

# 毛细相变回路 的理论 实验研究

Theoretical and experimental study  
for capillary phase change loop

Liu Wei Huang Xiaoming Liu Zhichun

刘 伟 黄晓明 刘志春



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

# 毛细相变回路 的理论 与 实验研究

刘 伟 黄晓明 刘志春

Theoretical and experimental study  
for capillary phase change loop



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

### 图书在版编目(CIP)数据

毛细相变回路的理论与实验研究/刘伟 黄晓明 刘志春—武汉：华中科技大学出版社，2010.11  
ISBN 978-7-5609-6603-8

I. 毛… II. ①刘… ②黄… ③刘… III. 电子回路-文集 IV. TM645-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 185030 号

### 毛细相变回路的理论与实验研究

刘伟 黄晓明 刘志春

策划编辑：刘 勤

责任编辑：刘 勤

封面设计：潘 群

责任校对：周 娟

责任监印：熊庆玉

出版发行：华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编：430074 电话：(027)87557437

录 排：武汉众欣图文照排

印 刷：湖北新华印务有限公司

开 本：880mm×1230mm 1/16

印 张：24 插页：1

字 数：736 千字

版 次：2010 年11月第 1 版第 1 次印刷

定 价：54.00 元



本书若有印装质量问题，请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线：400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

## 作者简介



**刘伟**，教授，博士生导师，享受国务院政府特殊津贴。1987年3月—1988年5月赴美国迪金森大学做访问学者；1994年10月—1995年10月赴日本爱媛大学做高级访问学者；1997年11月—1998年1月赴日本爱媛大学做访问教授。

刘伟教授现兼任中国工程热物理学会理事，中国太阳能学会理事，湖北省工程热物理学会副理事长，教育部热工基础课程教学指导委员会委员，中国电力教育协会能源动力工程学科教学委员会副主任等。曾任国家自然科学奖评审专家，教育部科学技术奖评审专家，国家自然科学基金专家评审组成员等。

刘伟教授长期从事工程热物理及能源领域的教学及科研工作，现为“工程传热学”国家级精品课程负责人。主持承担包括国家自然科学基金项目、“973计划”子课题任务项目、教育部博士点基金项目、湖北省科技攻关重点项目等在内的17项国家级和省部级科研项目以及10余项其他院所和企业委托科研项目。获省部级教学与科技成果奖3项，获授权发明专利5项，实用新型专利3项，出版学术专著和规划教材3部，发表学术论文200余篇，其中SCI、EI和ISTP收录论文170余篇次。



**黄晓明**，1976年6月出生，工学博士，现为华中科技大学能源与动力工程学院副教授，硕士生导师。主要研究方向为热毛细泵相变回路的理论与技术研究、电子器件散热与控制技术、多孔介质传热传质理论研究等。近年来，作为项目负责人承担了1项中国博士后基金，2项校创新基金，并参与了国家自然科学基金重点项目1项、国家973子项目1项及其他国家级项目2项。合作出版专著1部，参编教材1部，在国内外重要期刊公开发表论文20余篇，其中SCI、EI及ISTP收录13篇。



**刘志春**，工学博士，副教授，硕士生导师，1976年3月出生，2006年毕业于华中科技大学工程热物理专业，获得博士学位。主要研究方向为热毛细泵相变回路的理论与技术研究、传热强化理论与技术以及微通道传热与流动等，教学方面主要承担“传热学”、“工程热力学”、“反应堆热工水力学”等本科和“多孔介质传热传质理论”等研究生课程的教学工作。主持国家自然科学基金、教育部博士点基金以及多项横向课题，参加包括国家自然科学基金重点项目、“973”计划子课题等项目在内的国家级、省部级和横向项目多项。获授权国家发明专利7项，在国内外重要期刊及会议上发表30余篇学术论文，其中SCI、EI及ISTP收录20余篇。



## 内 容 简 介

毛细相变回路技术在空间站、航天器、通讯卫星、电子元器件冷却等方面有着广阔的应用前景。本书汇集了作者近十年来关于毛细相变回路的主要研究成果,内容包括毛细芯内的传热与流动,蒸发器和冷凝器内的相变传输,毛细相变的界面现象与稳定性分析,以及针对毛细相变回路的优化、仿真与性能实验等。

