

面向皮肤组织工程支架的三维多孔点阵结构制备及拉伸特性研究*

PREPARATION AND TENSILE PROPERTY OF 3D POROUS LATTICE STRUCTURE FOR SKIN TISSUE ENGINEERING SCAFFOLDS

方创**¹ 纪小刚***^{1,2} 王炜¹

(1. 江南大学 机械工程学院, 无锡 214122)

(2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122)

FANG Chuang¹ JI XiaoGang^{1,2} WANG Wei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

(2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Wuxi 214122, China)

摘要 数字光处理(Digital Light Process, DLP)成型方法具有成型速度快、成型精度高的特点,能够较好用于微小尺寸结构的制备。因此,设计了一种以人工拓扑优化的正方体网格为单胞,并将该单胞沿空间进行周期性扩展,获得新型三维多孔点阵结构。配制了一种具有弹性的光敏树脂,选择DLP成型法进行实验制备。探究了DLP打印对该点阵结构成型的影响因素和成型效果,制备出了结构完整、无淤塞的样品,并通过该结构样品的单轴拉伸实验,研究其拉伸力学性能。结果表明,DLP打印所制备的该新型多孔结构,其内部孔隙清晰、连通性好,且孔隙率均达到了80%以上,拉伸断裂伸长率也均在85.6%以上,其中点阵结构3的拉伸韧性最大,其综合拉伸特性最优。该结构可广泛应用于皮肤组织工程支架、柔性电极、易碎品装夹夹具等。

关键词 三维多孔点阵结构 单元网格构型 拉伸特性 DLP成型

中图分类号 TB34 TP391.73

Abstract Digital light process (DLP) forming method has the high forming speed and accuracy characteristics, and can be better used for the preparation of tiny size structures. Therefore, in this study, a new 3D porous lattice structure obtained by artificial topology-optimized square lattice as a single cell and spatial 3D equally spaced array of the single cell was designed. Then a flexible and elastic photosensitive resin by using DLP forming method for preparation experiments was carried out. The influence of DLP printing on the formation of the lattice structure and the forming effect were investigated. The tensile mechanical properties of all samples of complete structure without siltation were studied. The results show that the new porous structure prepared by DLP printing has clear internal pores and good connectivity in which the porosity reached more than 80%, and the elongation at break is also above 85.6%, among which the tensile toughness of lattice structure 3 is the largest and its comprehensive tensile properties are the best. The structure can be widely used in skin tissue engineering scaffolds, flexible electrodes, fragile product clamping fixtures, etc.

Key words 3D lattice structure; Cell grid configuration; Tensile characteristics; DLP molding

Corresponding author: JI XiaoGang, E-mail: bhearts@jiangnan.edu.cn, Fax: +86-510-85910542

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52175234, 51105175), and the Jiangsu Province "Six Talent Summit" Grant (No. JXQC-006).

Manuscript received 20221018, in revised form 20221125.

0 引言

多孔结构具有减震吸能、高比强度、单位体积表面

积大、相对密度较小等特点,在能量吸收、热量交换和消声降噪方面有着广泛的应用^[1-3]。同时,在医疗领域中,多孔结构植入物的高孔隙率及内部连通性可为种

* 20221018 收到初稿, 20221125 收到修改稿。国家自然科学基金项目(52175234, 51105175), 江苏省“六大人才高峰”项目(JXQC-006)资助。

** 方创, 男, 1997年生, 安徽亳州人, 汉族, 江南大学硕士研究生, 主要研究方向为增材制造。

*** 纪小刚(通信作者), 男, 1977年生, 江苏常州人, 汉族, 江南大学机械工程学院教授, 主要研究方向为增材制造。

子细胞的增殖分化提供合适的三维立体微环境^[4],而其较好的力学性能和缓冲吸能特性又可以起到良好的支撑作用及保护种子细胞免受外界冲击而产生损伤,是一种较为优异的支架构形。

多孔结构的传统制备方法有微孔发泡成型法^[5]、致孔剂滤沥法^[6]、热致相分离法^[7]等,这些方法都只能在多孔结构成型时使其自发形成孔隙,很难在成型过程中对其内部结构的成型做到精准控制。随着增材制造技术的日益成熟,为诸如多孔结构这类复杂几何体的制备提供了新思路,相较于传统的多孔结构成型方法,3D 打印技术在材料选择上更为广泛,在结构成型控制上也更为精确^[8],且已经取得了一定的进展。KRISHNA B V 等^[9]用激光近净成型法制备了具有梯度孔隙的多孔 Ti 植入物。ZHOU C C 等^[10]采用熔融沉积成型法制备了兼具宏观和微观孔隙的聚乳酸支架。王春晓等^[11]使用金属粉末,采用电子束熔化法制备出了正八面体、三圆交型单元结构的多孔支架。韩宗政等^[12]以铝合金为成型材料并采用激光选区熔化成型法对反 Kagome 点阵结构进行了制备研究。以上学者均对多孔结构的 3D 打印制备进行了研究,但激光近净成型法和电子束熔化法等所用材料多为金属粉末,且打印设备复杂,环境要求较高,成本较昂贵;而熔融沉积成型法所用材料以低熔点热塑性材料为主,精度受喷嘴直径影响较大,因此上述方法所用材料的力学性能都较难满足皮肤组织工程支架对于柔弹性的要求,且在精度和成本上也有着各自的缺陷。

