

DOI: 10.3901/JME.2011.14.146

# 采用低熔点液态金属工质散热的热沉 传热数值模拟\*

宋思洪<sup>1,2</sup> 廖 强<sup>1</sup> 沈卫东<sup>2</sup>

(1. 重庆大学工程热物理研究所 重庆 400044; 2. 重庆通信学院军事电力工程系 重庆 400035)

**摘要:** 为研究低熔点液态金属散热工质的强化散热机理, 针对芯片散热, 对热沉内低熔点液态金属镓以及水分别作为散热工质时的层流传热性能分别进行数值模拟, 比较分析热沉流道长度、直径、 $Re$  数及工质导热系数对热沉散热性能的影响。结果表明, 以镓为工质时, 芯片温度受流道长度变化的影响较小, 随流道直径、 $Re$  数的增加而降低; 仅在流道长度小于临界长度的较短范围内具有比水更好的冷却效果, 且临界长度随  $Re$  数的增加而增大; 工质导热系数越大, 芯片温度降低的程度越来越小。研究结果为合理设计液态金属散热系统提供理论基础。

**关键词:** 液态金属 芯片冷却 传热性能 数值模拟

**中图分类号:** TK124

## Numerical Simulation on Heat Transfer of Heat Sink Using Liquid Metal with Low Melting Point as Coolant

SONG Sihong<sup>1,2</sup> LIAO Qiang<sup>1</sup> SHEN Weidong<sup>2</sup>

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chongqing University, Chongqing 400044;

2. Military Electricity Engineering Department, Chongqing Communication College, Chongqing 400035)

**Abstract:** In order to better understand the mechanisms of the cooling enhancement by the liquid metal based cooling technique, the heat transfer performances of the heat sink using liquid gallium and water as coolants for chip cooling are numerically simulated and compared to reveal the influences of channel length and diameter,  $Re$  and thermal conductivity on the heat dissipation rate. The results indicate that when liquid gallium is used as coolant, the chip temperature slightly changes with the channel length, and decreases with increasing channel diameter and  $Re$ . It is found that the critical length increases with  $Re$ , the cooling effect of liquid gallium is better than that of water only when the channel length is smaller than the critical length. It is also found that increasing the thermal conductivity can make the decrease extent of the chip temperature smaller. All the results provide the theoretical basis for better designing the cooling systems that use liquid metal as coolant.

**Key words:** Liquid metal Chip cooling Heat transfer performance Numerical simulation

## 0 前言

近年来, 随着电子芯片的高频、高速以及集成电路技术的迅速发展和微电子机械系统技术的进步, 电子芯片的总功率密度大幅增长而物理尺寸却越来越小, 热流密度也随之增加, “热障”问题因此日益严峻。芯片技术发展对高性能冷却方法的迫切要求与实际应用的广阔空间, 使得对超高热流密度芯片、微系统的散热技术研究一直成为国际上异常

重要而活跃的研究领域<sup>[1-3]</sup>。传统风冷和水冷方法对于高散热密度的情况已显得无能为力<sup>[4-5]</sup>, 微通道<sup>[6]</sup>、热电制冷<sup>[7]</sup>以及利用相变<sup>[8]</sup>等散热方式虽提高了散热能力, 但仍不能完全满足电子器件散热的要求。刘静等<sup>[9-10]</sup>于 2002 年提出了以低熔点金属或其合金作为冷却流动工质的计算机芯片散热方法并获得发明专利, MA 等<sup>[11-15]</sup>采用蠕动泵及电磁泵等方式驱动液态镓(Ga)进行散热的试验研究和数值模拟, 分析了流速、功率等因素对散热的影响, 论证了液态金属散热方法的优越性。在散热领域, 液态金属由于具有很高的导热性能而受到国际上的广泛关注, 美国 Nanocooler 公司<sup>[9]</sup>随后也进行相关研究

\* “十一五”信息对抗国防预研资助项目(41101050203)。20101208 收到初稿, 20110516 收到修改稿

并取得部分进展；GHOSHAL 等<sup>[16]</sup>设计出一种利用高导热性能液态金属的芯片冷却装置，可实现 200 W/cm<sup>2</sup> 的散热能力。

