

# 金属泡沫微流道热沉内流体流动 与传热特性的数值研究\*

李勇铜, 徐会金, 巩亮, 张克舫

(中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院 热能与动力工程系, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 为改善高能量密度电子设备的冷却效率,提出了在微流道热沉内填充金属泡沫的新型热沉结构,并数值研究了金属泡沫的孔隙率、孔密度、材质(铜、镍及铝)、流体质(水、乙二醇及纳米流体)等相关参数对微流道流动与换热特性的影响.研究表明:金属泡沫可以显著地强化微流道热沉的换热特性;添加金属泡沫后微流道热沉的换热性能可提高2倍以上;采用纳米流体与金属泡沫相结合的双重强化换热手段可以进一步地增强微流道热沉的冷却能力;在层流流动状态下金属泡沫微流道热沉可以对发热量为 $200\text{ W/cm}^2$ 的电子设备进行有效地冷却,表明其在高功率密度电子设备热管理领域具有广阔的应用前景.

**关键词:** 金属泡沫; 微流道热沉; 电子设备热管理; 纳米流体; 流动与换热

**中图分类号:** TK124 **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2014.03.007

## 引言

随着电子器件向着高性能、微型化、高集成度的方向逐步发展,电子器件的能量密度也越来越高,ITRS2012<sup>[1]</sup>预测到2020年芯片的能量密度将达到 $100\text{ W/cm}^2$ !如何对高能量密度电子芯片进行有效地冷却是目前微电子产业发展亟待解决的关键问题之一.对此科研工作者进行了大量的研究,并提出了许多冷却方案,如:液体相变冷却<sup>[2-3]</sup>、微流道液体冷却<sup>[4-5]</sup>等.在众多的冷却方式中,微流道冷却方式冷却效率较高,具有很大的应用潜力<sup>[6-7]</sup>.然而,当前的微流道冷却方式对高能量密度电子设备的冷却依旧存在着一定的难度.因此,如何强化微流道内的流动传热,已成为目前有关微流道冷却技术的研究焦点.

最近有关强化传热的研究表明,金属泡沫能够显著提高对流传热性能,并在紧凑型换热器、航天航空、军事等领域有着非常大的应用前景<sup>[8-13]</sup>.鉴于金属泡沫比表面积大、导热系数高、流体混合能力强等优良的热物理性能,因此,为了提高微流道电子设备冷却效能,将金属泡沫应用于微流道冷却领域具有较高的学术研究价值及工程应用前景.为此,本文提出在微通道热沉内填充金属泡沫的新型微流道冷却方案,并以高能量密度电子芯片冷却为背景进行数值研究.

\* 收稿日期: 2013-11-01; 修订日期: 2014-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(51206187);山东省自然科学基金(ZR2012EEQ022)

作者简介: 李勇铜(1991—),男,宁夏固原人,硕士生(E-mail: lyt0903@163.com);

巩亮(1980—),男,山东青岛人,博士(通讯作者. E-mail: lgong@upc.edu.cn).

# 1 物理模型

图 1 给出了本文所研究的金属泡沫微流道的物理模型.其中,微流道的主体材料是铜,基本尺寸为:20 mm×20 mm×8 mm,通道的壁厚为 1 mm,内部填充物为铜质金属泡沫;在微流道基板底面的正中间,放置有一个 10 mm×10 mm 的待冷却电子芯片,如图 2 所示.