针对上述问题,本文首先创新了一种自定义拓扑优化的正方体单元网格,并对其进行有规律的空间阵列布局,以形成新型三维多孔点阵结构。接着,配制了一种柔弹性光敏材料,并选择已经在牙模成型上广泛应用的数字光处理(Digital Light Process, DLP)打印方式进行成型实验,该成型方式对成型材料和成型环境的要求都较低,能有效节约打印成本。然后,探究 DLP 成型参数对于成型效果的影响规律,实现多孔点阵结构的高精、高效制备。最后,通过 CAE 模拟和单轴拉伸实验,检测了该种三维多孔点阵结构的拉伸力学特性,旨在寻找出最优构型,并探讨了该结构对皮肤组织工程支架的适用性。

1 模型与制备

1.1 材料参数与性能测试

本文选取一种柔弹性光敏树脂^[13]用于多孔点阵结构的成型制造,该种树脂由 7162 弹性单官聚氨酯丙烯酸树脂、3906 弹性双官聚氨酯丙烯酸树脂、ACMO(丙烯酸吗啉)和 IBOA(丙烯酸异冰片酯)四种组分按

照一定比例混合配制而成,使用 Encamini 设备(如图 1 所示,成型尺寸 64 mm×40 mm×110 mm,分层厚度 20~100 μm,成型速度 40~100 mm/h),基于 DLP 下置式原理进行成型打印。

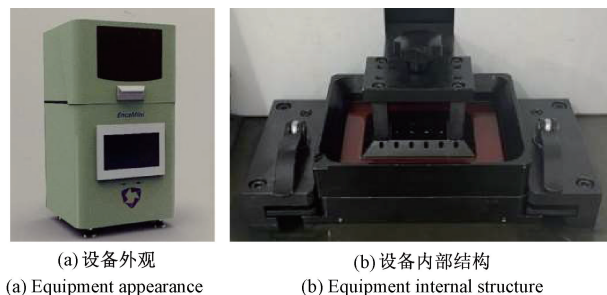


图 1 光固化成型设备

Fig. 1 Light-curing molding equipment

为了获取该光敏树脂材料力学性能参数,本文以 ISO 3167:2014 标准进行 1:2 比例缩放制出 1A 型拉伸试件(图 2),其受拉段长度 l_0 及横截面积 A 分别为 75 mm 和 20 mm²。采用 QJ211S 型电子万能材料试验机(最大施加压力为 5 kN;实验速度为 0.01~300 mm/min;精度等级为 0.5 级;有效拉伸空间为 500 mm)进行 5 次单轴拉伸实验。值得注意的是,该万能材料试验机虽然有着较高的精度,但其直接输出的位移数据仍包含一定的传动误差,导致该位移值与真实值相差显著,为了获取更加准确的形变数据 l ,在测试系统中,配置一定补偿值进行修正,结合修正后的载荷-位移数据,利用式(1)和式(2)计算拉伸样条的名义应力 R_{nom} 和名义应变 ε_{nom} ,进而结合式(3)和式(4)求解其真实应力 R_{true} 和真实应变 $\varepsilon_{\text{true}}$,最后绘制其对应的应力-应变曲线,如图 3 所示。



图 2 拉伸试件

Fig. 2 Tensile sample

$$\varepsilon_{\text{nom}} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\text{true}} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \quad (2)$$

$$R_{\text{nom}} = \frac{F}{A} \quad (3)$$

$$R_{\text{true}} = R_{\text{nom}}(1 + \varepsilon_{\text{true}}) \quad (4)$$

为了进一步探究该材料的力学性能,结合应力-应变关系,获取该材料的断裂应变率和抗拉强度。值得关注的是,该应力-应变关系近似线性关系,弹性模量可用其斜率表征,对应求解结果如表 1 所示。

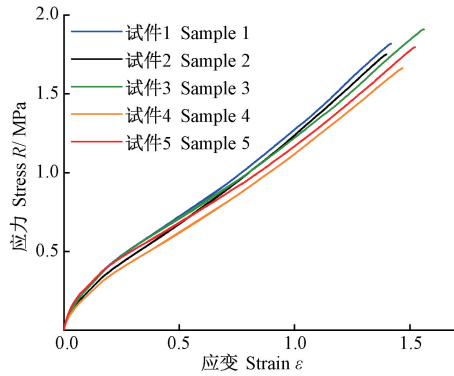


图 3 拉伸试件真实应力-应变曲线

Fig. 3 True stress-strain curve of tensile samples

表 1 拉伸试件测试结果

Tab. 1 Test results of tensile samples

编号 Number	断裂 应变率 Fracture strain rate	抗拉强度 Tensile strength R_m /MPa	弹性模量 Modulus of elasticity E /MPa
试样 1 Sample 1	1.42	1.82	0.97
试样 2 Sample 2	1.40	1.75	0.93
试样 3 Sample 3	1.56	1.90	0.92
试样 4 Sample 4	1.47	1.66	0.94
试样 5 Sample 5	1.52	1.79	0.96
平均值 Average value	1.47 ± 0.06	1.78 ± 0.09	0.94 ± 0.02

1.2 单元网格构型选取

基于朱士魁等^[14]建立的单元网格构型库,结合孔隙率、易成型性等因素,通过对其进行衍生和构型优化,设计了三种单元网格构型(表 2)作为本文的点阵结构单元。这三种结构都具有较好的孔隙率,且在结构强度上各有差异。此类单元均为正方体,且边长尺寸为 2.40 mm,单元内部采用圆柱形杆件进行支撑。由表 2 可以看出,本文设计的三种单元结构在 0.35 mm 杆件直径下的孔隙率分别为 88.43%、88.47%、84.20%。

