

冰模板法多级孔隙结构陶瓷 3D 打印机设计

董俊卓 齐俊 李子昂 张卓 张曼汝 张耿*

西安工业大学机电工程学院, 中国·陕西 西安 710021

摘要: 针对骨缺损修复领域, 多级孔隙结构陶瓷材料因生物相容性佳而备受瞩目, 但现有 3D 打印技术难以同步制造宏微多级孔隙结构。本项目结合冷冻干燥法与 3D 打印技术, 设计了一种能构建宏微尺度冰模板的 3D 打印机。该打印机集成了铺料、冷冻、铣削宏观大孔、水凝胶注射及计算机控制系统, 实现了个性化多级孔隙结构的定制, 自主控制整个打印流程, 并完成了关键部件的选型与计算。此项目为个性化骨缺损修复中多孔陶瓷支架的快速成型提供了一种解决途径。

关键词: 多级孔隙结构; 骨缺损; 3D 打印; 多孔陶瓷; 冷冻干燥

Design of a Ceramic 3D Printer with Multi-level Porous Structure Using Ice Template Method

Junzhuo Dong Jun Qi Ziang Li Zhuo Zhang Manru Zhang Geng Zhang*

School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi, 710021, China

Abstract: In the field of bone defect repair, multi-level porous ceramic materials have garnered significant attention due to their excellent biocompatibility. However, existing 3D printing technologies face challenges in simultaneously producing macro- and micro-scale porous structures. This project combines freeze-drying and 3D printing technologies to design a 3D printer capable of constructing macro- and micro-scale ice templates. The printer integrates material spreading, freezing, milling of macro-scale pores, hydrogel injection, and a computer control system, enabling the customization of personalized multi-level porous structures. It autonomously controls the entire printing process and completes the selection and calculation of key components. This project provides a solution for the rapid prototyping of porous ceramic scaffolds in personalized bone defect repair.

Keywords: multilevel pore structure; bone defects; 3D printing; porous ceramics; freeze drying

0 前言

骨缺损是骨科的一个重要难题^[1], 临床病例骨缺损情况具有显著的特异性和不规则特征, 绝大多数需要采用定制化的支架进行治疗, 并且材料需要具有宏微两级的孔隙结构。宏观孔径 ($100\sim 400\mu\text{m}$) 可以用于骨组织再生以及细胞和体液在内自由流通; 微观孔径 ($< 100\mu\text{m}$) 可以改善细胞代谢、促进细胞粘附攀爬^[2,3], 也可作为生长因子缓释的载体。目前急需开发出一种可定制外形并实现内部宏微两级孔隙结构可控的 3D 打印设备。

在 3D 打印多孔陶瓷领域, 常见的技术包括基于粉末的激光选区烧结/熔化 (SLS/SLM)^[4]、立体喷墨打印 (3DP)^[5] 以及基于浆料的光固化 (SL)^[6]、分层浆料沉积 (LSD)^[7] 和陶瓷激光烧结 (CLS)^[8] 等。但在成形制造技术层面上, 很难实现更小孔径 (如 $100\mu\text{m}$ 以下) 的 3D 打印; 同时, 制件内部往往存在难以控制的微观尺度孔, 这些孔的形状、尺寸和分布对制件的性能具有重要影响。因此, 为实现这种微孔结构的可控加工, 需在 3D 打印技术中引入材料学科的造孔技术。本研究将冷冻干燥原理与低温铣削技术相结合, 用于获取个性化定制的同时, 实现多级孔隙结构的可控加工。本研究将从结构、工艺性能、成型效果等方面介绍本结构。

1 总体结构设计

图 1 是冰模板法多级孔隙结构陶瓷 3D 打印机采用冷冻干燥法原理与 DIW 陶瓷成型原理相结合, 层叠铺设, 一次完成成品中的一层设计, 应用半导体制冷片完成微孔的实现、使用 0.5mm 铣刀完成大孔的设计并根据需要切割出每层的形状, 最后将设计出的成品从 3D 打印机中取出, 进行冷冻干燥、烧结等步骤得到成品。

