

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.01.013

3D打印正四面体自锁多孔支架及其力学行为研究

王文晓¹, 李俊儒¹, 李欣琳¹, 张传伟¹, 何田¹, 王晓², 张鹏飞¹

(1. 青岛大学机电工程学院, 山东青岛 266071; 2. 青岛大学数学与统计学院, 山东青岛 266071)

摘要: 为得到与人骨力学性能相匹配的组织工程支架, 提出了一种新型的基于正四面体的自锁多孔支架, 利用熔融沉积成型(FDM) 3D打印技术, 制备了5组具有不同孔隙率的多孔支架, 并对支架的表面形态、孔隙率、亲水性和力学性能进行了测试和分析。结果表明: 由3D打印制得的支架呈现比较规则的逐层结构, 能观察到明显的正四面体结构, 这是传统的支架制备方法实现不了的; 5组支架的孔隙率分别为71.25%, 76.75%, 80.47%, 82.48%, 83.28%, 实现了比较高的孔隙率; 随着孔隙率的增加, 支架的压缩强度和压缩弹性模量降低, 5组不同孔隙率支架的压缩强度分别为6.27, 3.53, 2.29, 1.64, 1.24 MPa, 压缩弹性模量分别为33.25, 19.23, 16.33, 13.92, 11.99 MPa, 其中组号为1的支架的力学性能与人体软骨下骨的力学性能较为符合, 能够有效地缓解植入物与人骨的应力遮挡。

关键词: 3D打印; 多孔支架; 孔隙率; 力学性能

中图分类号: TH16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)01-0071-06

3D Printed Regular Tetrahedron Self-Locking Porous Scaffold and Its Mechanical Behavior

Wang Wenxiao¹, Li Junru¹, Li Xinlin¹, Zhang Chuanwei¹, He Tian¹, Wang Xiao², Zhang Pengfei¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China;

2. School of Mathematics and Statistics, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract : To obtain a tissue engineering scaffold matching the mechanical properties of human bone, a novel self-locking porous scaffold based on orthotetrahedron was proposed, and five groups of porous scaffolds with different porosity were prepared by using fused deposition modeling (FDM) 3D printing technology, and the surface morphology, porosity, hydrophilic properties and mechanical properties of the scaffolds were tested and analyzed. The results show that the scaffolds made by 3D printing show a relatively regular layer-by-layer structure, and an obvious positive tetrahedral structure could be observed, which restored the design drawing, which could not be achieved by traditional scaffold preparation methods. The porosity of the five groups of scaffolds is 71.25%, 76.75%, 80.47%, 82.48% and 83.28%, which achieve a relatively high porosity with the increase of porosity, the compressive strength and compressive elastic modulus of the scaffolds decreased. The compressive strength of the scaffolds with different porosity in five groups is 6.27, 3.53, 2.29, 1.64, 1.24 MPa, and the compressive modulus is 33.25, 19.23, 16.33, 13.92 and 11.99 MPa, respectively, among which the mechanical properties of the scaffold with group number 1 are more consistent with those of human subchondral bone. The mechanical properties of the scaffold with group number 1 are more consistent with the mechanical properties of human subchondral bone, which can effectively relieve the stress shading between the implant and human bone.

Keywords : 3D printing ; porous scaffold ; porosity ; mechanical property

由于骨折、肿瘤或骨质退变等情况引起的骨缺损及其相关疾病, 已经成为危害人类身体健康、降低人们生活质量的一大问题, 而骨缺损修复仍然是一个巨大的临床挑战^[1-2]。目前, 自体骨移植和同种

异体骨移植被广泛应用于骨缺损的治疗。但这些技术都有其不可避免的缺点, 如供体短缺、手术复杂、潜在的疾病传播和排斥反应等, 使得骨移植手术往往难以达到理想的疗效^[3-5]。

基金项目: 山东省高等学校青创人才引育计划自愈合材料研究创新团队建设项目(DC2000000891)

通信作者: 张鹏飞, 教授, 主要研究方向为功能型(自愈合/形状记忆/高性能)聚合物材料与复合、结构与性能分析、聚合物材料增材制造

收稿日期: 2022-10-03

引用格式: 王文晓, 李俊儒, 李欣琳, 等. 3D打印正四面体自锁多孔支架及其力学行为研究[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(1): 71-76.