1.3 三维多孔点阵结构设计

将设计的三种单元各自沿边长方向上进行三维等间距线性阵列,得到图 4 中 5×5×5 的三种三维多孔点阵结构,因此,每个方向长度为 2.4×5=12 mm,即点阵结构尺寸为 12 mm×12 mm×12 mm。

1.4 三维多孔点阵结构的制备

本文的多孔点阵结构采用柔弹性树脂进行光固化成型制得。在实际打印中发现,结构的整体成型效果受到分层厚度、每层曝光时间、成型速度(DLP 打印中,设备完成每一分层形状所需的时间)等因素的综

表 2 单元构型及孔隙率

Tab. 2 Conformation and porosity of single cells

单元构型 Cellular configuration	孔隙率计算公式 Porosity calculation formula ($L=2.40$ mm)	孔隙率 Porosity/% ($d=0.35$ mm)
	$p = 1 - \frac{\rho}{\rho_s} = 1 - \frac{\sqrt{3}\pi d^2}{L^2}$	88.43
	$p = 1 - \frac{\rho}{\rho_s} = 1 - \frac{\pi d^2 (1 + \frac{2}{\sin \alpha})}{2L^2}$ $\alpha = 54.7^\circ$	88.47
	$p = 1 - \frac{\rho}{\rho_s} = 1 - \frac{\pi d^2 (3 + \frac{2}{\sin \alpha})}{2L^3}$ $\alpha = 35.3^\circ$	84.20

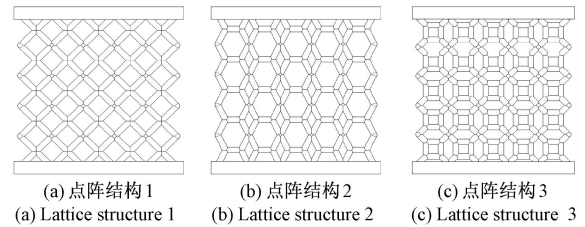


图 4 三维多孔点阵结构

Fig. 4 3D porous lattice structure

合影响。在每层曝光时间不足、成型速度较快的情况下,若分层厚度过小,常常会导致结构中节点连接处在成型过程中相互脱离;若分层厚度过大,又会导致树脂在成型结束后呈半液半固的未完全固化状态;而在曝光时间过长、成型速度较慢的情况下,还会导致浸润在结构表面的多余树脂固化凝结在杆件上,出现粘连和堵塞的现象,影响成型效果。经过反复测试,最终得到该三维多孔点阵结构较合适的成型参数,如表 3 所示。

值得关注的是,单元杆件直径对点阵结构最终能否成型及成型质量也有着很重要的影响。由于该树脂在未进行二次光固化前有着较强的脆性,若杆件直径较小,容易导致结构在成型过程中折断;若杆件直径过大,则成型时孔隙内的残余树脂又不容易排出,从而导致残余树脂在孔隙内固化而堵塞,降低成型精度与质量。经反复实验,可将多孔点阵结构的单元杆件直径设定在 0.30~0.50 mm。

为了获得更高的孔隙率,尽可能选取小直径杆件进行测试,但在实际打印中发现,杆件直径为 0.35 mm 时的结构成型率要远远高于杆件直径为 0.30 mm 时的情况,因此本文选用 0.35 mm 这一直径进行打印。同时,为了保证结构与夹持棒料有较高的接触面积,以便对样品结构进行性能测试,在样品结构成型制备时特将其横截面尺寸放大 1 倍,即 3 种样品结构的成型尺寸均为 24 mm×24 mm×12 mm,最终成型效果如图 5 所示。

表 3 DLP 光固化成型参数
Tab. 3 DLP forming parameters

分层厚度 Delamination thickness/ μm	每层曝光时间 Exposure time of each layer/ms	成型速度 Forming speed/ (mm/h)
50	2	70

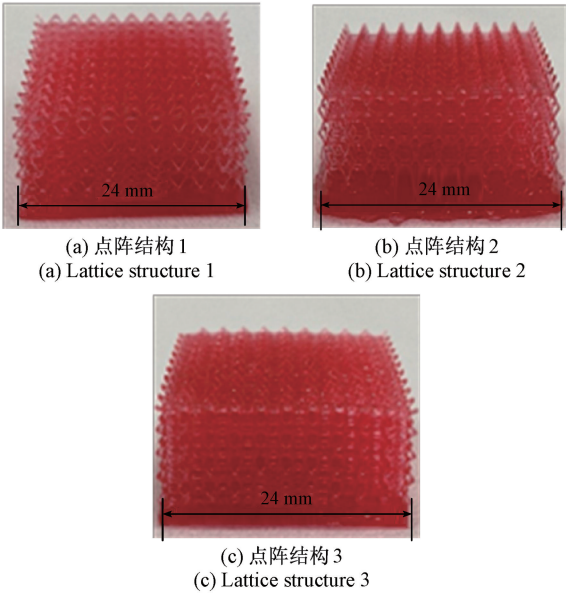


图 5 成型效果图
Fig. 5 Formed effect results

2 三维多孔点阵结构 CAE 拉伸仿真

2.1 拉伸仿真分析

使用 Abaqus 对第 1.3 节中的三种多孔点阵结构进行有限元拉伸模拟。点阵结构单胞杆件直径均为 0.35 mm, 导入模型后, 根据表 1 中的测试结果, 选取弹性模量为 0.94 MPa。仿真模拟的主要研究对象为两夹板之间的多孔点阵结构, 而结构中上、下两夹板较厚, 可近似看作刚体。