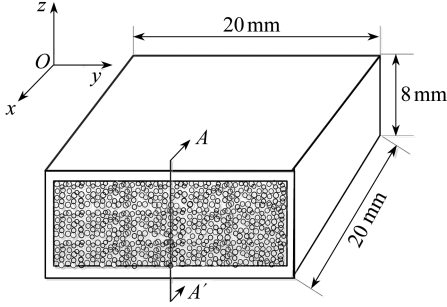


图 1 金属泡沫微流道示意图

Fig.1 Physical model of a metal-foam filled heat sink

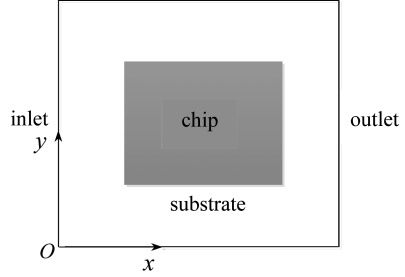


图 2 基板示意图

Fig.2 Substrate of the heat sink

# 2 控制方程及边界条件

## 2.1 控制方程

根据文献[14],当基于渗透率的 Reynolds(雷诺)数大于 10 时,传统的 Darcy(达西)定律就不能准确地描述多孔介质中的流体流动,因此本文采用拓展型的 Darcy 模型(Brinkman-Forchheimer model)<sup>[15]</sup>描述多孔区域中流体的动量传递,如式(2).此外,考虑到充满水的金属泡沫中液体相和固体相的局部非热平衡较小,本文采用考虑局部热平衡假设的单能量方程来描述多孔区域内流体的能量传递,如式(3).

质量守恒方程

$$\nabla \cdot \langle \mathbf{V} \rangle = 0, \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\frac{\rho_f}{\varepsilon} \langle (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \rangle = -\frac{1}{\varepsilon} \nabla \langle \mathbf{p} \rangle_f + \mu_{\text{eff}} \nabla^2 \langle \mathbf{V} \rangle - \left[ \frac{\mu_f}{K} - \frac{\varepsilon \rho_f C_i}{\sqrt{K}} \right] \langle \mathbf{V} \rangle, \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{V}$  为速度矢量;  $\rho_f$  和  $\mu_f$  分别为流体的密度和动力粘度;  $K, \varepsilon, \mu_{\text{eff}}, C_i$  分别为渗透率、孔隙率、有效粘性系数及惯性系数.

能量守恒方程

$$\rho c_p \langle \mathbf{V} \rangle \cdot \nabla \langle T \rangle = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \cdot \nabla \langle T \rangle), \quad (3)$$

式中,  $k_{\text{eff}}$  是有效导热系数,可由式(4)表示:

$$k_{\text{eff}} = \varepsilon k_f + (1 - \varepsilon) k_s. \quad (4)$$

## 2.2 边界条件

为了简化计算,在数值研究前,首先做如下假设:忽略热辐射的影响,忽略泡沫与固体壁面之间的接触热阻,流体与固体的物性为常数,金属泡沫材料各向同性.根据上述假设,针对图 1 所示的物理模型,通道入口设置为温度 300 K 的均匀速度分布来流,出口为自由出口边界条件,热沉底部芯片区域设置为  $q = 100 \text{ W/cm}^2$  的恒热流边界(描述 ITRS2012 对 2020 年芯片能量密度的预测),其余外部壁面均为绝热边界条件.此外,金属泡沫内壁面为无速度滑移、无温

度跳跃的流、固耦合界面。

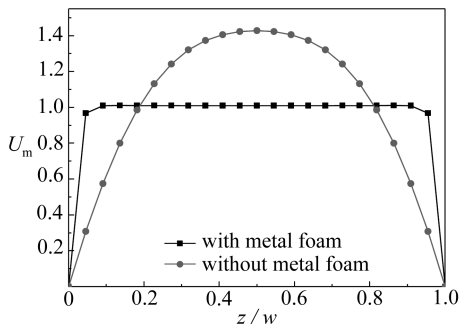
### 3 结果和分析

#### 3.1 网格独立性考核

在数值模拟之前,首先选取了网格数量由 38 475 至 418 241 的 8 套网格系统进行网格独立性考核.其中,网格数为 176 700 和 418 241 两套网格计算得到压降  $\Delta p$  和  $\overline{Nu}$  的差别分别为 0.32% 和 0.09%.为了节省计算资源,研究区域的网格数量最终确定为 176 700.

