

DOI: 10.3901/JME.2010.08.109

基于多孔微热沉的大功率 LED 冷却技术研究*

万忠民^{1,2} 陈敏¹ 刘伟² 刘靖²

(1. 湖南理工学院物理系 岳阳 414006;

2. 华中科技大学能源与动力工程学院 武汉 430074)

摘要: 针对大功率发光二极管(Light-emitting diode, LED)具有的高热流通量、表面温度要求严格控制的特点, 提出一种新型高效的基于多孔微热沉系统的散热技术来满足大功率 LED 散热封装的需求。分析多孔微热沉系统的工作原理以及传热特性, 基于局部热力学平衡建立多孔微热沉流动与传热的数学模型, 并用 SIMPLE 算法进行数值求解, 得出微热沉的温度分布以及影响微热沉性能的一些因素。数值研究表明: 在高热流密度下, 微热沉散热表面的温度能维持较低水平, 即使在热流达到 200 W/cm^2 时, 散热表面的最高温度才 $55.2 \text{ }^\circ\text{C}$; 提高工质入口流速可以降低微热沉内的温度以及散热表面的温度水平。多孔微热沉系统能够有效地解决大功率 LED 的散热问题, 提高 LED 芯片的可靠性与使用寿命。

关键词: 大功率发光二极管 多孔微热沉 多孔介质 高热流密度 散热

中图分类号: TN312.8

Research on Porous Micro Heat Sink for Thermal Management of High Power LED

WAN Zhongmin^{1,2} CHEN Min¹ LIU Wei² LIU Jing²

(1. Department of Physics, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006;

2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: In view of the characteristics of high power light-emitting diode (LED), such as high heat fluxes and requirement of strict temperature control, a porous micro heat sink system is presented for thermal management of high power LED, which has high heat transport capability. The working principle and heat transfer characteristics of porous micro heat sink are analyzed. Numerical model for the micro heat sink is proposed to describe liquid flow and heat transfer based on the local thermal equilibrium of porous medium, and it is solved with SIMPLE algorithm. The numerical results show that the heated surface temperature of porous micro heat sink is low at high heat fluxes and the maximal temperature of heated surface is only $55.2 \text{ }^\circ\text{C}$ at the heat flux of 200 W/cm^2 . Increasing inlet fluid velocity can decrease the temperature in the micro heat sink and the heated surface temperature. The micro heat sink has good performance for the cooling of high power LED, and it can improve the reliability and life of LED. The numerical results obtained are useful for performance optimization and design of porous micro heat sink.

Key words: High power light-emitting diode(LED) Porous micro heat sink Porous medium High heat flux Heat dissipation

0 前言

以大功率发光二极管(Light emitting diode, LED)为基础的半导体照明技术由于相对于现有的

普通照明技术有着发光效率高、单色性好、使用寿命长、特别是节能与环保特性, 使其成为近年来研究的一个热点^[1-2]。

对于大功率 LED, 理论上其具有较高的发光效率, 但由于半导体制造技术以及没有有效的冷却方式, 目前的电光转换效率约为 $10\% \sim 20\%$, 这意味着剩余 $80\% \sim 90\%$ 的电能转化为了热能^[3], 而芯片尺寸仅为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 其热流密度高达 100 W/cm^2 ,

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2007CB206901)、国家自然科学基金(50774034)、中国博士后科学基金(20090451038)和湖南省教育厅优秀青年(09B041)资助项目。20090714 收到初稿, 20091209 收到修改稿

并且随着芯片技术的不断成熟,单个 LED 芯片的功率可以达到 5 W 以上,这就意味着热流密度非常高,可达 500 W/cm^2 ,特别是当多个 LED 密集排列组成系统时,热量的耗散问题更严重,传统的散热方式已不能满足这样高的热流密度散热的需求^[4-6]。如此高的热流密度如果不能及时有效传递出去,热量不断堆积在芯片内,将使芯片内部温度迅速升到一个很高的水平,这将极大降低 LED 的发光效率^[7-8],改变 LED 发光颜色,降低 LED 发光强度,同时加速器件老化^[9],大大降低其使用寿命,甚至导致 LED 器件烧毁。