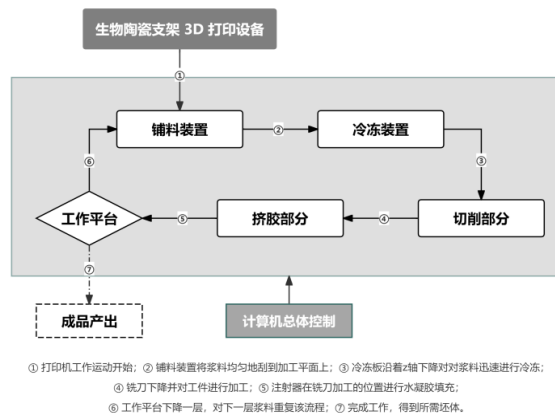


图 1 得到成品工艺流程图

2 主要部件的运动设计

2.1 整体运动方案设计

在本设计中打印机采用经典的三轴运动方案,通过控制铺料模块、冷冻模块、打印平台模块和铣刀模块的运动来实现坯体加工。铺料模块和冷冻模块限制 4 个自由度,可在 x 轴和 z 轴移动,铺料模块在 x 轴移动以完成铺设陶瓷浆料操作,在 z 轴运动防止干扰别的机构运动,冷冻装置在 z 轴运动以完成冻结浆料操作,在 x 轴运动防止干扰别的机构运动;打印机平台原理为层叠铺设,设计可上下移动,并设计凹槽限制陶瓷浆料的流动;铣刀限制 2 个自由度,可在 x、y、z 轴进行移动并在 x 轴转动,在 x 轴转动与注射器进行更换操作,铣刀根据设计要求铣削出宏观大孔,并在每层切割出设计的形状,随后更换为注射器,注射器填充水凝胶在宏观大孔的位置,经过冷冻烧结后变为设计要求中的宏观大孔,铣刀在 x、y、z 轴运动以满足工件设计的需求。打印机工作运动步骤如下。

①铺料装置将浆料均匀地铺到加工平面上。

②铺料结束后,冷冻板沿着 z 轴下降对浆料迅速进行冷冻,冷冻完成后铺料装置和冷冻装置沿 x 轴运动至不影响后面装置运动的地方。

③铣刀下降并沿 x、y、z 轴运动对工件进行加工,加工完成后,沿着规定边缘进行切割运动,切割出本层设计的二维形状。

④铣刀回归原位并沿 x 轴旋转更换为注射器,注射器在铣刀加工的位置进行水凝胶填充。

⑤注射器回归原位并沿 x 轴旋转回铣刀,工作平台下降一层,并进行下一层浆料的铺设—冷冻—切割。

⑥完成工作,得到我们所需坯体。

2.2 打印平台运动设计

在加工工艺中,每层冻结浆料经多级孔隙结构工作完成后,打印平台需下降一层。由于每层的高度都很小,所以对传动机构的要求也比较高。它的基本工作原理是:步进电机带动滚珠丝杆旋转,滚珠丝杆与电机之间用联轴器连接,并利用加工平台和螺帽进行紧固,实现了加工平台的升降运动。其三维模型如图 2 所示。

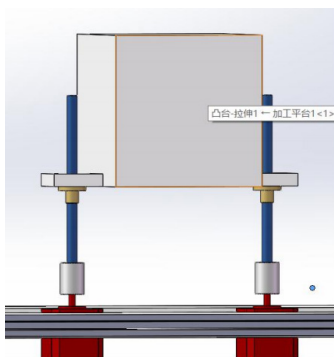


图 2 加工平台运动方式

2.3 铺料、冷冻装置运动设计

铺料与冷冻装置实现铺设浆料于工作平台和冷冻陶瓷浆料以制备微观小孔作用。铺料、冷冻装置使用固定装置装于同一光轴上,两装置统一运动,以此满足活动范围小和不影响后面铣刀的工作的要求,光轴保证装置的运动导向,先进行铺设陶瓷浆料,再进行冷冻陶瓷浆料。其三维模型如图 3 所示。