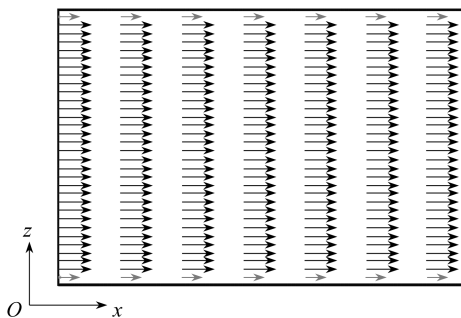
#### 3.2 金属泡沫形态参数对流动与换热的影响

图 3 给出了金属泡沫微流道 A-A' 截面的速度分布,其中图 3(a) 为 A-A' 截面  $x = 0.01$  m 处的无量纲速度分布(孔隙率  $\varepsilon = 0.90$ ,孔密度(单位英寸长度上的平均孔数(1 in = 0.025 4 m))  $\omega = 40$ ,  $Re = 200$ ),从图中可以看出填充金属泡沫后流体速度只在壁面附近有较大变化,其余区域均十分均匀(从图 3(b) 中可以更清晰地看出这一特点).此外,与不填充金属泡沫的速度分布相比,发现微流道中填充金属泡沫可以使流动边界层变薄,从而增强流体流动的掺混性,但与此同时,流体在微流道内的流动阻力也迅速增加。



(a) A-A' 截面的无量纲速度

(a) Dimensionless velocity profile of A-A' section



(b) A-A' 截面的速度矢量图

(b) Velocity vectors of A-A' section

图 3 微流道 A-A' 截面的速度分布图

Fig.3 Velocity profile of A-A' section

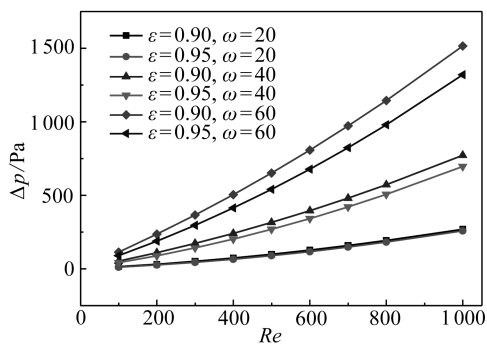


图 4 流动压降随 Re 的变化

Fig.4 Pressure drop vs. Reynolds number

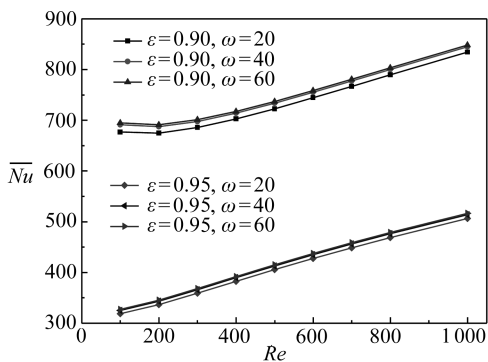


图 5 平均 Nusslet(努塞尔)数随 Re 的变化

Fig.5 Average Nusselt number vs. Reynolds number

图 4 给出了在微流道中填充不同形态参数的金属泡沫后,微流道内的流动压降随 Reynolds 数的变化曲线.由图可知,在微流道中填充金属泡沫之后,流动压降明显增加,这是由金属

泡沫自身错综复杂的微结构所致.当流体从金属泡沫中流过时,在固体骨架的作用下流体互相掺混、扰动增加,进而使得流动的非线性效果增强、压降增大,并且随着流速的增加这种影响越发明显.同时,在孔隙率相同时,压降随孔密度的增大而增加.这是由于随着孔密度增大、孔径减小,流体流通的截面尺寸减小,从而造成流动阻力增加所致;随着孔密度的增加,单位长度的孔数目增加,流体流动阻力增加、压降也会增大.此外,在相同孔密度情况下,当孔隙率减小时,固体骨架在流体通道中所占的比例增加,从而导致流动阻力和粘性耗散作用增加,最终造成压降增大.

