道仍较少。因此,本文提出了一种基于 Voronoi 分割法的梯度多孔结构设计方法,设计了沿径向方向上初始间距与最终间距尺寸不同的梯度变化多孔结构。通过有限元仿真(FEM)分析和压缩试验,探究不同梯度 Voronoi 多孔结构的力学性能和能量吸收特性,揭示 Voronoi 多孔结构在不同梯度条件下的变形机制与其力学性能之间的密切联系,为提升航空航天关键零部件轻量化、结构强度和抗冲击能力等提供理论基础和参考价值。

1 试验及方法

1.1 Voronoi 多孔结构设计

Voronoi 图可以进行如下定义^[23]。对于 m 维欧几里得空间上的一组数量为 k ($k \geq 2$) 的种子,即

$$P = \{p_1, \dots, p_k\} \in R^m \quad (1)$$

式中, m 表示维度; R 表示空间; p_k 表示空间内的第 i 个种子 ($i=1, \dots, k$); P 表示空间内所有种子的集合。如图 1 所示,以这些种子为圆心的圆进行半径等速率扩张后产生的边界图形称为 Voronoi 图,二维平面内, Voronoi 图的边界由相邻种子的垂直平分线组成;而在三维空间内, Voronoi 图的边界由相邻种子连线的中垂面组成。因此, Voronoi 图可以由下式进行定义。

$$V(p_i) = \{p | d(p, p_i) \leq d(p, p_j), \quad j \neq i, j=1, \dots, k\} \quad (2)$$

式中, $d(p, p_i)$ 表示位置 p 与种子 p_i 之间的欧几里得距离; $V(p_i)$ 表示与种子 p_i 相对应的 Voronoi 多边形。本文使用 Grasshopper 软件进行 Voronoi 不规则多孔结构的可控设计,基于三维空间上 Voronoi-Tessellation 分割算法,将 Voronoi 多边形根据体中心和面中心进行缩放(体缩放系数 S_v , 面缩放系数 S_f),并根据缩放后的几何边线生成的网格进一步获得 Voronoi 多孔结构。由

于结构的孔隙部分体积基本由缩小后的 Voronoi 单元体积构成,因此 Voronoi 多孔结构的孔隙率近似等于体缩放系数 S_v ,并能够通过 Grasshopper 的体积测算组件反馈调节获得孔隙率精确的模型。Voronoi 多孔结构基于 Voronoi 图设计而成, Voronoi 图则受种子的数量和分布控制。因此,通过对种子的参数控制可进一步实现 Voronoi 多孔结构的孔隙尺寸梯度设计。

图 2 展示了可控 Voronoi 不规则多孔结构的设计流程。首先在三维空间上建立长方体几何边界,在几何边界内部生成 s 层规则的种子点阵,第 i 层与第 $i+1$ 层点阵间的间距设置为 A_i ,第 i 层种子与种子的间距设为 B_i (图 2(a))。使用概率球法对点阵进一步进行变换,使用式(3)对点的 x, y, z 坐标进行随机抖动。

$$\begin{cases} x' = x + R \times \text{rand} \times \sin(\pi \times \text{rand}) \times \cos(2\pi \times \text{rand}) \\ y' = y + R \times \text{rand} \times \sin(\pi \times \text{rand}) \times \cos(2\pi \times \text{rand}) \\ z' = z + R \times \text{rand} \times \sin(\pi \times \text{rand}) \times \cos(2\pi \times \text{rand}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, R 为概率球半径,控制孔隙点阵抖动的范围; rand 为随机数,取值范围为 0~1。如图 2(b) 所示,对 z

