

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.09.006

基于 MAM 和 PAM 的多喷头 3D 打印系统^{*}

陈鹏华, 张祥林^{*}, 陈志超, 李文超, 石磊, 周奎
(华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北武汉 430074)

摘要:针对生物组织工程中多组分生物模型的三维打印问题,对电机挤出沉积式喷头、气动式微滴喷射式喷头、多材质模型路径规划及多喷头协调控制等方面进行了研究,提出了基于 MAM 和 PAM 的多喷头 3D 打印系统及多喷头协调控制方法,优化了 PAM 打印系统以提高系统打印精度,并改进了路径规划方法从而满足了多材质模型打印;最后利用多材质模型的打印实验对该系统的可行性进行了测试。研究结果表明:多喷头 3D 打印系统实现了多喷头之间的协调控制,实现了多材质复杂模型的打印;同时 MAM 和 PAM 喷头打印精度均满足了生物组织工程的需求,为实现高仿生结构的打印奠定了良好的基础。

关键词:多喷头;电机挤出沉积技术;气动式微滴喷射技术;3D 打印

中图分类号:TH164

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)09-0981-06

Multi-nozzle system based on MAM and PAM for multi-material dispensing

CHEN Peng-hua, ZHANG Xiang-lin, CHEN Zhi-chao, LI Wen-chao, SHI Lei, ZHOU Kui
(School of Material Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at solving the printing problem of multi-component model in biological tissue engineering, the MAM system, the PAM system, the path planning for multi-material model and the coordinated control of multi-nozzle were investigated. A multi-nozzle 3D printing system based on MAM and PAM was proposed. A method was presented to cooperatively control multi-nozzle. The PAM system was optimized to improve printing accuracy, and the path planning was improved to meet multi-material printing. Finally, the feasibility of the system was verified by printing multi-material model. The results indicate that the multi-nozzle 3D printing system can print the complex multi-material model by improving the path planning method, which realize the coordination control of multi-nozzle, and the printing accuracy of MAM and PAM satisfy requirements of the tissue engineering. At last, the system lays the good foundation for printing highly bionic structure.

Key words: multi-nozzle; motor assisted microsyringe (MAM); pressure assisted microsyringe (PAM); 3D printing

0 引言

近年来,3D 打印受到全球各行各业的广泛关注,生物 3D 打印又是 3D 打印技术研究最前沿的领域^[1],其中通过 3D 打印实现组织的再生修复一直是近十年来的研究热点和重点。实现组织的再生修复关键就是打印出高仿生预构体^[2],而高仿生预构体其本身存在

以下复杂性^[3]:(1)结构的复杂性和多尺度(μm - mm)耦合;(2)成分的复杂性和梯度渐变;(3)功能的复杂性和高仿生。这使目前生物 3D 打印仍存在很大的困难。

而仅仅依靠单喷头打印系统更难满足生物 3D 打印的需求。目前,国内外在多喷头生物 3D 打印领域的研究日益活跃^[4]。例如,Utrecht University 的 SCHUURMAN W 团队^[5]和清华大学的王小红团队^[6]

收稿日期:2016-12-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(81371939;31270150)

作者简介:陈鹏华(1994-),男,安徽六安人,硕士研究生,主要从事生物 3D 打印设备方面的研究和开发工作。E-mail:luye@hust.edu.cn

通信联系人:张祥林,男,教授,博士生导师。E-mail:hust_zxl@mail.hust.edu.cn

分别以低温沉积多喷头 3D 打印系统实现了多种水凝胶的混合打印;HUTMACHER D W^[7]采用 3 喷头打印系统制备了用于修复软骨的 3 层水凝胶结构;韩国 CHO D W 小组^[8]采用混合多喷头 3D 系统进行连续出丝,实现了包含弹性软骨和脂肪组织的外耳的制备。虽然这些研究都实现了多喷头的同时打印,但是这些打印系统无法实现性质差异很大的材料的混合打印,即这些研究尚不能用于“软硬结合”(硬:基质材料,软:细胞、生长因子等)的骨组织植入体的制备。因此,开发适合于骨组织工程 3D 打印的设备具有深远意义。

本研究设计的多喷头生物 3D 打印设备,它的最终目标是为了满足骨组织工程 3D 打印的需求—软硬材料的协调打印,实现高仿生骨组织预构体的打印,能够在结构和功能上代替自体骨满足骨移植的要求。

