文章编号:0253-4339(2022) 05-0033-08
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2022.05.033

热电冷却微流体芯片的温度响应特性优化研究

朱 江[1] 孙东方[1] 高 才[1] 唐景春[1] 张秀平[2] 杨 磊[1] 刘向农[1]

(1 合肥工业大学汽车与交通工程学院 合肥 230009;2 压缩机技术国家重点实验室(压缩机技术安徽省实验室) 合肥 230031)

摘 要 精确的温度调控是微流体技术在生化分析和医学诊断等方面发展应用的重要保障。为实现微流体芯片目标区域的温度控制,本文设计了基于异型结构热电制冷器的微流体芯片温度控制系统,通过数值模拟和实验测试分析了该温控系统的传热特性及及温度响应特性。研究结果表明:采用的热电制冷器可将微流体芯片样品池的温度降至-24 ℃,但样品池的降温速率远小于热电制冷器的冷端降温速率,存在温度响应迟滞问题。为此,进一步提出了带有聚冷结构的系统优化,结果表明:聚冷结构的引入虽然会带来少量的冷量损失,但可以显著提升该温控系统的温度响应速率,有效减少响应时间。对于 T 型聚冷结构,当下底直径为 14 mm 和 10 mm 时,可分别将温度响应时间减少 30% 和 40.7%。

关键词 热电制冷;微流体;降温速率;聚冷结构;温度控制

中图分类号:TB657.5;TB61$^+$9.2 **文献标识码**:A

Optimization of Temperature Response Characteristics for Thermoelectric Cooling Microfluidics

Zhu Jiang[1] Sun Dongfang[1] Gao Cai[1] Tang Jingchun[1] Zhang Xiuping[2] Yang Lei[1] Liu Xiangnong[1]

(1. School of Automobile and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009, China; 2. State Key Laboratory of Compressor Technology (Anhui Laboratory of Compressor Technology), Hefei, 230031, China)

Abstract Precise temperature control is needed for developing and applying microfluidic technology in biochemical analysis and medical diagnosis. A temperature control system based on a thermoelectric cooler with a specially shaped structure was designed to realize the temperature control of the target area of microfluidic chips. The heat transfer and temperature response characteristics of the temperature control system were analyzed based on numerical simulation and experimental tests. The results showed that the thermoelectric cooler reduced the temperature of the sample cell of the microfluidic chip to -24 ℃. However, the pull-down rate of the sample cell was much lower than that of the thermoelectric cooler, which exhibited temperature response hysteresis. To address this challenge, a T-shaped concentrated cooling structure was proposed. The results showed that the concentrated cooling structure substantially improved the response rate of the temperature control system and effectively reduced the response time, at a cost of consuming a small amount of cooling. For the concentrated cooling structure with a lower diameter of 14 mm and 10 mm, the temperature response time was reduced by 30% and 40.7%, respectively.

Keywords thermoelectric pull-down; microfluidics; pull-down rate; concentrated cooling structure; temperature control

近年来,随着微加工技术的发展,微流体器件在细胞研究、液滴生成及破裂分析和 PCR 分析中显示出巨大的优势[1-2]。在对微流体的操控过程中,不仅要准确地控制流体的成分比,还必须精确地进行温度调控[3]。目前针对微流体的升温控制已有一些成功的探索,如集成电阻丝加热,微波加热和红外加热等[4-5]。这些方式虽然能满足室温以上的单向温度操控,但对于微流体芯片内的降温需求仍存在一些局限性,如微流体芯片冰核形成、细胞分析等。由于微流体芯片的体积非常小,传统的制冷方法并不能较好地实现片上的快速、精确控温。

基于珀尔贴效应的热电制冷技术,在直流电流驱

基金项目:国家自然科学基金(52006051,51876053)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52006051 & No. 51876053).)

收稿日期:2021-08-11;修回日期:2021-11-08

动下实现能量转换,可提供精确温控,且具有尺寸可控、易集成、成本低、响应快等优点[6-7],在微流体的温度调控方面优势显著,受到国内外相关行业的高度关注[8-9]。A. E. Sgro 等[10]使用热电制冷器(thermoelectric cooler, TEC)对微流体芯片局部降温,在微流体通道内制作了一个冰阀,并实现了包裹在流动液滴中单个细胞的快速冷冻。C. G. Velve 等[11]将 TEC 冷却后的液体流经酵母细胞的上方,以实现对酵母细胞温度的控制,该方式通过冷却介质间接调控微流体的温度变化。Han Chao 等[12]设计了一种与倒置光学显微镜兼容的 TEC 控温设备,将 4 个 TEC 分布在微流体芯片周围,并留出中间的透光孔,以观察中心样品区域。