针对 LED 的散热问题,不少国内外研究者开展了相关热问题研究。罗小兵等^[2,4]提出了一种基于封闭微喷射流的高功率 LED 主动散热方案,依靠封闭微喷系统来实现大功率 LED 芯片组的散热,并通过数值计算与试验对其进行了研究。YAN 等^[6]针对 LED 高热流的特点,研究了空气冷却和被动冷却技术,结果表明这两种技术都不能良好地保证 LED 的节点温度在最大允许的范围内,因此提出了采用主动式液冷技术,并用节点法对 LED 的传热热阻进行了分析。ARIK 等^[4]采用有限元法开展数值模拟,求解了 LED 芯片温度分布并评估了局部高温对芯片有源层的影响。袁柳林等^[5]采用微通道致冷技术,设计了大功率 LED 阵列封装的微交错通道致冷结构,并采用该技术对 LED 进行冷却。CHEN 等^[9]采用硅加工的热电制冷器(TE cooler)来冷却大功率 LED。LAN 等^[10]分析了大功率 LED 的热特性,并运用热瞬态方法计算了不同的环境温度和冷凝温度下以及有无热管冷却状态下 LED 阵列的节点温度和传热热阻,研究表明采用热管在一定程度上可以减小系统的传热热阻。LU 等^[11]采用环路热管对 LED 进行散热,分析了大功率 LED 的启动特性,温度的均匀性以及系统的热阻,研究了环路热管不同倾角时系统的性能,结果表明热管热沉的传热热阻在 $0.19 \sim 3.10 \text{ K/W}$ 之间。ACIKALIN 等^[12]采用主动冷却方法,利用小型压电风扇来形成强迫对流,压电风扇可以作为电子器件和 LED 冷却的一个具有竞争力的热管理手段。

本文首次提出一种基于多孔介质的微热沉系统来有效解决大功率高热流密度 LED 的散热,该系统由于采用多孔介质,有较大的比表面积以及很高的局部传热系数,因此具有传热能力强以及散热效率高等特点,同时该系统具有结构简单,可靠性强等优点。基于局部热力学平衡建立了多孔微热沉流动与传热的数学模型,通过 SIMPLE 算法进行求解,得出了微热沉的温度分布以及影响散热器传热性能

的一些因素,研究表明,多孔微热沉系统能够很好地解决大功率 LED 的散热问题。

1 多孔微热沉系统的工作原理

图 1 所示为本文提出的多孔微热沉的原理图。

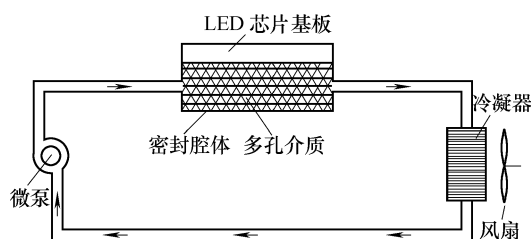


图 1 多孔微热沉系统原理图

可见,系统由多孔微热沉、冷却器、微泵组成,该结构易与 LED 芯片进行封装。该冷却系统在封装和运行前,先要注入一定的液体(如水、甲醇、乙醇等)进入系统,将多孔介质放入密封腔体内形成多孔微热沉,其上表面与 LED 芯片进行封装连结。其基本的工作原理:微泵启动后,推动液体通过微热沉的进口进入微热沉,液体通过多孔介质,LED 芯片内产生的高热流通过多孔介质传递给液体,此时液体迅速升温,在微泵的作用下升温的液体进行冷凝器与外界环境进行热交换,导致液体的温度降低,低温液体重新进入微泵开始新一轮的循环,从而实现冷却系统的工作过程。

