

文章编号:0253-4339(2024)04-0085-08

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2024.04.085

电子芯片弹热制冷式热控系统的数值模拟

赵志明¹ 刘奇¹ 蒋翔俊² 董兴琨² 邹吾松³ 张笑凡³

(1 陕西科技大学机电工程学院 西安 710021; 2 西安电子科技大学机电工程学院 西安 710071;

3 中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所 无锡 641100)

摘要 电子行业的迅猛发展使电子设备的热流密度急剧攀升。高效的散热方法,能够显著降低设备的工作温度,提升其性能并延长使用寿命。为进一步降低芯片的最高使用温度,提出一种基于形状记忆合金(SMA)弹热效应的电子芯片热控方法,即将卸载过程中产生的冷能通过流体介质输送至具有良好散热性能的电子芯片微通道散热器热控系统中。利用FLUENT软件,分析三维条件下系统的传热特性。结果表明:冷却后的传热流体进一步降低芯片的最高温度达5.5 K,微通道散热器性能提高约10.7%。经参数分析发现,提高制冷系统的循环频率和冷却液体积流量可以显著提高其制冷能力,循环频率为0.25 Hz和0.33 Hz时分别可提高68%和92%。

关键词 散热;弹热效应;微通道散热器;制冷系统;制冷能力

中图分类号:TB61⁺1; TB64

文献标识码: A

Numerical Simulation of Elastocaloric Cooling Thermal Control System for Electronic Chips

Zhao Zhiming¹ Liu Qi¹ Jiang Xiangjun² Dong Xingkun² Zou Wusong³ Zhang Xiaofan³

(1. Collage of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an, 710021, China; 2. Mechanical and Electrical Engineering, Xidian University, Xi'an, 710071, China; 3. Leihua Electronic Technology Institute, Aviation Industry Corporation of China, Wuxi, 641100, China)

Abstract The rapid development of the electronic industry has led to a sharp increase in the heat flux of electronic equipment. The search for efficient cooling methods can significantly reduce the operating temperature of devices, improve their performance, and extend their lifespan. To further reduce the maximum operating temperature of chips, this study proposes a thermal control method for an electronic chip using the elastocaloric effect in shape memory alloys. The cold energy generated during unloading was transferred through the fluid to the microchannel heat sink thermal control system of the electronic chip with good heat dissipation performance. The temperature variation characteristics of the system under three-dimensional conditions were analyzed using FLUENT software. The results showed that the heat transfer fluid after refrigeration could reduce the highest temperature of the chip by 5.5 K, and the performance of the microchannel heat sink was improved by approximately 10.7%. Parametric analysis shows that an increase in the cycle frequency and accumulated flow rate of cooling liquid can significantly improve the cooling capacity of the refrigeration system, with cycle frequencies of 0.25 Hz and 0.33 Hz improving the cooling power by 68% and 92%, respectively.

Keywords heat dissipation; elastocaloric effect; microchannel heat sink; refrigerating system; cooling power

随着电子行业向微型化和高集成化方向发展,电子器件内部热量积聚愈发剧烈,热流密度急剧攀升,工作温度也相应上升。长时间在高温环境下工作,会严重影响电子设备的使用性能和寿命。研究表明,高温是电子设备最主要的失效形式^[1-2]。因此,合理控制电子设备的工作温度是提高其可靠性和延长寿命的有效方法。微通道散热器是当前电子设备冷却系

统中的热门研究领域之一,由 D. B. Tuckeman 等^[3]于1981年提出,具有结构紧凑、传热能力强等特点。

近年来,研究者们采用多种方法对微通道散热器进行优化,提高其传热效率。如 H. A. Kose 等^[4]通过对比矩形、三角形和梯形3种不同截面形状的微通道,在相同条件下,发现矩形具有更高的努塞尔数和更低的进出口压降。A. Rajalingam 等^[5]通过研究截

面变化的通道证明截面变化有益于增强二次流以提升整体性能。Tan Hui 等^[6]基于自然界传热性能优良的网络拓扑,对比了 5 种仿生拓扑结构,发现仿蜘蛛网结构在高热流密度下表现出更加优异的性能。李昊等^[7]对比 3 种不同结构发现,进出口位置垂直对角布置的结构散热性能更佳。Zhuang Dawei 等^[8]基于心血管启发,提出菱形分形拓扑结构,该结构在降低流阻和提高散热性能方面优势显著。Qian Sihao 等^[9]采用基于密度法的拓扑优化方法,对微通道结构进行了优化设计。相较于传统 S 型流道,经过优化后的结构在降低最高温度和提高均温性能方面有明显改善。此外, M. Hadavand 等^[10-12]对传热介质进行了研究,并采用导热系数更高的纳米流体作为传热流体,结果表明,相比于基液,纳米流体具有更好的散热性能,且随着纳米粒子体积浓度的增加,导热性能也得到提升。采用纳米流体的显著缺点是增加了流体的黏度,导致流体流动时压降更高。