本文针对芯片散热，对低熔点液态金属层流时的散热性能进行数值模拟，分析热沉流道长度、直径、雷诺数及导热系数对散热性能的影响，为低熔点液态金属散热器的设计提供理论依据，并提出一种增强低熔点液态金属散热能力的设计方法。

## 1 数值模拟及试验验证

### 1.1 数值模拟

散热模块几何模型如图 1 所示，热沉尺寸  $l_{hs} \times b \times \delta = 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ，热沉流道管径  $D = 4 \text{ mm}$ ；热沉流道分直管和蛇形管两种，直管时其流道长度  $l$  等于热沉长度  $l_{hs}$ ，即  $l = l_{hs} = 50 \text{ mm}$ ，如图 1a 所示；蛇形管时分 2, 3, 4 列三种蛇形布置，流道长度分别为 101 mm、125 mm、150 mm，如图 1b 所示。芯片位置在热沉底面居中，尺寸为 15 mm×15 mm。

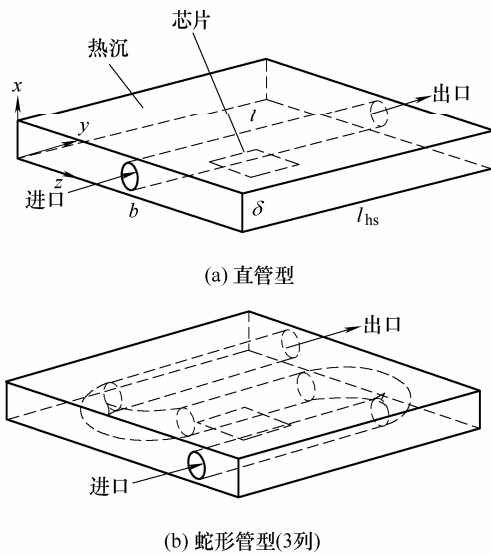


图 1 散热模块几何结构图

以镓和水分别作为散热工质，其物性参数如表 1 所示，热沉为铜，工质进口温度 30 °C，芯片功率 60 W，热沉除与芯片接触面以外的表面均视为绝热。

采用 FLUENT 商业软件进行数值求解，采用三维层流模型，流动边界条件为速度进口和压力出口，热边界条件如下

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial x} = \begin{cases} q & y, z \in A \\ 0 & \text{其他区域} \end{cases} \quad x = 0 \quad (1)$$

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad \text{其他边界} \quad (2)$$

式中， $T$  表示绝对温度； $x, y, z$  表示笛卡尔坐标系； $\kappa$  为热沉材料的导热系数； $A$  代表热沉底部的芯片区域； $q = P/S$ ， $P$ 、 $S$  分别为芯片功率和面积。

表 1 散热工质的热物性参数

流体	导热系数 $\kappa_f /$ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	比热容 $c_p /$ (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	密度 $\rho /$ (kg·m <sup>-3</sup> )	粘度 $\gamma /$ 10 <sup>8</sup> (m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	普朗特数 $Pr$
镓	29.4	344	6 093	29.7	0.02
水	0.6	4 200	1 000	100.6	7.04

采用有限体积法对计算区域进行离散，固体区域采用均分四面体网格，网格边长为 1 mm，流体区则采用非均分四面体网格进行划分，其中近壁面处网格较为密集，网格边长最大为 0.5 mm，最小为 0.1 mm。为保证收敛的稳定性，采用分离变量法隐式求解，对流换热区的压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法，动量、能量参量的求解均采用二阶迎风格式。

### 1.2 试验验证

针对尺寸为 50 mm×50 mm×6 mm 的直管型热沉，管道直径 4 mm、管长 50 mm，以铜块内的加热棒加热铜块作为热源，铜块顶端 15 mm×15 mm 的面作为模拟芯片，其他面采用绝热材料进行包裹隔热处理，如图 2 所示。模拟芯片与热沉底面中间紧密接触，并涂以导热硅脂增强传热，热沉其他表面以隔热材料包裹以视为绝热。采用蠕动泵驱动散热工质流过铜质热沉内的管道来对芯片散热，进口温度采用恒温水浴控制，出口散热工质采用风冷散热器进行散热处理，在热沉与芯片间布置热电偶通过数据采集器采集芯片表面温度，待系统启动后芯片温度达到稳定时读数。试验平台示意图如图 3 所示。