设置时将下夹板进行完全固定; 同时在上夹板取中心参考点 R_p , 并将 R_p 点与上夹板进行耦合; 然后在 R_p 点上施加方向向上、拉伸量为 7.20 mm (60% 的拉伸伸长率) 的拉伸载荷, 以此来模拟结构受单轴拉伸作用时的情况。

为了能够清楚地看到结构受拉时的应力分布位置, 此处将应力分布云图显示在了未变形的结构图上, 仿真结果及应力分布如图 6 所示。

由图 6 的仿真应力云图不难得出, 三种点阵结构分别受单轴拉伸作用时, 各个结构产生的最大应力均位于节点处。需要强调的是, 多孔点阵结构中的节点通常分为单胞之间的过渡节点和单胞内部空间杆件的连接节点, 在图 6 中, 单胞之间的过渡节点存在明显的应力集中, 而单胞内部杆件的连接节点处应力较小, 且各个结构的最大应力均位于单胞与单胞之间的过渡节

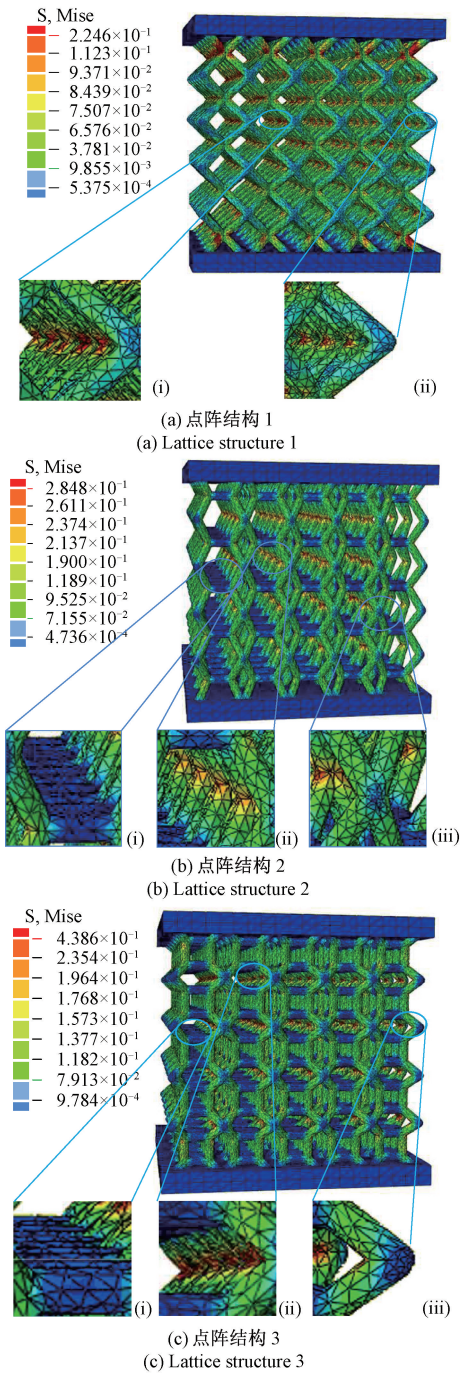


图 6 仿真应力云图
Fig. 6 Nephogram of simulation stress

点处。

除节点之外, 在拉伸方向有长度分量的空间杆件也会产生较大的应力, 如图 6 中的倾斜杆件所示; 而完全垂直于拉伸方向的水平杆件无明显变形, 说明其受到的应力较小。

从应力数值来看, 三种多孔点阵结构在拉伸率均为 60% 的情况下, 点阵结构 1 的应力值范围为 $(5.38 \times 10^{-4}) \sim (2.25 \times 10^{-1})$ MPa, 点阵结构 2 的应力值范围为 $(4.74 \times 10^{-4}) \sim (2.85 \times 10^{-1})$ MPa, 点阵结构 3 的应力值范围为 $(9.78 \times 10^{-4}) \sim (4.39 \times 10^{-1})$ MPa。由

此可见,点阵结构 3 受拉时产生的应力最大,点阵结构 2 其次,而点阵结构 1 产生的应力最小。

2.2 拉伸仿真结果讨论

根据上述仿真结果,对接下来的拉伸实验现象做出以下两点预测:

1) 由拉伸仿真中各结构的应力集中位置可以推测,这几种点阵结构在实际拉伸时的断裂位置应该在杆件节点处,且大部分断裂位置应该位于单胞之间的连接节点处。

2) 由于各结构都采用相同材料,其材料强度相同,所以由拉伸仿真中各结构在相同拉伸量时产生的应力大小可以推测,点阵结构 1 断裂伸长率最大,点阵结构 2 其次,点阵结构 3 最小。

3 三维多孔点阵结构拉伸实验分析

3.1 测试内容

为了验证仿真分析结果的准确性,针对三种结构,分别制备了 3 组试件,在酒精清洗和二次固化后,用于拉伸实验。

为了便于试件的夹持固定,并确保夹持棒料在拉伸实验中不产生形变,以免影响实验精度,采用硬质铸造树脂打印了相应的夹持棒料,并通过强效胶水,将每个点阵结构上、下表面分别与两个夹持棒料进行粘接固定。只要所用胶水在拉伸实验中没有发生脱胶、脱落等现象,就可忽略胶水因素对实验产生的影响。

拉伸实验在 QJ211S 型电子万能材料试验机上进行,夹持效果如图 7 所示。采用单轴拉伸实验方法,具体步骤为:固定试件下端,并对其上端施加拉伸载荷,加载速度设为 20 mm/min,并记录下各结构拉伸过程中的载荷-位移数据。