综上所述,目前强化微通道传热性能的方法主要从微通道结构和传热介质两方面入手。此外,微通道散热器的散热能力与传热流体温度之间存在重要关系。随着传热流体温度的降低,微通道散热器的散热性能相应提高。但该方法受限于传统制冷技术,因此相关研究相对较少。而新型固态制冷技术的发展为电子行业提供了潜在的解决方案。

弹热制冷技术是近年发展起来的一种新型固态制冷技术。2014 年,美国能源部将其列为 20 余项替代传统蒸气式制冷技术中最具潜力的技术,该技术主要的一类介质是形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)。其制冷机制为:当 SMA 在受到轴向交变应力时,会发生马氏体相与奥氏体相间的相互转换,并伴随相变潜热的变化。在 SMA 卸载过程中,由于自身温度降低,它会从周围环境中吸收热量以恢复自身温度,从而实现制冷效果^[13-14]。将弹热制冷技术应用于微通道散热器中,可有效降低传热流体温度并提高微通道的散热能力。

根据目前的研究结果, Ni-Ti 合金具有较高的绝热温度变化,因此成为固态制冷领域研究最广泛的制冷工质之一。在环境温度为 322 K 的条件下, J. Tušek 等^[15]测得 Ni-Ti 合金在加载时表现出 25 K 的绝热温变,而在卸载时表现出 21 K 的绝热温变。此外,在相同条件下, Ni-Ti 合金的制冷能力为 7 W/g, 远高于 Cu-Al-An 合金^[16]。从系统层面, J. Tušek 等^[17]在主动回热式循环中测得系统具有 15 K 的温升。Zhang Jiongiong 等^[18]通过增大传热流体与记忆合金的传热面积,成功将 SMA 的制冷能力提高 52.9%。

Qian Suxin 等^[19]对主动回热式系统进行数值分析,结果表明系统最高可实现 70 K 的理论制冷温差。

本文采用弹热制冷系统来设计电子芯片的散热,通过降低传热流体温度进一步降低芯片的最高温度。使用 Ni-Ti 合金作为弹热制冷工质,并构建了主动回热式制冷系统模型。通过使用有限元分析软件 FLUENT 对模型进行瞬态传热和流动模拟,分析 SMA 的温度变化,并观测制冷系统和芯片的温度变化情况。最后,研究了制冷系统的制冷量,并分析影响其性能的因素,以验证弹热制冷技术在电子设备散热中的应用价值。

1 热控系统模型

1.1 主动回热式循环原理

热控系统采用两组 SMA 床构成主动回热式结构,如图 1 所示。系统中包含热端换热器、冷端换热器、热汇(环境)、热源(微通道散热器及芯片组件)、SMA 床、流体泵、控制阀($V_1 \sim V_4$)等元件。在一次制冷循环的前半周期中(图 1(a)), SMA#1 卸载后处于低温状态, SMA#2 在驱动力 F 作用下经加载后处于高温状态。当传热流体经过这两组 SMA 床时,温度会发生变化:流经 SMA#1 时,温度降低;流经 SMA#2 时,温度升高。此外,系统内部设置有流体泵为传热流体提供动力,并将高温流体和低温流体分别输送至热端换热器和冷端换热器处,冷端换热器和热端换热器的温度分别用 T_c 和 T_h 表示。在制冷循环的后半周期中(图 1(b)),整个过程与前半个周期刚好相反,通过阀门控制流体流向实现 SMA#1 排热和 SMA#2 制冷。

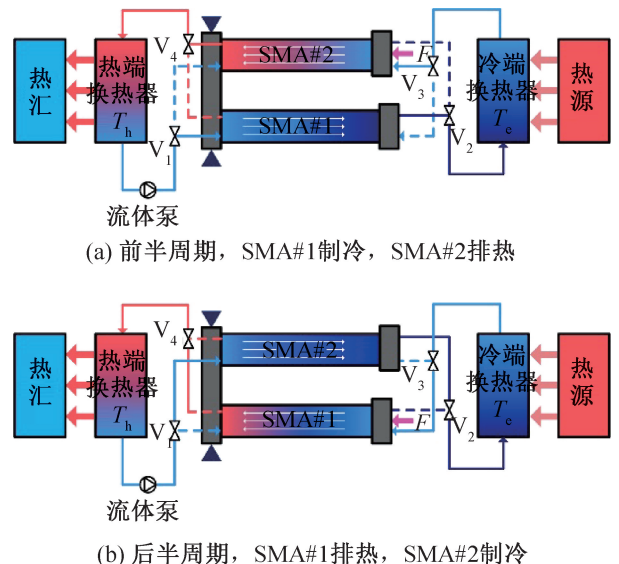


图 1 主动回热式冷却系统原理
Fig.1 Principle of active elastocaloric regenerative cooling system

在本研究中,由于冷却对象为电子芯片,冷端换热器与微通道直接相连,用于芯片冷却。在热端换热器处,高温流体与环境进行充分热交换,目的是使热端换热器出口处的流体温度恢复至室温,然后进入下一循环。