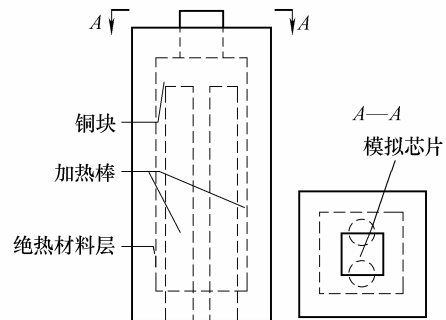


图 2 模拟芯片结构示意图

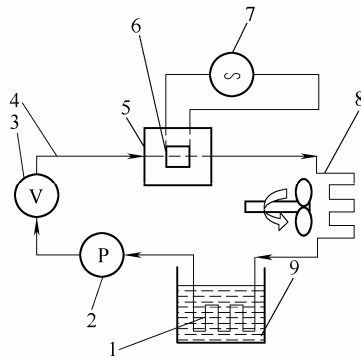


图 3 试验平台示意图

1. 换热器 2. 蠕动泵 3. 流量计 4. 连接胶管 5. 热沉  
6. 模拟芯片 7. 交流电源 8. 风冷散热器 9. 恒温水浴

试验采用了水和镓两种散热工质。试验中，工质进口温度为  $30.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，加热功率  $P=60\text{ W}$ 。通过试验分别测量了不同雷诺数  $Re$  时热沉的散热性能，同时数值模拟了相同工况下的热沉换热特性，试验和数值模拟预测结果如图 4 所示。从图 4 可以看出，以水和镓分别作为散热工质时，数值模拟结果和试验结果吻合较好，芯片温度最大相对误差不超过 7%，证明所采用的数值模拟方法准确有效。

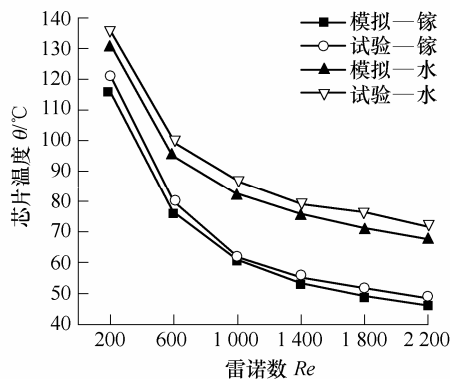


图 4 芯片温度的数值模拟和试验结果比较

## 2 计算结果及分析

### 2.1 管长的影响

分别以镓和水为散热工质，热沉内流道管径为  $4\text{ mm}$ ，芯片功率  $P=60\text{ W}$ 、面积  $S=225\text{ mm}^2$ ， $Re=600$  和  $1800$  时，对直管型流道热沉(流道长度为  $50\text{ mm}$ )与三种蛇形管流道热沉(流道长度分别为  $101\text{ mm}$ ， $125\text{ mm}$ ， $150\text{ mm}$ )的芯片散热进行数值模拟，不同流道长度下的芯片温度模拟结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出，以水为散热工质时，芯片温度随流道长度的增加而迅速降低；以镓为散热工质时，流道长度增加，芯片温度变化较小。在相同  $Re$

下，流道存在一临界长度  $l_c$ ，当流道长度  $l < l_c$  时，镓作为散热工质才比水作为散热工质具有更低的芯片温度， $l > l_c$  时则相反，且  $Re$  越大， $l_c$  值越大。