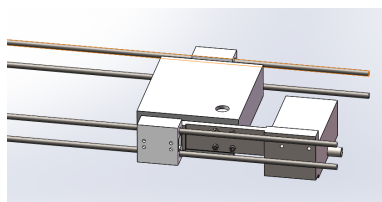


图 3 铺料、冷冻装置连接结构三维图

2.3.1 铺料、冷冻装置 z 轴运动设计

针对铺料、冷冻模块 z 轴的移动设计,选用了滚珠丝杠驱动方案。本发明的具体实现是:采用一种固定机构,将步进电机与打印机的机架相连接,由联轴器将电机的输出轴与滚珠丝杠相连接,再用螺母将两个组件的紧固机构连接起来,实现对电动机反向和正向转动的控制。在丝杠旁边平行安装一根平行的光轴,可以消除径向的压力和引导,并提高结构的稳定性。其三维模型如图 4 所示。

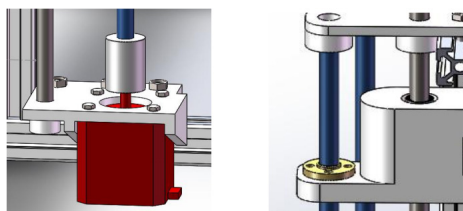


图 4 冷冻、刮料装置 z 轴运动方式三维图

2.3.2 铺料、冷冻装置 x 轴运动设计

关于冷冻、铺料装置 x 轴的移动设计,是由同步轮、同步带、光轴和支座相互协作而完成的。用步进电动机驱动同步皮带,使其旋转,使其沿轴向方向平移。光轴通过该托架,以承受该设备的径向作用力。其三维模型如图 5 所示。

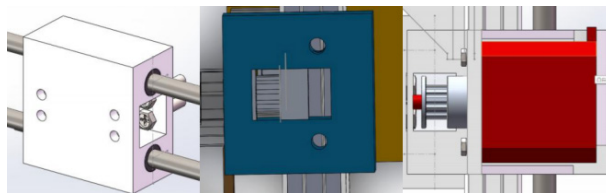


图 5 冷冻、铺料装置 x 轴运动模型

2.4 铣刀、注射器运动设计

使用三个直线导轨实现铣刀和注射器在 x、y、z 三坐标轴上的移动,x、y 轴的运动来设计工件的宏观微孔,z 轴的运动来保证铺料冷冻装置的不冲突运动其三维模型如图 6 所示。

铣刀铣出大孔隙用水凝胶填充,因整体环境处在低温之中,水凝胶会迅速固化,高分子水凝胶经过烧结会转化为气体,从而形成大孔径孔隙结构。

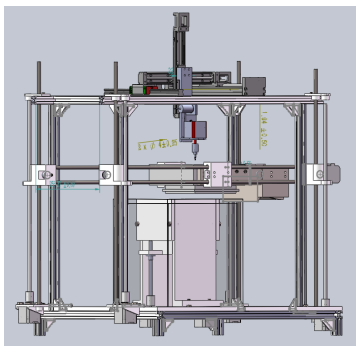


图 6 铣刀注射器运动三维图

如图 7 所示铣刀和注射器共用同一运动装置,运动装置包括三个直线导轨,由控制系统控制、电机驱动其在 x、y、z 三坐标轴上的移动。

铣刀不光在工件表面设计出本层陶瓷浆料大孔的形状,同时对边缘部分进行切割,切割出需要的形状。铣刀的进给量略微大于工作平台的下降量,每层的大冰晶可穿透本层,致使每层大孔隙相连,以此达到设计要求。