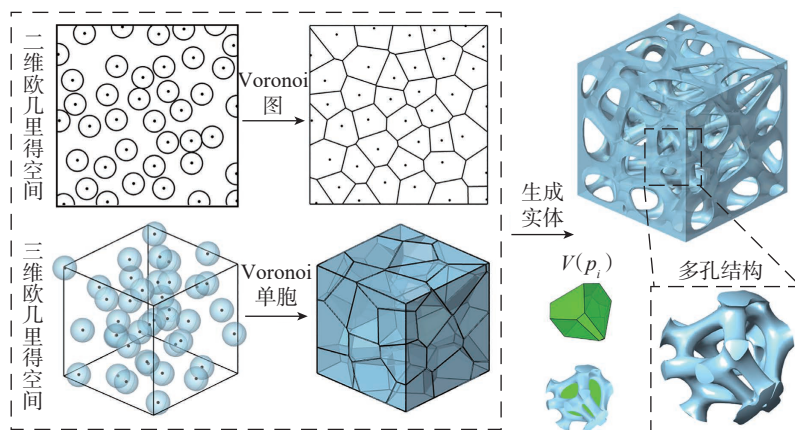
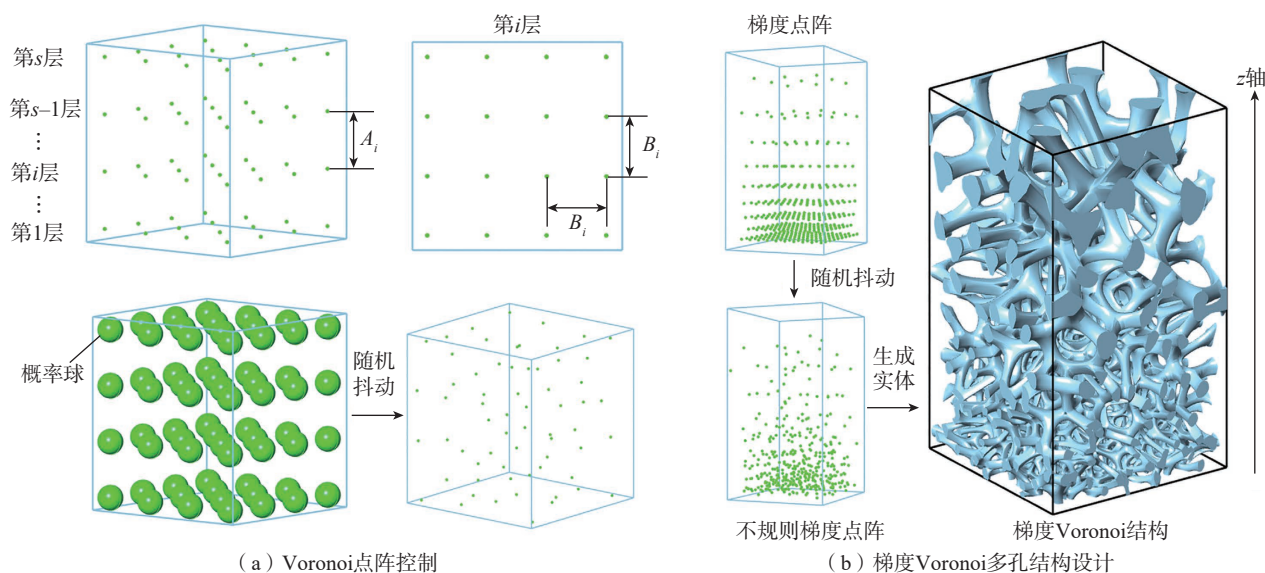


图 1 基于 Voronoi 的多孔结构设计原理

Fig.1 Design principle diagram of porous structure based on Voronoi



(a) Voronoi点阵控制

(b) 梯度Voronoi多孔结构设计

图2 梯度Voronoi多孔结构设计原理图

Fig.2 Schematic diagram of gradient Voronoi porous structure design principle

轴方向上的参数 A_i 进行梯度设置,同时设置第 i 层的间距参数 B_i , 获得沿着 z 轴分布的梯度点阵,并进一步形成不同孔径分布的梯度 Voronoi 多孔结构。

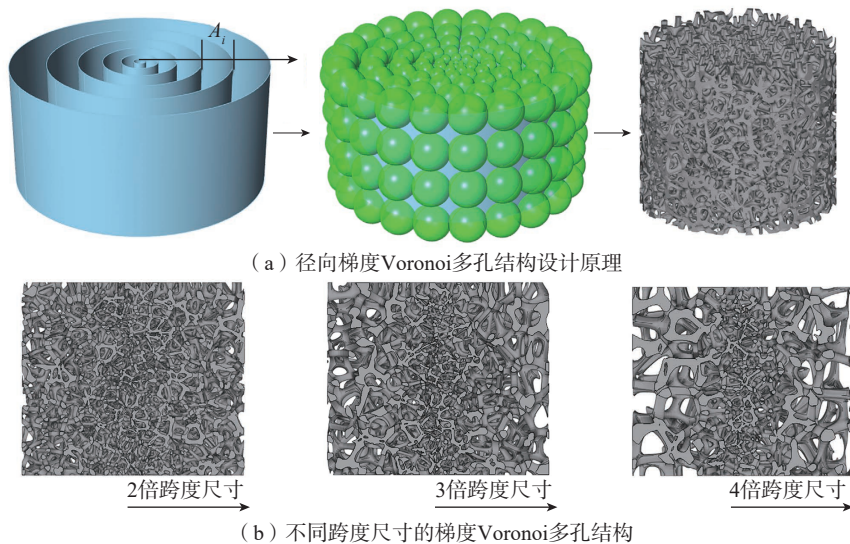
本文将梯度方向调整为径向方向,设计了由中心轴沿着径向方向孔径梯度变化的 Voronoi 多孔结构,如图 3 (a) 所示,此时第 i 层点阵分布在不同直径的第 i 层圆柱曲面上,梯度尺寸 A_i 为圆柱曲面的间距,并且种子的 x, y 坐标转化为相对于圆柱曲面的 u, v 坐标, z 轴对应径向方向。如图 3 (b) 所示,本文分别设计了孔隙率为 70% (即材料体积分数 30%), 径向方向上初始间距 A_1 与最终间距 A_n 尺寸变化为 2 倍、3 倍、4 倍的圆柱多孔结构模型(以下分别命名为 G-2、G-3、G-4), 其中,初始间距 $A_1=0.5$ mm, 圆柱模型高 10 mm, 直径 12 mm。