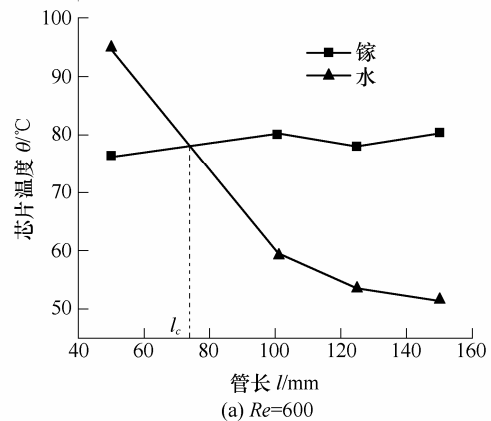
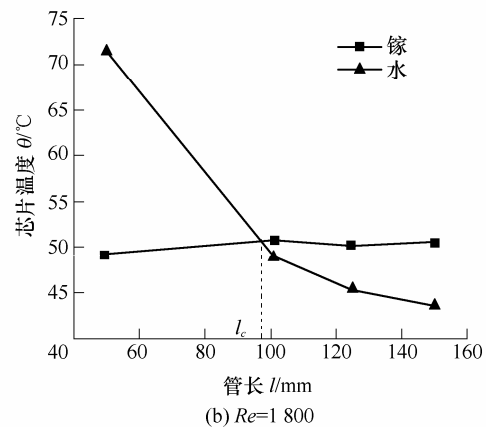
(a)  $Re=600$ (b)  $Re=1800$ 

图 5 不同流道长度下的芯片温度

以  $x/D=0.07RePr$  计算热入口段长度  $x^{[17]}$ ，热入口段内  $Nu$  高于热充分发展段。由于镓的  $Pr$  数非常小，则  $x$  很短，整个流道仅有很短一部分处于热入口段，因此，再增加流道长度对芯片散热影响不大，且由于热沉热阻的影响，整个流道在不同长度处热流密度不同，在采用较长的蛇形管流道时，热入口段处于热流密度较小处，散热效果有限，从而导致在芯片功率不变的情况下，流道越长，反而芯片温度略有升高。当采用水为散热工质时，由于水的  $Pr$  数较大， $x$  较长，整个流道全部处于热入口段，流道越长，则芯片温度越低，散热效果更好。

由热入口段长度分析可知，流道越长，采用镓时整个流道的平均  $Nu_m$  越小于采用水时的平均  $Nu_m$ ，又  $\kappa_{Ga} > \kappa_{water}$ ， $\alpha = \kappa_f Nu_m / D$ ，因此必存在一临界  $Nu_{mc}$ ，亦即存在与之对应的临界长度  $l_c$ ，此时采用镓和水的对流换热效果相同。当  $l < l_c$  时， $(\kappa_f Nu_m)_{Ga} > (\kappa_f Nu_m)_{water}$ ， $\alpha_{Ga} > \alpha_{water}$ ，采用镓的散热效果要好； $l > l_c$  时， $(\kappa_f Nu_m)_{Ga} < (\kappa_f Nu_m)_{water}$ ，

$\alpha_{Ga} < \alpha_{water}$ , 采用水的散热效果要好。且  $Re$  越大, 铯的入口段越长, 占整个流道长度的比例越大, 临界平均  $Nu_{mc}$  一定时, 与之对应的  $l_c$  可以越长。

## 2.2 管径及 $Re$ 的影响

以铯为工质, 采用  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 6\text{ mm}$  的直管型热沉, 内流道长度  $50\text{ mm}$ , 对不同流道直径 ( $D=2, 3, 4, 5\text{ mm}$ ) 在不同  $Re$  时芯片的散热进行数值模拟, 其结果如图 6 所示。

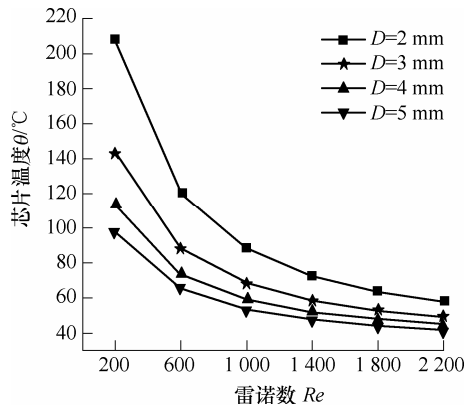


图 6 不同流道直径不同  $Re$  时的芯片温度

从图 6 可以看出, 在常规尺寸范围内, 流道直径越大,  $Re$  数越高, 芯片温度越低。因此, 以铯为工质时, 芯片散热系统可选择管径较大的短流道, 以减小系统尺寸、质量及流动阻力。