多孔微热沉冷却系统用于大功率 LED 散热时具有独特的优势。多孔微热沉的多孔介质采用网状金属丝网或烧结的金属毛细芯组成,孔隙半径非常小,其有效半径小到十几微米,甚至 $3 \mu\text{m}$ 以下,具有非常大的散热面积/体积比,局部对流换热系数大,传热能力强^[13],传热效率高,可以解决大功率 LED 封装散热的需求。同时由于该冷却系统有可以弯曲的液体管道,所以冷凝器位置可以任意布置,即将热量引入到合适的位置进行冷却,冷凝器对位置的要求不苛刻,可以解决受限空间内电子器件散热,这一点对于大功率 LED 的散热非常重要。

2 多孔微热沉的数学模型

在 LED 封装过程中,多孔微热沉直接与 LED 芯片的基板进行封装贴合,其封装表面温度分布以及高低水平直接影响着 LED 器件的性能^[14],因此对微热沉的研究显得非常重要。考虑到封闭腔体采用导热系数很大的铜(导热系数为 $398 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$),其厚度很薄,因此热阻非常小,在此忽略金属封闭腔体的影响,对微热沉的多孔介质区域建立数学模

型，其计算模型如图 2 所示。

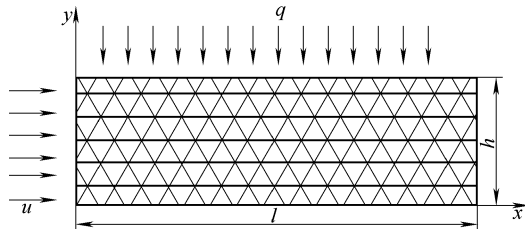


图 2 多孔微热沉的计算模型

2.1 控制方程

在建立多孔介质数学模型时，提出如下假设：

- ① 多孔介质属刚性介质；
 - ② 毛细多孔芯处于局部热力学平衡态；
 - ③ 忽略重力的影响。
- 运用体积平均法，根据 BRINKMAN 和 FORCHHEIMER 对 DARCYLEWIS 定律的修正理论，以左下角点为坐标原点对多孔区建立如下控制方程。

连续方程

$$\frac{\partial(\epsilon\rho_f)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\rho_f}{\epsilon} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\rho_f}{\epsilon^2} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \left(\frac{\mu}{K} + \frac{\rho_f \epsilon C}{\sqrt{K}} |v| \right) u + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\rho_f}{\epsilon} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\rho_f}{\epsilon^2} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} - \left(\frac{\mu}{K} + \frac{\rho_f \epsilon C}{\sqrt{K}} |v| \right) v + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3)$$

能量方程

$$(\rho c)_e \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_e \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa_e \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \quad (4)$$

式中， $C=1.75\epsilon^{-3/2}/\sqrt{150}$ ， $\kappa_e = \kappa_f \epsilon + (1-\epsilon)\kappa_s$ ， $(\rho c)_e = (\rho c)_f + (1-\epsilon)(\rho c)_s$ ； u 、 v 分别表示为 x 、 y 向的速度； θ 为温度； t 为时间； ϵ 为多孔介质的孔隙率； ρ 为密度； c 为等压比热容； μ 为流体的动力粘度； K 为流体的渗流参数； κ 为导热系数； κ_e 为多孔芯的有效导热系数；下标 f 表示液体工质； s 表示固相。

2.2 边界条件

边界条件如下所示。

$$\begin{aligned} x=0: & u=u_0 \quad v=0 \quad \theta=\theta_0 \\ x=l: & \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad v=0 \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y=0: & u=0 \quad v=0 \quad \kappa_e \frac{\partial \theta}{\partial x} = h_a(\theta - \theta_a) \\ y=h: & u=0 \quad v=0 \quad \kappa_e \frac{\partial \theta}{\partial x} = q \end{aligned}$$

式中， u_0 为微热沉系统回流液体速度； θ_0 为微热沉系统回流液体温度； θ_a 为环境温度； h 为多孔芯的高度； l 为多孔芯的长度； h_a 为空气对流换热系数， q 为热流密度。