Wang Wenxiao, Li Junru, Li Xinlin, et al. 3D printed regular tetrahedron self-locking porous scaffold and its mechanical behavior[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(1): 71-76.

因此骨组织植入物的研究对于骨缺损患者十分重要,组织工程研究为解决这类问题提供了一大途径,骨组织工程在开发具有更好力学强度、生物相容性和骨诱导性的骨替代材料方面具有巨大的潜力^[6]。组织工程学的主要目的是设计生物支架,用以修复、维持或改善因创伤或疾病造成的组织损伤而破坏的组织功能及其临床应用^[7],将骨组织工程支架植入缺损部位,使细胞可以附着在支架上进行增殖、分化,长成新骨^[8]。多孔结构支架具有良好的承重耐性和减震吸能效果,可以通过调整多孔结构和尺寸来控制其力学性能,使得植入假体的模量与人骨相匹配,从而避免应力遮挡,同时多孔结构也有利于物质交换,促进细胞的增殖分化,加快骨修复的过程^[9]。

为了获得理想的支架多孔结构,选择合适的成型工艺是关键。目前,传统的支架制备方法,如静电纺丝、颗粒浸出、冷冻干燥等,很难精确控制孔的大小、孔隙率、孔形状和孔的连通性,构建的多孔结构支架的微观结构是不可控的^[10],而且制备过程复杂,残留的溶剂难处理,给后续的实验造成了很多的不方便^[11-12]。3D打印可以通过层层堆叠的方式将材料按照预先设计的模型变成实物,通过3D打印技术,可以得到与设计几乎完全相同的多孔支架,人们可以准确控制支架的孔结构和尺寸,而且还可以根据不同患者的具体情况,实现骨支架的微观内部多孔结构和宏观外形尺寸的个性化制备^[13]。

当材料的性能与宿主骨组织匹配后,微孔形状细微变化对成骨细胞的黏附和增殖有很大影响。Arun等^[14]对孔隙率为68.46%~90.98%的六种支架结构的刚度、强度、渗透性和应力集中进行了全面研究,结果表明,孔形状影响Ti6Al4V骨支架的透气性、刚度、强度和应力集中系数。Bael等^[15]研究了局部曲率和孔洞形状,结果表明钝角比锐角更容易引起细胞堵塞。Kanhed等^[16]发现,通过控制支架的孔隙分布,HAP生物陶瓷复合支架的力学和生物学性能得到显著改善。康建峰等^[17]提出了基于3D打印的可变模量金属假体微结构设计,设计的多孔微结构有效降低了金属假体模量,缓解了应力遮挡。

笔者设计了独特的正四面体自锁多孔支架模型,采用热塑性材料PLA作为原材料,通过FDM 3D打印技术制备出形貌规则、具有不同孔隙率的骨组织工程支架,对支架的表面形态、孔隙率、水接触

角、吸水率进行了表征,并对支架的力学性能进行了评价。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA粒:分子量100 000,4032D,美国Nature-Works公司。

1.2 主要仪器与设备

FDM 3D打印机:HORI Z400型,北京汇天威科技有限公司;

超景深视频显微镜:DVM6型,新加坡徕卡公司;

光学接触角及3D形貌测量系统:Theta型,瑞典Biolin公司;

万能材料试验机:WDM-100型,山东科测测试技术有限公司。

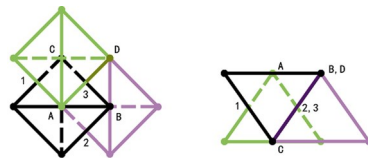
1.3 多孔支架的设计

自锁(SIL)多孔结构在减重、绝缘、能量耗散和吸收冲击能量方面具有很大的优势^[18],传统的SIL结构尽管有许多优点,但是不能承受面内载荷^[19]。通过FDM 3D打印技术,可以改进SIL结构的设计,从而使SIL结构能够承受面内应变。与传统的单元装配方式不同,笔者新设计的3D打印SIL结构是根据支杆之间的连接生成的。