1.2 仿真模型

根据图 1 中的原理建立热控系统的仿真模型。为了提高 SMA 与流体的传热能力,选用传热面积较大的超弹性 Ni-Ti 二元合金板作为制冷工质^[20],其物理特性及几何参数如表 1 所示^[19]。为简化计算,本文仅保留流体域及重要部分固体域(SMA 床和微通道散热器),仿真模型如图 2(a)所示。微通道散热器选用仿蛛网式结构,通道截面为矩形,文献[6]表明该结构具有良好的散热性能,通道布局如图 2(b)所示。

表 1 Ni-Ti 合金的物理属性和仿真模型参数

Tab.1 Physical properties of Ni-Ti alloy and simulation model parameters

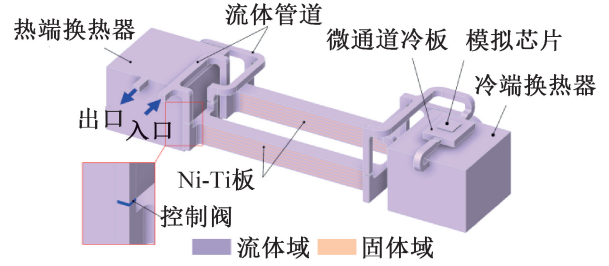
特性	数值
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	6 500
导热系数 $k/[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	18
比热容 $c/[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	550
熵变 $\Delta s/[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	42
绝热温变 $\Delta T_{\text{ad}}/\text{K}$	22.7*
长度 l/mm	106
宽度 w/mm	10
厚度 h/mm	1
每组 SMA 质量 m_s/g	41.34
弹性模量 E/MPa	30 000
最大相变应力 $\sigma_{\text{max}}/\text{MPa}$	800
相变应变 ε_{T}	0.08
最大驱动力 P/kN	48

注:*表示在 298.15 K 下的绝热温变。

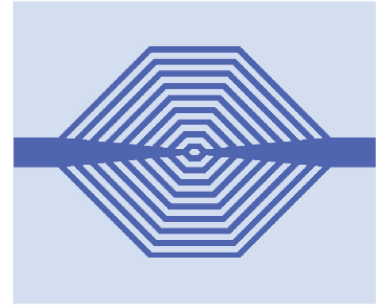
2 控制方程及边界条件

2.1 控制方程

本文在三维瞬态条件下对 SMA 的弹热效应及其与传热流体的传热特性进行数值模拟,研究传热流体的温度变化情况,并分析经过冷却后的传热流体对电子芯片散热性能的影响。采用 FLUENT 软件进行流热耦合模拟,根据式(1)计算出入口雷诺数的取值范



(a) 弹热制冷系统三维仿真模型



(b) 仿蛛网微通道结构

图 2 热控系统仿真三维模型

Fig.2 The 3D simulation model of thermal control system

围为 835~1 668,确定流动状态为层流。

$$Re = \rho v_{\text{in}} D_h / \mu \quad (1)$$

式中: Re 为入口雷诺数; ρ 为密度, kg/m^3 ; v_{in} 为入口速度, m/s ; D_h 为入口特征长度, m ; μ 为动力黏度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。

在求解时进行如下假设:

- 1) 流体不可压缩,且流动过程不发生相变;
- 2) 各类材料的物理性质不随温度变化;
- 3) 忽略辐射传热对系统的影响;
- 4) 忽略黏性耗散的影响。

基于上述假设,热控系统在求解时应满足质量守恒定律、动量守恒定律及能量守恒定律,其控制方程如下所示。

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

能量方程:

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} + u \frac{\partial T_f}{\partial x} + v \frac{\partial T_f}{\partial y} + w \frac{\partial T_f}{\partial z} = \frac{k_f}{\rho_f c_f} + \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{k_s}{\rho_s c_s} \left(\frac{\partial T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial T_s}{\partial y^2} + \frac{\partial T_s}{\partial z^2} \right) + g''' \quad (7)$$

式中: u, v, w 分别为流体沿 x, y, z 方向上的速度分量, m/s ; t 为时间, s ; ρ 为所用材料的密度, kg/m^3 ; ν 为流体的运动黏度, m^2/s ; p 为压强, Pa ; T 为温度, K ; k 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。下标 f 和 s 分别表示流体和固体。

式(7)中, g''' 为 SMA 相变时的内热源项, 当加载 SMA 时, 该项为正, 当卸载 SMA 时, 该项为负, 仅当 SMA 无相变发生时, 该项为零。本文模拟 SMA 相变时进行如下假设: 马氏体的相变率与合金应变率相等, 且加载和卸载过程中 SMA 产生的能量相同。内热源由式(8)定义^[16]:

$$g''' = \rho_s T_s \Delta s \dot{\xi}_M \quad (8)$$

式中: Δs 为弹热材料发生相变过程的熵变值, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $\dot{\xi}_M$ 为材料相变过程中的马氏体相变速率, s^{-1} , 文献[16]给出了该项的具体表达式。

SMA 在轴向拉压时, 其本构方程^[16]为:

$$\varepsilon(\sigma, T_s, \xi_M) = \xi_A \frac{\sigma}{E_A} + \xi_M \left(\varepsilon_T + \frac{\sigma}{E_M} \right) \quad (9)$$