由于在微流道内添加金属泡沫后可以有效地增强流体的掺混特性,从而也强化了流体在通道内的对流换热.图 5 给出了填充不同形态参数的金属泡沫之后  $\overline{Nu}$  随  $Re$  的变化.由图可以明显看出,添加金属泡沫可以明显地强化微流道换热(不添加金属泡沫  $\overline{Nu}$  仅为 33.9);同时也发现,孔隙率是影响金属泡沫换热性能的主要因素, $\varepsilon$  由 0.95 减小至 0.9 后可使传热效果增强近一倍,从图 6 中可以更明显地看出这一特性.这是由于孔隙率越小,固体骨架所占的体积分数越多,热扩散作用越强,基板中产生的热量能迅速地以导热的方式从基板导入固体骨架中并被周围流体带走.另外,随着孔隙率的降低,流体与固体之间的接触面积增加、进而亦强化了对流传热.因此,在微流道中添加孔隙率相对较低的金属泡沫可以有效地增强微流道热沉的冷却性能,如图 7 所示.从图看出,对于发热量为  $q = 100 \text{ W/cm}^2$  的芯片,当  $Re$  大于 200 后,3 种不同形态参数的金属泡沫均可以使芯片表面的最高温度降至  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  以下,从而实现对芯片的有效冷却、保证芯片的正常工作.此外,在  $Re$  和孔密度一定的条件下,孔隙率越小,金属泡沫微流道热沉对电子芯片的冷却效果越强.

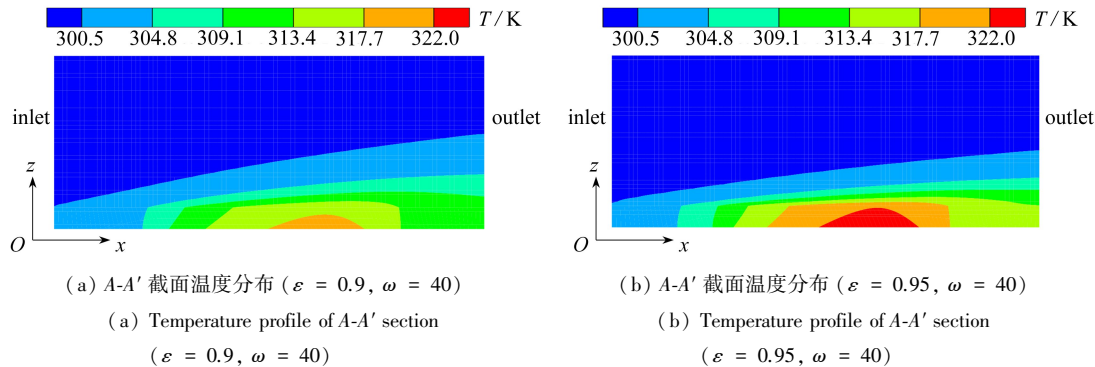


图 6  $Re = 1000$  情况下金属泡沫微流道截面温度分布

Fig.6 Temperature profile of the metal-foam filled microchannel at  $Re = 1000$

虽然在微流道内填充金属泡沫可以大幅度地强化对流换热,但同时流动阻力也随之增加.为了衡量不同微流道热沉的冷却性能,本文采用式(5)所示的能效因子对金属泡沫微流道热沉进行性能分析,如图 8 所示.从图中可以看出,在等泵功情况下,金属泡沫的微流道热沉具有良好的综合换热性能;也就是说,虽然填充金属泡沫的微流道压降较大,但是良好的换热性能能够弥补压降较大的不足.

$$F_{pf} = \frac{Nu_d/Nu_s}{(\Delta p_d/\Delta p_s)^{1/3}}, \quad (5)$$

其中,  $Nu_d, Nu_s$  分别表示金属泡沫的微流道与光滑微流道的平均 Nusselt 数;  $\Delta p_d, \Delta p_s$  分别表示金属泡沫微流道与光滑微流道内的流动压降.

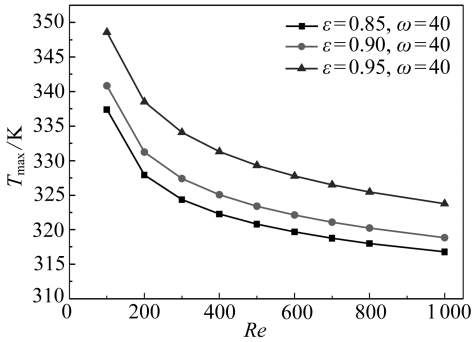


图7 芯片表面最高温度随  $Re$  的变化  
Fig.7 Effect of Reynolds number on chip surface max-temperature