本文以样品观测微流体芯片(用于观测液滴或细胞的生成及保存)为依托,设计了基于异型结构 TEC 的微流体芯片温度控制系统,建立了热电冷却微流体芯片的多物理场仿真模型,并根据实验测量获得 TEC 的物性参数。通过多物理场仿真方法对 TEC 的制冷性能进行分析,并与实验结果对比,验证该模型的准确性。最后,探讨该温度控制系统的动态响应特性,并对其进行优化,为热电制冷技术在微流体芯片温度调控中的应用提供指导。

1 理论模型

1.1 基于热电制冷的微流体芯片温控模型

为在温度调控的同时实现目标区域的光学观察,本文采用定制的带孔异型结构 TEC 冷却微流体芯片,如图 1(a)所示。其中,微流体流道宽度为 300 μm,中央样品池直径为 1 mm,流道的长度为 20 mm,流道的深度为 300 μm。该微流体装置由聚二甲基硅氧烷(PDMS)和载玻片基底组合制成。TEC 外径为 25 mm,孔径为 4 mm。

TEC 为固态器件,内部由多对 P、N 型半导体热电偶组成,当施加直流电到半导体元件阵列时,由于珀尔贴效应,热电偶的一端吸热,产生冷却效果,另一端向周围环境释放热量[13]。本文定制的 TEC 由 42 对半导体热电偶电串联且热并联组成。考虑到半导体热电偶的热特性和电特性具有周期性,只选取一对热电偶元件进行分析,如图 1(b)所示。图中,Q_C 为冷端吸收热量,Q_H 为热端释放热量,L_1 为热电臂的截面边长,L_2 为热电臂的间距,H_0、H_1 和 H_2 分别为陶瓷板、连接器和半导体的厚度,尺寸如表 1 所示。

1.2 热电制冷能量转换与输运方程

建立 TEC 的热模型,计算过程采用绝对温标,采用如下假设[14-15]:

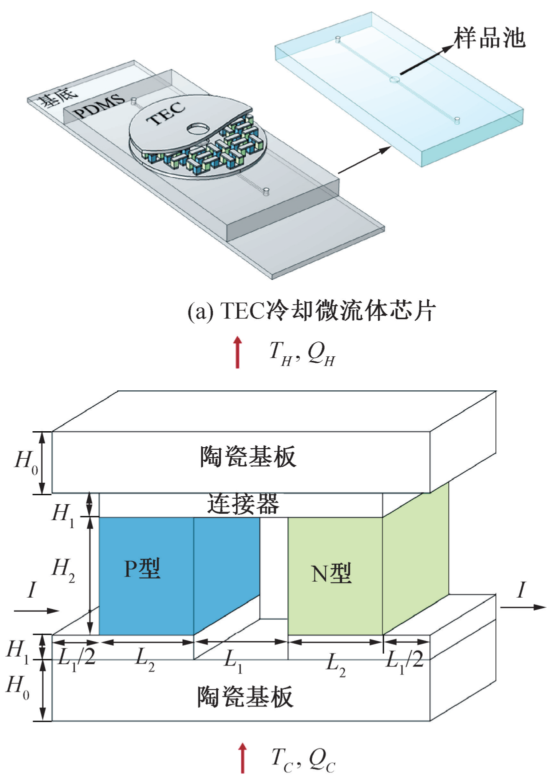


图 1 几何模型

Fig.1 The geometric model

表 1 热电偶几何尺寸

Tab.1 Geometry size of thermocouple

单位:mm

参数	L_1	L_2	H_0	H_1	H_2
尺寸	1	1	0.68	0.27	1.3

1)与 TEC 制冷量相比,辐射的热损失很小,因此忽略辐射的热损失。

2)假定陶瓷基板和金属连接器的热物性与温度无关。

3)所有接触面都考虑接触热阻,半导体和连接器之间考虑接触电阻。

对于连接器、P 型和 N 型半导体,稳态能量方程可表示为:

$$\nabla\cdot(\lambda\nabla T)+\frac{J^2}{\sigma}-\beta\vec{J}\cdot\nabla T=0 \tag{1}$$

通过增加一个瞬态项,可以在稳态的基础上建立瞬态模型:

$$\nabla\cdot(\lambda\nabla T)+\frac{J^2}{\sigma}-\beta\vec{J}\cdot\nabla T=\rho c_p \tag{2}$$