本书体系完整、内容全面,可作为航天器热控制、电子器件与设备散热、制冷低温、热能工程等领域的工程技术人员以及高等院校相关专业师生的参考书。



# 前言

近几十年来,随着电子技术、微电子技术及组装技术的发展,电子设备正朝着高集成度组装、微组装的方向发展。由于电子设备的功率增加、集成度加大、体积缩小,使其热流密度急剧上升,工作温度大为增高。但是,因为过热,电子设备或器件的性能随之下降,甚至发生故障,因此,其可靠度和寿命将大为降低。在一些重要的应用场合,如 CPU、LED、LASER 及卫星与航天器电子载荷的冷却等,都对散热技术提出了很高的要求。研究表明,70%以上的电子设备和器件的失效是由过热引起的,因此,如何采取有效措施,将热量有效地排散出去,就成为提高电子设备和器件可靠性的关键技术。基于这样的需求,毛细泵回路(Capillary Pumped Loop, CPL)和环路热管(Loop Heat Pipe, LHP)等毛细相变回路散热技术快速地发展起来,其中也包括毛细芯热管(Capillary Wick Heat Pipe, CWHP)和微槽热管(Micro-groove Heat Pipe, MGHP)等。

CPL 和 LHP 分别于 1966 年和 1971 年由美国航空航天局 Lewis 研究中心的 Stenger 及前苏联乌拉尔技术学院的 Gerasimov 和 Maydanik 首先提出,是两种基于毛细相变机理和分离热管技术发展起来的散热装置。CPL 和 LHP 利用其蒸发器内毛细芯的毛细抽力驱动系统的工质循环,利用蒸发器和冷凝器内的工质相变传输热量,具有传热强、热阻低、效率高、能耗小、传输距离长等特点。与其他类型的散热装置相比,CPL 和 LHP 的优点为:利用工质相变传输热量,因而,传热效果好,可以实现小温差传热,特别适合于电子设备和器件的散热要求;没有运动部件,不需要外部能量输入,因而,可以减少系统噪声,减轻系统重量,节约系统能耗,降低维护费用,延长使用寿命,将其应用于卫星及航天器的电子器件散热,可以减小发射重量,提高安全性和可靠度;通过调节冷凝器中蒸气的凝结面积,实现对系统工作温度的控制,因而,系统响应快,自适应性好,控温较为方便;蒸发器和冷凝器分离,适应远距离输送热量的灵活布局,因而,可根据系统散热的要求,使结构更加紧凑,而且,蒸发器可以直接和热源接触,热阻低,传热效率高;系统可以采用多个蒸发器,因而,热分享性能较好,可实现对多个目标负荷的散热和温控。

近半个世纪以来,尽管许多关于 CPL 和 LHP 的研究成果见诸于文献报道,但仍旧有许多问题没有得到有效解决,从而限制了其广泛应用。例如,系统的压力和温度振荡、毛细芯的界面稳定性、蒸发器的背向导热、液体补偿腔内的液体沸腾、高性能及复合毛细芯的制备等,都亟待在理论和技术上进一步改进或完善。因此,迫切需要研制出热排散效果更好、运行性能更优、调节能力更强的 CPL 和 LHP 系统,并且通过理论分析和仿真计算得到优化的设计参数,通过系统实验获得基本的性能数据,为 CPL 和 LHP 的工程应用奠定基础。为此,本书作者及其课题组近十年来一直从事 CPL 和 LHP 的理论、实验和研发工作,本书就是作者主要研究工作的汇集和总结,相关内容已获得了 5 项国家发明专利。

本书共分为四个部分:第一部分为毛细芯内的传热与流动分析,主要研究蒸发器毛细芯中工质的相变传热与流动;第二部分为蒸发器和冷凝器内的传输问题,主要研究蒸发器的整体性能及冷凝器内工质的传热和流动特性;第三部分为毛细界面现象与稳定性分析,主要研究毛细相变界面特征及其稳定性;第四部分为系统优化、仿真与性能实验,主要研究系统的优化方法、数值计算、动态仿真及性能实验等。书中介绍的较为完整的理论分析、较为具体的研究方法,以及较为丰富的实验数据,对毛细相变回路的研究和应用具有一定的参考价值。

作者在毛细相变回路方面的研究工作先后得到国家自然科学基金(50876035; 50906026)和其他国家计划项目的经费资助,使得较为系统的研究工作得以完成或延续,在此,特致以诚挚的谢意。作者课题组的杨金国老师及研究生万忠民、盖东兴、涂正凯、陈彬彬、韩延民、王强、邓芳芳、宰军、史光、张亮、孙