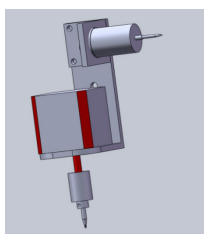


图 7 铣刀、注射器连接三维图

2.5 总体装配

在确定原理与技术方案的的基础上,融合预设的工艺流程,针对各部件的功能需求、材料选择及运动特性进行详细设计后,最终绘制出总体装配图,如图 8 所示。

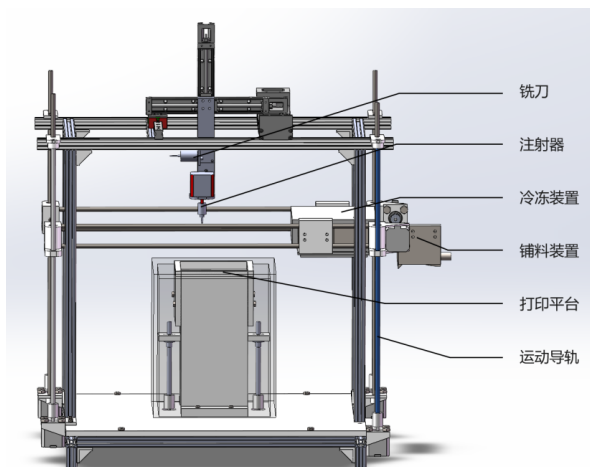


图 8 总体装配图

3 实验结果

基于机构设计原理构建了实验平台,并采用水基陶瓷浆料作为打印介质开展成形实验,所制得的多孔陶瓷部件展示于图 9 中。利用扫描电子显微镜对材料的微观形貌进行深入分析后,结果显示该多孔支架具备从宏观到微观的多级孔隙结构特征。宏孔是通过采用低温铣削技术和低温凝胶挤出工艺精心制造而成,这一过程确保了支架中百微米级别的大孔能够实现精确控制,并且这些大孔在层内与层间均形成了良好的互连通道。微观孔隙结构则是通过精细的冷冻工艺来调控,成功实现了对百微米以下次级孔隙的精确构造。这些微观孔隙呈现出一种类似自然生长的片层状结构,有利于细胞的附着和攀爬。

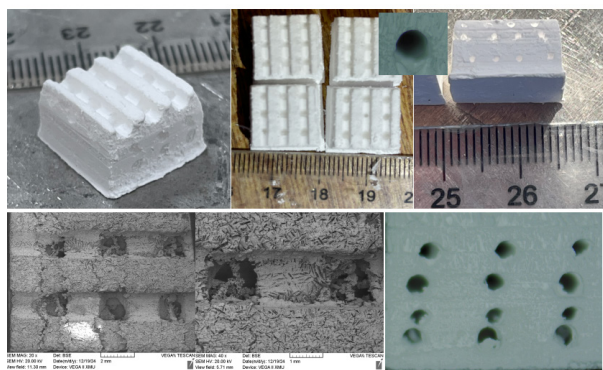


图 9 宏微多级孔隙结构

4 结语

论文根据陶瓷冻结浆料的分层实体制造法制造多级孔隙陶瓷,针对刮料、冻结、铣削、凝胶挤出等功能,进行了整体机械结构设计,通过对比完成了各零部件的选型与计算,并对机械结构的运动进行了分析,最终通过所搭建的实验平台开展实验,制备出多级孔隙结构陶瓷支架,为骨缺损治疗中高性能生物支架的 3D 打印提供了一种有效的解决途径。

参考文献:

- [1] 李涤尘,杨春成,康健峰,等.大尺寸个性化PEEK植入物精准设计与控性定制研究[J].机械工程学报,2018,54(23):135-139.
- [2] 严宁,侯铁胜.材料孔隙结构对骨长入的影响[J].中国生物医学工程学报,2008,27(4):4.
- [3] Yang H J, Hwang P J, Lee S H. A study on shrinkage compensation of the SLS process by using the Taguchi method[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2002,42(11):1203-1212.
- [4] P W Wang, R L Yu, R Tan, et al. Preparation of coated sand for selective laser sintering and optimization of baking process of sand moulds[J]. China Foundry,2023(20):519-525.
- [5] T A Le Néel, P Mognol, J Y Hascoët. A review on additive manufacturing of sand molds by binder jetting and selective laser sintering[J]. Rapid Prototyping J,2018(24):1355-2546.

[6] Lu Z L, Cao J W, Bai S Z, et al. Microstructure and mechanical properties of TiAl-based composites prepared by Stereolithography and gelcasting technologies[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2015(633):280-287.

[7] Tian X, Li D, Heinrich J G. Rapid prototyping of porcelain products by layer - wise slurry deposition (LSD) and direct laser sintering[J]. Rapid Prototyping Journal,2012,18(5):362-373.

[8] Yen H C, Tang H H. Study on direct fabrication of ceramic shell mold with slurry-based ceramic laser fusion and ceramic laser sintering[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2012,60(9-12):1009-1015.

作者简介：董俊卓（2003-），男，中国陕西渭南人，在读本科生，从事 3D 打印研究。

通讯作者：张耿（1987-），男，中国陕西咸阳人，博士，副教授，从事先进制造研究。