等式(1)左侧第二项和第三项分别为焦耳热和汤姆逊热。β 可以表示为:

$$\beta=T\frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}T} \tag{3}$$

值得注意的是,恒定的塞贝克系数意味着汤姆逊效应被忽略。从理论上讲,当半导体内部发生高温梯度时,汤姆逊效应不可忽视。电势是半导体中电子和空穴之间的驱动力,可以通过求解下式得到:

$$\nabla\cdot(\sigma(\nabla\phi - \alpha\nabla T)) = 0 \tag{4}$$

ϕ 可以用式(5)计算出电场:

$$\vec{E} = -\nabla\phi + \alpha\nabla T \tag{5}$$

式(1)和式(2)中电流密度向量的计算式:

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \tag{6}$$

在实际情况中,热电材料的热物性通常具有温度依赖性[16-17]。因此,在本模型中,导热系数、电导率和塞贝克系数都被认为是温度的函数:

$$\alpha(T) = a_0 + a_1 T + a_3 T^2 \tag{7}$$

$$\sigma(T) = b_0 + b_1 T + b_3 T^2 \tag{8}$$

$$\lambda(T) = c_0 + c_1 T + c_3 T^2 \tag{9}$$

式中:$\alpha(T)$、$\sigma(T)$ 和 $\lambda(T)$ 分别为半导体材料与温度相关的塞贝克系数、、电导率和导热系数, a_0、a_1、a_2、b_0、b_1、b_2、c_0、c_1、c_2 为通过实验数据确定的拟合参数。

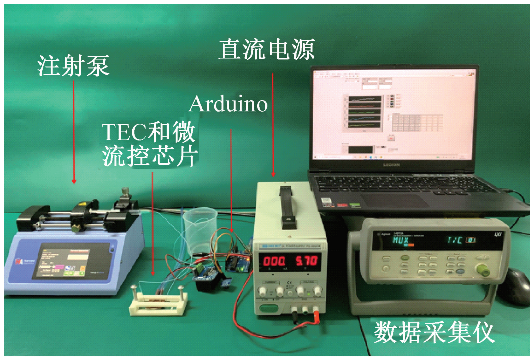
除去 PN 结及连接器的其他表面,电流无法通过,即电流密度在任意单位矢量 $\vec{n}$ 上均为 0,因此:

$$\vec{J}\cdot\vec{n} = 0 \tag{10}$$

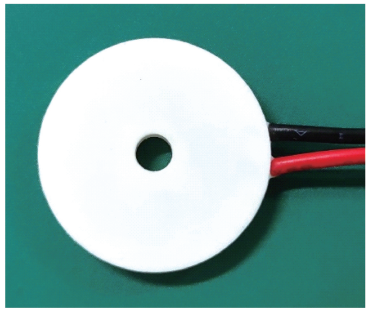
2 实验方案

2.1 实验装置

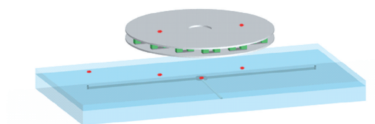
搭建了基于热电制冷的微流体芯片温度调控实验测试系统,如图 2(a)所示,实验采用定制带有微孔的异形结构 TEC 冷却微流体芯片,如图 2(b)所示。温度控制系统包括循环水冷却器、数据采集仪、基于 Arduino 微控制器的比例积分微分(PID)控制器及直流电源等。图 2(c)中红点表示布置的测温点,为准确测量样品池中的温度,加工过程中在微流体芯片的侧边预设边长 0.3 mm 的孔,埋设微型 T 型热电偶,用于测量样品池中的温度。实验与仿真结果均采用摄氏温标。



(a) 实验系统



(b) 定制的带孔TEC实物图



(c) 测温点布置图

图 2 实验系统图

Fig.2 Experimental system

2.2 误差分析

实验误差主要包含两个方面:一方面是由实验设备的精度导致,属于系统误差,无法避免,需要对实验设备的参数进行误差分析。本实验的仪器精度如表 2 所示,微流控芯片温控系统温度测量的误差分析如下:

表 2 实验设备误差

Tab.2 Experimental instruments uncertainty

仪器名称	不确定度
T 型热电偶	±0.5 ℃
数据采集仪	±1.0 ℃
稳压电源	≤0.2% + 3 mA

TEC 和微流控芯片的温度均通过 T 型热电偶测得,通过数据采集仪在电脑中进行收集并分析,根据该热电偶的性能参数,查得测温范围为 -200 ~ 200 ℃,不确定度为 0.5 ℃,同时数据采集仪有 1 ℃的不确定度,因此实验设备的相对误差 η_1 为:

$$\eta_1 = \frac{x_1 + x_2}{m_1} \tag{11}$$

式中:x_1、x_2 分别为热电偶和数据采集仪的不确定度,℃;m_1 为热电偶量程,℃。

实验中,系统测量范围为 -30 ~ 40 ℃,测量的最大误差值 κ 为 0.15 ℃,相对于实验量程的误差 η_2 为:

$$\eta_2 = \frac{\kappa}{m_2} \tag{12}$$

式中:m_2 为实验所需量程,℃。计算可得,η_1 为 0.375%,η_2 为 0.214%,均在实验允许的范围内。

另一方面是实验操作者导致的随机性误差,实验中进行多次重复实验,减少随机误差对实验结果带来的影响。

3 结果与讨论

3.1 实验结果

PID 控制器在 TEC 中得到广泛应用,依据 L. L. Josephson 等[18]的测试条件,用 PID 控制器将 TEC 的冷端温度 t_C 设定在 5 ℃。热电冷却微流体芯片的温度响应曲线如图 3 所示。由图 3 可知,TEC 冷端在 70 s 内从室温达到稳定温度。TEC 热端的热量由循环冷却水带走,使热端温度迅速稳定。但由于 PDMS 的低导热特性,微流体芯片热响应较慢,微流体芯片的样品池需要超过 160 s 的时间才能达到 7.5 ℃的稳定温度,远低于 TEC 冷端降温速率。在基于热电制冷的温度控制中,TEC 的制冷温度及降温速率至关重要,因此,本文进一步分析稳态电流下 TEC 及微流体芯片的降温特性。

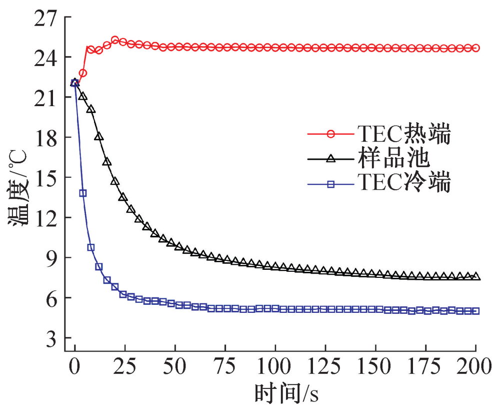


图 3 热电冷却微流体芯片的温度响应曲线

Fig.3 Temperature response curve of thermoelectric cooling microfluidic chip

3.2 仿真模型验证

为了分析 TEC 及微流体芯片的温度响应特性,并对该温控系统进行优化,建立了热电冷却微流体芯片的多物理场仿真模型。

根据聂山钧等[19]的方法,利用非线性最小二乘法提取材料参数,该方法可以提取出 TEC 的 3 个重要参数(240~310 K):

$$\alpha = 3.73 \times 10^{-4} - 1.70 \times 10^{-6} T + 3.43 \times 10^{-9} T^2 \tag{13}$$

$$\sigma = 5.39 \times 10^{-5} - 3.55 \times 10^{-7} T + 6.58 \times 10^{-10} T^2 \tag{14}$$

$$\lambda = 2.583 + 2.97 \times 10^{-3} T - 1.56 \times 10^{-5} T^2 \tag{15}$$

在仿真分析前,首先在最佳工作电流 4.4 A 下,对模型进行网格独立性验证。采用 M1(12 804 个网格)、M2(23 842 个网格)、M3(37 907 个网格)、M4(64 027 个网格)、M5(86 892 个网格)、M6(229 797 个网格)和 M7(397 398 个网格)7 个网格系统进行网格独立性验证。图 4 所示为在 7 种不同网格系统下 TEC 的冷热端温差 Δt 和热端的温度 t_H,其中 $\Delta t = t_H - t_C$。由图 4 可知,当网格数超过 M4 之后,计算结果几乎不变,表明所使用的数值结果与网格无关。因此,在不损失精度的情况下节省计算时间,本研究采用 M5 网格系统。

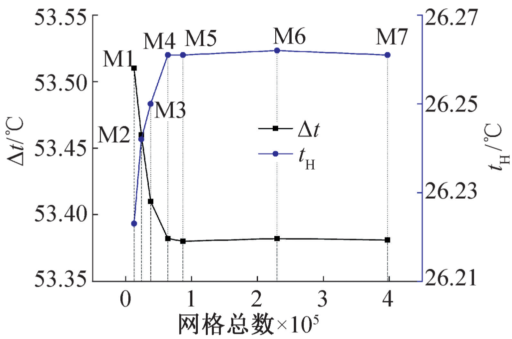


图 4 网格独立性检验结果

Fig.4 Grid independence test results

样品池温度 t_{sample} 变化和 TEC 的 Δt 仿真分析结果与实验数据对比如图 5 所示,随着 TEC 的驱动电流逐渐增大,t_{sample} 随驱动电流的增加先降低后升高,当电流为 4.4 A 时 t_{sample} 最低,此时为 TEC 最佳工作电流,TEC 的冷端也达到最低温度。在最佳工作电流 4.4 A 下,对比仿真计算结果和实验数据,t_{sample} 测量值与仿真所得结果的回归分析决定系数 R^2 为 0.997 5,TEC 的 Δt 测量值和仿真值的回归分析决定