1 多喷头 3D 打印系统

多喷头 3D 打印系统主要由打印系统、三维运动平台、控制系统组成,如图 1 所示。

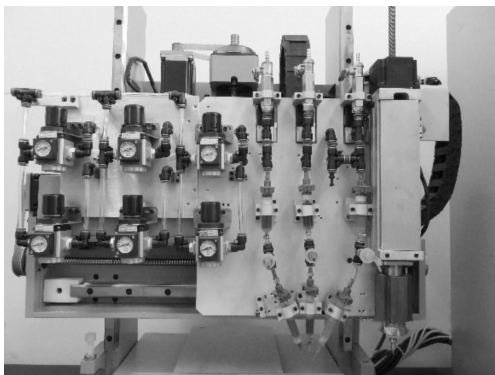


图 1 多喷头 3D 打印设备

打印系统分为 MAM 打印系统和 PAM 打印系统,通过控制系统协调两者进行混合打印,三维运动负责实现打印头的三维运动完成三维打印。下面本研究对 MAM、PAM 打印系统和三维运动平台进行简单介绍。

1.1 MAM 打印系统

MAM 打印系统作为 3D 打印主要成形技术之一,具有打印材料粘度高,粘度范围广,可控性好、结构简单等特点,主要以连续“微丝”形式挤出成型,适合用于高粘度支撑材料的成形。

MAM 喷头是通过电机推动活塞进行挤出沉积,由丝杆结构将电机扭矩转化为挤出力,从而推动活塞挤出成型材料。MAM 喷头如图 2 所示。

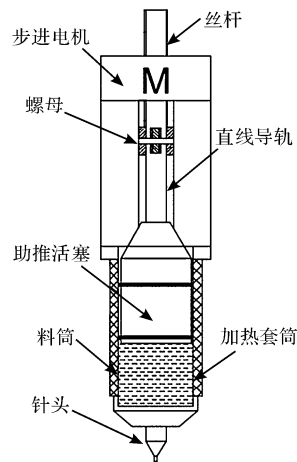


图 2 MAM 喷头

步进电机的旋转运动通过丝杆结构转化为直线运动,从而推动活塞运动。为了保证丝杆活塞运动的稳定性,笔者将丝杆活塞固定于直线导轨上,使活塞丝杆料筒保持同心。活塞与料筒之间通过密封圈进行密封而不是间隙配合,防止材料进入缝隙中导致活塞卡死。在料筒外侧包有加热套筒,从而能够对材料进行直接加热,实现温敏材料的打印,加热温度范围为 4℃ ~ 300℃,温度范围大,适用于各种高低温及温敏材料的打印。

本研究中 MAM 电机采用直线丝杆步进电机,步进电机最大推力和扭矩关系为:

$$T = \frac{F_{\text{推}} L}{2 \times \pi \times 0.9} \quad (1)$$

MAM 喷头简化模型如图 3 所示。

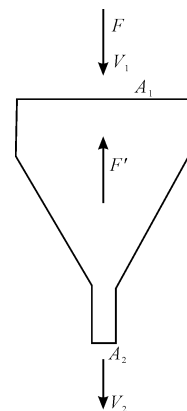


图 3 喷头简化模型

当 MAM 处于工作状态时,料筒内材料处于压缩不可变形状态且材料内各处速度一致,根据针头和料筒直径以及挤出最大速度可得出喷嘴处所受力:

$$F' = \left(\frac{\rho V_2^2}{2A_1} \right) (A_1 - A_2)^2 \quad (2)$$

式中: ρ —材料密度。

从而计算出实际中作用在材料上的力 F 为:

$$F = F_{\text{推}} - F' \tag{3}$$

材料粘度 η 与实际推力 F 之间的关系为:

$$\eta = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{d_u}{d_r}} \tag{4}$$

式中: d_u/d_r —剪切速率,为料筒内材料流动速率,即挤出速度; A —料筒横截面积。

通过以上计算出相应粘度下所需要的电机扭矩,匹配相对应的电机型号,本研究中电机型号为海顿直线步进电机,最大扭矩 $T = 3.4 \text{ Nm}$,丝杆直径 $D = 10 \text{ mm}$,导程 $L = 4 \text{ mm}$,最大推力 $F = 4\,804.2 \text{ N}$ 。

控制系统由硬件和控制程序构成,通过控制步进电机来实现对 MAM 喷头挤出速度的控制。

1.2 PAM 打印系统

目前,在细胞打印中,气动打印成为了主要研究方向,其材料适用性范围较大,稳定性较好,结构简单,细胞打印成活率高,因此本研究中采用 PAM 实现 D-O-D 式打印,用于生物活性材料的打印,使支架能够在功能和成分上仿生。