式中: ε 为材料的应变; ε_T 为相变应变; σ 为对 SMA 所施加的应力, MPa ; E 为弹性模量, MPa ; ξ_A 和 ξ_M 分别为奥氏体质量分数和马氏体质量分数, 满足如下关系:

$$\xi_A + \xi_M = 1 \quad (10)$$

2.2 边界条件

根据上述假设, 设置计算模型的边界条件: 入口为速度入口, 在 0.4 L/min 的体积流量下, 计算得入口速度为 0.42 m/s , 并指定入口温度恒定为室温, 以模拟热端换热器与环境进行充分热交换; 在该流量下, 回热器内的流体的平均流速为 0.1 m/s ; 出口为压力出口; 其他壁面为绝热条件。芯片尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$, 功率为 100 W , 芯片与微通道冷板之间的传热面积为 100 mm^2 , 芯片热功率和 SMA 相变潜热采用能量源项加载。初始时, 系统中传热流体、热端换热器、冷端换热器、SMA 床以及芯片的温度均为处于室温状态。

2.3 网格无关性验证

对模型进行网格无关性验证, 将热控系统分成 2 个子系统, 即由微通道散热器、传热流体和电子芯片

组成的微通道散热系统, 以及由 SMA、传热流体组成的弹热制冷系统, 分别对 2 个子系统进行网格独立性验证。

表 2 所示为芯片功率为 100 W 时 5 组不同网格密度对应的芯片最高温度。由表 2 可知, 在第 III 组和第 IV 组网格密度下, 芯片最高温度变化小于 0.3% , 同时考虑到计算精度和时间成本, 因此选取第 III 组网格尺寸进行模拟。

表 2 微通道散热器的网格无关性验证

Tab.2 Grid independency test of microchannel heat sink

组别	单元尺寸/mm		单元数	芯片温度/K
	流体	固体		
I	0.5	1	99 316	351.9
II	0.4	0.8	175 680	351.6
III	0.3	0.6	381 867	351.3
IV	0.2	0.6	747 812	351.2
V	0.17	0.6	1 054 055	351.1

在该网格密度下, 通过与文献[6]的实验结果进行对比, 验证微通道散热器的仿真结果, 得到在不同热流密度下芯片的最高温度, 如图 3 所示。本文仿真方法与实验结果基本一致, 证明其适用于芯片热控系统的研究。

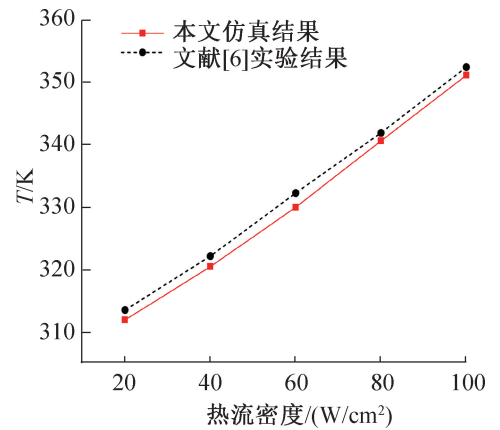


图 3 模型仿真数据与实验数据对比

Fig.3 Comparison of simulation and experimental data

对于制冷系统, 因两组 SMA 床的结构相同, 为了降低计算成本, 取其中一组 SMA 床及相应的传热流体进行网格无关性验证, 在体积流量为 0.4 L/min 的条件下评估单组 SMA 床单次制冷温差。图 4 所示为 7 组不同网格数量下的制冷温差, 由图 4 可知, 在网格密度在 $150 \text{ 万} \sim 350 \text{ 万}$ 的计算结果变化很小, 所以本文选用第 5 组网格密度作为 SMA 床的计

算网格。

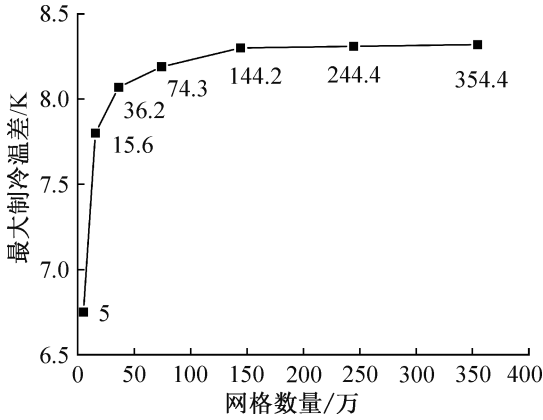


图4 SMA床的网格无关性验证

Fig.4 Grid independence test of SMA bed

3 结果与分析

3.1 系统的温度变化

在制冷系统的循环频率为 0.25 Hz,冷却液的体积流量为 0.4 L/min,且芯片功率恒定为 100 W/cm²时,热端换热器温度 T_h 和冷端换热器温度 T_c 随时间的变化如图 5 所示。系统中各部分初始温度均为 298.15 K。在系统开始运行后, T_h 开始上升, T_c 开始下降。当系统运行至约 50 s, T_h 和 T_c 趋于稳定状态。此时, T_c 在 292.6~292.8 K 波动,而 T_h 则在 304~304.2 K 波动。制冷系统产生约 11.4 K 的系统温升,且冷端换热器可实现约 5.6 K 的温降。基于相变潜热相等的假设, T_h 和 T_c 在经过相同的循环周期后达到稳定状态。