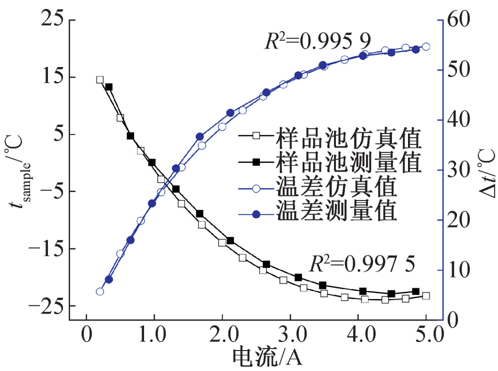


图 5 数值模拟与实验结果对比

Fig.5 Comparison of numerical simulation and experiment results

系数 R^2 为 0.995 9,说明建立的多物理场模型预测精度较高。

3.3 瞬态传热分析

由于 PID 控制对 t_{sample} 的反馈信号响应时间有很高的需求,为分析该 TEC 对 t_{sample} 的冷却特性,本文从瞬态过程进行分析。

在施加恒定的 4.4 A 电流情况下,TEC 工作稳定后的温度分布云图如图 6 所示,此时 TEC 的 t_C 可达到−27.9 ℃,t_{sample} 可达到−24 ℃。图 7 所示为 TEC 的 t_C 和微流体芯片 t_{sample} 响应情况。由图 7 可知,TEC 的冷端温度在第 50 s 时达到−20 ℃的期望目标温度,这一段的降温特性决定了控制系统的动态调节时间。而微流体芯片 t_{sample} 直至第 200 s 才达到该温度,这是由于 PDMS 的低导热系数(0.15 W/(m·℃))[20],冷量传导至样品池的时间很长,过长的温度响应迟滞时间会显著影响 PID 控制达到稳定时间。

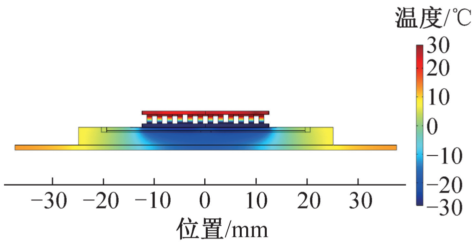


图 6 恒定电流下温度分布云图

Fig.6 Temperature distribution under constant current

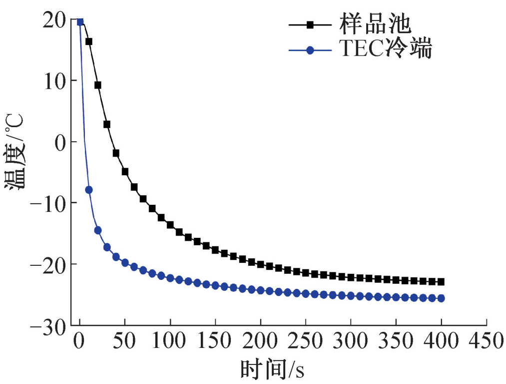


图 7 恒定电流下的温度响应曲线

Fig.7 Temperature response under constant current

3.4 聚冷结构对冷却效果的影响

由图 7 可知,TEC 冷却微流体芯片时,微流体芯片内部样品池的热响应速率明显低于 TEC 冷端,而这也会影响温度调控的速率和精度。因此,本文提出一种带有聚冷结构的微流体芯片热电冷却系统,旨在将 TEC 的冷量集中在微流体芯片样品池目标区域。图 8(a)和图 8(b)分别为配备了 T 型聚冷结构和圆台型聚冷结构的热电冷却系统的温度场分布云图。T 型聚冷结构上部直径为 25 mm,高度为 1 mm;下部直径为 14 mm,高度为 4 mm;总高度为 5 mm。圆台型聚冷结构的上底为 25 mm,下底为 14 mm,高度为 5 mm。此外,基于透光观察的前提,聚冷结构的材料必须为透明,且要有较好的导热性,本文采用透明的氧化铝作为聚冷结构材料,其基本物性参数[21]如表 3 所示。

