

基于 WOA 的低温 3D 打印系统 模糊 PID 温度控制策略研究

张跃瀚^{1,2}, 胡嘉杰^{1,2}, 卜方鑫^{1,2}, 朱莉娅^{1,2}

(1.南京师范大学南瑞电气与自动化学院,江苏 南京 210023)

(2.南京师范大学江苏省三维打印装备与制造重点实验室,江苏 南京 210023)

[摘要] 低温 3D 打印技术在组织修复中应用广泛,相较传统常温 3D 打印技术,打印的支架有成型精度高、结构稳定、孔隙率高的优点。但目前低温 3D 打印以成型平台制冷为主,针对大尺寸的凝胶类生物材料成型仍存在困难。设计了一种基于鲸鱼优先算法(whale optimization algorithm, WOA)的低温 3D 打印系统模糊 PID 温度控制策略,可以实现整个打印腔室内低温环境稳定可控。首先,建立了半导体制冷器温度控制系统的模型。然后,利用 MATLAB/Simulink 对传统 PID、模糊 PID、以及基于 WOA 的模糊 PID 方法控温性能进行仿真,相较传统及模糊 PID 控制,基于 WOA 的模糊 PID 控制器相较传统 PID 控制器,上升时间缩短了 22 s,调节时间缩短了 249 s,超调量减小了 4.1%。最后,搭建基于 WOA 的模糊 PID 温度控制策略的低温 3D 打印系统,完成常温与低温打印对比实验。实验结果表明,低温 3D 打印系统打印的水凝胶支架成型精度高且结构稳定,有良好的多孔微观结构,有利于组织修复与再生。

[关键词] 低温 3D 打印, 鲸鱼优先算法, 水凝胶支架, 多孔微观结构, 生物修复

[中图分类号] TP205 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2025)01-0001-11

Research on Fuzzy PID Temperature Control Strategy for Low-Temperature 3D Printing Systems Based on Whale Optimization Algorithm

Zhang Yuehan^{1,2}, Hu Jiajie^{1,2}, Bu Fangxin^{1,2}, Zhu Liya^{1,2}

(1.School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. Jiangsu Key Laboratory of 3D Printing Equipment and Manufacturing, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Low-temperature 3D printing technology is widely used in tissue repair. Compared with traditional room-temperature 3D printing, scaffolds printed by low-temperature 3D printing technology exhibit advantages such as high molding precision, structural stability, and high porosity. However, current low-temperature 3D printing only controls the temperature on the forming platform, leading to difficulty in formation of large-scale gel-like biomaterials. Therefore, this paper designs a fuzzy PID temperature control strategy based on the whale optimization algorithm (WOA) for low-temperature 3D printing systems, enabling stable and controllable low-temperature environments within the entire printing chamber. Firstly, a model of the semiconductor cooler temperature control system is established. Then, simulations of traditional PID, fuzzy PID, and fuzzy PID based on the WOA are conducted to assess temperature control performance using MATLAB/Simulink software. Compared with traditional and fuzzy PID control methods, the fuzzy PID controller based on the WOA reduces the temperature rise time by 22 seconds, shortens the settling time by 249 seconds, and decreases overshoot by 4.1%. Finally, a low-temperature 3D printing system employing the fuzzy PID temperature control strategy based on the WOA is constructed, and comparative experiments between room-temperature and low-temperature printing are performed. According to the experimental results, the low-temperature 3D printing system designed in this study exhibits high precision and structural stability in printing hydrogel scaffolds. Meanwhile, porous microstructures are formed during printing process, which will improve tissue repair and regeneration.

Key words: low-temperature 3D printing, whale optimization algorithm, hydrogel scaffold, porous microstructure, biological repair

收稿日期: 2024-08-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目(32171358).

通讯作者: 朱莉娅, 博士, 副教授, 研究方向: 生物打印技术、可穿戴传感器、微型能量收集. E-mail: 61193@njnu.edu.cn

3D 打印技术可以实现个性化制造,制造复杂结构的支架^[1]. 然而,传统 3D 打印技术仍存在精度、稳定性不足等问题,且打印温度会影响生物材料活性^[2]. 近年来,低温 3D 打印技术^[3]越来越多地用于生物组织重建与修复领域. 相较于传统 3D 打印技术,低温 3D 打印可以实现纳米到微米尺度结构的高精度成型^[4],再经冷冻干燥处理后可于材料内部形成微孔结构^[5]. 因此,低温 3D 打印技术有利于构建具有良好微观结构、生物相容性、生物活性的支架^[6],在提高成型精度的同时提升材料或结构的力学性能^[7],为细胞营养物质交换和扩散提供了通道^[8].

优化温度控制算法有利于进一步提高温度控制精度、缩短响应时间及提升系统抗干扰能力^[9]. 谢竹逵等^[10]在粒子群模糊 PID 的基础上,将粒子群算法的惯性因子进行非线性余弦递减改进,学习因子根据迭代次数进行正弦形式的变化,将改进的粒子群算法对模糊控制器中的比例因子进行优化,去缓解模糊控制依赖专家经验的问题. Li 等^[11]为了提高粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)的收敛速度和效率,引入了圆映射等技术,将优化后的粒子群算法用于颗粒格栅传递函数的辨识以及模糊 PID 控制器中量化因子和比例因子的优化并应用于颗粒炉样机的实验研究. 鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)可以进一步提高模糊 PID 算法的优化效率^[12]. Zhang 等^[13]提出了基于 WOA 的优化模糊 PID 控制策略,将其用于四旋翼控制系统,调节时间相较传统 PID 控制和模糊 PID 控制分别减少了 17 s 和 8 s,同时提高了控制系统的抗干扰能力. Qin 等^[14]提出了一种基于 WOA 的模糊控制策略来调节压缩机转速和实现最优客舱温度,超调量仅为 0.08 ℃,与传统 PID 控制和模糊 PID 控制相比,制冷系数分别提高了 0.14 和 0.07.

目前关于低温 3D 打印设备的温度控制算法的研究仍处在进步阶段. Wu 等^[15]将模糊 PID 控制算法用于 3D 打印机的低温控制,减少了达到低温环境所需的稳态时间,增强了抗干扰能力,但是系统仍存在温度波动的情况. 同时,目前低温 3D 打印大多局限在成型平台制冷,这种制冷方式下打印平台容易结霜^[16],当支架成型高度较大时容易因温差导致变形,影响打印效果. 因此,本文提出一种基于 WOA 的低温 3D 打印系统模糊 PID 温度控制策略,旨在引入 WOA 实现打印腔室整体环境温度的快速、准确控制. 首先,建立基于多片半导体制冷器的打印腔室温度控制系统模型,求出其传递函数. 其次,比较传统 PID、模糊 PID 及基于 WOA 的模糊 PID 算法温度控制性能. 最后,搭建低温 3D 打印平台并完成低温与常温条件下水凝胶材料成型测试,分析并总结打印效果.