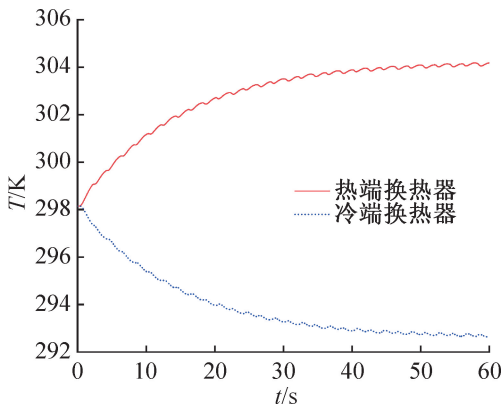
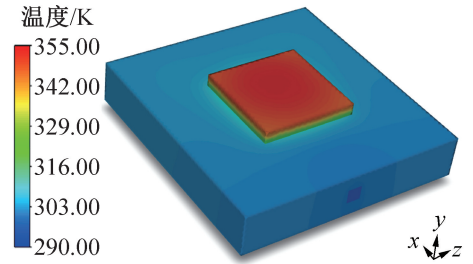


图5 冷端换热器和热端换热器的温度分布

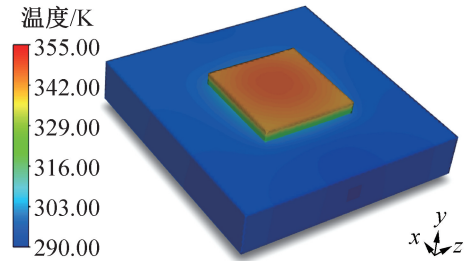
Fig.5 Temperature variation of hot side heat exchanger and cold side heat exchanger

图 6 所示为传热流体在 2 种不同温度下,芯片的最高温度分布情况。与常温传热流体相比,冷却后的传热流体可将电子芯片的最高温度降低约 5.6 K,散

热性能提高约 10.7%。从温度分布云图可知,改变传热流体温度仅改变微通道散热器和芯片的最高温度,在 2 种不同温度流体的作用下,从微通道入口端到出口端具有相似的温度梯度变化。



(a) 常温流体作用下芯片温度分布



(b) 低温流体作用下芯片温度分布

图6 两种温度下芯片温度分布

Fig.6 Chip temperature distribution at two temperatures

图 7 所示为电子芯片上下两表面的平均温度和冷端换热器温度 T_c 随时间的变化。在循环初始时,由于 T_c 变化较慢,导致微通道内的流体趋于常温。此时芯片的上表面和下表面的平均温度分别为 349.65 K 和 331.46 K。随着系统运行, T_c 逐渐下降,芯片温度也随之降低。由图 7 可知, T_c 达到稳定状态后,其平均温度约为 292.6 K。此时芯片的上表面温度和下表面温度各自降至 344.21 K 和 326.01 K,相较于常温冷却液均降低约 5.4 K。此外,芯片温度

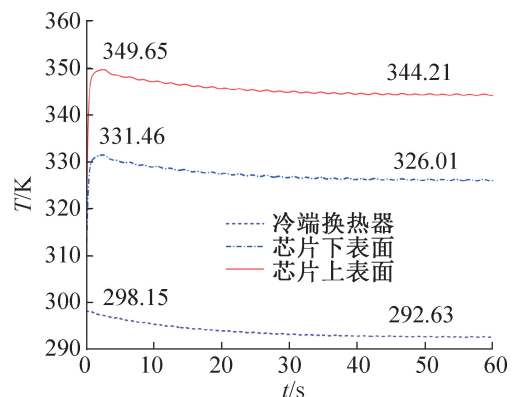


图7 芯片和冷端换热器温度随时间的变化

Fig.7 Chip and cold end heat exchanger temperatures over time

的变化情况与 T_c 变化情况具有同步性,说明可通过最大程度降低 T_c 的方式来实现芯片温升的最小化。因此,本研究中以提高制冷温差为主要目的。

3.2 制冷系统制冷量的影响因素

比制冷能力 SCP (specific cooling power) 可用于衡量 SMA 的单位质量制冷功率密度,按照式(11)^[19]计算:

$$SCP = Q_c / m_s \quad (11)$$

式中: m_s 为每组合金床中合金质量, g; Q_c 为系统的制冷功率, W, 可按照式(12)计算:

$$Q_c = \frac{c_f \rho_f V \frac{1}{f} (T_{c,out} - T_{c,in})}{\frac{1}{f}} = c_f \rho_f V (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (12)$$

式中: V 为传热流体的体积流量, L/min; f 为制冷系统循环频率, Hz; $T_{c,out}$ 和 $T_{c,in}$ 分别为微通道出口和入口温度, K。