## 2.3 工质导热系数的影响

为研究工质导热系数对芯片散热性能的影响, 假设铯的导热系数可在水与铯的导热系数之间, 即  $0.6 \sim 29.4$  范围内变化, 而其他物性参数保持不变, 对其在流道长度为  $50\text{ mm}$ , 直径为  $4\text{ mm}$  的直管型热沉内,  $Re=2200$  的情况下, 芯片功率分别为  $60\text{ W}$ 、 $120\text{ W}$  时的散热性能进行数值模拟, 其结果如图 7 所示。

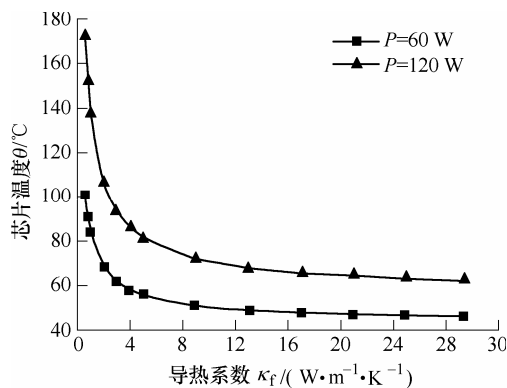


图 7 不同功率时工质导热系数对芯片温度的影响

从图 7 可以看出, 不同功率时, 芯片温度随导热系数的增加而降低, 但导热系数越高, 芯片温度

降低的幅度大大减小。因此, 片面追求过高的导热系数, 并不能大幅提高工质的散热性能, 反之, 可以考虑在铯中掺混一定比例的高潜热相变材料微胶囊, 适当牺牲铯的导热系数, 而增加散热工质的等效比热, 形成一种潜热型的低熔点液态金属功能热流体, 以提高工质的散热性能。MA 等<sup>[18]</sup>成功地在液态铯中掺混入碳纳米管粉末, 证明了在铯中掺入颗粒类物质的可行性。潜热型低熔点液态金属功能流体的制备与传热性能将是下一步研究的重点内容。

## 3 结论

(1) 采用数值计算方法对以铯和水作为散热工质的热沉层流传热进行数值模拟, 研究表明, 以液态铯作为散热工质时, 散热效果受流道长度影响较小; 以水为散热工质时, 流道越长, 散热效果越好。热沉仅在流道长度小于临界长度的情况下, 以铯作为散热工质才具有比水更好的散热效果。

(2) 在常规尺寸范围内, 以铯为工质, 流道直径越大, 散热效果越好, 且随  $Re$  的增加而增加。

(3) 过高的导热系数并不能大幅提高工质的散热性能。因此, 可考虑在工质的其他物性方面, 如提高比热来增强工质的散热性能, 以期获得一种具有较高的导热系数以及较大的等效比热的潜热型低熔点液态金属功能热流体。

## 参 考 文 献

- [1] 揭贵生, 孙驰, 汪光森, 等. 大容量电力电子装置中板式水冷散热器的优化设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46 (2): 99-105.  
JIE Guisheng, SUN Chi, WANG Guangsen, et al. Optimization design of water-cooled heat sink applied to large-capacity power electronic equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (2): 99-105.
- [2] DEVDATTA P K, DEBENDRA K D. Analytical and numerical studies on microscale heat sinks for electronic applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25: 2432-2449.
- [3] 万忠民, 陈敏, 刘伟, 等. 基于多孔微热沉的大功率 LED 冷却技术研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46 (8): 109-113.  
WAN Zhongmin, CHEN Min, LIU Wei, et al. Research on porous micro heat sink for thermal management of high power LED[J]. Journal of Mechanical Engineering,