表 3 物性参数

Tab.3 Material parameters

材料	导热系数/(W/(m·℃))	比热容/(J/(kg·℃))	密度/(kg/m^3)
PDMS	0.15	1 380	970
透明氧化铝	46.06	757.6	4 000

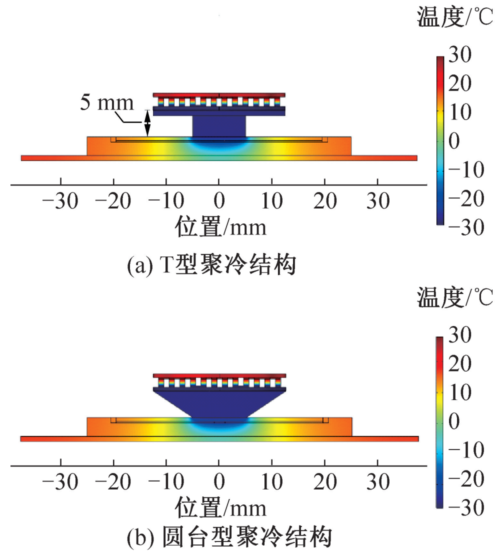


图 8 引入聚冷结构后的温度分布

Fig.8 Temperature distribution with concentrated cooling structure

图 9 所示为引入聚冷结构后,样品池的温度响应特性曲线。其中,T 型和圆台型的聚冷结构的下底直径均为 10 mm。由图 9 可知,引入聚冷结构后,微流体芯片中样品池的降温速率显著提高,圆台型和 T 型聚冷结构均可减少 TEC 对微流体芯片样品池的冷却时间。T 型和圆台型聚冷结构均在 10 s 达到最快的冷却速率,此时 T 型聚冷结构的降温速率为 0.88 ℃/s,圆台型聚冷结构降温速率为 0.74 ℃/s,随后样品池的冷却速率变缓。在第 140 s 之后,T 型聚冷结构和圆台型的聚冷结构对于样品池的降温表现几乎相同。圆台型的聚冷结构的体积(1.276 cm^3)大于 T 型聚冷结构(0.805 cm^3),这带来更大的热容,导致在施加了恒定电流的前 140 s 内,T 型聚冷结构的降温

速率明显快于圆台型聚冷结构,可以显著缩小 t_{sample} 的稳定所需时间,这在控制系统中,可以显著减少温度反馈的迟滞性,带来更好的控温动态响应效果。

此外,由于引入聚冷结构会给系统带来额外热阻,导致 t_{sample} 略高于未引入聚冷结构时的 t_{sample}。在第 400 s 时,带有 T 型聚冷结构的 t_{sample} 比无聚冷结构高 2.47 ℃,带有圆台型聚冷结构的 t_{sample} 比无聚冷结构的 t_{sample} 高 2.32 ℃。T 型结构和圆台型结构两者所能达到的最低温度几乎一致。

通过分析可知,与圆台型相比,具有相同下底面积且体积更小的 T 型聚冷结构在提升降温速率的同时,对最低温度值的负面影响较小。因此,本文重点对 T 型聚冷结构进行了优化研究。

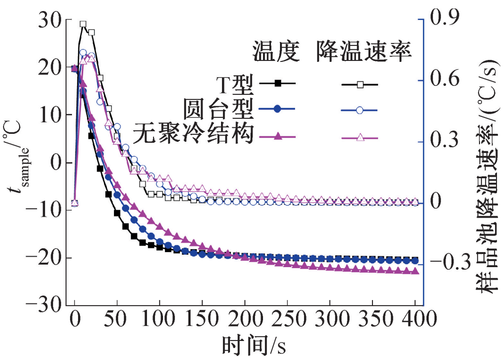


图 9 聚冷结构对降温速率的影响

Fig.9 Effect of concentrated cooling structure on cooling rate

图 10 所示为不同下底直径的 T 型聚冷结构对微流体芯片中样品池降温速率的影响。由图 10 可知,T 型聚冷结构的下底直径越小,样品池中央的降温速率越快,达到稳定的时间越短。这是由于聚冷结构的上底面积不变,下底面积较小,因此下底的热流密度显著增大。此外,由于聚冷结构也具有热容,过大的聚冷结构,例如下底直径为 20 mm 和 25 mm 时,反而会给降温速率带来负面影响,使降温速率下降。当下底直径为 14 mm 时,T 型聚冷结构在样品池达到-21 ℃之前均快于未配备聚冷结构的 TEC 冷却系统,且最快可以减少 45 s 的温度响应时间,节约 30% 的响应时间。同样,下底直径为 10 mm 时,可针对于-20 ℃以上情况,且最快可以减少 55 s(40.7%)的温度响应时间。虽然更小的聚冷结构的下底直径(6 mm)可以在 90 s 时达到较为稳定的温度表现,但其过小的下底直径带来了更大的热阻,导致在相同的 TEC 工作电流下,样品池所能达到的最低温度略有升高。因此,下底直径为 10 mm 和 14 mm 的 T 型聚冷结构表现出较好的兼容性。