PAM 打印系统为气动打印系统,气路系统是其中最为主要的组成部分。

本研究中气路系统结构如图 4 所示。

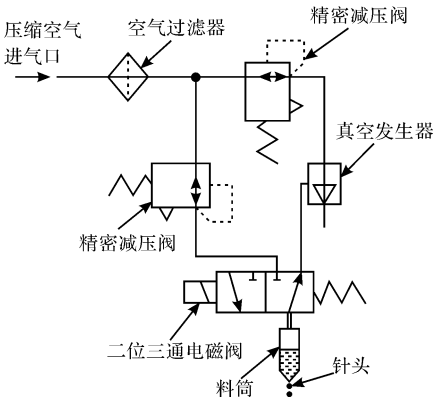


图 4 PAM 喷头系统

该系统通过空气压缩机产生压缩空气,由空气过滤器($0.2 \mu\text{m}$)将压缩空气进行干燥,去掉其中的大颗粒、水分以及细菌,保证气体的干燥无菌。PAM 打印的材料为低粘度材料,在非工作状态下料筒中需有一定的背压,防止材料在重力下从针头处流出。本研究采用双气路,一路为正压,一路为负压,两路均采用精密减压阀来进行气压调节。负压气路中由真空发生器产生负压。正负压气路通过两位三通电磁阀进行切换,保证料筒仅受到单一气压影响。

PAM 打印精度主要受气体压力和打印频率影响,另外针头直径及针头类型对精度也有较大影响。本研究中采用自制玻璃针头减小针头对打印精度的影响。在研究打印频率过程中,采用丹麦 B&K 8103 水听器监测料筒内压力变化规律,对于不同的压力大小,其压力波形图一致。当接通时间小于 1.7 ms 时,压力峰值无法达到设定压力,而当电磁阀接通时间大于 1.7 ms 时,压力会在达到峰值后保持。因此为了打印出最小液滴,将电磁阀接通时间均设为 1.7 ms 。对于气体压力对液滴大小的影响,通过调压阀调节压力大小来测试相应材料的最小打印压力。本研究中打印材料粘度在 100 mPas ,采用 $110 \mu\text{m}$ 孔径的玻璃针头,打印压力为 35 kPa ,电磁阀接通时间为 1.7 ms (打印频率 588 Hz),打印的液滴直径为 $200 \mu\text{m}$ 左右。当电磁阀接通时间为 1.7 ms 时,得到压力波形变化如图 5 所示。

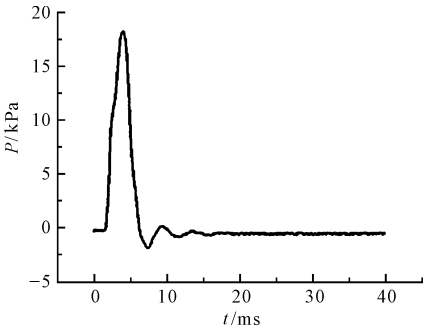


图 5 气压变化波形图(电磁阀接通时间 1.7 ms ,压力 20 kPa)

1.3 三维运动平台

三维运动平台是多喷头 3D 打印系统的重要组成部分,它的主要作用是支撑 MAM 和 PAM 打印系统,完成三维运动,实现多喷头 3D 打印。

2 控制系统

经分析,多喷头 3D 打印设备的控制主要是多喷头打印之间的协调控制,相比于单喷头打印系统,多喷头打印系统在路径规划及打印控制上更为复杂。

2.1 路径规划

本研究在 3D 打印中通过对三维模型进行切片、路径规划处理,得到机器可识别的代码,控制三维运动平台的运动。对于多喷头打印系统来说,其打印的模型为多材质模型,路径规划后得到的路径文件也需包括各喷头的打印信息。

本研究设计了 4 喷头系统,为了保证各喷头的打印控制,将路径文件中的点坐标设计为 $(X、Y、P1、P2、P3)$, $X、Y$ 为运动位置信息,与单喷头打印系统一致, $P1、P2、$

$P3$ 为 PAM 喷头控制信息,由于 PAM 在本研究中仅采用 D-O-D 式打印方式, $P1$ 、 $P2$ 、 $P3$ 采用 1/0 来控制,1 为工作状态,喷头打印;0 为非工作状态,喷头关闭。