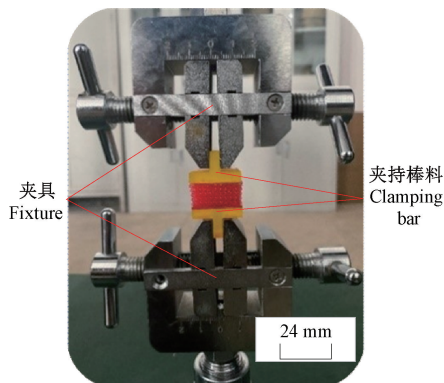


图 7 拉伸机装夹效果

Fig. 7 Clamping effect of tension equipment

3.2 拉伸实验结果

每种点阵结构进行 3 次拉伸实验并对输出的载荷-位移数据进行均值处理后,结合第 1.1 节中所用的计算方法,获得对应的应力-应变曲线(图 8),对应的

拉伸特性参数如表 4 所示。

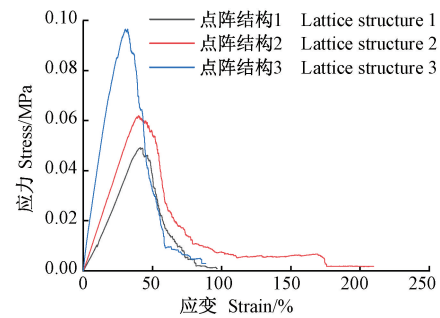


图 8 应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curve

表 4 拉伸特性参数

Tab. 4 Parameters of tensile properties

	点阵结构 1 Lattice structure 1	点阵结构 2 Lattice structure 2	点阵结构 3 Lattice structure 3
拉伸模量 Tensile modulus/MPa	0.120±0.000 21	0.154±0.000 14	0.319±0.000 12
断裂强度 Breaking strength/MPa	0.049±0.000 08	0.062±0.000 05	0.097±0.000 03
有效伸长率 Effective elongation/%	41.0±3.7	40.1±4.1	30.4±2.3
最大伸长率 Maximum elongation/%	96.8±6.2	116.0±3.9	85.6±2.7

由图 8 可知,该多孔点阵结构在受拉过程中有上升和下降两个阶段。上升阶段中,结构杆件进入初始拉伸阶段,杆件因拉伸产生的应力在未断裂前随拉伸量的增加而增大,各点阵结构在此阶段曲线中都呈现出近似于线性上升的趋势。之后,曲线上升至顶点并开始进入下降阶段,此时经实验观察发现,点阵结构中的某些节点开始陆续断裂,从而导致结构因拉伸产生的内力也迅速下降,点阵结构整体强度也随之下降,因此下降阶段表现为整体应力随拉伸量增加而不断下降。随着拉伸量继续加大,处在断裂面的各连接节点最终完全脱离,从而应力下降为 0。

由于下降阶段中结构发生了断裂,所以将上升阶段视为有效拉伸段,下降阶段视为失效拉伸段。

实验的结构断裂面如图 9 所示。由图 9 发现,这些点阵结构在拉断之后,断裂位置的杆件基本完好,且断裂位置的单胞结构也大多完整。这说明点阵结构在实际拉伸时的断裂点主要集中在杆件节点处,且断裂节点多数为单胞间节点,即该多孔点阵结构在受拉时的断裂形式大多表现为单胞与单胞之间相互分离,与上文的仿真结果和分析一致。

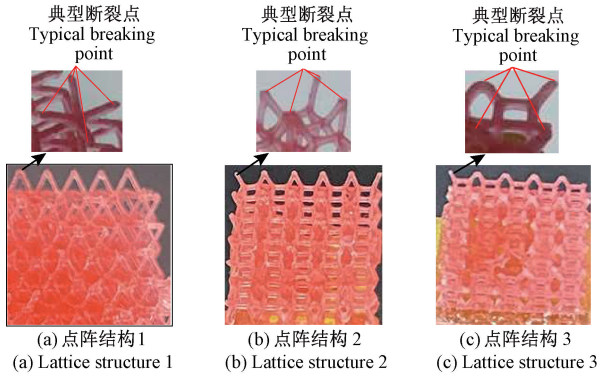


图9 结构断裂面

Fig. 9 Fracture surface of the structure

需要强调的是,该结构中每个支撑杆件的直径仅为 0.35 mm。由表 2 可知,多孔点阵结构的孔隙率达到了 84.20%~88.43%,且每个单胞断裂处的总拉伸横截面积为 $4\pi d^2/\cos\alpha$,约为同尺寸实心正方体截面的 8.21%~9.45%。由表 4 的数据可知,结构整体在受拉时的有效伸长率为 30.4%~41.0%,完全断裂伸长率为 85.6%~116.0%。这表明能有效地将结构整体的伸长和受拉产生的内力均匀、合理地分布在结构中的各单胞、杆件和节点之间,从而有效解决高孔隙率导致的极细杆件和较低强度问题,明显增加整体结构受拉时的失效应变与断裂应变。

此外,点阵结构 3 在上升阶段中的曲线斜率最大,表明其拉伸模量和断裂强度最高,但其有效伸长率最低;点阵结构 1 有着最好的有效伸长率,但其拉伸模量和断裂强度则较小,即点阵结构 1 在拉伸时产生的内力最小。