1.2 建立 FEM 仿真模型

使用 ABAQUS 软件对梯度 Voronoi 多孔结构进行准静态压缩仿真以分析结构内部的受力状态。如图 4 所示。FEM 仿真模型由压缩板、固定板及梯度 Voronoi 多孔结构组成,梯度 Voronoi 多孔结构放置于固定板

上,并由压缩板进行加载。FeCoCrMn 体系高熵合金具有高强度、优异延展性、抗辐射损伤稳定性和耐腐蚀性^[24],是航空领域复杂零部件的潜在材料。通过 Li 等^[25]对该合金材料的前期研究,得到用于梯度 Voronoi 多孔结构的材料属性参数为密度 7.7584 g/cm³、弹性模量 160.78 GPa、泊松比 0.33 、延伸率 17.1% 。考虑到金属的硬化效应,使用 Johnson-Cook (J-C) 本构模型,基于前期获得的合金拉伸曲线^[25],设置 J-C 参数:

$A=468.3$ MPa、 $B=1397.6$ MPa、 $n=0.665$ 、 $C=0.0417$,由于准静态压缩试验变形过程不涉及剧烈温度变化,取 $m=0$ 。将压缩板、固定板分别与参考点 1 和参考点 2 绑定并设置为刚性平板,平板与梯度 Voronoi 多孔结构间的法向接触设置为硬接触,切向接触设置为摩擦接触。固定板完全固定,压缩板沿轴向加载 8 mm。使用 Hypermesh 软件进行网格划分,为了保证仿真模型的精确性,采用修正的二次四面体网格 (C3D10M),网格



(a) 径向梯度Voronoi多孔结构设计原理

(b) 不同跨度尺寸的梯度Voronoi多孔结构

图3 径向梯度Voronoi多孔结构设计示意图

Fig.3 Schematic diagram of radial gradient Voronoi porous structure design

尺寸设置为 0.1 mm。

1.3 试样制备

采用 Fe50Mn30Co10Cr10 合金粉末(佛山市钺丰材料科技有限公司)进行结构成形,其化学组成如表 1 所示。粉末颗粒呈球形,粒径尺寸在 5~75 μm 区间,粉末的平均粒径尺寸约 30 μm。使用 Laseradd Dimetal-100 (广州雷佳增材科技有限公司)制备梯度 Voronoi 多孔结构,经过前期工艺优化^[25],采用的 SLM 成形工艺参数为激光功率 180 W、扫描速度 500 mm/s、扫描间距 70 μm、层厚 30 μm、扫描角度 67°。成形过程处于氩气保护状态,以防止成形过程中发生氧化反应。成形后的梯度 Voronoi 多孔结构在酒精中进行 30 min 的超声波振动清洗以去除表面黏结的粉末,SLM 成形原理和成形后的梯度 Voronoi 多孔结构如图 5 所示。

1.4 压缩测试

使用 CMT5105 电子万能试验机(三思永恒科技(浙江)有限公司)对梯度 Voronoi 试样进行单轴压缩试验。将样品水平放置于压缩平台

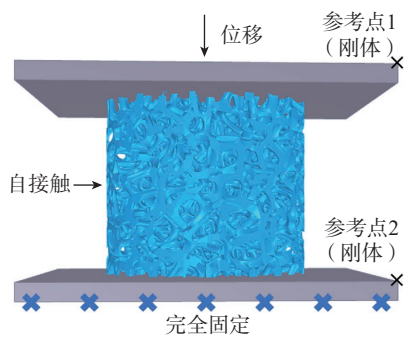


图 4 FEM 仿真模型

Fig.4 FEM simulation model

表 1 Fe50Mn30Co10Cr10 高熵合金化学组成(质量分数)

Table 1 Chemical composition of Fe50Mn30Co10Cr10 high-entropy alloy (mass fraction) %

Fe	Mn	Co	Cr
30.6	49.87	10.22	9.31

上,设置加载速度为 0.5 mm/min,压缩应变 0.8,即压缩终止位移设置为 8 mm。缓慢下移压缩机,待预载荷达到 5 N 时开始输出力-位移曲线,将输出的力-位移曲线进行数据转化后得到压缩应力-应变曲线,即

$$\sigma = \frac{F(x)}{S} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{d}{h} \quad (5)$$

式中,σ为应力,MPa;F(x)为压缩载荷,N;S为试样的表面积,mm²;ε为应变;d为压缩位移,mm;h为试样高度,mm。每种跨度尺寸的梯度 Voronoi 多孔结构使用 3 个试样进行重复的机械测试以获得压缩特性曲线。梯度 Voronoi 多孔结构的能量吸收曲线依据应力-应变曲线计算得到,即

$$EA(\varepsilon) = \int_0^{\varepsilon^1} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (6)$$

式中,ε¹为致密化应变,即应力-应变曲线的斜率接近压缩弹性模量时的压缩应变。此外,本文对梯度 Voronoi 多孔结构的能量吸收效率 η 进行了评估,即

$$\eta = \frac{1}{\sigma(\varepsilon)} \int_0^{\varepsilon^1} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (7)$$