SIL结构的示意设计如图1所示。在图1a中, l 和 t 分别代表四面体单元的支杆长度和厚度。该设计由一些相同的单元以特定的模式连接而成,四面体形状的单元被组装成立体支架结构,其中每个单独的单元被其相邻的单元固定在特定的位置。使



(a)



(b)

a—单层装配设计(l 为支杆长度; s 为单元的支杆厚度; t 为孔径);

b—单个单元和其周围单元的俯视图和正视图(顶点:A,B,C,D;

连锁节点:1,2,3)

图1 自锁结构设计示意图

用拓扑SIL组件的优势之一是避免应力集中,对集中力承载能力的研究指出,单个单元的失效不会导致整个支架的失效^[20],这表明四面体支架具有缺陷容忍。

先前研究表明,孔径对支架中细胞的生长有显著影响,平均孔径尺寸范围从200 μm 至1 000 μm 被认为是最佳的尺寸^[21]。笔者设计的正四面体多孔支架,每个单元边长 l 为2.0 mm,其孔隙率分别为40%,45%,50%,55%,60%,能够保证孔径尺寸 t 处于200~1 000 μm 的范围内。单元数量为 $5 \times 5 \times 6$,这样,支架整体尺寸为10.0 mm $\times$ 10.0 mm $\times$ 9.8 mm。

1.4 多孔支架的制备

使用工业级3D打印机基于FDM工艺打印3D多孔支架。首先利用三维建模软件建立多孔支架的三维模型,以STL格式输出,并将处理好的STL文件在切片软件中进行位置摆放与打印参数调整,之后进行切片,将切片好文件以gcode格式输出,将gcode文件输入3D打印机用于支架模型打印。将PLA颗粒放入真空烘箱中80 $^{\circ}\text{C}$ 干燥12 h,然后通过单螺杆挤出机熔融挤出,单螺杆温度为190 $^{\circ}\text{C}$,牵引成直径为 (1.75 ± 0.05) mm的3D打印用线材。打印头工作温度设置为210 $^{\circ}\text{C}$,打印板工作温度为40 $^{\circ}\text{C}$,层厚为0.05 mm,打印速度为40 mm/s,此外,设置透水底垫,使打印好模型容易从平台上取下。

常见的打印喷嘴的直径一般为0.2 mm、0.4 mm,而笔者设计的支架每个单元的支杆厚度很小,我们需要直径更小的喷嘴,所以选择了直径为0.1 mm的打印喷嘴,如图2所示。但是由于所能找到的喷嘴装配方式与现有打印机并不匹配,所以对打印喷头和限位开关进行了改进,利用不锈钢高压内丝直通来连接喷嘴和喉管,并且对限位开关进行了加长。最终可以顺利打印出笔者设计的支架模型。

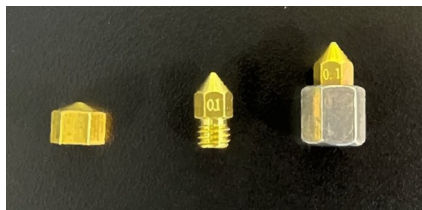


图2 打印喷嘴

1.5 样品表征

(1) 形态分析。

利用超景深视频显微镜观察支架的表面结构和形态。

(2) 孔隙率测量。

PLA多孔支架的孔隙率可以利用称重法计算得出:

$$\omega = \frac{(W_0 - W_1)}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ω 为PLA支架的孔隙率; W_0 为实心PLA立方体的质量; W_1 为PLA支架的质量。

(3) 亲水性测试。

用光学接触角测量仪测试5组支架的水接触角,分析各组支架的亲水性能。为了测试支架的吸水性能,将制备的支架置于烧杯中,并向每个烧杯中加入适量蒸馏水至完全浸没支架。通过比较吸水前后的质量差异,比较各组支架之间的吸水性能,以吸水后1,2,3 h为测试时间节点。吸水率计算为:

$$m = \frac{(M_1 - M_0)}{M_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m 为PLA支架的吸水率; M_0 为支架吸水前的质量; M_1 为支架吸水后的质量。

