

电热微夹持器微尺度传热分析与优化设计*

林琳^{1,2}, 杨国舜³, 武灏¹, 申浩¹, 陈立国¹

(1. 苏州大学机器人与微系统研究中心 苏州, 215021)

(2. 厦门海洋职业技术学院海洋机电学院 厦门, 361012)

(3. 航天工程装备(苏州)有限公司 苏州, 215100)

摘要 针对电热平行梁微夹持器存在的末端夹指高温问题, 首先, 对电热微夹持器的传热机理进行分析, 结合实验得到微尺度下的拟合传热参数; 其次, 对传统的电热微夹持器末端夹指设计了 S 型梁散热结构, 使用显微红外分析仪对微夹持器对优化效果进行表征; 最后, 通过微球夹持实验验证了优化设计的可靠性。结果表明, 空气自然对流换热系数可达到宏观状态下的 60~300 倍, 在此数据基础上进行的优化设计可以使末端夹指温度降低约 45%。该优化方案对其他材料或结构的电热微夹持器也具有一定的通用性。

关键词 电热微夹持器; 尺度效应; 传热参数; 温度场; 结构优化

中图分类号 TN302; TH39

引言

微夹持器作为微机电系统 (micro-electro mechanical system, 简称 MEMS) 中典型的执行部件, 主要用来完成一些微小目标的夹持、移动和组装等操作, 对微操作过程的实施起着至关重要的作用^[1-5]。微夹持器按照驱动方式分类, 主要有压电、电磁、气动、静电以及电热等。由于电热微夹持器具有结构简单、体积小、响应速度快、驱动力大、抗干扰能力强和控制简单等优点^[6-7], 故得到了广泛关注。

电热微夹持器通常使用的材料为硅、SU8 胶和镍铁合金等, 通过集成电路 (integrated circuit, 简称 IC) 工艺制成。驱动结构分为 V 型梁、平行梁和拓扑结构等形式。其中, 以平行梁结构最为紧凑, 其特征尺寸一般在微米级, 通电发热后末端夹指的最高温度一般在 100°C~800°C。如此高的夹指温度会使细胞失活, 也会使一些有机材料融化或变性, 严重限制了电热微夹持器的使用范围。为了降低末端夹指温度, 需对微夹持器的温度场进行分析。研究显示, 当电子元器件尺寸达到一定的微小程度后, 传热特性会与宏观尺度下有很大不同, 会导致尺度效应的产生^[8-9]。目前, 国内外针对电热微夹持器的传热尺度效应的研究较少。

Tuckerman 等^[10]提出了微管道中流动和传热现象与常规管道中流动和传热现象有显著差别。Peirs 等^[11]认为尺度小于 100 μm 的空气自然对流换热系数可高达 100 W/(m²·K), 为宏观状态下的 10~20 倍。文献[12]认为从 6 000 Å 到 400 Å (1 Å=0.1 nm), 铜的热导率会减小 5 倍。以上研究表明, 传热特性确实存在尺度效应, 但是对尺度效应的影响程度没有达成共识。

笔者以结构简单的硅基电热平行梁微夹持器作为研究对象, 对微尺度传热机理进行分析, 并对微尺度传热实验器件的温度场测定进行传热参数 (heat transfer parameters, 简称 HTP) 拟合。在此基础上, 针对末端夹指温度过高的问题进行散热结构的优化设计, 通过对散热梁的温度场测量和微夹持实验表征优化设计的效果。

1 传热分析与热流模型

1.1 传热机理分析

电热微夹持器通过电热驱动, 加载电压后, 电流流经窄的热臂和宽的冷臂, 热臂中产生更多焦耳热以及更高的温度和更大的热膨胀量以驱动末端夹指产生夹持动作^[13-14]。电热微夹持器的传热过程包括热传导、热辐射和空气自然对流换热。下面对微尺

* 国家重点研发计划资助项目 (2018YFB2002900)