1 低温生物 3D 打印机系统设计

1.1 三维运动结构

采用模块化设计思想,将低温生物 3D 打印机主体划分为三维运动结构和制冷模块设计. 本设备采用丝杆-螺母结构的直线滑台模组作为传动机构,相较齿轮-皮带传动系统,运行时噪音小,具有较高的刚性,能够在承受大载荷运动时确保传动系统的稳定性,在反向运动时也能保持较高的精度.

XY 运动机构主要作用为承载成型平台在 XOY 平面进行任意路径运动,外形为常见直线滑台模组结构,Y 向模组固定在 X 向模组安装板上. 由于成型平台需要在 -20 ℃ 左右的低温中长时间工作,运动系统需要具备极高的耐低温能力. 所以在选型上采用 HS5776 低温步进电机作为驱动,滑台主体材料为铝合金,出线部分进行防水处理.

实验的环境温度与室温差别较大,滑台取消常见的防尘盖设计,变成裸露式的结构,避免防尘盖内结霜,影响成型平台运动. Z 轴运动结构采用 75 电机直线滑台模组,切换机构连接部分采用铝合金零件进行连接.

本文设计的 3D 打印设备采用的是双喷头打印工艺,为了减小双喷头工作时的影响,需要加装喷头切换装置. 双喷头系统允许打印多材料的复杂模型,扩展了打印的应用范围. 使用不同的喷头打印同一模型的不同部分. 可以提高打印效率. 本文设计的是齿轮-双边齿条传动切换结构,具有噪音小、定位精度高、可负载重量大、切换过程扰动小、延迟低等特点,适用于本文的低温高精度打印场合. 打印装置实体结构如图 1 所示.

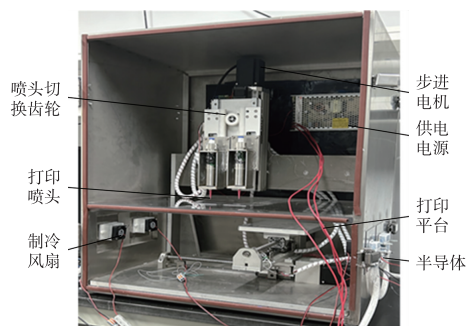


图 1 低温生物 3D 打印机实体结构

Fig. 1 Cryobiology biological 3D printing machine solid structure

1.2 制冷模块

1.2.1 半导体制冷结构及数学模型的建立

制冷半导体由 P 型半导体与 N 型半导体组成,尺寸一般为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$,由陶瓷片封装保证其绝缘性。一面从外界吸收热量形成“冷端”,另一面向外界释放热量,半导体制冷片工作原理如图 2 所示。

对半导体建立数学模型

$$N \frac{\partial(T_1 - T_0)}{\partial t} + PA(T_1 - T_0) = \Delta Q. \quad (1)$$

式中, N 为半导体制热系数, P 为传热系数, A 为传热面积, T_0 和 T_1 代表工作开始前的初始温度和结束后的最终温度, Q 表示的是单位时间内的产热量。

半导体的传递函数模型是一个一阶惯性环节,

$$W(s) = \frac{N}{1 + Ts}. \quad (2)$$

式中, T 为时间常数, s 是拉普拉斯变换中的复频率变量, $W(s)$ 为传递函数。温度传感器采集半导体冷端温度信息时会滞后。因此附加一个滞后环节来提高温控系统控制精度。滞后环节可以表示为

$$W_0(s) = e^{-\tau s}. \quad (3)$$

式中, τ 为延迟时间。 $W_0(s)$ 为传递函数。故将式(1)~式(3)串联可组成半导体制冷器的数学机理模型,

$$G(s) = W(s) \cdot W_0(s) = \frac{N}{T\tau s^2 + (T + \tau)s + 1}. \quad (4)$$

式中, $G(s)$ 为传递函数。采集半导体温度随时间变化的数据,结合式(4)建立传递函数,

$$G(s) = \frac{-0.000\ 111\ 6}{s^2 + 0.013\ 23s + 0.000\ 168\ 8}. \quad (5)$$

1.2.2 水冷导热装置

半导体工作时,热端温度升高,影响冷端温度。为提高制冷效率,要通过水冷导热装置降低热端温度。同时由机器内部通过翅片与风扇将冷端温度传递到打印平台,构建低温环境。水冷导热装置通常用于散热或温控系统中,其作用是转移热量,以维持设备的稳定工作温度。通过水冷方式散热,将半导体热面端产生的热量转移至冷却液,维持其工作稳定性。这种方式可以确保设备运行在安全的温度范围内,提高制冷性能。与传统散热系统相比,可以更有效地降低半导体热端的温度,提高工作效率,水冷导热装置实物图及其应用如图 3 所示。

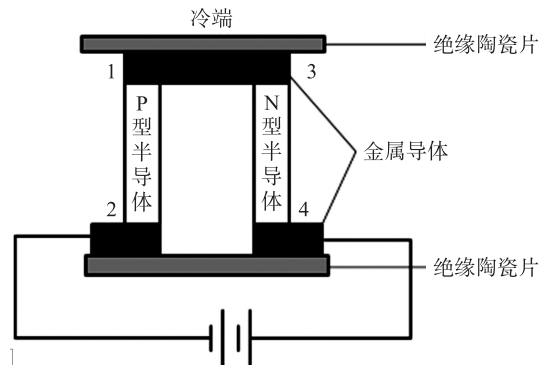
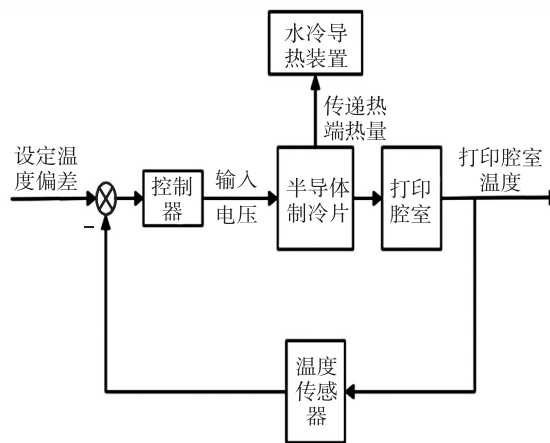


图 2 半导体制冷片工作原理

Fig. 2 Working principle of semiconductor refrigeration chip



(a) 水冷导热装置实物



(b) 半导体制冷流程图

图 3 水冷导热装置实物图及流程图

Fig. 3 Physical picture and flowchart of water-cooled thermal conduction device

由单片机输出端口输出脉宽调制(pulse width modulation,PWM)波至 4 个驱动,控制半导体运行状态,控制电路原理图如图 4(a)所示. 根据控制电路原理图,连接 STM32F407 单片机、双路 12A 驱动模块及半导体负载,控制电路实物图如图 4(b)所示.