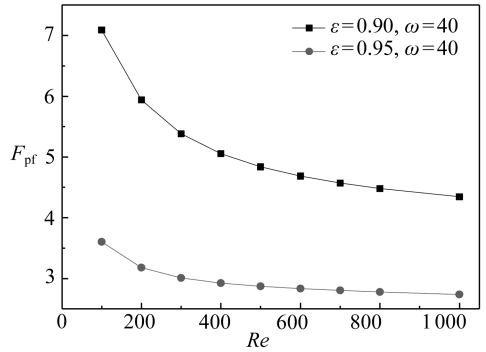


图8 金属泡沫微流道的综合换热性能  
Fig.8 Effect of Reynolds number on heat transfer performance  $F_{pf}$

### 3.3 金属泡沫材质及冷却工质对热沉冷却性能的影响

为进一步研究金属泡沫微流道热沉的冷却性能,本文分别对铜、铝、镍3种金属泡沫以及水、乙二醇和  $Al_2O_3-H_2O$  纳米流体3种冷却工质对热沉冷却性能的影响进行了数值研究。

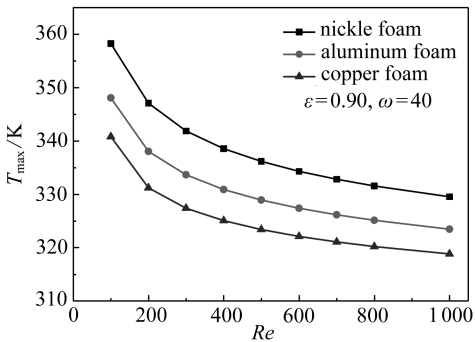


图9 泡沫材质对芯片最高温度的影响  
Fig.9 Effect of metal foam materials on chip surface max-temperature

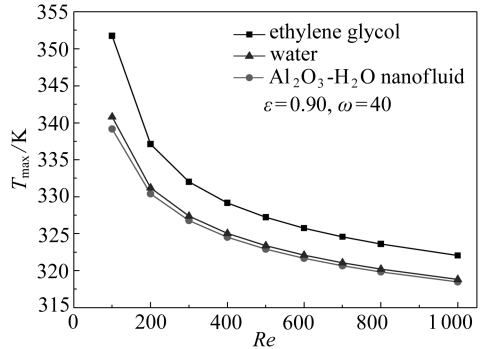


图10 不同冷却工质对冷却效果的影响  
Fig.10 Effect of coolants on chip surface max-temperature

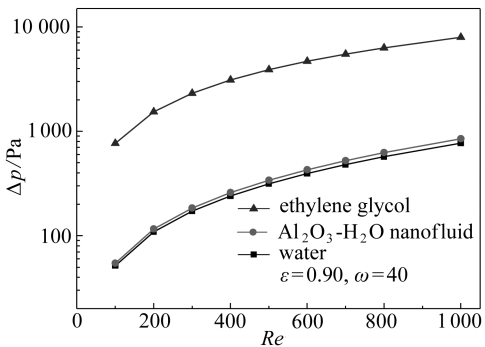


图11 不同冷却工质对压降的影响  
Fig.11 Effect of coolants on pressure drop

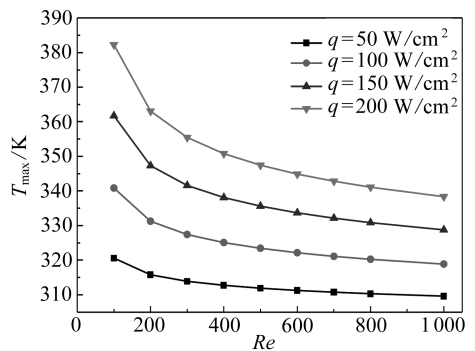


图12 金属泡沫微流道的冷却性能  
Fig.12 Cooling capability of the metal-foam filled heat sink

图9给出了铜、铝、镍3种金属泡沫微流道热沉对芯片的冷却能力.由图可知,填充铜泡沫



的微流道冷却效果最好,填充镍泡沫微流道冷却效果最差.这是由于材料的导热系数不同所致,在3种材料中,铜的导热系数最大  $k_s = 386 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,铝次之  $k_s = 202 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,镍最小  $k_s = 91 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .当固体骨架的导热系数较大时,导热热阻较小,热量能迅速地从基板传导至整个骨架中,并以对流换热的方式传输至周围的流体;当固体的导热系数较小时,导热热阻较大,泡沫骨架不能迅速地将基板的热量带走,从而发生热量积存.因此,金属泡沫的导热系数越高,金属泡沫微流道热沉对电子器件的冷却效果越好.