收稿日期: 2021-01-26; 修回日期: 2021-03-13

度下的传热过程进行分析。

硅材料中的载热粒子是声子,室温下半导体等固体中声子的平均自由程大约为10~100 nm,声子的输运只有在平均自由程远大于器件特征尺度时,呈现为弹道型而非扩散型,基于扩散输运基础上的Fourier定律才不适用。电热微夹持器驱动臂的特征尺寸取热臂的宽度和最小间隙的宽度值,其特征尺寸一般为10 μm。可见,电热微夹持器的特征尺寸远大于其平均自由程,宏观状态下基于扩散输运基础的Fourier定律和导热系数仍然适用,不受微尺度的影响。

以往对硅材料电热微夹持器的传热研究主要考虑热传导,忽略了对流换热和热辐射的影响。热辐射散热问题主要研究达到稳态后的辐射散热,文献[15]根据特征空间尺度 L 与声子波长 λ_c 、相干长度 l_c 和平均自由程 λ 的关系,分为三类空间微尺度领域。对于硅材料,由于相干长度和波长都是纳米级,而电热微夹持器本身特征尺寸为微米级,所以热辐射仍适用连续介质假定,宏观状态下的经典辐射输运模型斯蒂芬-波尔兹曼定律^[16]仍然适用。

电热微夹持器对流换热发生在空气的自然对流边界层,不能直接套用强制对流理论,这也是受微尺度效应影响的重要参数。空气自然对流是浮升力导致的一种运动现象,密度本是物性参数,但在边界层内会产生梯度变化,并产生体积力,进而形成浮升力。因此,在建立边界层微分方程时,密度应该认为是变化的,需要把密度当成变量使用,并表现为温度的函数。

局部自然对流换热系数 α_x 和努谢尔特数 Nu_x 分别为

$$\alpha_x = \frac{q_w}{t_w - t_\infty} \quad (1)$$

$$Nu_x = \frac{\alpha_x x}{k} = -\theta'(0) \left(\frac{Gr_x}{4} \right)^{\frac{1}{4}} = gPr \left(\frac{Gr_x}{4} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

其中: q_w 为壁面热流; t_w 为壁面温度; t_∞ 为边界层外的理想流体温度; $Gr_x = \beta g \Delta t x^3 / \nu$ 为格拉晓夫数; β 为容积膨胀系数; ν 为空气边界层的运动黏度。

推导出微分精确解为

$$Nu_x = 0.75 \left[\frac{2Pr^2 Gr_x}{5 \left(1 + 2Pr^{\frac{1}{2}} + 2Pr \right)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

其中: $Pr = \nu/a$,为普朗特数; a 为热扩散系数。

式(1)说明牛顿冷却公式仍然成立,将电热微夹持器驱动臂的特征尺寸代入(3),通过式(3)和式(1)计算出不同温度下驱动臂的对流换热系数(convective heat transfer coefficient,简称CHTC) α_x 。从式(3)可以看出,对流换热系数与特征尺寸尺度范围有指数级别的关系,对电热微夹持器的传热特性有较大影响。

1.2 微元体热流模型

电热微夹持器的结构材料是单晶硅,其宏观常规尺度下传热参数^[17]如表1所示。

表1 单晶硅宏观传热参数

Tab.1 Parameters of silicon at conventional scale

传热参数	数值
导热系数 $k / (\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	148
黑度 ϵ	0.6
对流换热系数 $\alpha / (\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	5~25
斯蒂芬-波尔兹曼 $\sigma_b / (\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1})$	5.67×10^{-8}

在电热微夹持器普遍特征尺度的微米级范围内,传热特性和宏观尺度有很大区别。为了测量电热微夹持器传热的热学参数,采用一端连接温度为 T_1 的恒温热源基体,另一端为悬空的长直悬臂梁结构最简化模型。由于热臂长度远大于宽度和高度,故可以忽略横截面上的温度差异。在热臂上距离底部 x 处,取一个垂直于长度方向相距 dx 的两截面形成的微元体进行分析。

微元体上的能量交换由左侧热传导进入微元体的热量 Q_L ,右侧热传导出微元体的热量 Q_R ,微元体侧壁及上下表面热辐射损失的热量 Q_f ,以及微元体侧壁及上下表面对流换热损失的热量 Q_d 。