分析图7可知,芯片的最高温度受传热流体温度影响较大。而弹热制冷系统的制冷量与循环频率、流速及 SMA 长度等因素有关^[19]。循环频率和流速主要影响系统的制冷温差,本文将重点探讨这2种因素对系统制冷量的影响。分别设置循环周期为4 s和3 s,循环频率分别为0.25、0.33 Hz,并研究不同体积流量下 SMA 的制冷性能。

在冷热端散热情况相同的条件下,得到不同流量下热端换热器温度 T_h 与冷端换热器 T_c 的温差 T_{diff} ($T_{\text{diff}} = T_h - T_c$) 如图8所示。结果显示,在2种循环频率下,系统温差随体积流量的增大呈下降趋势。这与主动回热式制冷系统的特性有关。当循环达到稳定后, SMA 两端存在明显的温度梯度。在流量较小时,流体将 SMA 高温端产生的冷量带至低温端,而低温

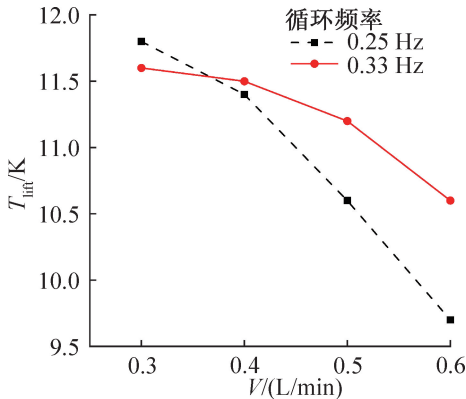
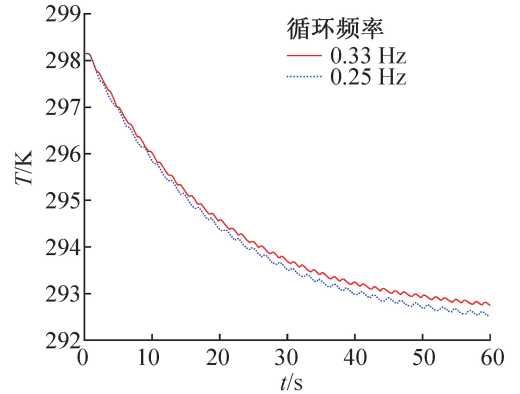


图8 不同体积流量下 T_h 与 T_c 的温差

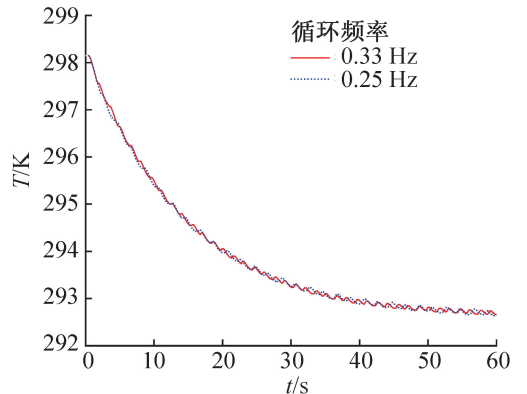
Fig.8 Temperature difference between T_h and T_c at different volume flow rate

端产生的冷量直接通过流体进入冷端换热器中,因此 T_c 下降。随着流量增大,更多冷量进入热源中,导致冷端温度上升,进而降低了 SMA 两端的温差。由图8还可知,循环频率小对应着更大的温度变化差值。在较小频率下,单个周期运行时间长,流体与 SMA 间换热充分,因此导致温差小于高频率对应的温差。

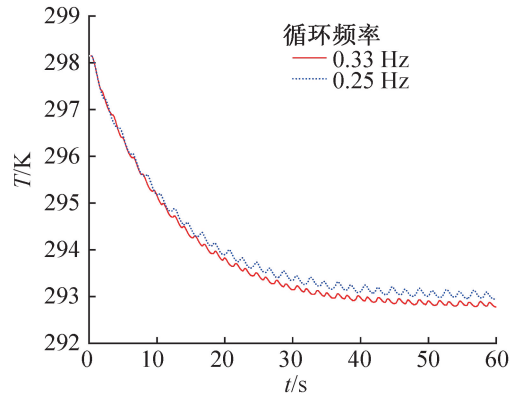
图9所示为不同循环频率下冷端换热器温度随时间的变化。由图9(a)可知,当体积流量为0.3 L/min,循环频率为0.33 Hz时, T_c 低于循环频率为0.25 Hz的情况。而随着体积流量增大(图9(b)~(d)),流体在 SMA 板内的流速增大,进而增大了传热速率,导致 SMA 床两端的温差减小。在0.25 Hz 频率下达到稳定状态后,其稳定值有所上升。当体积流量为