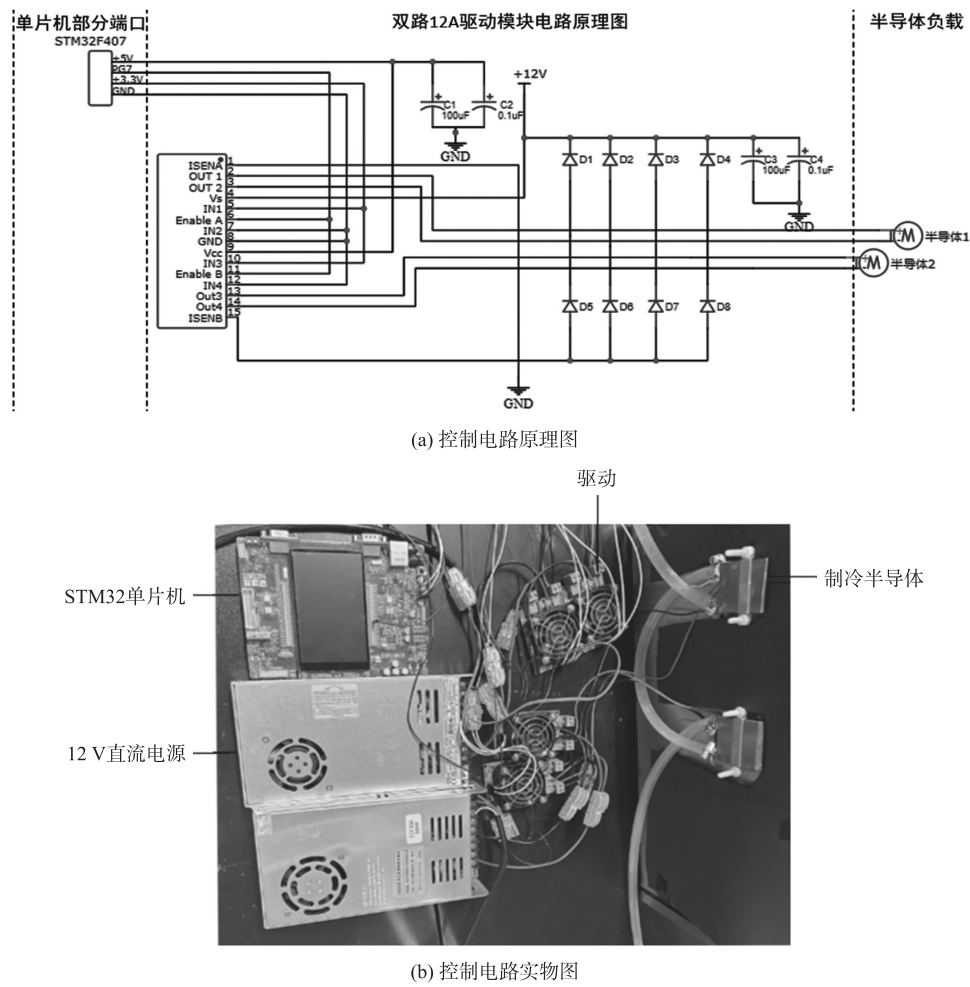


图 4 控制电路原理及实物图

Fig. 4 Principle of the control circuit and the physical image

2 基于 WOA 的模糊 PID 控制器设计

2.1 模糊 PID 控制

模糊 PID 控制器在传统 PID 控制基础上,将输入量通过模糊化、与模糊规则的匹配推理、解模糊 3 个步骤,传给模糊控制器,根据输入量的变化,对系统进行最优控制.

本研究基于模糊 PID 控制算法,构建了一种适用于低温生物 3D 打印机温度调控的策略. 利用模糊控制器来处理目标温度与实际反馈温度之间的差异(即偏差 e) 以及其变化速率(即偏差变化率 ec),并将这些变量作为模糊输入. 此外,引入 PID 控制中的关键参数 K_p 、 K_i 和 K_d ,并将其增量 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 视为模糊控制过程中的中间量. 最后,将 K_p 、 K_i 和 K_d 作为模糊输出的结果,其中包含预先设定好的 PID 控制参数以及它们对应的比例因子. 以 K_p 、 K_i 、 K_d 作为模糊输出量,整定后的模糊 PID 控制参数可表示为

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + K_1 \times \Delta K_p, \\ K_i = K_{i0} + K_2 \times \Delta K_i, \\ K_d = K_{d0} + K_3 \times \Delta K_d. \end{cases} \quad (6)$$

式中, K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 为 PID 控制参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的预设值. ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为相应的比例因子. 表 1 展示了模糊输入量和模糊输出量的模糊论域.

表 1 模糊输入量和输出量的模糊论域

Table 1 Fuzzy domain of fuzzy input and output

参数	论域	参数	论域
e	$[-6, 6]$	K_i	$[-6, 6]$
ec	$[-6, 6]$	K_d	$[-6, 6]$
K_p	$[-6, 6]$		

在模糊控制领域,通常采用大、中、小以及正、负等术语来衡量输入与输出的规模及其对应的状态.选定 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 7 个等级,用更精确的方式来描述模糊输入和输出.设置输入和输出模糊论域子集的形状类型为 trimf,在图 5 展示了模糊隶属度函数.

设置的模糊规则体现了整体控制策略,鉴于上述 2 个模糊输入量和 3 个模糊输出量需在时间上相对应,结合模糊数学的相关知识以及工程实践经验,表 2 为结合模糊输入量和模糊输出量建立的模糊控制规则.