根据微尺度传热机理分析可知,热传导的尺度效应发生在10~100 nm以下,距离此结构的10 μm特征尺寸相距很远,因此仍然可以使用宏观的Fourier定律和导热系数进行分析。

热传导流入微元体的热量为

$$Q_L = -kwh \left(\frac{dT}{dx} \right)_x \quad (4)$$

其中: k 为热导率。

热传流出微元体的热量为

$$Q_R = -kwh \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x+dx} \quad (5)$$

在微米尺度下斯蒂芬-玻尔兹曼方程仍然适用,

则表面由于热辐射散失的热量为

$$Q_i = 2(\omega + h)\epsilon\sigma_b(T^4 - T_0^4)dx \quad (6)$$

其中: ϵ 为黑度; σ_b 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数。

当电热微夹持器在工作温度为 100~800 °C 时,根据维恩位移定律

$$\lambda_m T = b \quad (7)$$

其中: $b = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$ 。

由于物体的主要辐射波长在 2.7~7.77 μm 之间,已经和长直梁的特征尺寸相当,因此需要考虑热辐射是否受尺度效应影响,不能将宏观状态下硅的表面发射率直接用在微尺度,需要实验进行测定。

在微尺度下,牛顿公式仍然适用,但是对流换热系数与宏观常规尺度状态下有很大不同。表面由于对流换热散失的热量为

$$Q_d = 2(\omega + h)\alpha(T - T_0)dx \quad (8)$$

其中: α 为空气自然对流换热系数。

在稳态下,微元体温度保持不变,根据能量守恒

$$Q_L - Q_R = Q_i + Q_d \quad (9)$$

得到一维稳态微分方程

$$kwh\left(\frac{d^2T}{dx^2}\right) = 2(\omega + h)[\epsilon\sigma_b(T^4 - T_0^4) + \alpha(T - T_0)] \quad (10)$$

进行传热参数测定实验时,利用式(10)进行参数拟合,得到黑度 ϵ 和对流换热系数 α 。

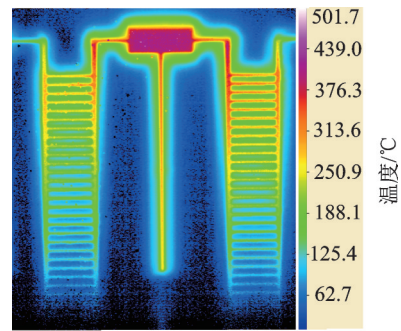
2 传热参数测定

2.1 参数拟合

常规的电热微夹持器及其他电热 MEMS 器件特征尺寸一般在 3~25 μm ,笔者受加工工艺及加工良品率所限,设计长直梁实验器件的主要特征尺寸为 10 μm ,即宽度尺寸 w ,其余尺寸总长度 $l=500 \mu\text{m}$,厚度 $h=50 \mu\text{m}$,制作工艺与电热微夹持器的制作工艺相同。

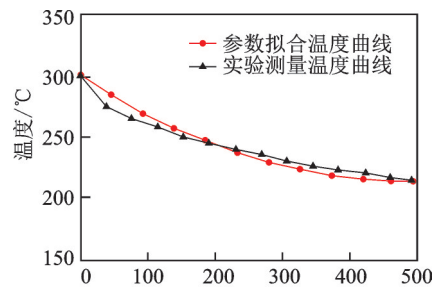
传热参数测量与拟合如图 1 所示。长方体恒温热源为 300 °C,经过梁上的对流与辐射作用,末端温度降为 225 °C。对长直梁部分使用式(10)进行参数拟合,得到黑度 $\epsilon=0.8$,对流换热系数 $\alpha=1\ 558 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$,传热参数拟合曲线如图 1(b)所示,与实测温度曲线吻合度较高。