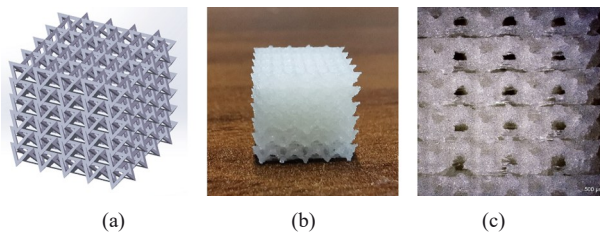
(4) 力学性能。

通过万能材料试验机测试多孔支架的力学性能。按GB/T 1041-2008对5组3D PLA支架(10.0 mm $\times$ 10.0 mm $\times$ 9.8 mm)分别进行压缩性能测试,使用的传感器为100 kN称重传感器,进给速度设置为1 mm/min。输入实际面积,输入支架高度,手动调节压床高度,记录支架的力-位移曲线,根据支架的高度和表面积计算得到支架的应力-应变曲线,通过分析应力-应变曲线计算支架的压缩强度和压缩弹性模量。

2 结果与讨论

2.1 支架形态

图3为支架的表面形态图。由图3可以看出,整个支架呈现比较规则的逐层结构,能观察到明显的正四面体结构。但是,在正四面体单元大小一致的情况下,单元孔径越大,支杆越细,支架的成型状况就越差,对设计图的还原度就越低,这是由于打



a—三维设计图;b—实物照片;c—超景深显微镜照片

图3 支架的表面形态图

印机精度限制的原因,暂时无法解决。在支架成型的过程中,最不容易打印的部分为两个正四面体单元顶点相互接触处,因为此处为模型的尖端部分,尺寸太小,打印机就无法完全还原。

现在3D打印可以制造具有不同结构、孔径、孔隙率和可控方向的复杂支架,这些是传统生物制造方法难以实现的。通过Solidworks软件创建正四面体自锁多孔支架的原型设计,每个正四面体单元的边长为2 mm,支杆厚度为250~330 μm ,而且与水平面并不平行。然而,由于挤出打印喷嘴中的高压阻力,挤出打印方法的最小打印特征分辨率通常超过100 μm 。在形成具有高孔隙率的3D结构时,快速和连续的移动-停止过渡极大地限制了当前普通商用3D打印机的精度和打印分辨率。而且现有的FDM 3D打印机采用的是在多个水平面上进行扫描,然后层层堆叠的方式进行打印的,并不是完全意义上的3D打印,对于微小的复杂结构成型效果很差。因此,具有较大尺寸的正四面体支架可以通过3D打印机轻松生产,但目前的3D打印方法还无法完全还原这种微小尺寸的正四面体支架。

2.2 支架孔隙率

不同组别支架的结构设计参数及其实际制得支架的孔隙率见表1。由实际测得的支架的孔隙率数据可得,支架整体的孔隙率是远远大于单个单元的孔隙率的,这是因为支架并不是由正四面体单元完全充满的,由于SIL正四面体单元独特的装配方式,导致在支架中还存在很多其他的空隙。另外,随着设计的单元孔隙率增大,虽然支架的孔隙率也随之增大,但是增大幅度渐渐减小,其原因有两个,一是正四面体单元的外部尺寸固定,单元之间的空隙不随孔径的增大而增大,二是打印工艺的限制,随着支杆厚度的减小,导致支架的还原度降低。

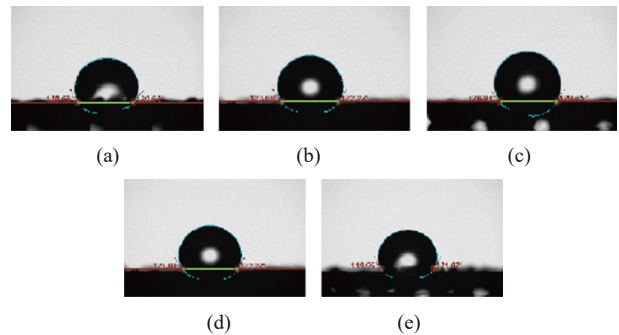
表1 支架的结构参数和孔隙率

组	单元孔隙率/%	s/ μm	t/ μm	支架孔隙率/%
1	40	330	433	71.25
2	45	310	467	76.75
3	50	290	500	80.47
4	55	270	533	82.48
5	60	250	567	83.28