晨、刘博、李欢等为本书的完成做出了积极贡献,研究生黄望梅、江雯为本书的整理和校对做了大量的工作,作者对他们一并表示衷心的感谢。

作者希望本书的出版能对毛细相变回路的理论和技术发展起到一定的促进作用。但是,限于作者的学识和水平,本书难免有不妥或错误之处,恳请广大读者和同行专家给予批评指正。

刘 伟 黄晓明 刘志春

2010 年 10 月于武昌





# 目 录

## 第一部分 毛细芯内的传热与流动分析

|                                                       |      |
|-------------------------------------------------------|------|
| CPL 蒸发器非饱和多孔芯内流动与传热分析 .....                           | (3)  |
| CPL 蒸发器多孔芯温压变化的数值模拟 .....                             | (8)  |
| CPL 蒸发器多孔芯传热传质特性的新数学模型 .....                          | (13) |
| Modeling for Heat and Mass Transfer with Phase        |      |
| Change in Porous Wick of CPL Evaporator .....         | (19) |
| CPL 蒸发器毛细芯中流动与传热的场协同分析 .....                          | (29) |
| CPL 蒸发器毛细芯非饱和流动与传热的场协同分析 .....                        | (35) |
| Flow and heat transfer analysis in porous wick of     |      |
| CPL evaporator based on field synergy principle ..... | (42) |

## 第二部分 蒸发器和冷凝器内的传输问题

|                                                             |       |
|-------------------------------------------------------------|-------|
| CPL 冷凝器多孔芯及槽道内蒸气的冷凝分析 .....                                 | (57)  |
| 平板多孔芯冷凝器内工质相变换热的 EOF 方法 .....                               | (61)  |
| 平板式 CPL 蒸发器启动特性研究 .....                                     | (65)  |
| CPL 毛细芯冷凝器的数值模拟研究 .....                                     | (71)  |
| 小型平板 CPL 蒸发器耦合数值计算及优化设计研究 .....                             | (76)  |
| 小型平板 CPL 蒸发器预热驱动过程研究 .....                                  | (81)  |
| 带翅片的小型平板 CPL 蒸发器相变传热的数值模拟 .....                             | (86)  |
| 小型平板 CPL 实现高热流密度散热的研究 .....                                 | (96)  |
| 实现电子器件散热的微小型平板 LHP 蒸发器传热特性研究 .....                          | (102) |
| Heat Transfer with Flow and Phase Change in an Evaporator   |       |
| of Miniature Flat Plate Capillary Pumped Loop .....         | (109) |
| Numerical Simulation of Two Phase Flow and Heat             |       |
| Transfer in CPL Condenser with Porous Element .....         | (124) |
| Heat and Mass Transfer in a Flat Disc-Shaped                |       |
| Evaporator of a Miniature Loop Heat Pipe .....              | (130) |
| Conjugate Numerical Analysis of Flow and Heat Transfer with |       |
| Phase Change in a Miniature Flat Plate CPL Evaporator ..... | (145) |

## 第三部分 界面现象与稳定性分析

|                                             |       |
|---------------------------------------------|-------|
| 毛细蒸发相变界面的数学模型和机理 .....                      | (163) |
| 相变流体回路中毛细芯内液体汽化界面的稳定性分析 .....               | (168) |
| 毛细芯热管的相变驱动机制与模型 .....                       | (173) |
| 无重力条件下毛细相变流体回路的稳定性研究 .....                  | (179) |
| Phase Change Driving Mechanism and Modeling |       |
| for Heat Pipe with Porous Wick .....        | (186) |





|                                                                                     |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 蒸发毛细弯液面热质传输特征及其稳定性分析·····                                                           | (193) |
| 蒸发毛细弯液面基于线性稳定分析的一个显示稳定判据·····                                                       | (201) |
| 无重力条件下毛细相变回路中界面的稳定性研究·····                                                          | (211) |
| 毛细相变流体回路冷凝界面的稳定性·····                                                               | (217) |
| Modeling of Driving Mechanisms for Capillary Pumped Loops and Loop Heat Pipes ····· | (224) |

#### 第四部分 系统优化、仿真与性能实验

|                                                                                                        |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 平板式 CPL 系统的动态仿真 ·····                                                                                  | (235) |
| 平板式毛细抽吸两相回路系统启动实验研究·····                                                                               | (241) |
| 平板型 CPL 的设计与实验研究 ·····                                                                                 | (245) |
| 新型平板式 CPL 系统的设计与实验 ·····                                                                               | (253) |
| Simulation and Optimization of Loop Heat Pipe with Flat-Plate Type Evaporator ·····                    | (258) |
| 新型平板式 CPL 的性能实验 ·····                                                                                  | (267) |
| Experimental Investigation of a New Flat Plate Type Capillary Pumped Loop ·····                        | (272) |
| 平板型小型环路热管的温度波动特性·····                                                                                  | (284) |
| 平板型环路热管温度波动现象研究·····                                                                                   | (293) |
| 平板型 MLHP 温度波动研究 ·····                                                                                  | (299) |
| 平板式 mLHP 的仿真与实验研究 ·····                                                                                | (306) |
| 小型平板 CPL 蒸发器优化设计研究 ·····                                                                               | (313) |
| CPL 微泵引射辅助回路的数值研究 ·····                                                                                | (317) |
| Design and Experimental Research of a Flat-plate<br>Type CPL with a Porous Wick in the Condenser ····· | (322) |
| Temperature Oscillation of mLHP with Flat Evaporator ·····                                             | (332) |
| Operational Characteristics of Miniature Loop Heat Pipe with Flat Evaporator ·····                     | (342) |
| 工质对平板型 LHP 运行特性影响的实验研究 ·····                                                                           | (354) |
| 环路热管系统温度波动的机理研究·····                                                                                   | (360) |
| 平板型环路热管烧结毛细芯的研制·····                                                                                   | (367) |
| 平板式 mLHP 实验的稳定性分析 ·····                                                                                | (371) |