3 计算结果及讨论

在数值计算中，多孔微热沉的多孔芯的尺寸： $l \times h = 10 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ，循环液体工质选用水，其有关参数为： $\kappa_f = 0.202 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ， $\mu_f = 5.2 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。考虑相容性问题，多孔芯采用铜材料，其孔隙率 $\epsilon = 0.5$ ，渗透率 $K = 6.616 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ ， $\kappa_s = 398 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ 。本文采用 SIMPLE 算法对模型进行求解。

图 3 所示为保持进口工质流速 $u = 0.2 \text{ m/s}$ 时，不同热流密度时多孔微热沉内的温度场分布。

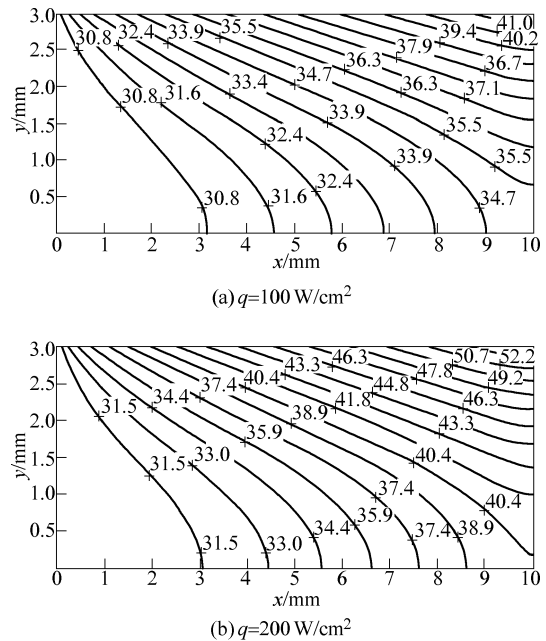


图 3 不同热流密度时微热沉的温度场分布

从图 3 中可以看出，温度沿着工质流动升高，这是由于 LED 散热的热量通过液体工质，将其带出多孔微热沉进入冷凝器中散发给周围的环境造成的。在入口靠近下壁区域，温度梯度小，温度较均匀，而在散热表面处温度梯度较大，这是由于 LED 散热的高热流所致。

图 4、5 分别为不同加热热流下多孔微热沉工质出口的温度分布以及散热表面的温度水平分布。

从图 4 可知，出口工质的温度沿着 y 向逐渐增大，随着热流增加，出口工质的温度在相同位置处

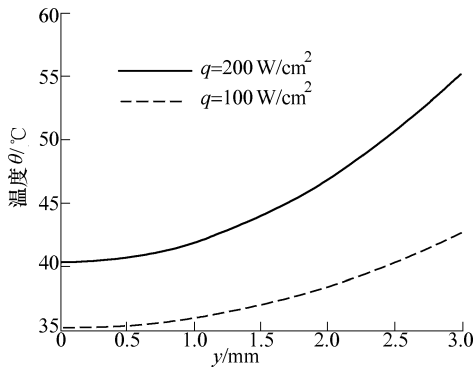


图 4 不同热流时微热沉的出口工质温度

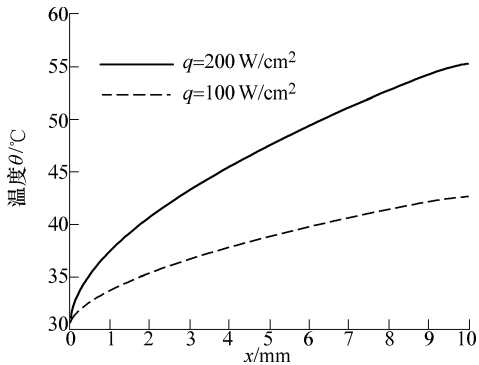


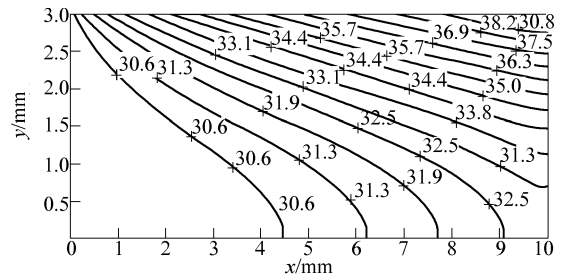
图 5 不同热流时微热沉的散热表面温度

也相应增加，同时，热流越大，出口工质温度沿 y 增加的速率越大。由于多孔微热沉的散热表面直接与 LED 芯片贴合，散热表面温度水平的高低直接影响着芯片的可靠性与使用寿命。