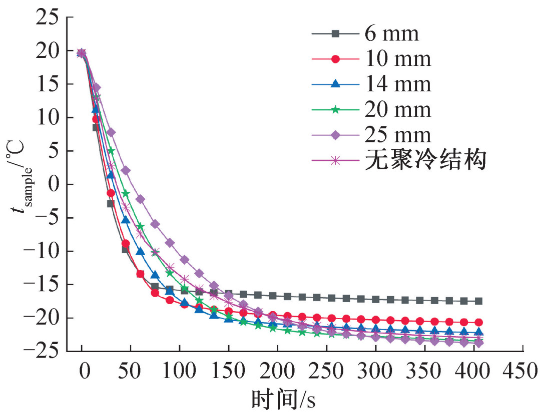


图 10 不同下底直径的 T 型聚冷结构的冷却效果

Fig.10 Cooling effect of T-shaped concentrated cooling structure with different bottom diameters

4 结论

本文设计了基于热电制冷的微流体芯片温度控制系统,研究了该温度控制系统的温度响应特性;并针对样品池温度响应迟滞问题,提出聚冷结构,显著提升该温控系统的温度响应速率,有效减少了温度控制系统的响应时间,得到结论如下:

1)引入聚冷结构之前,TEC 冷端和样品池温度最低可达到-27.9 ℃和-24 ℃,且分别在第 50 s 和 200 s 达到控制调节期望温度,但微流体样品池的降温速率远小于 TEC 冷端的降温速率。

2)引入聚冷结构,可以显著提升微流体芯片样品池的降温速率;T 型聚冷结构相比于圆台型聚冷结构,具有更好的降温效果,在控制系统中,可以显著减少温度反馈的迟滞性,带来更好的控温动态响应效果。

3)对于 T 型聚冷结构,下底直径越小,降温速率越大,但冷量损失也越大。下底直径为 14 mm 和 10 mm 的 T 型聚冷结构表现出较好的兼容性,可分别将温度响应时间减少 30% 和 40.7%,冷量损失样品池最低温度分别提高了 3 ℃和 4℃。

符号说明

t_C ——TEC 冷端温度,℃

t_H ——TEC 热端温度,℃

Δt ——TEC 冷热端温差,℃

t_{sample}——样品池温度,℃

T——温度,K

λ ——导热系数,W/(m·℃)

σ ——电导率,S/m

J ——局部电流密度,A/m²

β ——汤姆逊系数,W/(A·K)

α——塞贝克系数,V/K

ϕ——塞贝克电势,V

E——电场,V/m

本文受中央高校基本科研业务费专项资金(JZ2021HGTB0093)和压缩机技术国家重点实验室(压缩机技术安徽省实验室)开放基金(SKL-YSJ201914)资助。(The project was supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. JZ2021HGTB0093) and the State Key Laboratory of Compressor Technology (Anhui Laboratory of Compressor Technology) (No. SKL-YSJ201914).)

参考文献

[1] AMASIA M, KANG S W, BANERJEE D, et al. Experimental validation of numerical study on thermoelectric-based heating in an integrated centrifugal microfluidic platform for polymerase chain reaction amplification [J]. Biomicrofluidics, 2013, 7(1): 14106.

[2] PENG J, FANG C, REN S, et al. Development of a microfluidic device with precise on-chip temperature control by integrated cooling and heating components for single cell-based analysis[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 130: 660-667.

[3] MIRALLES V, HUERRE A, MALLOGGI F, et al. A review of heating and temperature control in microfluidic systems: Techniques and applications [J]. Diagnostics, 2013, 3(1): 33-67.

[4] FANG Cifeng, JI Fujun, SHU Zhiquan, et al. Determination of the temperature-dependent cell membrane permeabilities using microfluidics with integrated flow and temperature control[J]. Lab on a Chip, 2017, 17(5): 951-960.

[5] ZHU J, NGUYEN N, BARATCHI S, et al. Temperature-controlled microfluidic system incorporating polymer tubes [J]. Analytical Chemistry, 2019, 91(3): 2498-2505.