2 结果及讨论

2.1 应力-应变曲线分析

对不同尺寸跨度(G-2、G-3 和

G-4)的梯度 Voronoi 多孔结构进行压缩试验和 FEM 仿真,得到各试样的力学响应特性,如图 6 所示。可知,所有试样在压缩过程中首先经历弹性阶段,并经过一段应力平台期,然后逐渐致密化。在应变前期(应变 <40%),仿真曲线略高于压缩试验曲线,这是由于 3 种梯度 Voronoi 多孔结构中都存在尺寸细小(杆径约 150 μm)的支杆,SLM 成形存在的一些微孔和未熔缺陷使得试样的完整性降低,从而影响力学性能^[26]。较大的尺寸跨度可以改善这种现象,从图 6 可以看出,随着尺寸梯度增加,仿真与试验曲线的吻合度提升。这是由于试样中的部分支杆尺寸变大,结构整体受成形缺陷的影响变小。在应变后期(应变 >40%),可以观察到仿真曲线略低于压缩试验曲线,为了保证仿真的收敛性,设置移除 FEM 仿真计算中变形失效的网格单元,这使得高应变下的仿真曲线数值要略低于试验曲线^[27]。相较于 G-2、G-3 和 G-4 梯度 Voronoi 多孔结构的应力平台存在波动,这种波动在应变接近 20% 时发生,这是由结构内部大尺寸支杆的交错变形断裂引起的,即在压缩过程中,较粗的支杆会承担更多的载荷,因此较粗的支杆发生断裂时,较细的支杆所受到的载荷会骤然增加,并发生连锁断裂,形成锯齿状的应力-应变响应特性。比

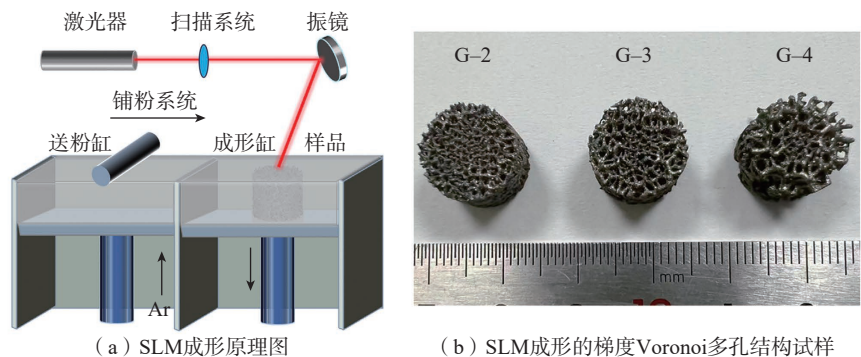


图 5 SLM 成形的梯度 Voronoi 多孔结构

Fig.5 Structure of gradient Voronoi porous structures by SLM

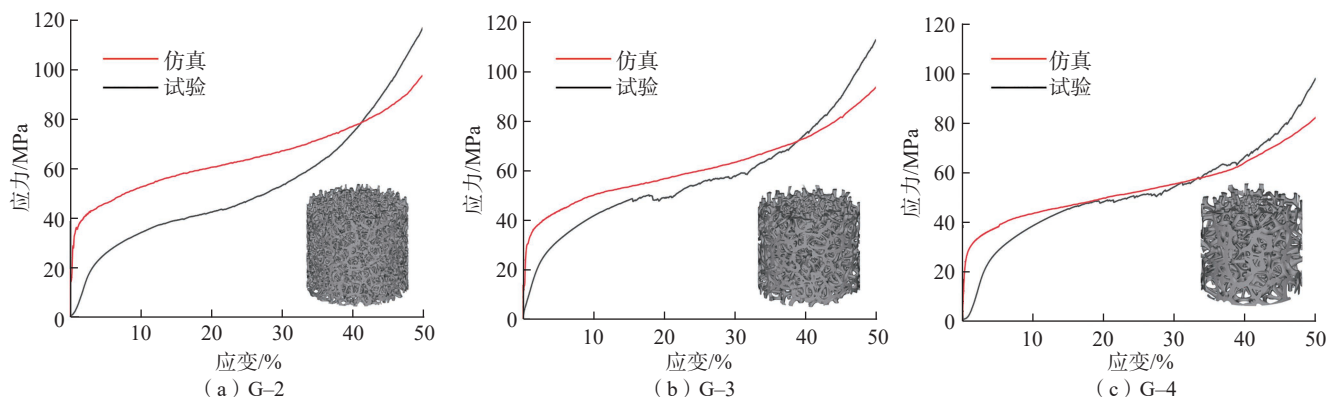


图6 不同跨度尺寸的梯度 Voronoi 多孔结构压缩试验和仿真应力-应变曲线图

Fig.6 Compression test and simulation stress-strain curves of gradient Voronoi porous structures with different spans

较3种梯度尺寸下的应力-应变试验曲线可以发现,相较于G-2梯度Voronoi多孔结构,G-3和G-4梯度Voronoi多孔结构都具有更高的流动应力平台,而在接近致密化的区域,G-2梯度Voronoi多孔结构的流动应力明显提升,并超过G-3和G-4梯度Voronoi多孔结构,其中G-4梯度Voronoi多孔结构表现出最低的流动应力,这种变化是由梯度多孔结构在不同压缩阶段内部受力形式的变化引起的。