(a) $V=0.3$ L/min



(b) $V=0.4$ L/min



(c) $V=0.5$ L/min

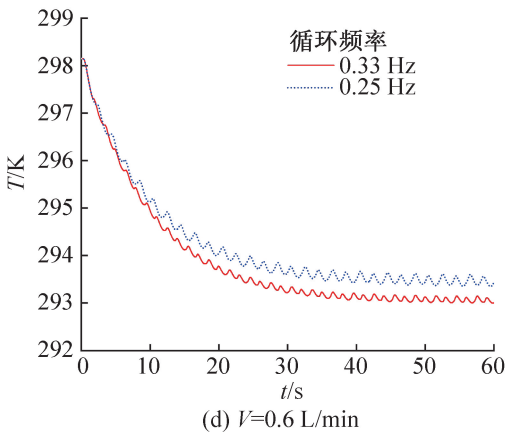


图9 不同循环频率下冷端换热器温度随时间的变化

Fig.9 Temperature variation of cold side heat exchanger at different frequency

0.6 L/min 时,循环频率为 0.33 Hz 时热源温度比 0.25 Hz 时热源温度低约 0.5 K。此外,对比频率为 0.25 Hz 和 0.33 Hz 时冷端换热器的温度变化发现,在各流量下,频率为 0.33 Hz 时热源温度的波动幅度总是小于 0.25 Hz 的情况。

图 10 所示为 SCP 随体积流量的变化。随着体积流量的增大,SCP 在两种循环频率下均呈上升趋势,当传热流体体积流量从 0.3 L/min 增至 0.6 L/min 时,SCP 分别增加 68% ($f=0.25$ Hz) 和 92% ($f=0.33$ Hz),且频率小时,SCP 反而越大。原因可归结为频率小对应着更长的制冷周期,传热流体可将 SMA 产生的冷量充分带入热源内,提高总制冷量。

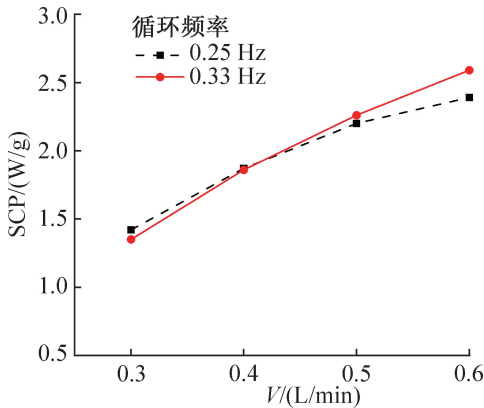


图 10 体积流量对 SCP 的影响

Fig.10 Effect of volume flow rate on SCP

在不同工况下,对比芯片最高温度降低值以探究体积流量和循环频率对热控系统的性能影响,结果如图 11 所示。当循环频率为 0.33 Hz,体积流量为 0.4 L/min 时芯片的温降最大,约为 5.6 K。随着流量增大,芯片最高温差先增大后减小,且在较小的循环频率下,流量大对应更小的温差,微通道散热性能提升并不显著。此外,随着流量增大,微通道内的传热速

率加快,芯片的最高温度也随之降低,这对微通道散热器的传热性能是有利的,但势必导致更大的进出口压降,从而增大泵功率。因此,对于所给定的热控系统,存在最佳的体积流量,在提高系统制冷量的同时,能够合理控制芯片的温升。

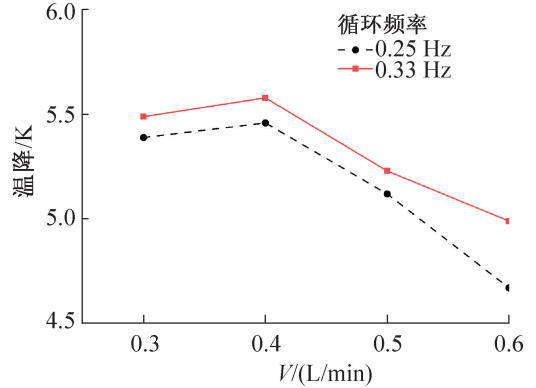


图 11 不同体积流量下芯片最高温差

Fig.11 Maximum temperature difference of chip at different flow rate

4 结论

本文通过三维条件下对 SMA 相变时释放或吸收的能量进行模拟,并分析了传热流体与 SMA,以及传热流体与微通道散热器之间的传热特性。同时对系统在不同工况下的性能进行了研究,得到如下结论:

1) 通过对比常温流体和低温流体对微通道散热器的影响,发现低温流体可将芯片最高温度降低 5.6 K,进一步提高微通道散热器的性能 10.7%。

2) 不同的循环频率和体积流量对热控系统性能影响显著。增大体积流量和提高循环频率均可提高制冷系统的制冷能力。在循环频率为 0.25 Hz 和 0.33 Hz 时,体积流量从 0.3 L/min 升至 0.6 L/min 时,SCP 可分别提高 68% 和 92%。

本文受陕西省自然科学基金(2023-JC-ZD-29、2022JQ-561)项目资助。(The project was supported by the Natural Science Foundation of Shaanxi Province (No. 2023-JC-ZD-29 & No. 2022JQ-561).)