拟合得到的热辐射系数(thermal radiation coefficient,简称 TRC)与宏观状态下基本相同,对流换



(a) 实测温度场

(a) Temperature field



(b) 传热参数拟合曲线

(b) Fitting curve of HTP

图 1 传热参数测量与拟合

Fig.1 Measurement and fitting curve of HTP

热系数是表 1 中宏观状态下的 60~300 多倍,这也和传热机理分析的对流换热系数与特征尺寸的关系相一致。

2.2 传热参数对温度场影响

使用长直梁上一维温度分布的微分方程分析了不同传热参数对温度场的影响如图 2 所示。图 2(a)所示的黑色曲线为使用宏观传热参数下的温度分布,其空气自然对流换热系数设为宏观状态下的 10 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$;黑体系数设为 0.9;红色曲线为笔者实验的拟合曲线。可以看到,2 条曲线有明显差异,采用宏观的传热参数,长直梁末端温度仅降低了 0.5 °C,宏观的传热分析已经远不能用于特征尺寸为 10 μm 尺度下的传热分析。

图 2(b)为长直梁末端温度随热辐射系数的变化情况,在微米尺度下的辐射效应不会有太大的增强。从图中看出,即使热辐射系数增大到 10,突破了普朗克黑体辐射极限时,其传热效应也没有对温度场产生太多影响。

如图 2(c)所示,长直梁末端温度和对流换热系数近似成线性关系,对流换热系数对温度场的影响较大。

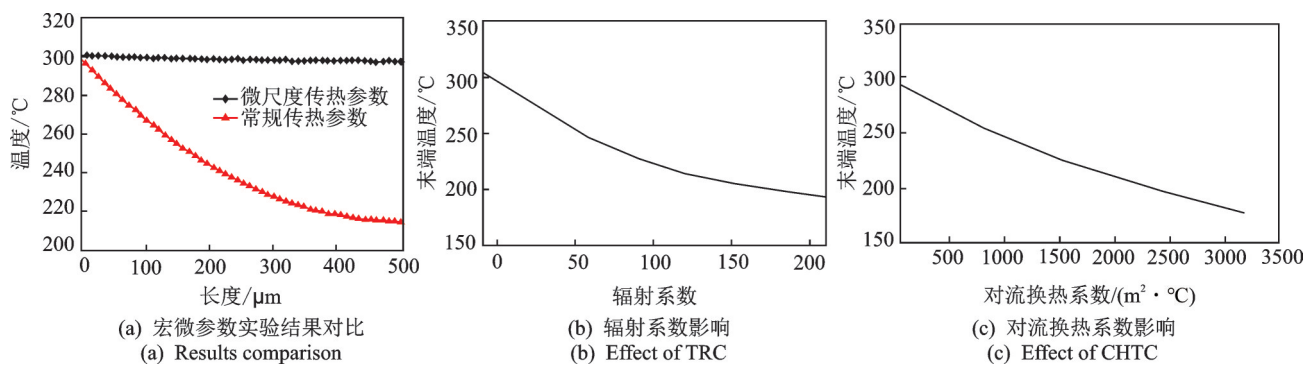


图 2 传热参数对温度场影响

Fig.2 Influence of HTP on temperature field

2.3 微狭缝的影响

微狭缝是电热微夹持器中经常出现的结构,电热平行梁的冷热臂之间、V型夹持器的驱动臂之间都会出现微狭缝结构。为了考察微尺度下狭缝间的散热,制作了单狭缝的实验器件。图3为狭缝结构的实测温度场。狭缝和梁的宽度均为 $10\ \mu\text{m}$,长度和厚度保持不变。保持其他参数不变,改变狭缝内部的对流换热系数对温度场进行拟合,得到的温度场曲线如3(b)所示。单狭缝内壁的对流换热系数为 $625\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$,小于实心长直梁的对流换热系数,说明拥有狭缝结构的悬臂梁的散热能力明显减弱。这主要是由于与结构外表面附近的空气相比,