# 第一部分

## 毛细芯内的传热与流动分析







# CPL 蒸发器非饱和多孔芯内流动与传热分析\*

黄晓明 刘伟 韩延民 侯增祺

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉, 430074)

**摘要:**对 CPL 蒸发器毛细多孔芯内的流动和传热提出了一个新的模拟方法, 即采用非饱和多孔介质输运模型, 以提高 CPL 蒸发器毛细多孔芯内流动和传热的计算精度。基于非饱和模型, 分析讨论了 CPL 的运行性能, 给出了应用非饱和模型所得到的计算结果。

**关键词:**CPL 蒸发器; 多孔芯; 非饱和; 流动与传热; 数值计算

## Analysis of the Unsaturated Heat and Mass Transfer in the Porous Wick of a CPL Evaporator

Huang Xiaoming Liu Wei Han Yanmin Hou Zengqi

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

**Abstract:** For improving the precision of the numerical calculation of heat and mass transfer in the porous wick of a CPL evaporator, a new mathematic model is put forward. That is the unsaturated transfer model for porous media. Basing on such an unsaturated numerical model, a CPL's operation performance is discussed and analyzed, and some critical conclusion is made.

**Keywords:** CPL evaporator; porous wick; unsaturated; heat and mass transfer; numerical calculation

### 1 引言

本文研究毛细抽吸两相回路(capillary pumped loop, CPL)蒸发器内的流动和传热特性。CPL 是一种高效的传热装置, 具有可靠性高、传输能力强、控温精确等优点, 因此, 得到了国内外学者的广泛关注, 并应用于航天器的热控<sup>[1,2]</sup>。Muraoka 等<sup>[3]</sup>将常见的管式冷凝器改变为多孔芯冷凝器, 使得冷凝器的气液之间有稳定的界面, 从而减少甚至消除系统的压力振荡。Figus 等<sup>[5]</sup>将蒸发器毛细芯内的流动划分为饱和蒸气区和饱和液体区, 并按饱和多孔介质理论分析计算了毛细芯内的流动和传热过程。Cao 等<sup>[4]</sup>研究了平板型毛细芯蒸发器, 同时计算了多孔芯内饱和液体与汽槽内蒸气的流动。在这些文献中, 对毛细芯的研究均使用饱和多孔介质模型, 没有考虑在蒸气区和液体区之间可能存在的非饱和区域。

实际上, 液体的蒸发不可能仅发生在主气液界面上, 在表面能的作用下, 液膜将向饱和蒸气区作吸附运动, 因此, 在两个饱和区之间将存在气液共存的非饱和区。为此, 本文对毛细多孔芯内非饱和流动和传热进行数学建模和计算分析; 进一步的研究将考虑将毛细芯划分为饱和蒸气区、非饱和区、饱和液体区, 即三层模型。

\* 黄晓明, 刘伟, 韩延民, 等. CPL 蒸发器非饱和多孔芯内流动与传热分析[J]. 上海理工大学学报, 2003, 25(专辑): 67-70.



## 2 物理模型

本文计算主要针对 CPL 平面蒸发器的一个典型计算单元,如图 1 所示。图 1(b)为毛细多孔芯计算单元,左右两边界均为对称边界,底部连接于储液槽道,顶部一部分与固体加热面接触,其上具有均匀热负荷,另一部分与蒸气槽道相通,为开口边界。蒸发器尺寸为  $200\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ ,蒸发面开有 29 个槽,这样,多孔芯计算单元的二维尺寸为  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。CPL 所使用的制冷介质为甲醇。冷凝器采用空气冷却,甲醇的冷凝温度设定为  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当 CPL 处于稳定运行时,多孔芯底部保持为  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在理想情况下,多孔芯底部处于液饱和态,而计算单元的其他部分为非饱和两相流区域。