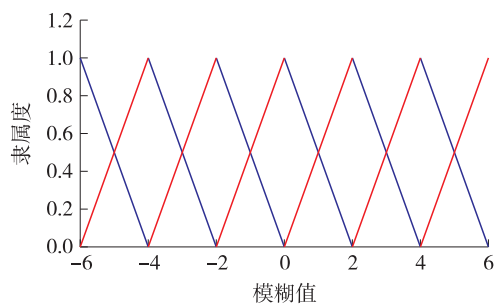


图 5 模糊隶属度函数

Fig. 5 Fuzzy membership function

表 2 模糊控制规则

Table 2 Fuzzy control rule

偏差(e)	偏差变化率(ec)						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZP/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PB/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

取隶属度函数曲线与横坐标轴所围区域的重心作为模糊推理的输出值,选取重心法 K 作为解模糊方法^[17],可表示为

$$K = \frac{\sum BF}{\sum B}. \quad (7)$$

式中, B 是隶属度, F 是其对应的模糊量化值.

2.2 WOA

相比其他群优化算法,WOA 具有结构清晰、寻优能力强和易实现的优点^[18].考虑到被控系统参数调节少、容易实现和自适应能力强等需求,故本文采用 WOA 作为寻优算法.具体过程可分为 3 个步骤.

(1) 围猎.当鲸群逐渐逼近猎物时,它们会寻找出最佳的鲸群位置,这个位置被称为 $X^*(t)$,其他鲸鱼的位置则是 $X_i(t)$,在下一代中,每个鲸鱼将尝试找到新的位置,即 $X_i(t+1)$,因此,可得出以下推导公式,用于描述所有鲸鱼如何在每一代中朝着最优位置移动.

$$X_i(t+1) = X^*(t) - M * D, \quad (8)$$

$$D = |C * X^*(t) - X_i(t)|, \quad (9)$$

$$M = 2r_1a, \quad (10)$$

$$C = 2r_2, \quad (11)$$

$$a = 2(1 - t/T_{\max}). \quad (12)$$

式中, D 代表了当前位置相对于最佳位置的差距, M 和 C 是两个系数变量, r_1 和 r_2 是介于 0 到 1 之间的随机数, t 代表了当前的迭代次数, T_{\max} 为最大迭代次数.

(2) 攻击.观察到两种主要的攻击模式:一种是通过收缩来形成包围圈,另一种则是采用螺旋状的方式.这两种攻击模式都具有一定的随机性,即它们可能会以 50% 的概率调整自身位置.对于收缩包围模式,其数学模型与围猎行为有着显著的相似性.在这个模型中,变量 M 的取值范围被限制在 $[-1, 1]$ 之间.螺旋式包围的数学模型为

$$X_i(t+1) = |X^*(t) - X_i(t)|e^{bl}\cos(2\pi l) + X^*(t). \quad (13)$$

式中, b 表示对数螺旋形状常数. l 为 $[-1, 1]$ 随机数.

(3) 随机搜索机制.当鲸鱼的距离与最佳位置相差超过一定阈值时,它们倾向于寻找附近的随机位置

以扩大搜索区域并增强整体搜索效率. 这一过程可以被描述为一种随机搜索策略. 设 M 代表鲸鱼与最佳位置之间的距离, 当 $|M| < 1$ 时, 这意味着鲸鱼离最佳位置很近, 因此它们更有可能直接找到最佳位置. 如果 $|M| > 1$, 那么鲸鱼就必须扩大其搜索范围, 以便找到最佳位置. 为了实现这一目标, 它们会选择一个随机的位置, 然后逐渐向最佳位置移动. 这种策略有助于提高鲸鱼的搜索效率, 通过扩大搜索领域, 搜索引擎的能力得以提升. 可表示为

$$D_1 = |C * X_{\text{rand}}(t) - X_i(t)|, \quad (14)$$

$$X_i(t+1) = X_{\text{rand}}(t) - M * D_1. \quad (15)$$

式中, $X_{\text{rand}}(t)$ 代表当前随机鲸鱼的位置, 而 D_1 则代表该位置与当前最优鲸鱼位置之间的距离. 通过优化算法对模糊控制的量化因子和比例因子进行调整, 有助于增强系统的自适应性和抗干扰能力.

在模糊 PID 控制系统中, PID 的初始设定值以及量化因子 K_e 、 K_{ec} 、 K_1 、 K_2 和 K_3 的选择对于系统的整体表现起着关键作用. 这些参数的选择通常依赖于实践经验和尝试性的调整, 具有较高的主观性和随机性, 这意味着它们无法确保实现最佳的温度控制效果. 为了寻找最佳的参数组合以提升控制器的性能, 需要对这些参数进行优化处理. 由于温度控制过程中的超调量较大且调节时间较长, 传统参数优化策略很难满足温度控制的需求. 因此采用 WOA 对各系数进行优化, 具体方法如图 6 所示.

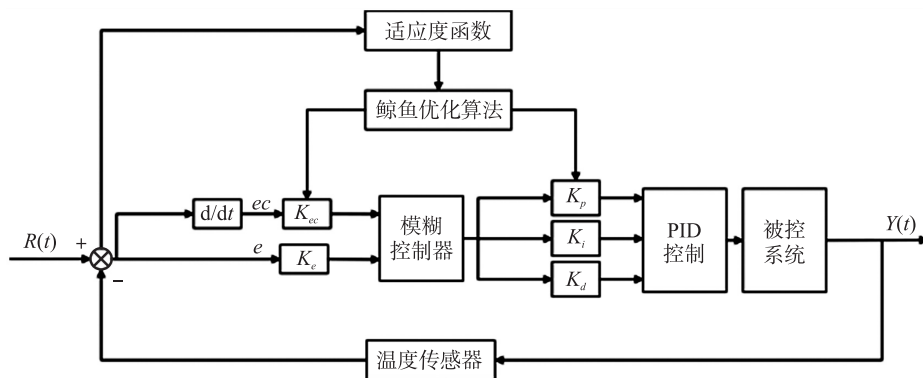


图 6 基于 WOA 的模糊 PID 温度控制策略原理图

Fig. 6 Principle diagram of fuzzy PID temperature control strategy based on WOA

2.3 仿真分析

选取适当的环境温度有利于提高 3D 打印质量. 受限于半导体与水冷循环泵制冷功率及现有研究中低温 3D 打印温度的常用情况^[19], 选取 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为后续实验的研究温度. 仿真时间设置为 500 s. 在 MATLAB/Simulink 环境中搭建基于 WOA 模糊 PID 的温度控制器的仿真模型, 如图 7 所示.

(1) 传统 PID 控制器. 通过多次实验与试错法, 确定了一组合适的 PID 控制参数, 分别为 $K_{p0} = -3.24$, $K_{i0} = -0.024$, $K_{d0} = -107.9$.