在产生的路径文件中,需包含喷头切换信息。四喷头之间的相互切换是完成多喷头打印的关键,本研究中将四喷头之间的相对位置确定,将相对位置参数输入控制程序,使喷头切换过程中加入自动加入位置补偿,实现喷头之间的切换。切换过程中出现的空行程,通过提高空行程时运动平台的运动速度减少空行程时间,提高效率。

通过以上设计,最终得到的路径文件信息格式为:

0 0 0 0 0

10 0 0 0 0

10 10 0 0 0

0 10 0 0 0

0 0 0 0 0 //该路径为 MAM 连续挤出打印出三维支架路径

301 //切换至一号 PAM

5 5 1 0 0 //在(5,5)处一号 PAM 打印一次

302 //切换至二号 PAM

5 5 0 1 0

303 //切换至三号 PAM

5 5 0 0 1

300 //打印完成

2.2 协调控制

本研究控制程序由 PC 端控制程序和底层 NextMoveES 运动控制卡组成,两者通过 RS232 进行信息传递。PC 端控制程序主要完成参数设定和路径文件加载,NextMoveES 运动控制卡根据 PC 端传输的信息控制硬件系统的运动,另外运动控制卡采集硬件系统返回的信息并传递给 PC 端控制程序。

系统总框图如图 6 所示。

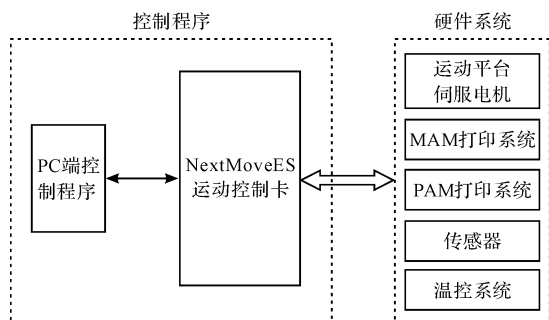


图 6 系统总框图

PC 端界面软件主要完成路径文件加载、参数设定以及平台手动控制,主要包含了 PAM 打印测试、系统

打印参数设置以及手动操作 3 部分。PAM 打印测试主要进行 PAM 液滴打印测试,调整 PAM 打印时的压力以及频率;打印参数设置主要设定喷头间的相对位置、支架层高、MAM 挤出速度;手动操作主要完成路径文件的加载,实现对设备的手动控制。

其控制程序界面如图 7 所示。

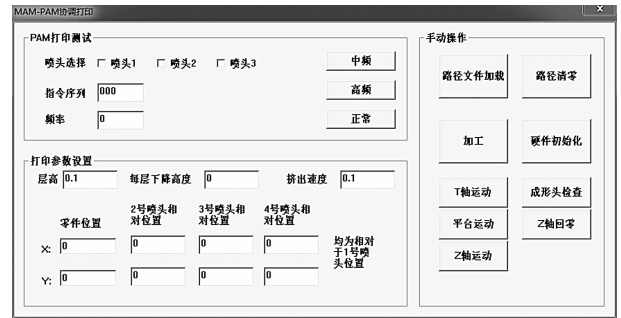


图 7 界面控制程序

底层控制卡 NextMoveES 控制硬件系统,控制各部分协调运动。NextMoveES 根据 PC 端传输的运动信息,控制平台伺服电机工作完成设定运动,根据打印信息控制 MAM 和 PAM 打印系统进行打印,协调两者实现三维支架的打印。另外,硬件系统中的反馈信号由 NextMoveES 接收处理后反馈给 PC 端。在打印过程中,控制程序根据电机反馈信号协调平台运动与 PAM 打印,确保 PAM 喷头在到达设定位置后启动打印,防止在运动过程中进行打印或未到达预定位置即打印。