由此可见,各结构受拉时的强度对比、发生断裂的先后顺序以及结构中的断裂位置与仿真结果相一致。

4 基于拉伸断裂韧性的三维点阵结构优选

4.1 三维多孔点阵结构拉伸的数值分析

由于该柔弹性成型材料的拉伸行为较为复杂,结合图 3 中的拉伸样条曲线趋势,可将该材料在受拉直至断裂这一过程中材料承受的载荷与形变长度之间的映射关系简化为正比关系。同时,为了方便参数指标的求解,假设该比例系数为 K ,其表征成型材料产生拉伸变形的难易程度。

本文涉及的点阵结构设计均满足拉伸主导型几何结构^[15]的特点,也就是当点阵结构在受到拉伸载荷时,其结构中所有杆件只会被拉直、绷紧,不会产生弯曲变形,即结构受拉时杆件只受到轴向力作用,因此受拉时该多孔点阵结构可视为桁架结构。又因为这些结构均由单胞进行规则阵列而成,所以对其力学分析可简化为对结构中任意一个单胞的分析。

图 10 对点阵结构中单胞的各个重要尺寸参数进行了标注,所有单胞均在竖直方向由原长度 L_0 被拉伸至 L ,其中三种结构中的单胞杆件受拉前的原长分别用 A_{0n}, B_{0n}, C_{0n} ($n=1,2,3,\dots$) 表示,拉伸后的长度分别用 A_n, B_n, C_n ($n=1,2,3,\dots$) 表示,而 a_0, b_0, c_0 为所标记杆件受拉前在水平面上的投影长度, a, b, c 为所标记杆件受拉后在水平面上的投影长度。基于图 10 中各关键参数,对应三种结构的整体拉伸模量 E 和最大节点力 F 的计算方法如表 5 所示。

表 5 中,对参数 a, b, c 以及 A_n, B_n, C_n ($n=1,2,3,\dots$) 均给出了明确的计算式,且其余参数值均为已知,因此结构整体拉伸模量 E 和最大节点力 F 可被快速计算获得。根据仿真设置,在 60% 的拉伸率下,将各自值代入表 5 中的公式即可获得相应的拉伸模量 E 和最大节点力 F (表 6)。

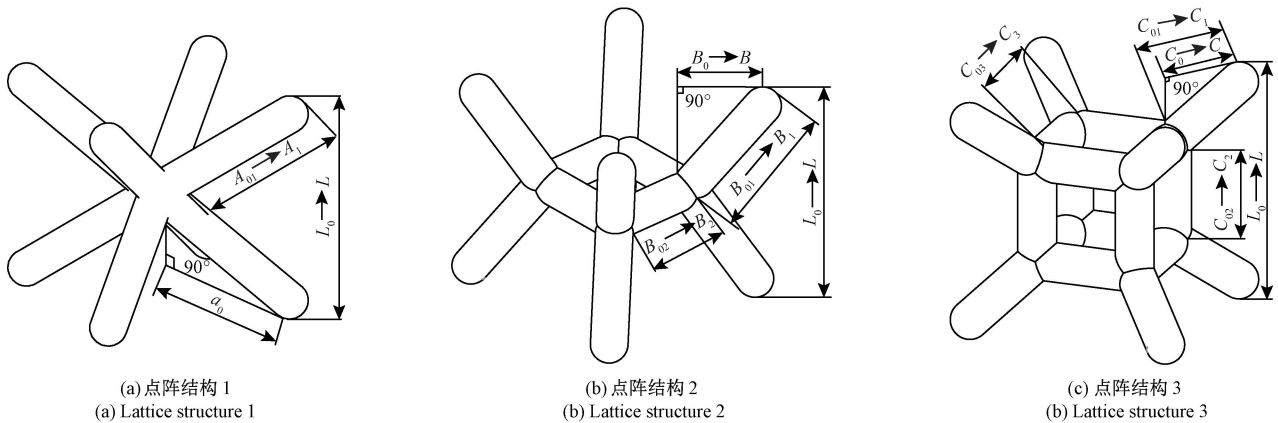


图10 三种点阵结构中的单胞分析与标注

Fig. 10 Analysis and labeling of single cell in three lattice structures

表 5 三种点阵结构拉伸特性参数计算方法

Tab. 5 Calculation of tensile property parameters for three lattice structures

结构整体拉伸模量 Overall tensile modulus of structure E/MPa		最大节点力 Maximum node force F/N
点阵结构 1 Lattice structure 1	$E = \frac{125}{36}KL \left[1 - \frac{A_{01}}{\sqrt{(L/2)^2 + a_0^2}} \right]$	$F = 2KL \left[1 - \frac{A_{01}}{\sqrt{(L/2)^2 + a_0^2}} \right]$
点阵结构 2 Lattice structure 2	$E = \frac{125}{36}KL \left[1 - \frac{B_{01}}{\sqrt{(L/2)^2 + b^2}} \right]$	$F = 2KL \left[1 - \frac{B_{01}}{\sqrt{(L/2)^2 + b^2}} \right]$
点阵结构 3 Lattice structure 3	$E = \frac{125K(C_1 - C_{01})\sqrt{C_1^2 - c^2}}{18C_1} + \frac{125}{36}K(L - 2\sqrt{C_1^2 - c^2} - C_{02})$	$F = \frac{4K(C_1 - C_{01})\sqrt{C_1^2 - c^2}}{C_1}$

注: 表 5 中 b 为方程 $b_0 - b = \sqrt{2}b \left[1 - \frac{B_{01}}{\sqrt{(L/2)^2 + b^2}} \right]$ 的解, C_1 为方程 $(3C_1 - C_{01})\sqrt{C_1^2 - c^2} = C_1(L - C_{02})$ 的解, 且 $c = 2c_0 - \frac{C_{01}c_0}{C_1}$ 。

Note: In Table 5, b is the solution of equation $b_0 - b = \sqrt{2}b \left[1 - \frac{B_{01}}{\sqrt{(L/2)^2 + b^2}} \right]$, C_1 is the solution of equation $(3C_1 - C_{01})\sqrt{C_1^2 - c^2} = C_1(L - C_{02})$, and $c = 2c_0 - \frac{C_{01}c_0}{C_1}$.