图10和图11分别给出了水、乙二醇和体积分数  $\varphi = 2\%$  的  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  纳米流体3种冷却工质的热沉冷却效果及压降特性,其中  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  纳米流体的物性详见文献[16].从图10可知,乙二醇的冷却效果最差,同时由于乙二醇的粘度较大也使得其在热沉中流动压降也是最大的,如图11中所示.但是对于  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  纳米流体而言,在水中增加了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米颗粒后不仅可以增加流体的有效导热系数,同时亦可由于纳米颗粒的 Brownian(布朗)运动增强流体的掺混效应<sup>[17]</sup>,因此与纯水相比采用含  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的纳米流体可以进一步强化传热,如图10所示.与此同时,在水中填充纳米颗粒亦会增加流体的粘度,因此  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  纳米流体的压降比纯水的压降虽有所增加,但幅度较小,如图11所示.

### 3.4 金属泡沫微流道的冷却能力

前文分析了不同因素对金属泡沫微流道热沉内流体流动与换热特性的影响.基于上述研究,本节以纯水作为冷却工质,选取孔隙率为0.9、孔密度为40的铜质金属泡沫构建微流道热沉,并数值考察该金属泡沫微流道热沉对发热量为  $50 \text{ W}/\text{cm}^2$ ,  $100 \text{ W}/\text{cm}^2$ ,  $150 \text{ W}/\text{cm}^2$ ,  $200 \text{ W}/\text{cm}^2$  的4款电子芯片的冷却能力.如图12所示,对于发热量为  $50 \text{ W}/\text{cm}^2$  和  $100 \text{ W}/\text{cm}^2$  的两种芯片,在  $Re = 100$  时即可使芯片温度降至  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  以下;当流动达到  $Re \geq 300$  后即可对  $q = 150 \text{ W}/\text{cm}^2$  的芯片进行有效冷却;当流动达到  $Re \geq 500$  的工况后,发热量为  $200 \text{ W}/\text{cm}^2$  的芯片也可被有效冷却至  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  以下.这充分反映出金属泡沫微流道热沉具有非常好的冷却能力.

## 4 结 论

本文提出了在微流道热沉内填充金属泡沫的新型热沉结构,对金属泡沫微流道热沉的散热性能进行了数值研究,并分析了相关影响因素对其冷却能力的影响,主要结论为

1) 在微流道热沉中填充金属泡沫可以显著地提高传热性能及热沉对电子器件的冷却能力,其中孔隙率是影响金属泡沫换热的主要因素,孔隙率越小,热沉冷却效果越好,但同时流动阻力也越大;

2) 选取高导热系数金属泡沫以及纳米流体冷却工质,可以起到双重强化换热的效果,从而进一步强化金属泡沫微流道热沉的冷却能力;

3) 对于铜质金属泡沫微流道热沉,可在纯水层流流动范围内对发热量为  $200 \text{ W}/\text{cm}^2$  芯片进行有效地冷却,表明金属泡沫微流道热沉对高能量密度芯片具有良好的冷却能力.

### 参考文献(References):

- [1] <http://www.itrs.net>.
- [2] Xie X L, He Y L, Tao W Q, Yang H W. An experimental investigation on a novel high-performance integrated heat pipe—heat sink for high-flux chip cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(5/6): 433-439.
- [3] Maydanik Y F, Vershinin S V, Korukov M A, Ochterbeck J M. Miniature loop heat pipes—a