[6] 吴雷, 高明, 张涛, 等. 热电制冷的应用与优化综述[J]. 制冷学报, 2019, 40(6): 1-12(WU Lei, GAO Ming, ZHANG Tao, et al. Thermoelectric cooling application and optimization: A review[J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(6): 1-12.)

[7] 王子成, 蔡兰兰, 高鹏, 等. 热电制冷强化风冷散热模块的工作特性分析[J]. 制冷学报, 2020, 41(2): 48-55.(WANG Zicheng, CAI Lanlan, GAO Peng, et al. Operating characteristics analysis of thermoelectric cooler enhanced air cooling module[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(2): 48-55.)

[8] FERNANDES A C, PETERSEN B, MØLLER L, et al. Caught in-between: System for in-flow inactivation of enzymes as an intermediary step in "plug-and-play" microfluidic platforms[J]. New Biotechnology, 2018, 47: 39-49.

[9] 刘勇, 高娜, 朱灵, 等. 微流控PCR装置中温度控制技术评述[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(2): 8-10, 14.(LIU Yong, GAO Na, ZHU Ling, et al. Review of temperature control technology of PCR microfluidic devices [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012, 31(2): 8-10, 14.)

[10] SGRO A E, ALLEN P B, CHIU D T. Thermoelectric manipulation of aqueous droplets in microfluidic devices[J]. Analytical Chemistry, 2007, 79(13): 4845-4851.

[11] VELVE C G, FU C, LE B M, et al. Fast microfluidic temperature control for high resolution live cell imaging [J]. Lab on a Chip, 2011, 11(3): 484-489.

[12] HAN Chao, MA Rui, SUN Zilong, et al. A temperature control system integrated with a microfluidic chip for sperm analysis[C]//Seventh International Conference on Photonics and Imaging in Biology and Medicine. Wuhan: SPIE, 2009, 7280: 40-48.

[13] 申利梅, 陈焕新, 梅佩佩, 等. 热电制冷模块热连接与电连接的性能优化分析[J]. 化工学报, 2012, 63(5): 1367-1372.(SHEN Limei, CHEN Huanxin, MEI Peipei, et al. Optimization analysis on thermal connection and electrical connection of thermoelectric refrigeration modules [J]. CIESC Journal, 2012, 63(5): 1367-1372.)

[14] SUN D, SHEN L, CHEN H, et al. Modeling and analysis of the influence of Thomson effect on micro-thermoelectric coolers considering interfacial and size effects[J]. Energy, 2020, 196: 117116.

[15] 申利梅, 陈焕新, 张威, 等. 影响热电制冷性能的关键因素及其分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1866-1872. (SHEN Limei, CHEN Huanxin, ZHANG Wei, et al. Analysis of the crucial factors affecting the performance of thermoelectric cooling[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(10): 1866-1872.)

[16] MINNICH A J, DRESSELHAUS M S, REN Z F, et al. Bulk nanostructured thermoelectric materials: Current research and future prospects[J]. Energy & Environmental Science, 2009, 2(5): 466.

[17] 汪若尘, 周润泽. 新型碲化铋基温差发电系统数值及试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 61-66. (WANG Ruochen, ZHOU Runze. Numerical and experiment study on novel Bismuth Telluride-based thermoelectric power generation system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(12): 61-66.)

[18] JOSEPHSON L L, GALUSH W J, FURST E M. Parallel temperature-dependent microrheological measurements in a microfluidic chip [J]. Biomicrofluidics, 2016, 10(4): 043503.

[19] 聂山钧, 王明富, 高晓东, 等. 热电制冷器温度依赖的材料参数的提取[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(11): 68-74. (NIE Shanjun, WANG Mingfu, GAO Xiaodong, et al. Extraction of the temperature-dependent thermoelectric material parameters of thermoelectric cooler[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(11): 68-74.)

[20] YI P, AWANG R A, ROWE W S T, et al. PDMS nanocomposites for heat transfer enhancement in microfluidic platforms[J]. Lab on a Chip, 2014, 14(17): 3419-3426.

[21] DOBROVINSKAYA E R, LYTVYNOV L A, PISHCHIK V. Sapphire: Material, manufacturing, applications[M]. US: Springer, 2009.

通信作者简介

孙东方,男,博士,讲师,合肥工业大学汽车与交通工程学院, 15656585991,E-mail: dfsun@ hfut. edu. cn。研究方向:热电制冷性能强化机制及其创新应用。

About the corresponding author

Sun Dongfang, male, Ph. D., lecturer, School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, +86 15656585991, E-mail: dfsun @ hfut. edu. cn. Research fields: performance enhancement and innovative application of thermoelectric cooler.