表 6 中结构整体拉伸模量 E 反映了结构的强度大小, 两者为正相关; 最大节点力 F 反映了结构的拉伸断裂伸长率大小, 两者为负相关。由表 6 可知, 结构整体拉伸模量 $E_{\text{点阵结构 3}} > E_{\text{点阵结构 2}} > E_{\text{点阵结构 1}}$, 最大节点力 $F_{\text{点阵结构 3}} > F_{\text{点阵结构 2}} > F_{\text{点阵结构 1}}$ 。可见, 整体拉伸模量 E 与最大节点力 F 之间为正相关, 即断裂伸长率与结构强度之间为负相关, 两者数值相互影响。因此, 对该结构拉伸特性的评价, 不能仅关注结构强度和拉伸断裂伸长率中的一个因素, 需对这两者的影响进行综合考虑。

表 6 三种点阵结构拉伸模量和最大节点力的计算值

Tab. 6 Calculated values of tensile modulus and maximum nodal force for three lattice structures

	结构整体拉伸模量 Overall tensile modulus of the structure E/MPa	最大节点力 Maximum node force F/N
点阵结构 1 Lattice structure 1	2.52K	1.451K
点阵结构 2 Lattice structure 2	3.21K	1.85K
点阵结构 3 Lattice structure 3	4.12K	2.37K

4.2 结构拉伸韧性

根据第 4.1 节的分析结果, 在此引入拉伸断裂韧性^[16]这一指标。断裂韧性是评价结构拉伸特性好坏的一个重要因素, 表示结构断裂前所吸收的能量, 可根据结构受拉时应力在拉伸应变上的积分进行计算, 并受到结构强度与拉伸断裂伸长率的综合影响。由此, 根据应力-应变曲线(图 8)和结构尺寸数据(表 2)可算出各结构的断裂能, 计算结果如图 11 所示。

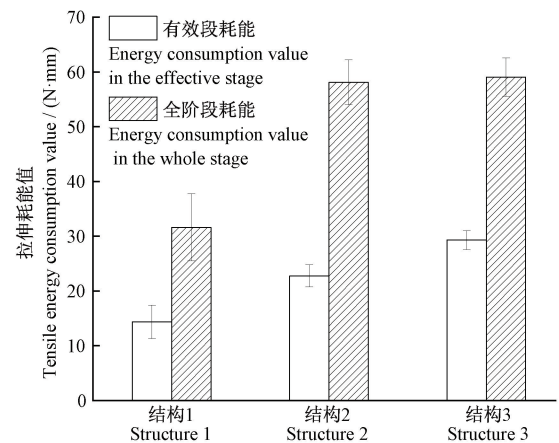


图 11 三种点阵结构在不同阶段的能量耗散值

Fig. 11 Energy dissipation values of three lattice structures at different stages

分析表明, 点阵结构 3 的拉伸耗能最大, 其有效阶段的耗能值为 $29.3 \text{ N} \cdot \text{mm}$, 全阶段耗能值为 $59.04 \text{ N} \cdot \text{mm}$, 说明点阵结构 3 的拉伸韧性最强, 综合拉伸特性最好。

5 结论

针对组织工程点阵支架的研制需求, 衍生设计了三种单胞构型, 并采用 DLP 成型工艺高效制备了对应的柔弹性点阵结构, 结合有限元仿真和物理实验, 探究了三种点阵结构的拉伸力学特性, 得到如下结论:

1) 基于四种不同组分, 配制了一种具有柔弹性的光敏树脂, 并采用 DLP 打印方式, 通过对分层厚度、曝光时间、成型速度、二次固化等打印参数的调控, 获得了孔隙清晰、内部连通性好的柔性实验试件。

2) 该柔弹性多孔点阵结构在受拉时,能合理地将受拉产生的内力和伸长均匀分布在各单胞、杆件和节点之间,使得结构获得了良好的拉伸断裂伸长率,表现出了良好的拉伸性能,能较好地满足皮肤组织工程支架结构在孔隙率及柔弹性方面的要求。

3) 根据仿真、实验结果,三种多孔点阵结构受拉后的断裂位置几乎都集中在单胞间的连接节点处,其断裂现象具体表现为不同单胞层之间的相互脱离;而单胞内部节点之间却少有断裂现象,断裂层处的单胞结构大多完好。

4) 鉴于该结构中的强度和拉伸断裂伸长率间存在相互影响,引入了拉伸断裂韧性,以综合评判结构强度和拉伸断裂伸长率对结构拉伸特性的影响。在杆件直径、支撑角度等几何因素都相同的情况下,单胞 3 构成的多孔点阵结构拥有最好的断裂韧性,因此,点阵结构 3 的综合拉伸特性最优异。