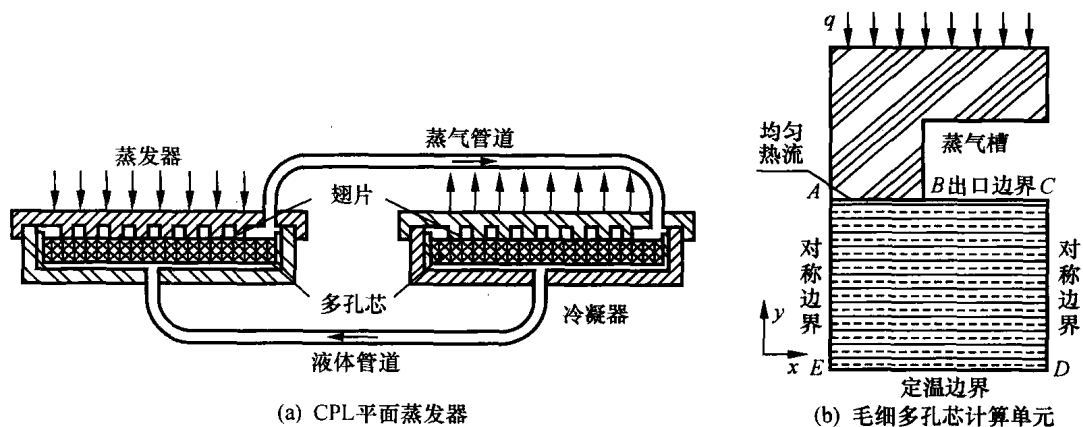


图 1 CPL 平面蒸发器和多孔芯数值计算单元示意图

## 3 数学模型<sup>[4-8]</sup>

建立数学模型时假设:(1)毛细多孔孔隙内的蒸气的压力为饱和压力;(2)气、固、液三相处于局部热平衡状态。由于 CPL 蒸发器应用于航天器,可以不考虑重力对流体流动的影响,因此,在动量方程中不考虑浮升力的影响。二维问题的控制方程如下。

连续性方程

蒸气:

$$\frac{\partial(\epsilon_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{V}_g) = \dot{m} \quad (1)$$

液体:

$$\frac{\partial(\epsilon_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \mathbf{V}_l) = -\dot{m} \quad (2)$$

动量方程

气相:

$$\epsilon_g \frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial t} + \epsilon_g (\mathbf{V}_g \cdot \nabla) \mathbf{V}_g + \dot{m} \mathbf{V}_g = -\frac{\epsilon_g}{\rho_g} \nabla p - \frac{\nu_g \epsilon_g}{K_g} \mathbf{V}_g \quad (3)$$

液相:

$$\epsilon_l \rho_l \left( \frac{\partial \mathbf{V}_l}{\partial t} + \mathbf{V}_l \cdot \nabla \mathbf{V}_l \right) + \dot{m} \mathbf{V}_l = -\frac{\epsilon_l \mu_l D_l}{K_l} \nabla \epsilon_l - \frac{\mu_l \epsilon_l}{K_l} \mathbf{V}_l \quad (4)$$

能量方程

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g c_g (\mathbf{V}_g \cdot \nabla) T + \rho_l c_l (\mathbf{V}_l \cdot \nabla) T = \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \nabla T) - \gamma \dot{m} \quad (5)$$

$$(\rho c)_m = \epsilon_s (\rho c)_s + \epsilon_l (\rho c)_l + \epsilon_v (\rho c)_v \quad (6)$$

$$\lambda_{\text{eff}} = \epsilon_s \lambda_s + \epsilon_l \lambda_l + \epsilon_v \lambda_v \quad (7)$$

以上方程中各变量和参数的物理意义分别是： $\epsilon$  为相含量； $V_l$  为液相速度矢量； $V_v$  为蒸气速度矢量； $c$  为比热容； $\rho$  为密度； $T$  为温度； $p$  为压力； $\dot{m}$  为蒸发量； $\mu$  为流体的动力黏度； $K$  为流体的渗流参数； $t$  为时间； $\lambda_{\text{eff}}$  为有效热传导系数。下标  $g$  表示气相， $l$  表示液相， $s$  表示固相。

## 4 数值计算结果

对非饱和和多孔芯内的传输方程采用有限差分法的计算结果如图 2~图 6 所示。图 2 为计算所得的非饱和温度场。可以看到温度变化主要集中在多孔芯左上角，与蒸发面相邻的左上边界为整个腔体的最高温度处。当热流密度比较低时，腔体的下半部分（包括右上角）基本上没有温度变化；只有当热流密度比较大时，腔体的这部分才产生明显的温度梯度。热流密度从  $10 \text{ kW/m}^2$  增加到  $18 \text{ kW/m}^2$ ，左上角处最高温度上升不过  $0.6^\circ\text{C}$ ，与文献[2]相比，这个温升相当低。由于 CPL 是一个传热器件，因此保证它自身温升较低，这就意味着蒸发器热阻较小，对热量的传递比较有利。如果在腔体内保持一定的非饱和区域，那么腔体内的相变区域也就变大，系统的局部高温区域减小，这样不仅可以提高系统的热效率，而且还有利于 CPL 控制温度波动的能力。