本研究中系统协调控制流程如图 8 所示。

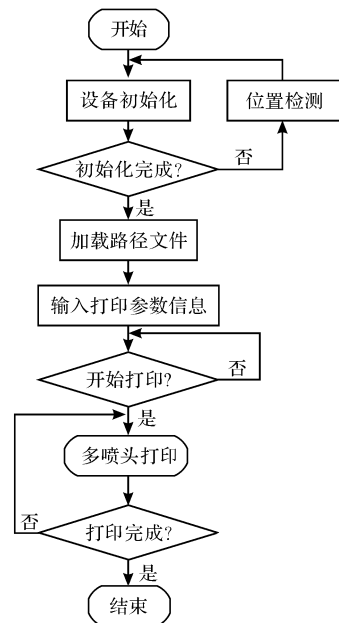


图 8 控制流程图

笔者通过 PC 端控制程序和底层 NextMoveES 运动控制卡的协调控制,完成整个系统的协调打印。

3 实验及结果分析

为研究多喷头打印系统可行性,本研究用以进行系统测试的简易模型如图 9 所示。

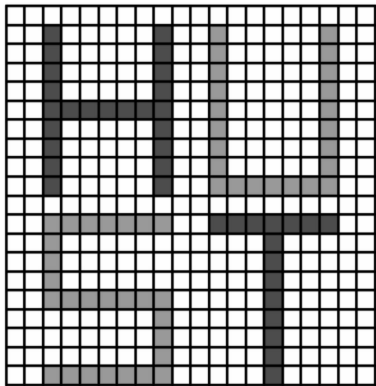


图9 多组分打印模型

该模型为 100 mm × 100 mm,丝间距为 5 mm,高度 1 mm。采用羟基磷灰石作为基质材料,采用红、绿两种有颜色的水作为低粘度成型材料。液滴尺寸大小为 1 mm,MAM 丝径为1 mm。打印参数如表 1 所示。

表 1 打印参数表

参数类型	参数名称	参数指标
PAM 打印参数	压力/kPa	100
	频率/Hz	100
	喷嘴直径/ μm	150(自制玻璃针头)
	挤出速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	0.05(活塞移动速度)
MAM 打印参数	喷嘴直径/ μm	500
	层高/mm	1
运动平台参数	运动速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	20

其打印结果如图 10 所示。

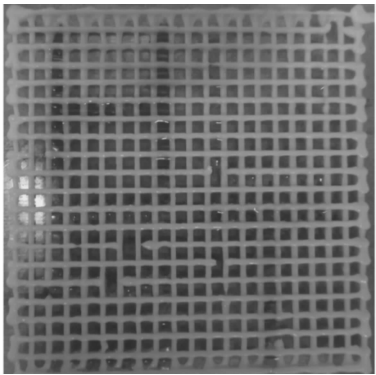


图 10 成型支架

由图 10 中可看出,打印结果与模型一致,证明该系统的可行性。

本研究中设计的多喷头打印系统在 PAM 精度上达到了较高水准,最小精度可达到 200 μm ,相比于喷墨打印相比精度较差,精度稍低于微阀式喷头(尺寸可达 150 μm 左右),但是 PAM 由于其压力小,材料在 PAM 系统中所受外界干扰少,对生物活性材料的打印更有优势,更符合与生物组织工程的打印需求,同时该成形精度完全符合生物组织工程的要求;MAM 挤出成型丝直径操作性较大,为保证支架具有较高的支撑强度,一般成型丝直径在 500 μm 左右,可根据材料的粘度来进行适当的调节;二者的协调打印能够满足骨组织工程在打印中对“软硬”材料打印的需求,实现二者的有机结合。

综上,该系统在成形精度上完全符合生物 3D 打印的需要,同时在多材质打印上实现了“软硬”材料的协调打印,将生物活性材料(细胞、生长因子等)与基质材料协调打印,满足骨组织工程具有较高强度并具有生物活性的需求。

5 结束语

本研究介绍了基于 MAM 和 PAM 的多喷头打印系统,该打印系统可以使用多种喷头打印不同性能的材质,实现了“软硬”材料的协调打印,为实现组织工程中高仿生结构的打印提供了技术上的可能性。通常,单喷头打印系统(MAM/PAM 等)仅打印单一性能的材料,而对于同一类型的多喷头打印系统无法实现材料性能差异较大的多材质打印,本研究中提出的多喷头打印系统解决了上述的难点,设计了相应的协调打印控制系统,同时提出了 PAM 打印系统使其打印精度满足打印需求。

但是本研究只是初步进行了多材质的打印测试,对于实际打印过程中由于材料性能差异较大导致的打印协调问题并没有做出具体的研究,下一步可研究打印过程中不同材料之间的协调问题。

(下转第 992 页)

本文引用格式:

陈鹏华,张祥林,陈志超,等. 基于 MAM 和 PAM 的多喷头 3D 打印系统[J]. 机电工程,2017,34(9):981-985,992.
CHEN Peng-hua, ZHANG Xiang-lin, CHEN Zhi-chao, et al. Multi-nozzle system based on MAM and PAM for multi-material dispensing[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(9):981-985,992.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>