2.3 亲水性

亲水性是组织工程支架的重要指标之一,它直接影响细胞在支架上的黏附率。图4显示了5组支架的接触角测试。由图4可以看到,随着支架中孔

隙率的增加,5组支架的接触角分别为120.52°,123.66°,136.94°,123.68°,119.55°,并无显著的统计学差异。笔者认为孔隙率的变化并不会改变支架的亲水性,事实上支架的亲水性主要与材料本身的属性有关。



接触角:a—120.52°;b—123.66°;c—136.94°;d—123.68°;e—119.55°

图4 PLA各组支架接触角照片

表2为5组支架分别在1,2,3 h的吸水质量百分比。从表2可以看出,随着孔隙率的增加,支架的吸水性能也相应提高。此外,5组支架在1,2,3 h的吸水率差异有统计学意义。因此,笔者认为高孔隙率可以提高支架的吸水性能,加强支架内营养物质的运输,促进细胞增殖。

表2 支架的吸水率

时间/h	1组	2组	3组	4组	5组
1	63.95	76.59	83.17	85.54	88.27
2	96.92	140.21	146.51	159.19	170.58
3	99.39	120.34	135.97	155.90	165.61

2.4 力学性能

支架的力学性能是其能否用于骨组织工程的重要指标,一般来说,支架的力学性能受支架的材料成分和结构的影响,笔者重点研究孔隙率对其力学性能的影响。

图5为5组不同孔隙率的正四面体SIL多孔支架在压缩过程中的应力-应变曲线。5组支架在压缩过程中的应力-应变曲线变化趋势相同,都经历了同样的3个阶段:阶段一为弹性变形阶段,此时压缩过程刚刚开始,组成支架的正四面体单元支杆发生弹性变形,应力较小,应变范围变化也不大,且曲线上升趋势逐渐变缓;阶段二为平台应力阶段,曲线上升趋势更加缓慢,并无明显屈服现象,支架的吸能效果明显,这是因为支架内部的部分正四面体单元支杆所受应力超过屈服强度后开始产生塑性变形,但是由于支架中多孔结构的存在,支杆在发生塑性变形后彼此并不会马上接触;阶段三曲线上

升加快,能量吸收能力下降明显,由于应变量随时间持续增大,支架的空隙逐渐变小,四面体单元的支杆彼此接触,整个支架接近于实心。

通过对压缩实验的应力-应变曲线的分析可以看出,正四面体自锁多孔支架具有优秀的承重性能和吸能效果。除此以外,从一层到另一层是连续断裂的,当顶层破坏时,底层完好无损,层状结构有助于提高能量吸收能力,且可防止整体性破坏。

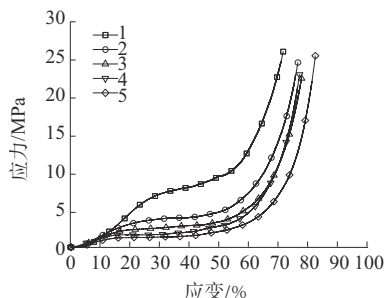


图5 不同孔隙率的正四面体PLA多孔支架的应力-应变曲线

一般来说,孔隙率的逐渐增加会导致支架的机械性能变差。需要确定不同孔隙率下支架的力学性能大小。压缩强度是在压缩实验中,试样破裂前所承受的最大压缩应力,压缩弹性模量是材料在弹性变形阶段所受压缩应力与应变之比。图6和图7分别为不同孔隙率的正四面体SIL多孔支架的压缩强度和压缩模量。由图6和图7可知,随着孔隙率的增加,支架的压缩强度逐渐减小,压缩弹性模量也随之降低。