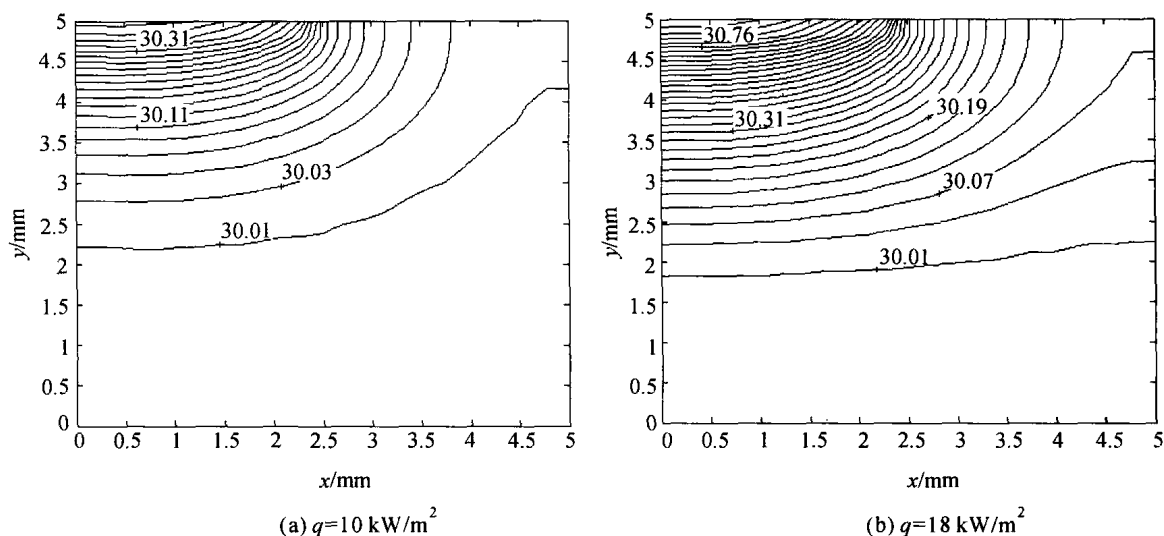


图 2 采用非饱和模型计算的多孔芯温度场

图 3 是非饱和模型计算所得的液相含量场。从图中可以看到水平方向上的液相含量变化主要发生在腔体的顶部。热流越大，液体向上的速度越快。与图 3(b)相比较，图 3(a)中液相含量基本达到饱和 ( $\epsilon_l = 0.59$ ) 的区域更多一些。

图 4 为计算所得蒸发量场。可以看到主要的蒸发区域在腔体的顶部，而热流密度越大，蒸发区域越大。蒸发量与 CPL 蒸发器所能传递的热量有关，因为相变所能带走的潜热比对流、导热所能传递的热量要高一个量级。因此，如果在计算中忽略非饱和区的计算会使计算结果产生较大偏差。

图 5 为计算所得速度矢量图。很明显，腔体顶部蒸气速度要比底部蒸气速度高几个量级，说明主要的蒸气形成和流动区域是在腔体的顶部。一般计算所得的出口速度量级在热流没有超过  $18 \text{ kW}$  时为  $10^{-2} \sim 10^{-1}$ ，热负荷越大，出口蒸气速度越大。图 6 给出的是蒸气出口速度随热流密度的变化。这一出口速度在非饱和模型中与潜热有很大关系，也就是与多孔芯所能传递的热量有关。从图 6 可以看出，相同的热流下多孔芯的固相含量  $\epsilon_s$  越小，孔隙率越大，蒸气出口速度越大，那么 CPL 的热量传输能力越高。