(2) 基于模糊 PID 的温度控制器. 在控制变量为正的情况下, 使用模糊策略控制参数.

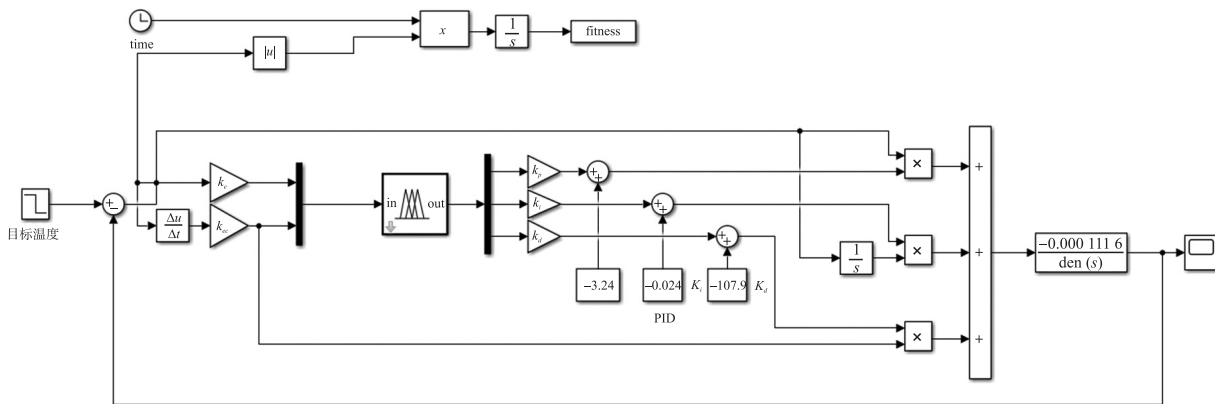


图 7 基于 WOA 的模糊 PID 控制器仿真模型

Fig. 7 Simulation model of fuzzy PID controller based on WOA

(3) 运用 WOA 结合模糊 PID 控制系统,得到了一组优化后的参数,包括 $K_e = 0.983$ 、 $K_{ec} = 0.925$ 、 $K_p = -0.09$ 、 $K_i = 0.96$ 以及 $K_d = 0.067$ 。经过实验验证,其结果如图 8 所示。

根据表 3 的数据,可以看到采用基于 WOA 的模糊 PID 控制相较传统 PID 控制表现出更快的响应能力。上升时间降低了 22 s,调节时间则减少了 249 s。这种控制方式还显著降低了超调量,相较于传统 PID 控制与模糊 PID 控制,超调量分别减小了 4.1% 和 1.6%。

表 3 各控制模型系统性能比较

Table 3 Performance comparison of various control model systems

控制器	上升时间/s	调节时间/s	超调量/%
传统 PID	132	373	7.2
模糊 PID	119	179	5.6
WOA 模糊 PID	110	124	3.1

综上所述,基于 WOA 的模糊 PID 控制具有更快的响应速度和更好的稳态特性,最终的稳态误差仅为 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$,可满足设计需求。在实际控制过程中,要求所设计的温度控制器在干扰作用下能快速响应。如图 9 所示,在干扰作用下,对上述 3 种温度控制器的控制效果进行了仿真测试。仿真时间设为 800 s,在 $t = 500\text{ s}$ 时加入了干扰,温度变化为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3 种温度控制器的调节时间对比如表 4 所示。结果表明在 $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化情况下,基于 WOA 模糊 PID 的温度控制器需 15 s 就能恢复到稳态,相较常规 PID 和模糊 PID 分别缩短了 137 s 和 20 s。

表 4 控制模型扰动后调节时间对比

Table 4 Comparison of adjustment time after control model disturbance

控制器	调节时间/s
传统 PID	152
模糊 PID	35
WOA 模糊 PID	15

基于 WOA 的模糊 PID 温度控制策略在模糊 PID 控制的基础上,将 WOA 迭代得到的相应系数与误差以及误差变化率相乘,再进行模糊化,进一步提高了系统的稳定性,有助于解决仅依靠经验调整 PID 控制参数和模糊规则所存在的问题,使得温度控制系统能够更高效、稳定地工作。

低温腔体整体由金属封装,腔体外壁与水冷循环泵的出液管上均包有包裹隔热棉,但整体低温腔体与外界仍存在热量交换的现象,为确定基于 WOA 的模糊 PID 温度控制策略的实际效果,将实际输出温度与理论输出温度进行比较,如图 10 所示。测量工具的精度影响测量结果,因此理论温度调节时间与实际温度调节时间之间仍存在差距。

3 实验与分析

3.1 实验材料及仪器

海藻酸钠(sodium alginate, SA, 分析纯),上海麦克林生化科技股份有限公司。CaCl₂,上海麦克林生化科技股份有限公司。Milli-Q AdvantageA10 超纯水系统(超纯水电阻率 $18.2\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$),美国密理博(Millipore)公司。低温生物 3D 打印机。扫描电镜 S-4800 FESEM 型,日本 Hitachi 公司。