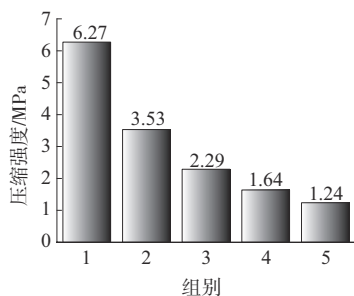


图6 PLA多孔支架压缩强度

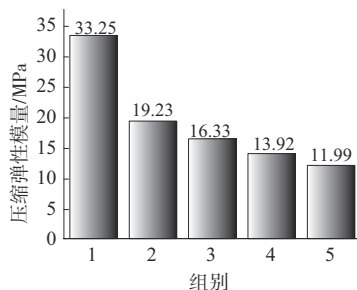


图7 PLA多孔支架压缩弹性模量

关节软骨是一种多组分单元,主要由三种组织成分组成:关节软骨、钙化软骨以及软骨下骨,在压缩变形中,相较于软骨,软骨下骨具有较强的压缩强度,具备与松质骨相近的力学强度,起主要的承重作用,其压缩强度为4~12 MPa,压缩弹性模量为27~46 MPa,制得的PLA支架里组1的力学性能(压缩强度为6.27MPa,压缩弹性模量为33.25MPa)与其最为匹配。

3 结论

采用FDM 3D打印方法,制备了一种新型的正四面体自锁多孔支架,探究了支架的表面形态、孔隙率和力学性能,得到以下结论:

(1) 制备得到的支架基本还原了设计图,整个支架表现为逐层结构,能观察到比较清晰的正四面体单元,由于现有的打印机和打印工艺的限制,对于这种孔洞结构比较复杂的多孔支架,达不到对设计图的完全还原,但是相比较于传统的支架制备方法,如静电纺丝、冷冻干燥等,已经可以很好实现对支架孔的形状和大小的控制。

(2) 3D打印得到的支架孔隙率为71.25%, 76.75%, 80.47%, 82.48%, 83.28%, 保持了比较高的孔隙率,有利于支架的轻量化、物质交换和细胞生长。

(3) 支架的孔隙率不会对其水接触角产生影响,但会提高其吸水性能,从而促进细胞的增殖分化。

(4) 支架具有良好的承重耐性和减震吸能效果,并且多层结构可防止整体性破坏。通过调整支架的孔隙率,可以对其力学性能进行控制,使其与人骨的力学性能更加匹配,随着孔隙率的增加,支架的压缩强度和压缩弹性模量逐渐降低。5组不同孔隙率支架的压缩强度分别为6.27, 3.53, 2.29, 1.64, 1.24 MPa, 压缩弹性模量分别为33.25, 19.23, 16.33, 13.92, 11.99 MPa。其中在制备得到的5组支架中,组号为1的支架的力学性能与人体软骨下骨的力学性能较为符合,能够有效地缓解植入物与人骨的应力遮挡。

参考文献

- [1] Ma Zhiyong, Wang Qifan, Xie Wenjia, et al. Performance of 3D printed PCL/PLGA/HA biological bone tissue engineering scaffold [J]. Polymer Composites, 2021, 42(7): 3 593-3 602.
- [2] 孙海波, 徐淑波, 张森, 等. SLM成形不同孔隙结构骨支架的仿真与实验研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14(2): 123-128.
Sun Haibo, Xu Shubo, Zhang Sen, et al. Simulation and experimen-