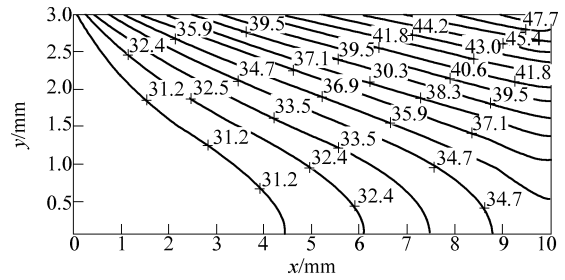
从图 5 可见，散热表面的温度随着流动方向逐渐升高，同时随着热流的增加，在相同的流速下，散热表面的温度升高，在工质的出口处温度达到最高，最高温度对于 LED 芯片的安全工作温度(安全结温)而言还是相对较低，在热流密度为 100 W/cm^2 时，最高温度才 $42.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ，即使在非常高的热流密度 200 W/cm^2 时，其最高温度也只有 $55.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ，可见新型的多孔微热沉能够有效地将 LED 芯片散发的热量带走，保证芯片安全可靠的工作。流出多孔微热沉的流体温度较高。

为了研究不同工质进口流速对多孔微热沉性能的影响，图 6 所示为入口流速 $u=0.3 \text{ m/s}$ 时微热沉内的温度场分布。与图 3a 和图 3b 相对比可以得出，在相同的热流密度情况下，提高工质的入口流速可以降低微热沉内的温度水平，且沿着流动方向，微热沉内相同位置温度减小量越大。

图 7 所示散热热流为 200 W/cm^2 ，不同的工质入口流速时多孔微热沉散热表面的温度分布。从图 7 中可以得出，提高工质的入口流速，可以降低散热表面的温度水平，同时沿着工质的流动方向，表面温度的减少量越大，在 $u=0.2 \text{ m/s}$ 时，散热表面的最高温度为 $55.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ，而当 $u=0.3 \text{ m/s}$ 时，散热



(a) $q=100 \text{ W/cm}^2$



(b) $q=200 \text{ W/cm}^2$

图 6 微热沉的温度场分布

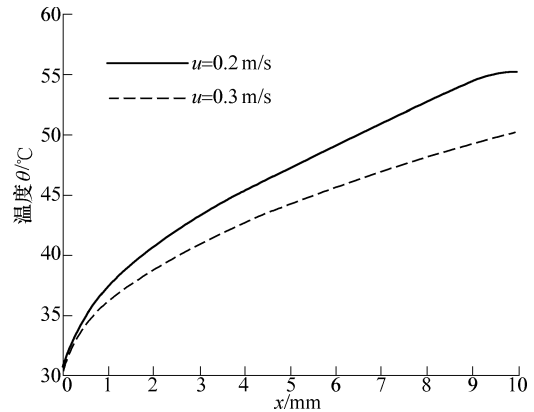


图 7 不同入口流速时微热沉的散热表面温度

表面的温度为 $50.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ，可见提高工质入口流速，可以保证 LED 芯片更小的结温，使 LED 能更可靠安全地运行。

4 结论

(1) 散热问题是大功率 LED 芯片封装技术面临的关键问题，为了提高 LED 芯片的性能与使用寿命，本文提出一种新型的多孔微热沉系统来实现 LED 芯片的高功率和高封装密度。

(2) 基于多孔介质的局部热力学平衡模型，建立了多孔微热沉的流动与传热的数学模型，并运用 SIMPLE 算法对其进行求解。

(3) 数值研究表明，微热沉内的温度沿着工质的流动方向增加，在出口处达到最大；同时散热表面温度也增加，但是散热表面的温度水平较低，其最高温度在热流密度为 200 W/cm^2 时才 $55.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ，远远小于 LED 芯片所允许的最大结温温度；提高微热