狭缝间的空气在水平方向上的温度梯度大大减小,空气的浮升力减弱,且狭缝的两壁面均会对空气的流动产生黏滞阻力,进一步降低了自然对流换热效果。

3 末端优化设计

3.1 基本参数

笔者针对图4所示的硅材料电热平行梁微夹持器末端结构进行优化。

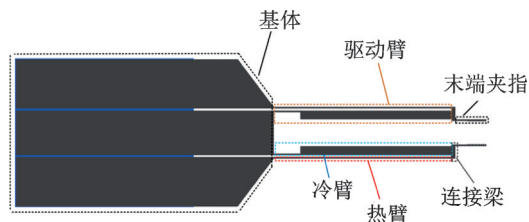
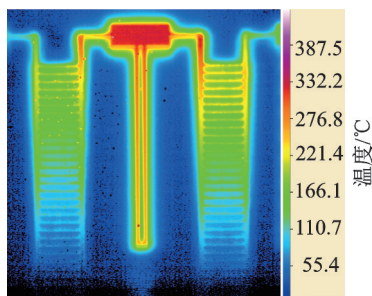
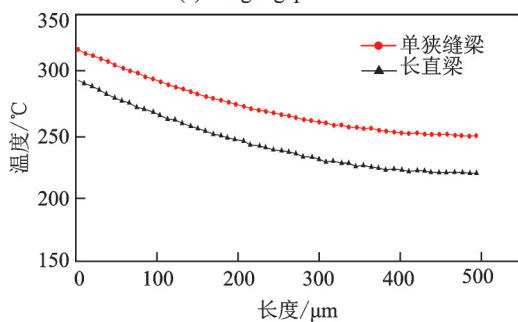


图 4 电热平行梁微夹持器末端结构

Fig.4 Structure of microgripper



(a) 单狭缝结构
(a) Single-gap



(b) 狭缝传热参数拟合
(b) Fitting curve

图 3 狭缝结构的实测温度场

Fig.3 Measured temperature field of gap structure

结合微操作对象的常见尺寸和微尺度结构的工艺制作难度,所设计的微夹持器基本参数如表2所示。

表 2 电热平行梁微夹持器的基本参数

Tab.2 Sizes of electro-thermal microgripper

参数/ μm	数值
初始张合量	130
驱动臂长度	1 000
热臂宽度	10
冷臂宽度	50
冷热臂间隙	10
基体长度	1 500
基体宽度	830
结构层厚度	50
基体层厚度	350

3.2 散热结构设计

图 5 为末端散热结构设计。为了降低平行梁夹持器的末端夹指温度,同时保持结构紧凑,拟在连接梁与末端夹指之间加入图 5(a)所示的 S 型散热梁结构。散热梁通过结构本身的热传导向末端夹指传递热量的同时,也在自身外表面通过对流作用将热量耗散在周围空气中。根据式(10),散热梁的外表面积越大,则散热能力越强,同时散热梁横截面积越小,则向下一个微元体的导热能力越低。将散热梁设计成 S 型结构,可以在有限区域内尽可能减小热传导时的横截面积,增长导热路径,同时增加散热面积。

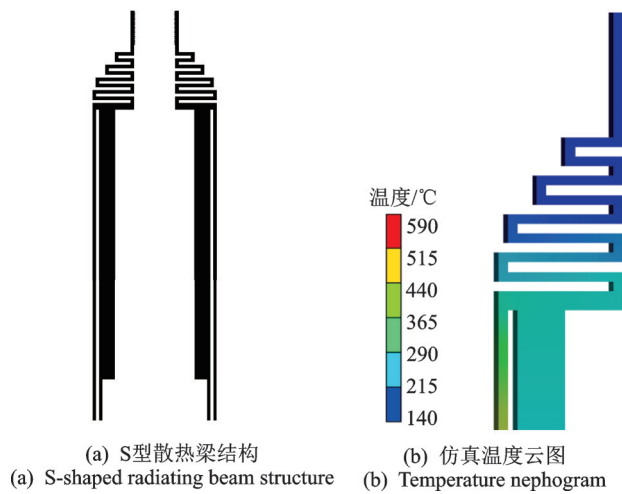


图 5 末端散热结构设计

理论上, S 梁的宽度越窄、总长度越长、散热效果越好。考虑到加工时的良品率问题, S 梁的宽度和所有狭缝宽度均设计为 $10\ \mu\text{m}$, S 梁总长度设为 $930\ \mu\text{m}$ 。

将 S 梁模型导入 ANSYS 中,根据测定参数设置所有狭缝内壁的对流换热系数为 $625\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$,其他外表面的系数为 $1\ 558\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$,环境温度为 22C 。仿真温度云图如 5(b)所示。当连接梁处的温度为 280C 时,末端夹指温度降低到 148C 。