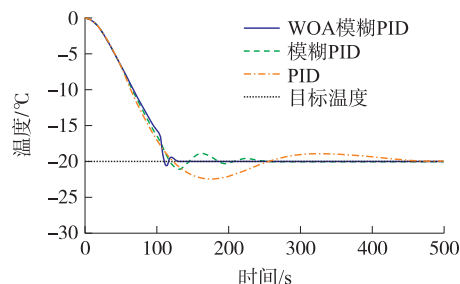


图 8 各控制模型仿真曲线

Fig. 8 The simulation curve of each control model

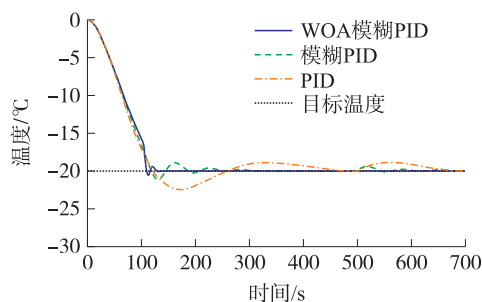


图 9 各控制模型添加扰动后仿真曲线

Fig. 9 Simulation curve after adding disturbance to each control model

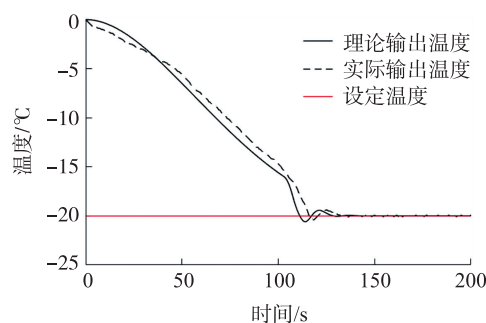


图 10 实际输出温度与理论输出温度曲线

Fig. 10 Curve of actual output temperature and theoretical output temperature

3.2 组织工程支架的打印

称取 4 g 海藻酸钠粉末,将其溶解于 46 mL 超纯水中,制备 8%浓度的水凝胶. 室温下采用 300 r/min 机械搅拌 10 min,静置 12 h,得到均匀且透明的水凝胶. 将制备的生物墨水用于支架的打印. 设置气压为 50 kPa,层高为 0.18 mm,使用直径 0.58 mm 的锥形点胶机针头固定在 20 mL 装入水凝胶油墨的针筒上. 打印针头移动速度 900 mm/min,然后使用低温 3D 打印机打印支架,将支架制于 CaCl_2 溶液中固化 5 min,取出晾干,得到成品,打印过程图像如图 11 所示.

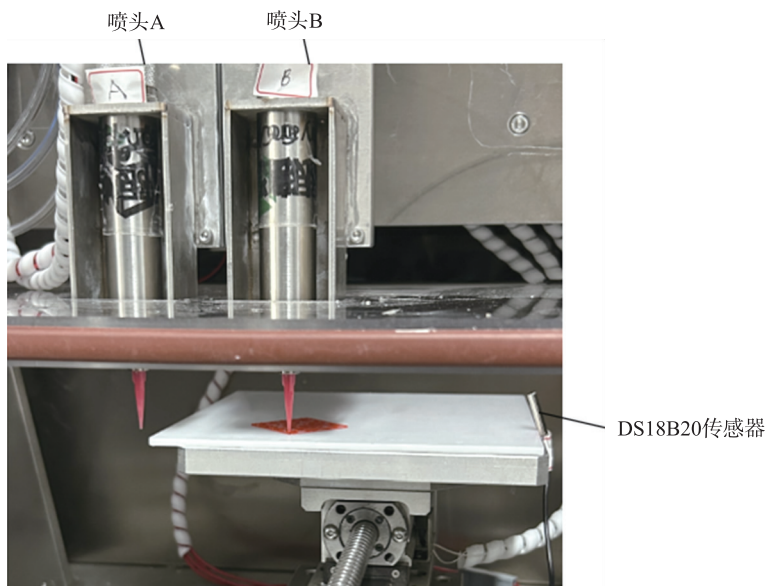


图 11 打印过程图像

Fig. 11 Printing process image

3.3 组织工程支架的表征条件与 SEM 表征结果

采用扫描电镜(SEM, Quanta 200FEG, FEI, 美国)对常温打印水凝胶支架和低温打印水凝胶支架的微观结构进行了表征. SEM 图片测试条件皆为:加速电压 20 kV,工作距离约 8.0 mm,电流 10 μA ,采用线平均扫描模式拍摄,SEM 表征结果如图 12 所示.

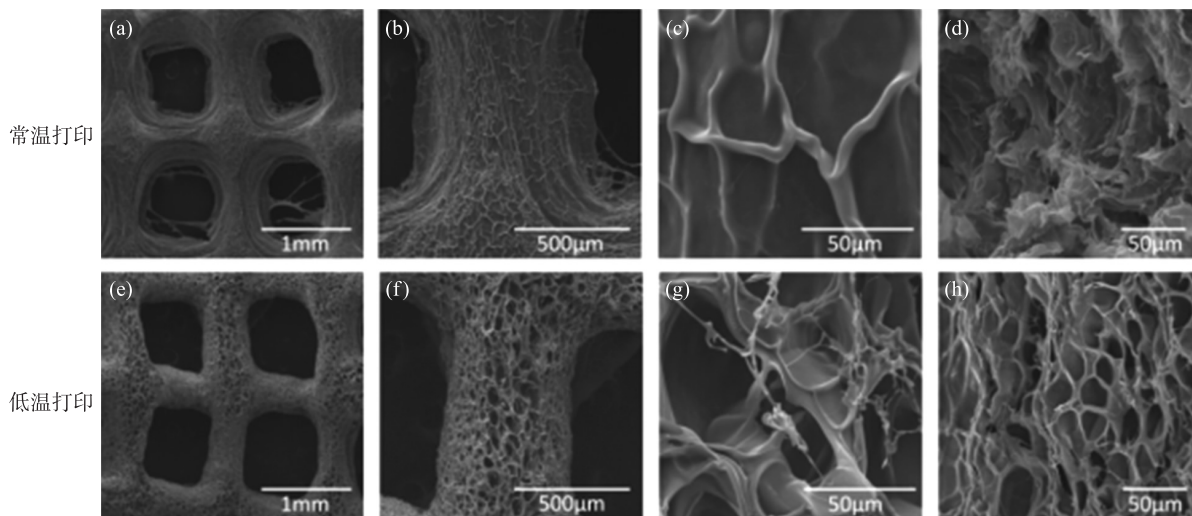


图 12 常温与低温打印的 SEM 表征结果

Fig. 12 SEM results of normal and low temperature printing

采用低温 3D 打印技术成功制备了水凝胶支架. 在所有支架中观察到规则的大孔约为 600~800 μm . 高倍扫描电镜结果进一步证实,每组细丝的表面(俯视图)和内部(横向视图)都显示出高度三维互联的微孔结构. 因此,获得了具有理想的三维互联宏观和微孔结构的分层多孔支架. 微孔有助于增加支架与组织

的接触面积.微孔产生的毛细管力促进体液渗透到支架的微孔中,因此支架与体液接触较多,这将加速支架的溶解和生物吸收,而大孔有利于细胞生长,支架矿化,因此在低温环境构建的具有层次结构和孔径的支架有望提高生物修复的效率.

3.4 低温 3D 打印对成型质量的影响

在常温与低温下打印 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的网格,交联成型后,放入 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱内保存,取出成品如图 13、图 14 所示.由图 13 可知,在进行常温下丝径较小的打印时,打印精度差,孔相互之间有粘连情况,水凝胶不能精确地沉积在打印层上,从而影响成品质量.图 14 中水凝胶支架在不同丝径打印时都有更好的效果.通过实验对比,打印丝径较大的支架时,低温与常温打印区别不大,打印丝径较小的支架时,低温 3D 打印水凝胶支架精度更高.