参考文献

[1] 梁灵娇,刘金平,许雄文. 用于高热通量电子散热的平板环路重力热管[J]. 化工学报, 2018, 69(10): 4231-4238. (LIANG Lingjiao, LIU Jinping, XU Xiongwen. Novel flat plate evaporator of loop gravity assisted heat pipe for high heat flux electronic cooling[J]. CIESC Journal, 2018, 69(10): 4231-4238.)

[2] 周礼,唐旻,钱佳唯,等. 面向系统集成的散热天线设

- 计[J]. 电子学报, 2022, 50(7): 1766–1773. (ZHOU Li, TANG Min, QIAN Jiawei, et al. Design of heatsink antennas for integrated systems [J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(7): 1766–1773.)
- [3] TUCKERMAN D B, PEASE R F W. High-performance heat sinking for VLSI[J]. IEEE Electron Device Letters, 1981, 2(5): 126–129.
- [4] KOSE H A, YILDIZELI A, CADIRCI S. Parametric study and optimization of microchannel heat sinks with various shapes [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 211: 118368.
- [5] RAJALINGAM A, CHAKRABORTY S. Estimation of the thermohydraulic performance of a microchannel heat sink with gradual and sudden variation of the flow passage[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 190: 122776.
- [6] TAN Hui, WU Longwen, WANG Mingyang, et al. Heat transfer improvement in microchannel heat sink by topology design and optimization for high heat flux chip cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 129: 681–689.
- [7] 李昊, 丁晓红, 景大雷. 液冷通道分布优化设计的仿真和试验研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10): 198–206. (LI Hao, DING Xiaohong, JING Dalei. Experimental and numerical investigation of fluid cooling channel layout designed by topology optimization [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(10): 198–206.)
- [8] ZHUANG Dawei, YANG Yifei, DING Guoliang, et al. Optimization of microchannel heat sink with rhombus fractal-like units for electronic chip cooling [J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 116: 108–118.
- [9] QIAN Sihao, WANG Wei, GE Chaoliu, et al. Topology optimization of fluid flow channel in cold plate for active phased array antenna[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 57(6): 2223–2232.
- [10] HADAVAND M, YOUSEFZADEH S, ALI AKBARI O, et al. A numerical investigation on the effects of mixed convection of Ag-water nanofluid inside a sim-circular lid-driven cavity on the temperature of an electronic silicon chip [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 162: 114298.
- [11] MUKESH KUMAR P C, ARUN KUMAR C M. Numerical study on heat transfer performance using Al_2O_3 /water nanofluids in six circular channel heat sink for electronic chip[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 21: 194–201.
- [12] EL-KHOULY M M, EL BOUZ M A, SULTAN G I. Experimental and computational study of using nanofluid for thermal management of electronic chips [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39: 102630.
- [13] QIAN Suxin, GENG Yunlong, WANG Yi, et al. A review of elastocaloric cooling: materials, cycles and system integrations [J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 64: 1–19.
- [14] 钱苏昕, 袁丽芬, 晏刚, 等. 弹热制冷技术的发展现状与展望[J]. 制冷学报, 2018, 39(1): 1–12. (QIAN Suxin, YUAN Lifen, YAN Gang, et al. State-of-the-art and prospects of elastocaloric cooling technology [J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(1): 1–12.)
- [15] TUŠEK J, ENGELBRECHT K, MIKKELSEN L P, et al. Elastocaloric effect of Ni-Ti wire for application in a cooling device [J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(12): 124901.
- [16] TUŠEK J, ENGELBRECHT K, MILLÁN-SOLSONA R, et al. The elastocaloric effect: a way to cool efficiently[J]. Advanced Energy Materials, 2015, 5(13): 1500361.
- [17] TUŠEK J, ENGELBRECHT K, ERIKSEN D, et al. A regenerative elastocaloric heat pump[J]. Nature Energy, 2016, 1(10): 16134.
- [18] ZHANG Jiongjiang, ZHU Yuxiang, CHENG Siyuan, et al. Enhancing cooling performance of NiTi elastocaloric tube refrigerant via internal grooving [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 213: 118657.
- [19] QIAN Suxin, YUAN Lifen, YU Jianlin, et al. Numerical modeling of an active elastocaloric regenerator refrigerator with phase transformation kinetics and the matching principle for materials selection[J]. Energy, 2017, 141: 744–756.
- [20] 陈炎亮, 王尧, 孙文, 等. 基于镍钛片的弹热冰箱设计与仿真研究[J]. 制冷学报, 2022, 43(4): 59–68. (CHEN Yanliang, WANG Yao, SUN Wen, et al. Design and simulation of elastocaloric refrigerator based on Ni-Ti plate [J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(4): 59–68.)

通信作者简介

蒋翔俊, 男, 副教授, 西安电子科技大学机电工程学院, 13325474405, E-mail: xjjiang@xidian.edu.cn. 研究方向: 智能材料与结构设计。

About the corresponding author

Jiang Xiangjun, male, associate professor, School of Mechanical and Electrical Engineering, Xidian University, 86–13325474405, E-mail: xjjiang@xidian.edu.cn. Research fields: smart materials and structural design.