- 2010, 46 (8): 109-113.
- [4] 刘东晓, 李运泽, 李运华. 纳卫星等效空间热沉的 PWM 控制及其在地面模拟试验中的应用研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46 (16): 148-154.
- LIU Dongxiao, LI Yunze, LI Yunhua. PWM control and application research on ground simulation experiment of equivalent space heat sink for nano-satellite[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (16): 148-154.
- [5] LI Teng, LÜ Yonggang, LIU Jing, et al. A powerful way of cooling computer chip using liquid metal with low melting point as the cooling fluid [J]. Forsch Ingenieurwes Engineering Research, 2006, 70(4) : 243-251.
- [6] 陈强, 杨静宇, 董涛, 等. 微管道换热器多孔介质模型分析及应用[J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 108-113.
- CHEN Qiang, YANG Jingyu, DONG Tao, et al. Analysis of porous medium model for microchannel heat sinks and its application[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40 (4): 108-113.
- [7] 任大海, 卢凯, 戴震宇, 等. 基于微机电系统技术的微型热电致冷器研究进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46 (8): 114-120.
- REN Dahai, LU Kai, DAI Zhenyu, et al. Latest development of micro thermoelectric cooler based on MEMS[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (8): 114-120.
- [8] 马虎根, 胡自成, 罗行, 等. 微尺度通道内混合物流动沸腾特性研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(1): 29-32.
- MA Hugen, HU Zicheng, LUO Xing, et al. Experimental investigation on boiling heat transfer of mixture in microchannel tube[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(1): 29-32.
- [9] 刘静, 周一欣. 芯片强化散热研究新领域——低熔点液体金属散热技术的提出与发展[J]. 电子机械工程, 2006, 22(6): 9-13.
- LIU Jing, ZHOU Yixin. New frontier in enhanced chip cooling its proposal and development of liquid cooling method using low-melting-point metal as coolant[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2006, 22(6): 9-13.
- [10] 刘静, 周一欣. 以液态金属镓或其合金作为流动工质的芯片散热装置: 中国, 02131419.5[P]. 2005-10-19.
- LIU Jing, ZHOU Yixin. A computer chip cooling device using liquid metal with low melting point and its alloys as the cooling fluid: China, 02131419.5[P]. 2005-10-19.
- [11] MA Kunquan, LIU Jing. Liquid metal cooling in thermal management of computer chips[J]. Front. Energy Power Eng., 2007, 1(4): 384-402.
- [12] MA Kunquan, LIU Jing. Heat-driven liquid metal cooling device for the thermal management of a computer chip[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40: 4722-4729.
- [13] LIU Jing, LÜ Yonggang, ZHOU Yixing, et al. Liquid metal based miniaturized chip-cooling device driven by electromagnetic pump[C]//2005 ASME International Mechanical Engineering Congress &Exposition, Nov. 5-11, 2005, Orlando, Florida, 2005: 501-510.
- [14] DENG Zhongshan, LIU Jing. Numerical evaluation on the heat dissipation capability of liquid metal based chip cooling device[C]//2005 ASME International Mechanical Engineering Congress &Exposition Nov. 5-11, 2005, Orlando, Florida, 2005: 511-515.
- [15] DENG Zhongshan, LIU Jing. Capacity evaluation of a mems based micro cooling device using liquid metal as coolant[C]//Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Zhuhai, China, 2006: 1311-1315.
- [16] GHOSHAL U, GRIMM D, IBRANI S, et al. High-performance liquid metal cooling loops[C]// Proceedings of the 21th IEEE Semi-conductor Thermal Measurement and Management Symposium, San Jose, USA: IEEE, 2005: 16-19.
- [17] 贾力, 方肇洪, 钱兴华. 高等传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- JIA Li, FANG Zhaohong, QIAN Xinghua. Advanced heat transfer[M]. Beijing: Advanced Education Press, 2003.
- [18] MA Kunquan, LIU Jing. Nano liquid-metal fluid as ultimate coolant[J]. Physics Letters A, 2007, 361: 252-256.

作者简介: 宋思洪(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士研究生。主要研究方向为强化传热。

E-mail: songsh0915@163.com

廖强, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为强化传热。

E-mail: lqzx@cqu.edu.cn