2.2 压缩强度

图7展示了G-2、G-3和G-4梯度Voronoi多孔结构的压缩屈服强度和弹性模量。如图7(a)所示,试验与仿真的屈服强度误差随着跨度尺寸的增加而减小,试验数据表明G-4梯度Voronoi多孔结构的屈服强度最高,达到22.93 MPa,G-3梯度Voronoi多孔结构的屈服强度为21.82 MPa,均高于G-2梯度Voronoi多孔结构(17.81 MPa)。梯度Voronoi多孔结构孔隙尺寸跨度的增加会提升结构的屈服强度,这可能归因于跨度尺寸更大的多孔结构内部存在更粗的支杆^[28]。如图7(b)所示,梯度Voronoi多孔结构的试验弹性模量范围在0.886~1.045 GPa间,其中G-2和G-4梯度Voronoi多孔结构的弹性模量较低,较低的弹性模量能够对能量吸收起到一定的缓冲作

用。此外,仿真的弹性模量明显高于试验数据,这可能是由于瞬态动力学模拟中的应力波传递较慢,模型的弹性变形不均匀导致的。

为了进一步了解梯度Voronoi多孔结构的内部受力状态,分析了5%应变下3种梯度Voronoi多孔结构的Mises应力分布云图。如图8所示,由于梯度Voronoi多孔结构孔隙具有随机分布的特性,加载过程中结构内部的应力传递不均匀,3种梯度多

孔结构都存在空间上不规则分布的集中应力,相较于有序分布的晶格结构,梯度Voronoi多孔结构出现的不均匀应力分布现象致使压缩过程中内部的支杆结构随应变的增加发生批次断裂,这种断裂形式有助于应力平台的形成,并提升结构的能量吸收效率。此外,从图8可以看到,应力集中主要出现在支杆上而不是支杆的连接节点处,因此梯度Voronoi多孔结构内部的弯曲断裂失效更倾向

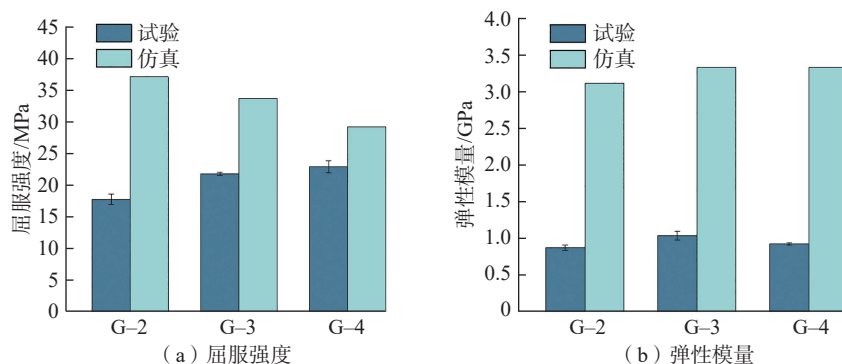


图7 不同跨度尺寸梯度 Voronoi 多孔结构的力学性能

Fig.7 Mechanical properties of gradient Voronoi porous structures with different spans

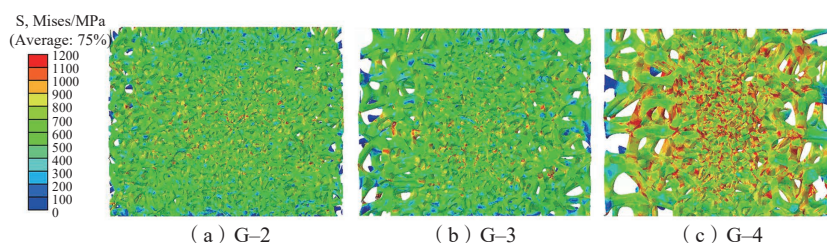


图8 5%应变下不同跨度尺寸梯度 Voronoi 多孔结构内部的 Mises 应力分布云图

Fig.8 Mises stress distribution cloud map inside the gradient Voronoi porous structures with different spans at 5% strain

于发生在支杆上。

2.3 变形分析

多孔结构的应力-应变曲线特性取决于压缩过程中结构内部的变形行为,因此对不同应变下(10%、30%和50%)梯度 Voronoi 多孔结构的等效塑性应变进行分析,结果如图9所示(红色虚线间的区域为主要变形区域)。可以看出,10%应变下,梯度 Voronoi 多孔结构的大部分支杆处于小变形状态,塑性变形主要发生在结构的中心区域。由于中心区域过于密集的孔隙分布和连接约束,支杆与支杆在变形过程中更容易发生挤压变形,而梯度 Voronoi 多孔结构边界部位的支杆结构由于孔隙形态的不完整性而拥有更大的变形自由度,这是边界区域塑性变形较小的主要原因。在变形过程中,由于大部分支杆结构还未达到受力极限,因此梯度 Voronoi 多孔结构的流动应力会随着应变的增加而增大。随着应变的增加,接近轴心的细小薄弱支杆发生断裂失效,此时大尺寸支杆结构还未达到损伤极限,并承担主要载荷,这种变形行为使得流动应力近乎保持不变并形成应力平台。应变达到30%时,变形损伤由支杆尺寸小的中间区域扩散至支杆尺寸大的边界区域。随着孔隙空间被压缩,断裂损伤的支杆开始相互接触,并填充结构中的孔隙部分,整个梯度 Voronoi 多孔结构逐渐致密化。当应变达到50%时,3种结构的内部几乎被损伤的支杆和碎屑完全填充并接近致密,而边界区域由于较大孔隙的存在仍具备能量吸收潜力,这一现象在 G-4 梯度 Voronoi 多孔结构中尤为明显。对比3种结构的变形云图可以发现,随着跨度尺寸的增加,梯度 Voronoi 多孔结构内部的孔隙变大,弱化了致密化过程中支杆的接触填充作用,因此更大尺寸跨度的梯度 Voronoi 多孔结构在应变后期具有更低的流动应力。