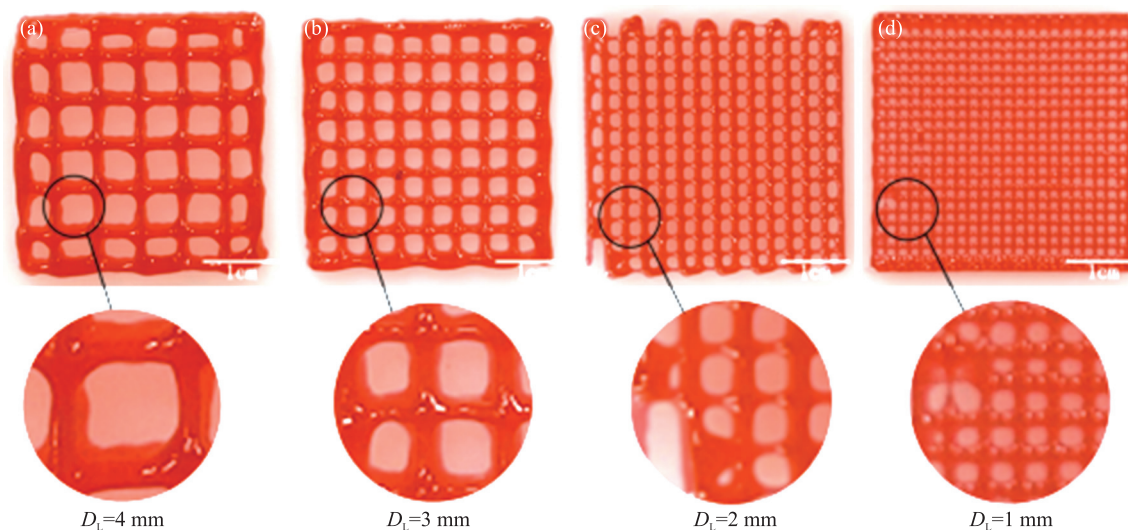


图 13 常温打印水凝胶支架

Fig. 13 Normal temperature print hydrogel scaffold

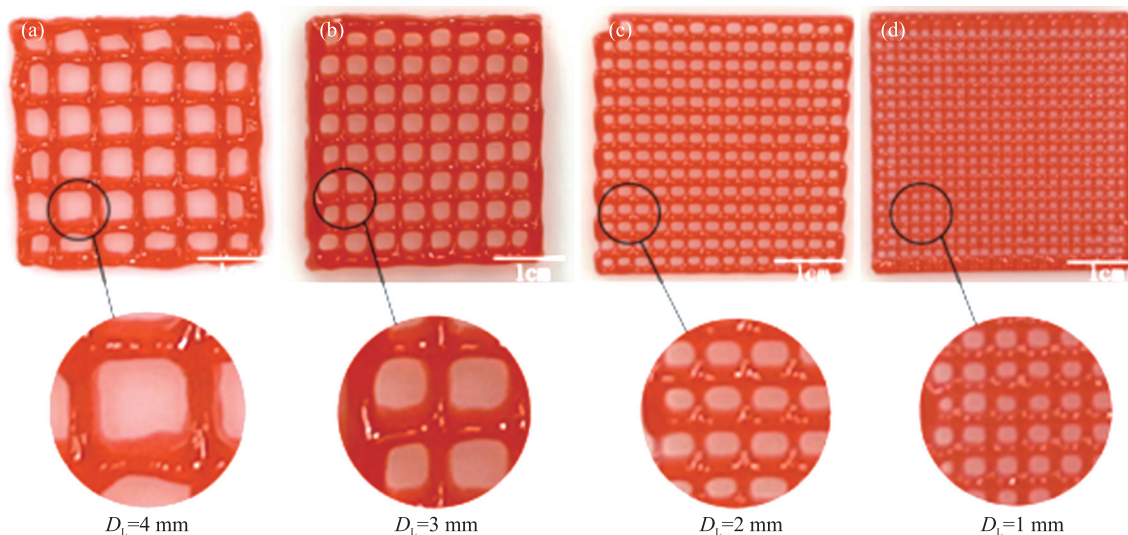


图 14 低温打印水凝胶支架

Fig. 14 Cryogenic printed hydrogel scaffolds

3D 打印空心模型,随着层高的增加产品易坍塌,为验证低温打印对成型产品稳定性的提高,分别与常温与低温下打印空心三棱柱、长方体及圆柱,成型结果如图 15 所示.常温打印高度 10 mm 以上空心模型时,随着打印层数的增加,局部区域出现的坍塌现象严重,导致浆料溢出,如图 15(c)、图 15(f)、图 15(i) 所示,成型精度较差.低温打印 10 mm 以上模型时,如图 15(b)、图 15(e)、图 15(h) 所示,打印工艺参数的成型质量较好,无浆料溢出和坍塌,打印结构相较常温打印更加稳定.