沉的工质进口流速, 可以使本散热系统带走更多的热量, 从而减小散热表面的温度, 即LED芯片的温度降低。因此, 多孔微热沉系统完全能够解决大功率LED封装散热问题, 提高LED芯片的性能与使用寿命, 为大功率LED的商业化应用提供了一种高效可行的方案。

参 考 文 献

- [1] HYUN-WOOK Ra, KWANG S S, CHI-WON O, et al. Heat transfer behavior of high-power light-emitting diode packages[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2007, 24(2): 197-203.
- [2] LUO Xiaobing, LIU Sheng. A microjet array cooling system for thermal management of high-brightness LEDs[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2007, 30(3): 475-484.
- [3] ARIK M, WEAVER S. Chip scale thermal management of high brightness LED packages[C]//Proc. SPIE 4th Int. Conf. Solid State Light, Denver, CO, 2004, 55: 214-223.
- [4] 罗小兵, 刘胜, 江小平, 等. 基于微喷射流的高功率LED散热方案的数值和实验研究[J]. 中国科学(E 辑), 2007, 37(9): 1 194-1 204.
LUO Xiaobing, LIU Sheng, JIANG Xiaoping, et al. Numerical and experimental investigation on microjet array cooling system for thermal management of high power LEDs[J]. Science in China(Series E), 2007, 37(9): 1 194-1 204.
- [5] 袁柳林, 刘胜, 陈明祥. 基于微通道致冷的大功率LED阵列封装热分析[J]. 半导体光电, 2006, 27(6): 712-716.
YUAN Liulin, LIU Sheng, CHEN Mingxiang. Thermal analysis of high power LED array packaging with microchannel cooler[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2006, 27(6): 712-716.
- [6] YAN L, CORDERO N, FRANK B. Liquid cooling of bright LEDs for automotive applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(6): 1 239-1 244.
- [7] PETROSKI J. Understanding longitudinal fin heat sink orientation sensitivity for light emitting diode (LED) lighting applications[C]//Proc. Int. Electron. Packag. Tech. Conf. Exhibition, Maui, HI, 2003: 111-117.
- [8] NARENDHAN N, GU Y M. Life of LED-based white light sources[J]. IEEE J. Display Technol., 2005, 1(1): 167-171.
- [9] CHEN J H, LIU C K, CHAO Y L, et al. Cooling performance of silicon-based thermoelectric device on high power LED[C]//Proc. 24th Int. Conf. Thermoelectrics, Clemson, SC, 2005: 53-56.
- [10] LAN K, JONG H C, SUN H J. Thermal analysis of LED array system with heat pipe[J]. Thermochemica Acta, 2007, 455(3): 21-25.
- [11] LU Xiangyou, HUA Tsechao, LIU Meijing. Thermal analysis of loop heat pipe used for high-power LED[J]. Thermochemica Acta, 2009, 493 (5): 25-29.
- [12] ACIKALIN T, GARIMELLA S V, PETROSKI J, et al. Optimal design of miniature piezoelectric fans for cooling light emitting diodes[C]//Proc. 9th Intersociety Conf. Thermal Thermomechanical Phenomena Electronic Syst., New York, 2004, 1: 663-671.
- [13] 何雅玲, 陶文铨. 强化单相对流换热的基本机制[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 27-38.
HE Yaling, TAO Wenquan. Fundamental mechanism of enhancing single-phase convective heat transfer[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 27-38.
- [14] ZENG Ping, CHENG Guangming, LIU Jiulong. Development of single-phase water cooling radiator for computer chip[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(2): 77-81.

作者简介: 万忠民(通信作者), 男, 1977年出生, 博士后。主要研究方向为航天器热控技术以及高热流密度电子器件散热的理论与试验。

E-mail: zhongminwan@hotmail.com