2.4 能量吸收

梯度 Voronoi 多孔结构的能量吸收能力如图10(a)所示, G-3 梯度 Voronoi 多孔结构表现出最强的能量吸收能力,这是由于该结构在应变过程中保持着较高的流动应力; G-2 梯度 Voronoi 多孔结构在应变前期的能量吸收能力较弱,但在后期增强并超过 G-4 梯度 Voronoi 多孔结

构,这是由应变后期流动应力的提升引起的,应变后期流动应力的提升则是由内部结构之间的填充接触引起的,而 G-4 梯度 Voronoi 多孔结构边界过大的孔隙结构弱化了这种效应。此外,对梯度 Voronoi 多孔结构的能量吸收效率进行了评估,如图10(b)所示。可知,3种梯度 Voronoi 多孔结构的能量吸收效率均随着应变的

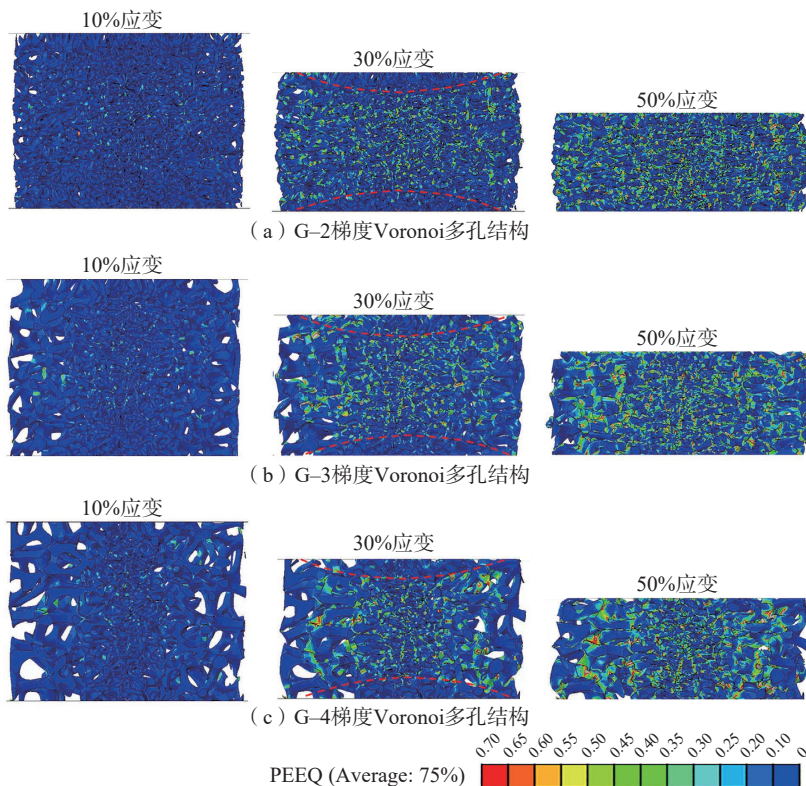


图9 不同跨度尺寸梯度 Voronoi 多孔结构在不同应变下的等效塑性应变云图

Fig.9 Equivalent plastic strain cloud maps of gradient Voronoi porous structures with different spans at different strains

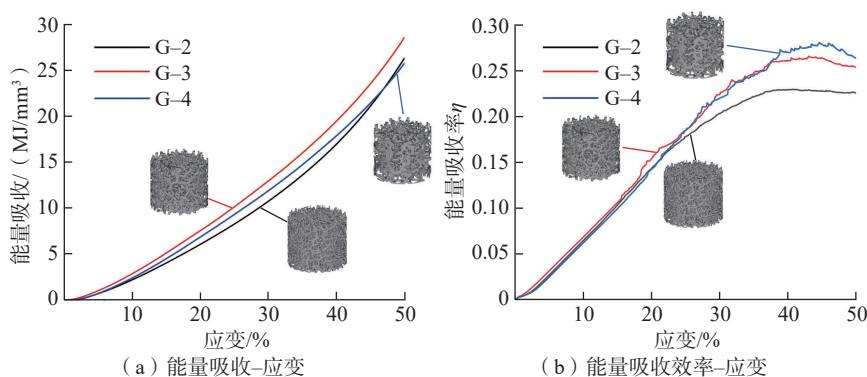


图10 不同跨度尺寸的梯度 Voronoi 多孔结构能量吸收和能量吸收效率与应变关系曲线

Fig.10 Relationship curves between energy absorption/energy-absorption efficiency and strain of gradient Voronoi porous structures with different spans