4 实验

为了验证优化方案,选用绝缘衬底上的硅片 (silicon on insulator, 简称 SOI) 通过 MEMS 工艺制作了优化后的电热微夹持器,利用显微红外热成像设备对 S 梁的温度场进行表征。图 6 为实测温度。图 6(a) 为 S 梁实测温度的数值矩阵,当连接梁处温

度为 280C 时,末端夹指温度可以降低到 152C 。图 6(b) 中虚线为坐标轴的角平分线,仿真结果与实测结果基本吻合。末端夹指温度随连接梁温度近似呈线性变化关系, S 梁能够降低大约 45% 的末端温度。

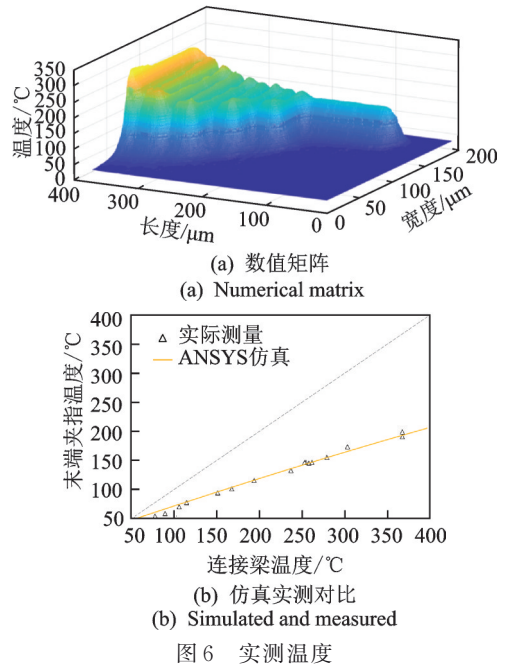


图 6 实测温度

Fig.6 Measured temperature

图 7 为聚苯乙烯微球夹持实验。图 7(a) 为使用结构优化后的微夹持器正在夹取直径为 $90\ \mu\text{m}$ 、熔点为 240C 的聚苯乙烯微球。此时,微夹持器的单边行程已经超过了 $20\ \mu\text{m}$,需要 500C 以上的驱动臂温度和 300C 以上的连接梁温度, S 梁的加入实现了对微球的成功拾取。当继续增大电压直到驱动臂熔断失效时,聚苯乙烯微球仍然保持完好,如图 7(b) 所示,证明温度优化方案是有效的。

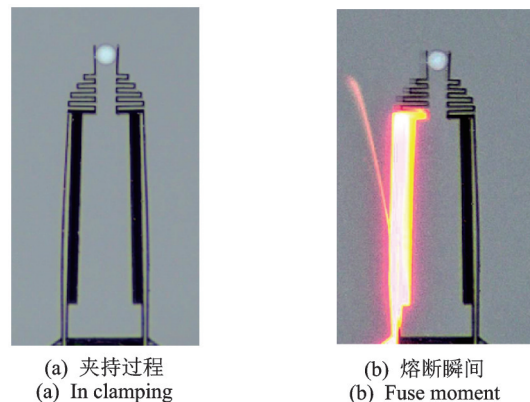


图 7 聚苯乙烯微球夹持实验

Fig.7 Experiment of polystyrene microsphere clamping

5 结束语

针对电热平行梁微夹持器存在的末端夹指高温问题,对电热微夹持器在微尺度下的传热机理进行理论分析,建立了热流模型,推导出传热参数的拟合方程。对长直梁和微狭缝实验器件进行温度场测量和参数拟合,得出传热参数中热辐射系数对温度场的影响较小,热传导系数不受尺度效应影响,对流换热系数对温度场的影响较大,微尺度下对流换热系数可达到宏观状态下的60~300多倍,是影响微夹持器传热的重要参数。在此数据基础上,对电热微夹持器设计了末端夹指与连接梁之间的S型梁散热结构。通过仿真、显微实测以及微球夹持实验,得出S梁总长度为930 μm 时,夹指温度可降低约45%左右。该结果表明,末端结构优化后得到了更加理想的温度场分布,提高了电热微夹持器的性能,扩大了应用场景。