- promising means for cooling electronics[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2005, **28**(2): 290-296.
- [4] GONG Liang, Kota K, TAO Wen-quan, Joshi Y. Thermal performance of microchannels with wavy walls for electronics cooling[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2011, **1**(7): 1029-1035.
- [5] Koyuncuoglu A, Jafari R, Okutucu-Özyurt T, Külah H. Heat transfer and pressure drop experiments on CMOS compatible microchannel heat sinks for monolithic chip cooling applications [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2012, **56**: 77-85.
- [6] Harper C. *Electronic Packaging and Interconnection Handbook* [M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2004.
- [7] Ulrich R, Brown W. *Advanced Electronic Packaging* [M]. 2nd ed. New York: Wiley, 2006.
- [8] Tian Y, Zhao C Y. Thermal and exergetic analysis of metal foam-enhanced cascaded thermal energy storage[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, **58**(1/2): 86-96.
- [9] 徐光, 霍格尔·米克. 金属泡沫材料的性能[J]. 武汉冶金科技大学学报, 1998, **21**(2): 154-160. (XU Guang, Mucke H. The properties of metalfoaming material[J]. *Journal of Wuhan Yejin University of Science and Technology*, 1998, **21**(2): 154-160. (in Chinese))
- [10] 卢天健, 何德坪, 陈常青, 赵长颖, 方岱宁, 王晓林. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J]. 力学进展, 2006, **36**(4): 517-535. (LU Tian-jian, HE De-ping, CHEN Chang-qing, ZHAO Chang-ying, FANG Dai-ning, WANG Xiao-lin. The multi-functionality of ultra-light porous materials and their applications [J]. *Advances in Mechanics*, 2006, **36**(4): 517-535. (in Chinese))
- [11] Lu W, Zhao C Y, Tassou S A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers—part I: metal-foam filled pipes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, **49** (15/16): 2751-2761.
- [12] Zhao C Y, Kim T, Lu T J, Hodson H P. Thermal transport phenomena in Porvair metal foams and sintered beds[R]. Micromechanics Centre & Whittle Lab, Department of Engineering, University of Cambridge, 2001.
- [13] Wassim Elias A. A systematic study on the mechanical and thermal properties of open cell metal foams for aerospace applications[D]. Master Thesis. North Carolina State University, 2004.
- [14] 田原, 赵长颖, 李增耀, 屈治国. 两种拓展达西模型对金属泡沫填充管中流动与换热的影响[J]. 工程热物理论, 2008, **29**(8): 1380-1382. (TIAN Yuan, ZHAO Chang-ying, LI Zeng-yao, QU Zhi-guo. Flow and heat transfer in metal foam filled pipes under two extended Darcy models [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, **29**(8): 1380-1382. (in Chinese))
- [15] Vafai K, Tien C L. Boundary and inertia effect on flow and heat transfer in porous media[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1981, **24**(2): 195-203.
- [16] Mohammed H A, Gunnasegaran P, Shuaib N H. The impact of various nanofluid types on triangular microchannels heat sink cooling performance[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2011, **38**(6): 767-773.
- [17] 宣益民, 李强. 纳米流体能量传递理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (XUAN Yi-Min, LI Qiang. *Theory and Application on Energy Transport of Nanofluid* [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))

# Numerical Study of Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics in Metal-Foam Filled Microchannel Heat Sink

LI Yong-tong, XU Hui-jin, GONG Liang, ZHANG Ke-fang

(*Department of Thermal Energy & Power Engineering,  
College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum,  
Qingdao, Shandong 266580, P.R.China*)

**Abstract:** A novel structure of metal-foam filled microchannel heat sink was proposed for electronics cooling applications. Effects of the main parameters, such as porosity, pore density, metal foam materials (copper, nickel and aluminum) and coolants (water, ethylene glycol and nanofluid), were numerically studied to predict the pressure drop and heat transfer performance of laminar flow in the heat sink. The results show that the thermal performance of the microchannel heat sink is enhanced over twice after filling-in of metal foam, and it is also positive for the heat transfer efficiency to employ nanofluid as coolant. The results also show that the microchannel heat sink filled with metal foam is well qualified for cooling chips with heat flux of  $200 \text{ W/cm}^2$ , which means that it has great potential for thermal management of electronics devices with high power density.

**Key words:** metal-foam; microchannel heat sink; thermal management of electronic device; nanofluid; flow and heat transfer

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China(51206187)