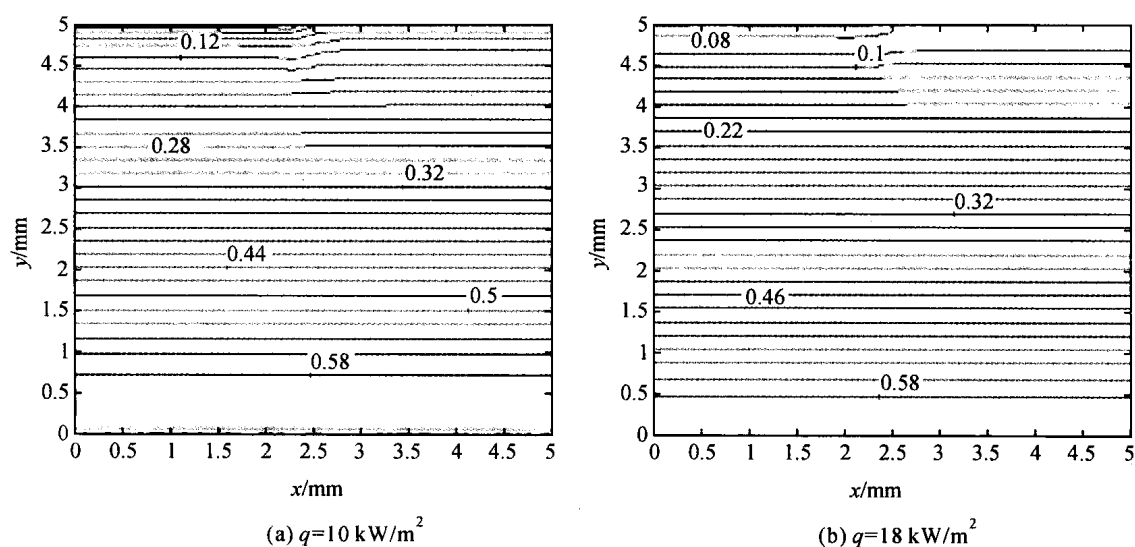


图3 采用非饱和模型计算的多孔芯液相含量场

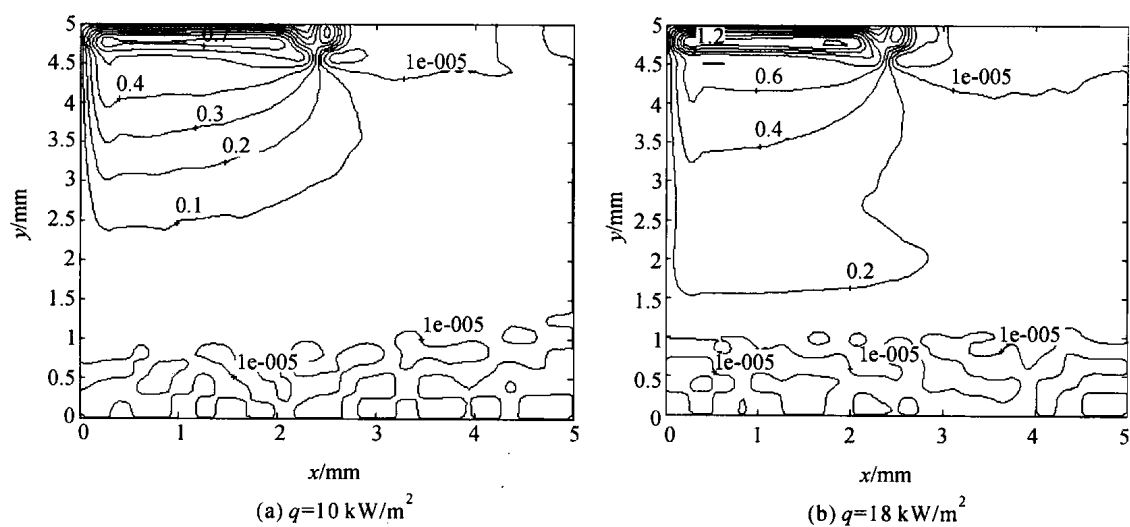


图4 采用非饱和模型计算所得多孔芯蒸发量场

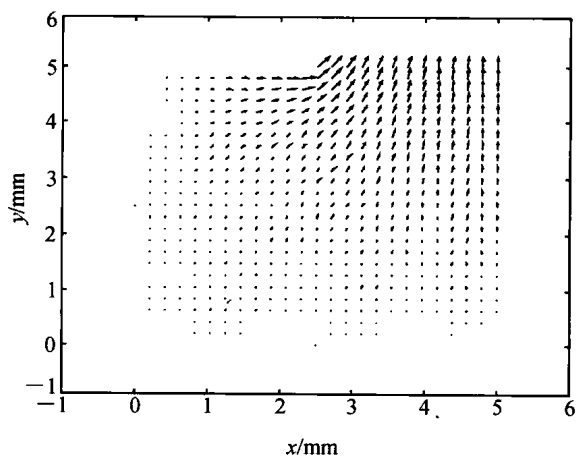
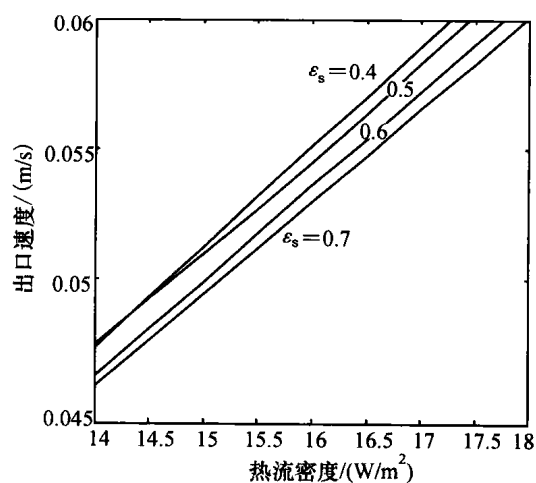
图5 多孔芯蒸气的速度场  $q=10 \text{ kW/m}^2$ 