增加而提升,其中,G-4 梯度 Voronoi 多孔结构的能量吸收效率最高,G-3 梯度 Voronoi 多孔结构次之,G-2 梯度 Voronoi 多孔结构的能量吸收效率最低,表明梯度 Voronoi 多孔结构跨度尺寸的增加明显提升了结构的能量吸收效率。

因此,Voronoi 多孔结构的梯度设计能够调节结构的能量吸收能力和能量吸收效率,通过适当的跨度尺寸调节,能够使 Voronoi 多孔结构在具备高能量吸收的同时还保持较高的能量吸收效率,如 G-3 梯度 Voronoi 多孔结构在保持最高能量吸收能力的同时,其能量吸收效率接近 G-4 梯度 Voronoi 多孔结构,这为研究人员使用同等材料获得更高性能的设计提供了参考。

3 结论

(1) Voronoi 多孔结构的梯度设计会影响结构的力学性能,3 种不同跨度尺寸的梯度 Voronoi 多孔结构的屈服强度顺序为 G-4 (22.93 MPa) > G-3 (21.82 MPa) > G-2 (17.81 MPa),表明梯度 Voronoi 多孔结构的屈服强度随着跨度尺寸的增加而提升,这是由于更大跨度尺寸的梯度 Voronoi 多孔结构内部存在更粗的支杆结构,改善了结构的力学强度。

(2) G-3 表现出最强的能量吸收能力,这表明适中的跨度尺寸梯度设计可以使梯度 Voronoi 多孔结构在应变平台和致密化阶段都具备较高的流动应力,从而表现出更强的能量吸收能力。此外,梯度 Voronoi 多孔结构的能量吸收效率会随着跨度尺寸的增加而提升,区域间的不均匀致密化行为能够提升结构的能量吸收效率。

(3) 有限元分析表明,梯度 Voronoi 多孔结构的内部变形机制相似,变形损伤主要先发生在靠近中心区域的薄弱支杆处,随着应变的增加而扩展到边界的粗支杆。此外,更小

跨度尺寸的 Voronoi 多孔结构会形成更多的局部致密化区域,更小的孔隙和更高的孔隙密度使得内部支杆结构的变形更剧烈,这加剧了结构内部的致密化行为。

参考文献

- [1] HU J B, WANG S F, WANG Y, et al. A lightweight methodology of 3D printed objects utilizing multi-scale porous structures[J]. *The Visual Computer*, 2019, 35(6): 949–959.
- [2] CHENG L, LIU J K, TO A C. Concurrent lattice infill with feature evolution optimization for additive manufactured heat conduction design[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2018, 58(2): 511–535.
- [3] LI D W, LIAO W H, DAI N, et al. Optimal design and modeling of gyroid-based functionally graded cellular structures for additive manufacturing[J]. *Computer-Aided Design*, 2018, 104: 87–99.
- [4] SCHAEGLER T A, CARTER W B. Architected cellular materials[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2016, 46: 187–210.
- [5] EVANS A G, HUTCHINSON J W, FLECK N A, et al. The topological design of multifunctional cellular metals[J]. *Progress in Materials Science*, 2001, 46(3–4): 309–327.
- [6] ZHENG T Q, ZHOU W, CHU X Y, et al. A columnar regular-porous stainless steel reaction support with high superficial area for hydrogen production[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(18): 10204–10216.
- [7] 岳学峥, 梁坤义, 陆松浩, 等. 增材制造多孔结构的冲击性能研究[J]. *航空制造技术*, 2024, 67(3): 38–44, 54.
- [8] YUE Xuezheng, LIANG Kunyi, LU Songhao, et al. Impact properties of porous structures formed by laser powder bed melting[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2024, 67(3): 38–44, 54.
- [9] ZHANG X, ZHANG M H, ZHANG C P, et al. Prediction and numerical study of thermal performance of gradient porous structures based on Voronoi tessellation design[J]. *Materials*, 2022, 15(22): 8046.
- [10] GHOUSE S, OOSTERBEEK R N, MEHMOOD A T, et al. Vacuum heat treatments of titanium porous structures[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 47: 102262.
- [11] XU F X, ZHANG X, ZHANG H. A review on functionally graded structures and materials for energy absorption[J]. *Engineering Structures*, 2018, 171: 309–325.
- [12] LUO F, LIU D Q, CAO T S, et al. Study on broadband microwave absorbing performance of gradient porous structure[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2021, 4(3): 591–601.
- [13] ZHANG X Y, FANG G, LEEFLANG S, et al. Topological design, permeability and mechanical behavior of additively manufactured functionally graded porous metallic biomaterials[J]. *Acta Biomaterialia*, 2019, 84: 437–452.
- [14] 杨永强, 陈杰, 宋长辉, 等. 金属零件激光选区熔化技术的现状及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011401.
- [15] YANG Yongqiang, CHEN Jie, SONG Changhui, et al. Current status and progress on technology of selective laser melting of metal parts[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011401.
- [16] HAN C J, LI Y, WANG Q, et al. Continuous functionally graded porous titanium scaffolds manufactured by selective laser melting for bone implants[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, 80: 119–127.
- [17] HAN C J, YAN C Z, WEN S F, et al. Effects of the unit cell topology on the compression properties of porous Co–Cr scaffolds fabricated via selective laser melting[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, 23(1): 16–27.
- [18] DU Y, LIANG H X, XIE D Q, et al. Design and statistical analysis of irregular porous scaffolds for orthopedic reconstruction based on Voronoi tessellation and fabricated via selective laser melting (SLM)[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 239: 121968.
- [19] AJDARI A, CANAVAN P, NAYEB-HASHEMI H, et al. Mechanical properties of functionally graded 2-D cellular structures: A finite element simulation[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 499(1–2): 434–439.
- [20] 林伟, 杨凤双, 石迎雨. 基于 Voronoi 方法的梯度点阵结构力学性能的研究[J]. *机械强度*, 2023, 45(2): 399–406.
- [21] LIN Wei, YANG Fengshuang, SHI Yingyu. Research on mechanical properties of gradient lattice structures based on Voronoi method[J].

Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(2): 399–406.

[19] WANG G J, SHEN L D, ZHAO J F, et al. Design and compressive behavior of controllable irregular porous scaffolds: Based on Voronoi-tessellation and for additive manufacturing[J]. ACS Biomaterials Science & Engineering, 2018, 4(2): 719–727.

[20] GUO Z P, HU J, KONG Z C. On impact loading of Voronoi functional graded porous structure[J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107765.

[21] ZHAO J Y, CUI Z, WANG S L, et al. Flexural response of additively manufactured honeycomb sandwich structures with continuous density-gradient variations[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 197: 111642.

[22] LIU B, FENG J W, CHEN J B, et al. A topology optimisation-based design

method for 3D Voronoi porous structures and its application for medical pillows[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2023, 18(1): e2285392.

[23] FANTINI M, CURTO M, DE CRESCENZIO F. A method to design biomimetic scaffolds for bone tissue engineering based on Voronoi lattices[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2016, 11(2): 77–90.

[24] GALI A, GEORGE E P. Tensile properties of high- and medium-entropy alloys[J]. Intermetallics, 2013, 39: 74–78.

[25] LI K, TROFIMOV V, HAN C J, et al. The printability, microstructure, and mechanical properties of $Fe_{80-x}Mn_xCo_{10}Cr_{10}$ high-entropy alloys fabricated by laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. Micromachines, 2024, 15(1): 123.

[26] LI L X, GU D D, LIU H, et al.

Lightweight load-bearing heat dissipation multifunctional pomelo peel-inspired structures fabricated by laser powder bed fusion[J]. International Journal of Bioprinting, 2023, 9(6): 1011.

[27] WANG X B, ZHANG L, SONG B, et al. Anisotropic mechanical and mass-transport performance of Ti_6Al_4V plate-lattice scaffolds prepared by laser powder bed fusion[J]. Acta Biomaterialia, 2022, 148: 374–388.

[28] JIN J L, WU S Q, YANG L, et al. Ni–Ti multicell interlacing Gyroid lattice structures with ultra-high hyperelastic response fabricated by laser powder bed fusion[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2024, 195: 104099.

通讯作者: 蒋睿哲, 工程师。

Research on Gradient Porous Structure Design and Additive Forming Performance Based on Voronoi

HAN Changjun¹, WANG Yunhui¹, LI Li¹, LI Kai¹, JIANG Ruizhe², YANG Yongqiang¹

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. AVIC Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Chengdu 610041, China)

[ABSTRACT] Voronoi tessellation is popular in porous structure design, known for its excellent impact resistance and energy absorption. However, the mechanical properties of Voronoi porous structures are apt to be affected by the gradient of pore size. In this study, the influence of gradient parameters on the mechanical properties of Voronoi porous structures is investigated to achieve the mechanical property enhancement. Three types of gradient Voronoi porous structures with varying gradient spans (G–2, G–3, G–4) were designed by controlling the distribution of seeds in the Voronoi pattern. The gradient Voronoi porous samples with 70% porosity were fabricated using selective laser melting (SLM) technology. The influence of gradient parameters on the mechanical properties of gradient Voronoi porous structures was investigated by experiments and finite element simulation, and the deformation mechanisms within their intrinsic structures were analyzed. The results demonstrate that the yield strength of the gradient Voronoi porous structures improves with increasing gradient span. Moreover, among these structure, G–3 exhibits superior energy-absorption ability as a result of possessing higher flow stresses during both strain platform and densification stage due to its moderate gradient span. Smaller gradient spans lead to localized densification region formation within the structure; small pores and high pore densities cause more drastic deformation in internal support structure, thereby enhancing densification behavior.

Keywords: Selective laser melting (SLM); Additive manufacturing; Voronoi; Porous structure; Energy absorption

(责编 向阳)