- tal study of bone scaffolds with different pore structures formed by SLM[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2022, 14(2): 123–128.
- [3] Dou Yichen, Huang Jinhui, Xia Xue, et al. A hierarchical scaffold with a highly pore-interconnective 3D printed PLGA/n-HA framework and an extracellular matrix like gelatin network filler for bone regeneration[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2021, 9:4 488–4 501.
- [4] Chen Yujie, Xu Wei, Shafiq Muhammad, et al. Three-dimensional porous gas-foamed electrospun nanofiber scaffold for cartilage regeneration[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 603:94–109.
- [5] Guo Yu, Xie Kai, Jiang Wenbo, et al. In vitro and in vivo study of 3D-printed porous tantalum scaffolds for repairing bone defects[J]. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2019, 5(2):1 123–1 133.
- [6] Zhou Xiaqing, Zhou Gan, Junka Radoslaw, et al. Fabrication of polylactic acid (PLA)-based porous scaffold through the combination of traditional bio-fabrication and 3D printing technology for bone regeneration[J]. *Colloids and Surfaces B-Biointerfaces*, 2021, 197. DOI:10.1016/j.colsurfb.2020.111420.
- [7] Shadman Beheshteh, Asadi Asadolah, Zahri Saber, et al. Design of PLGA-based scaffolds for developing and differentiating mesenchymal stem cells (MSCs) [J]. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2021, 11(5):12 732–12 742.
- [8] 任泽宇,姜宏,石永芳. 3D打印PLLA/HA复合组织工程骨支架及性能表征[J]. *燕山大学学报*, 2022, 46(2):116–122.
- Ren Zeyu, Jiang Hong, Shi Yongfang. Performance characterization of 3D printed PLLA/HA composite tissue engineering bone scaffold[J]. *Journal of Yanshan University*, 2022, 46(2):116–122.
- [9] 李耀明,姜宏,石永芳. 壳聚糖/聚乳酸/羟基磷灰石/聚乙烯醇复合材料骨支架的制备及表征[J]. *中国组织工程研究*, 2022, 26(18):2 888–2 893.
- Li Yaoming, Jiang Hong, Shi Yongfang. Preparation and characterization of chitosan/polylactic acid/hydroxyapatite/polyvinyl alcohol composite bone scaffold[J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2022, 26(18):2 888–2 893.
- [10] Deng Fuyuan, Liu Linlin, Li Zhong, et al. 3D printed Ti6Al4 V bone scaffolds with different pore structure effects on bone ingrowth[J]. *Journal of Biological Engineering*, 2021, 15(1). DOI: 10.1186/s13036-021-00255-8.
- [11] Ranjith Kumar Kankala, Xu Xiaoming, Liu Chenguang, et al. 3D-printing of microfibrillar porous scaffolds based on hybrid approaches for bone tissue engineering[J]. *Polymers*, 2018, 10(7). DOI:10.3390/polym10070807.
- [12] Liu Chenguang, Zeng Yuting, Ranjith Kumar Kankala, et al. Characterization and preliminary biological evaluation of 3D-printed porous scaffolds for engineering bone tissues[J]. *Materials*, 2018, 11(10). DOI:10.3390/ma11101832.
- [13] 王波群,揭晓华. 基于活塞挤出式3D打印制备PLA/PCL生物支架的研究[J]. *合成树脂及塑料*, 2019, 36(2):72–76.
- Wang Boqun, Jie Xiaohua. Preparation of PLA/PCL bio-scaffold based on piston extrusion 3D printing[J]. *China Synthetic Resin and Plastics*, 2019, 36(2):72–76.
- [14] Arjunan Arun, Demetriou Marios, Baroutaji Ahmad, et al. Mechanical performance of highly permeable laser melted Ti6Al4 V bone scaffolds[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, 10(7). DOI:10.3390/polym 10070807.
- [15] Bael S. Van, Chai Y. C, S. Truscetto, et al. The effect of pore geometry on the in vitro biological behavior of human periosteum-derived cells seeded on selective laser-melted Ti6Al4 V bone scaffolds[J]. *ACTA Biomaterialia*, 2012, 8(7):2 824–2 834.
- [16] Kanhed Satish, Awasthi Shikha, Goel Sneha, et al. Porosity distribution affecting mechanical and biological behaviour of hydroxyapatite bioceramic composites[J]. *Ceramics International*, 2013, 2 (1):186–194.
- [17] 康建峰,王玲,孙畅宁,等. 面向3D打印可变模量金属假体的微结构设计[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(5):175–180.
- Kang Jianfeng, Wang Ling, Sun Changning, et al. Microstructure design for 3D printed metal prosthesis of adjustable modulus[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(5):175–180.
- [18] Blake Hussey, Peyman Nikaeen, Matthew D Dixon, et al. Lightweight/defect-tolerant topologically self-interlocking polymeric structure by fused deposition modeling[J]. *Composites Part B-Engineering*, 2020, 183. DOI:10.1016/j.compositesb.2019.107700.
- [19] Schaare S, Dyskin A V, Estrin Y, et al. Point loading of assemblies of interlocked cube-shaped elements[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2008, 46(12):1 228–1 238.
- [20] Feng Yuezhong, Siegmund Thomas, Habtour Ed, et al. Impact mechanics of topologically interlocked material assemblies[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 7:140–149.
- [21] Tang Xiongfeng, Qin Yanguo, Xu Xinyu, et al. Fabrication and in vitro evaluation of 3D printed porous polyetherimide scaffolds for bone tissue engineering[J]. *BioMed Research International*, 2019, 2019. DOI:10.1155/2019/2076138.