综上,本文所制备的柔弹性三维多孔点阵结构展现出了较好的拉伸特性,为人工皮肤组织工程支架以及新型多孔材料的构形设计和制备提供了一种新的思路。同时,该结构也能较好地应用于柔性电极、易碎品装夹夹具等。后续研究中,拟进一步探究生物可降解光敏树脂的配方;并尝试对构成该结构的正方体单胞进行梯度拓扑优化,从而制备出更适用于全层皮肤组织工程支架的多孔结构;探寻单胞间节点增强方案,使该结构的拉伸断裂伸长率及力学性能得到进一步增强。

参考文献 (References)

- [1] HELOU M, KARA S. Design analysis and manufacturing of lattice structures: an overview [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2018, 31(3): 243-261.
- [2] AMANI Y, TAKAHASHI A, CHANTRENNE P, et al. Thermal conductivity of highly porous metal foams: experimental and image based finite element analysis [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 122: 1-10.
- [3] 吴海波, 袁 波, 韩建荣, 等. 多孔陶瓷材料的制备研究进展 [J]. 耐火材料, 2012, 46(3): 230-235.
WU HaiBo, YUAN Bo, HAN JianShen, et al. Research process of porous ceramics materials preparation [J]. Refractories, 2012, 46(3): 230-235 (In Chinese).
- [4] 伍卫刚, 郑启新. 组织工程多孔支架材料制备技术的研究进展 [J]. 国际生物医学工程杂志, 2008, 31(4): 242-245.
WU WeiGang, ZHENG QiXin. Advancement of the preparation technology of the porous scaffolds for the tissue engineering [J]. International Journal of Biomedical Engineering, 2008, 31(4): 242-245 (In Chinese).
- [5] 张 硕, 丁亚军, 应三九. 微孔 NC/TEGN/RDX 复合材料的制备及力学性能 [J]. 含能材料, 2019, 27(3): 210-215.
ZHANG Shuo, DING YaJun, YING SanJiu. Fabrication and mechanical properties of micro-porous NC/TEGN/RDX composites [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(3): 210-215 (In Chinese).
- [6] 陆嘉玮, 张坤玺, 虞 玺, 等. 胺解改性聚 L-谷氨酸酯引导骨再生膜的制备 [J]. 高等学校化学学报, 2019, 40(3): 601-611.
LU JiaWei, ZHANG KunXi, YU Xi, et al. Preparation of amine-modified poly (γ -benzyl-L glutamate) guided bone regeneration film [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2019, 40(3): 601-611 (In Chinese).
- [7] 郑秋光, 刘海亮, 肖长发. 热致相分离法偏二氯乙烯-氯乙烯共聚物多孔膜的制备及性能 [J]. 高等学校化学学报, 2019, 40(4): 841-848.
ZHENG QiuGuang, LIU HaiLiang, XIAO ChangFa. Preparation and performance of poly (vinylidene chloride-co-vinyl chloride) porous membranes via thermally induced phase separation [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2019, 40(4): 841-848 (In Chinese).
- [8] 杨建明, 汤 阳, 顾 海, 等. 3D 打印制备多孔结构的研究与应用现状 [J]. 材料导报, 2018, 32(15): 2672-2682.
YANG JianMing, TANG Yang, GU Hai, et al. Research and application of 3D printed porous geometric structure: a review [J]. Material Guide, 2018, 32(15): 2672-2682 (In Chinese).
- [9] KRISHNA V B, BOSE S, BANDYOPADHYAY A. Low stiffness porous Ti structures for load-bearing implants [J]. Acta Biomaterialia, 2007, 3(6): 997-1006.
- [10] ZHOU C C, YANG K, WANG K F, et al. Combination of fused deposition modeling and gas foaming technique to fabricated hierarchical macro/microporous polymer scaffolds [J]. Materials and Design, 2016, 109: 415-424.
- [11] 王春晓, 李 祥, 罗 云. 多孔钛合金支架结构设计及其抗压强度分析 [J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(2): 165-168.
WANG ChunXiao, LI Xiang, LUO Yun. Design and strength analysis of porous titanium scaffold [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(2): 165-168 (In Chinese).
- [12] 韩宗政, 段明德, 杨子威, 等. 反 Kagome 点阵结构主参数分析及力学行为 [J]. 机械强度, 2022, 44(2): 440-446.
HAN ZongZheng, DUAN MingDe, YANG ZiWei, et al. Main parameter analysis and mechanical behavior of anti-Kagome lattice structure [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(2): 440-446 (In Chinese).
- [13] 纪小刚, 张建安, 栾宇豪, 等. 仿皮肤三维多孔点阵结构压缩吸能性能研究 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(15): 222-230.
JI XiaoGang, ZHANG JianAn, LUAN YuHao, et al. Research on compression energy absorption performance of skin-like 3D porous lattice structure [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(15): 222-230 (In Chinese).
- [14] 朱仕魁, 纪小刚, 刘大鹏, 等. 轻量化设计中的单元网格构型研究 [J]. 塑料工业, 2017, 45(3): 151-156.
ZHU ShiKui, JI XiaoGang, LIU DaPeng, et al. Study of lightweight design based on lattice structure [J]. China Plastics Industry, 2017, 45(3): 151-156 (In Chinese).
- [15] ZHENG X, LEE H, WEISGRABER T H, et al. Ultralight ultrastiff mechanical metamaterials [J]. Science, 2014, 344(6190): 1373-1377.
- [16] 侯建龙, 雷建银, 李世强, 等. 3D 打印贝壳仿生复合材料的拉伸力学行为 [J]. 高压物理学报, 2020, 34(1): 74-80.
HOU XiangLong, LEI JianYin, LI ShiQiang, et al. Tensile mechanical behavior of 3D printed composite materials inspired by nacre [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(1): 74-80 (In Chinese).