参 考 文 献

- [1] ANASTASIADI G, LEONARD M, PATERSON L, et al. Fabrication and characterization of machined multi-core fiber tweezers for single cell manipulation [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 3557-3567.
- [2] AL-ZANDI M H M, WANG C, VOICU R, et al. Measurement and characterization of displacement and temperature of polymer based electrothermal microgrippers [J]. *Microsystem Technologies*, 2018, 24(1): 379-387.
- [3] ZHANG Z, YU Y, SONG P, et al. Automated manipulation of zebrafish embryos using an electrothermal microgripper [J]. *Microsystem Technologies*, 2020, 26: 1823-1834.
- [4] MUHAMMAD M U, SALEEM M M, KHAN U S, et al. Design, closed-form modeling and analysis of SU-8 based electrothermal microgripper for biomedical applications [J]. *Microsystem Technologies*, 2019, 25: 1171-1184.
- [5] CAUCHI M, IVAN G. The effects of cold arm width and metal deposition on the performance of a U-beam electrothermal MEMS microgripper for biomedical applications [J]. *Micromachines*, 2019, 10(167): 1-18.
- [6] ARAVIND T, RAMESH R. Modelling of Chevron electrothermal actuator and its performance analysis [J]. *Microsystem Technologies*, 2018, 24: 1767-1774.
- [7] 姚志远, 李晓牛, 李响, 等. 直线超声电机设计、建模和应用的研究进展[J]. *振动、测试与诊断*, 2016, 36(4): 615-623. YAO Zhiyuan, LI Xiaoniu, LI Xiang, et al. Advances in design, modeling and applications of linear ultrasonic motors[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(4): 615-623. (in Chinese)
- [8] AURELIO S. Design and experimental testing of an electro-thermal microgripper for cell manipulation [J]. *Microsystem Technologies*, 2018, 24: 1053-1060.
- [9] SHIVHARE P, UMA G, UMAPATHY M. Design enhancement of a chevron electrothermally actuated microgripper for improved gripping performance [J]. *Microsystem Technologies*, 2016, 22: 2623-2631.
- [10] TUCKERMAN D B, PEASE R E W. High-performance heat sinking for VLSI [J]. *IEEE Electronic Device Letters*, 1981, 2(5): 126-129.
- [11] PEIRS J, REYNAERTS D, VAN B H. Design of miniature parallel manipulator for integration in a self-propelling endoscope [J]. *Sensors and Actuators*, 2000, 85(5): 409-417.
- [12] NATH P, CHOPRA K L. Thermal conductivity copper films [J]. *Thin Solid Films*, 1974, 20: 53-63.
- [13] PIRIYANONT B, MOHEIMANI S O R. MEMS rotary microgripper with integrated electrothermal force sensor[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2014, 23(6): 1249-1251.
- [14] VEROTTI M, DOCHSHANOV A, BELFIORE N P. A comprehensive survey on microgrippers design[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2017, 139: 1-18.
- [15] TIEN C L, CHEN G. Challenges in microscale conductive and radiative heat transfer [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1994, 116: 799-807.
- [16] BELEN S. Modelling and experimental verification of heat dissipation mechanisms in an SU-8 electrothermal microgripper [J]. *Microelectronic Engineering*, 2014, 124: 90-93.
- [17] 郝秀春, 褚金奎, 王立鼎, 等. 电热微夹钳的热效应分析和数值模拟[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(14): 1269-1272. HAO Xiuchun, CHU Jinkui, WANG Liding, et al. Heat effect analysis and numerical simulation of an electrothermal microgripper [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(14): 1269-1272. (in Chinese)



第一作者简介:林琳,女,1976年2月生,博士、副教授。主要研究方向为微操作机器人。曾发表《树脂镜片加工用局部球面并联机床的设计》(《哈尔滨理工大学学报》2012年第17卷第3期)等论文。
E-mail: linlin@xmoc.edu.cn

通信作者简介:陈立国,男,1974年11月生,博士、教授。主要研究方向为微纳操作机器人。
E-mail: chenliguo@suda.edu.cn