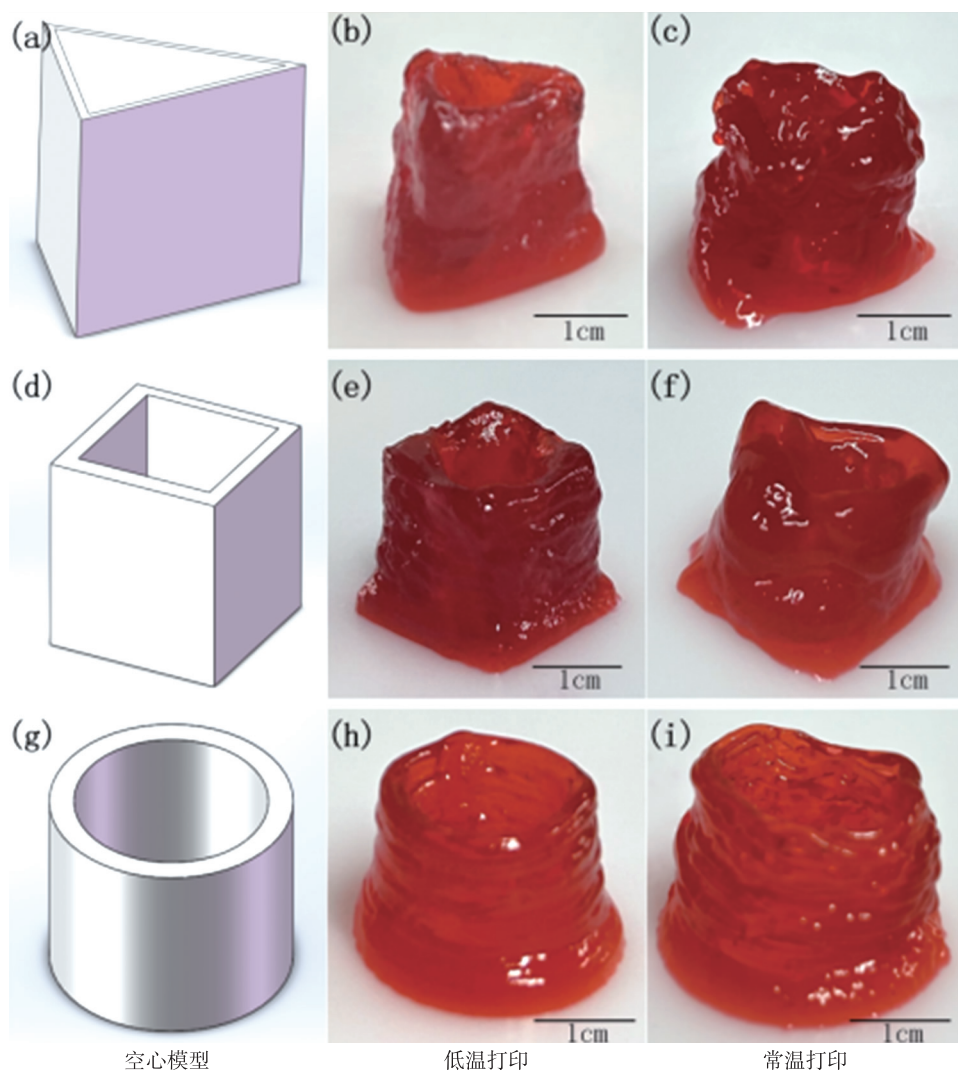


图 15 打印空心模型成型结果

Fig. 15 The printing results of the hollow model

4 结论

本文针对传统常温 3D 打印技术缺乏精度、稳定性和良好微观结构的缺点,研究了一种基于 WOA 的模糊 PID 温度控制策略的低温 3D 打印系统,在优化打印参数的同时引入基于 WOA 的低温 3D 打印系统模糊 PID 温度控制策略,优化了温度控制器中的参数,克服传统 PID 参数超调量大、调节时间长的缺点,调节时间更短(缩小了 249 s),超调量更小(减少了 4.1%),最终的稳态误差仅为 0.04 ℃,实现了更好的温控精度,添加扰动后仅需 15 s 就能到达稳态,有较强的抗干扰能力. 相较于传统 3D 打印技术,低温生物 3D 打印技术提高了打印结构的稳定性和精度,并通过构建高度连通的微孔结构,提高了支架孔隙率,这种低温打印产生的微孔结构有望提高组织修复的效率.

[参考文献] (References)

- [1] MANI M P, SADIA M, JAGANATHAN S K, et al. A review on 3D printing in tissue engineering applications[J]. Journal of Polymer Engineering, 2022, 42(3): 243–265.
- [2] 陈明学, 吴江, 殷瀚, 等. 基于低温沉积 3D 打印技术构建新型组织工程半月板支架的研究[J]. 中国修复重建外科杂志, 2024, 38(6): 748–754.
- [3] LIU W, WANG D, HUANG J, et al. Low-temperature deposition manufacturing: A novel and promising rapid prototyping

- technology for the fabrication of tissue-engineered scaffold[J]. *Materials Science and Engineering:C*,2017,70(2):976–982.
- [4] GAO X S, WANG H H, LUAN S F, et al. Low-temperature printed hierarchically porous induced-biomineralization polyaryletherketone scaffold for bone tissue engineering[J]. *Advanced Healthcare Materials*,2022,11(18):2200977.
- [5] WANG C, LAI J, LI K, et al. Cryogenic 3D printing of dual-delivery scaffolds for improved bone regeneration with enhanced vascularization[J]. *Bioactive Materials*,2021,6(1):137–145.
- [6] SUN T, WANG J Z, HUANG H G, et al. Low-temperature deposition manufacturing technology: A novel 3D printing method for bone scaffolds[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*,2023,11:1222102.
- [7] CASTILHO M, DIAS M, GBURECK U, et al. Fabrication of computationally designed scaffolds by low temperature 3D printing[J]. *Biofabrication*,2013,5(3):035012.
- [8] BARTOLOMÉ E, BOZZO B, SEVILLA P, et al. ABS 3D printed solutions for cryogenic applications[J]. *Cryogenics*,2017,82:30–37.
- [9] ZHANG P, GAO Q, YU K C, et al. Investigation on the temperature control accuracy of a print head for extrusion 3D printing and its improved design[J]. *Biomedicines*,2022,10(6):1233.
- [10] 谢竹逵,冯可. 改进的粒子群模糊 PID 算法在温控系统中的应用[J]. *机电工程技术*,2023,52(11):222–225.
- [11] LI H S, LU G J, SU J D, et al. Improved particle swarm fuzzy PID temperature control for the pellet grill[J]. *IEEE Access*,2024,12:66373–66381.
- [12] NADIMI-SHAHRAKI M H, ZAMANI H, ASGHARI V Z, et al. A systematic review of the whale optimization algorithm: Theoretical foundation, improvements, and hybridizations[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*,2023,30(7):4113–4159.
- [13] ZHANG Y, LI F, ZHANG Y, et al. Enhanced whale optimization algorithm for fuzzy proportional-integral-derivative control optimization in unmanned aerial vehicles[J]. *Machines*,2024,12(5):295.
- [14] QIN Z J, WANG X D, ZHANG H B, et al. Research on heat pump air conditioner compressor speed control strategy based on whale algorithm[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*,2024,53:103939.
- [15] WU X Y, WANG X N, HE G G. A fuzzy self-tuning temperature PID control algorithms for 3D bio-printing temperature control system[C]//2020 Chinese Control and Decision Conference(CCDC). Hefei, China, 2020.
- [16] LI Z A, XU M J, WANG J H, et al. Recent advances in cryogenic 3D printing technologies[J]. *Advanced Engineering Materials*,2022,24(10):2200245.
- [17] KAUR A, KUMAR A. A new method for solving fuzzy transportation problems using ranking function[J]. *Applied Mathematical Modelling*,2011,35(12):5652–5661.
- [18] HE S, WU Q H, SAUNDERS J R. Group search optimizer: an optimization algorithm inspired by animal searching behavior[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*,2009,13(5):973–990.
- [19] LIU T Q, YANG B, TIAN W Q, et al. Cryogenic coaxial printing for 3D shell/core tissue engineering scaffold with polymeric shell and drug-loaded core[J]. *Polymers*,2022,14(9):1722.

[责任编辑:陈 庆]