图6 蒸气出口速度随热流密度的变化





## 5 结论

(1) 在 CPL 蒸发器的毛细多孔芯中存在着非饱和区域, 蒸发器的热负荷越大, 毛细多孔芯内的温度和相含量变化越明显, 非饱和区域会增大。

(2) 单纯采用非饱和模型的计算结果与真实情况可能存在一定的偏差, 但这对建立三层模型, 并完善 CPL 毛细芯内热质传递的数值模拟, 起着关键作用。

### 参考文献

- [1] HOU Z Q, SUN C H, ZHANG J X. Test study on unsteady operation of capillary pumped loop [C]. Proc. of 10th Int. Heat Pipe Conference. Stuttgart, 1997.
- [2] SCHWEICKART R. IEEE. NASA Goddard Space Flight Center, 1989.
- [3] MURAOKA I, RAMOS F M, VLASSOV V V. Experimental and theoretical investigation of a capillary pumped loop with a porous element in the condenser[J]. Int. Comm. Heat and Mass Transfer, 1998, 25(8): 1085-1094.
- [4] CAO Y, FAGHRI A. Conjugate analysis of a flat-plate type evaporator for capillary pumped loops with three-dimensional vapor flow in the groove[J]. Int. J. Heat and Mass Transfer, 1994, 37(9): 401-409.
- [5] FIGUS C, BRAY Y LE, BORIES S, et al. Heat and mass transfer with phase change in a porous structure partially heated; continuum model and pore network simulations[J]. Int. J. Heat and Mass Transfer, 1999, 42(8): 2557-2569.
- [6] LIU W, PENG S W, MIZUKAMI K. A general mathematical modeling for heat and mass transfer in unsaturated porous media; an application to free evaporative cooling [J]. Heat and Mass Transfer, 1995, 31(1): 49-55.
- [7] LIU W, PENG S W, MIZUKAMI K. Moisture evaporation and migration in thin porous packed bed influenced by ambient and operative conditions[J]. Int. J. of Energy Research, 1997, 21(1): 41-53.
- [8] LIU W, ZHAO X X. 2D numerical simulation for simultaneous heat; water and gas migration in soil bed under different environmental conditions [J]. Heat and Mass Transfer, 1998, 34(4): 307-316.



# CPL 蒸发器多孔芯温压变化的数值模拟\*

王强 刘伟 刘志春 黄晓明

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉, 430074)

**摘 要:**应用二维气液两相分层饱和和多孔介质模型,对蒸发器多孔芯内的传热传质过程进行了非稳态数值模拟。根据多孔芯内气液相界面移动时,内部温度场和压力场分布的计算特性,分析了系统启动和变工况运行过程中多孔芯温度和压力的变化机制。

**关键词:**CPL;蒸发器;压力变化;多孔芯;数值模拟

## Numerical Study of the Pressure and Temperature Changing of the Porous Wick in Capillary Pumped Loop Evaporator

Wang Qiang Liu Wei Liu Zhichun Huang Xiaoming

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

**Abstract:** Two-phase layered saturated porous model of two dimensions is used to study the heat and mass transfer procedure in the porous wick of CPL evaporator. The numerical simulation results show us the characteristics of the temperature and pressure fields and the changing mechanism with variable loads is analyzed.

**Keywords:** capillary pumped loop; porous wick; evaporator; pressure changing; numerical simulation

## 1 引言

本文主要是在完善蒸发器多孔芯的数学物理模型的基础上<sup>[1,2]</sup>,用数值方法研究了 CPL 系统启动和变工况运行过程中,伴随着蒸发器多孔芯内气液相界面移动时,两相温度场和压力场的分布特性及非稳态变化机制。

## 2 数学物理模型

本文考虑的平板型蒸发器加热翅片-槽道结构具有对称性分布的特点(如图 1(a)所示),物理模型取于 CPL 蒸发器翅片下方多孔芯区域的一个二维计算单元 ABCDE(如图 1(b)所示)。计算单元的上部是来自蒸发器翅片的热流,左右边界均为对称边界,底部紧邻蒸发器的回液槽道,蒸气从翅片槽道区排出(开口边界)。多孔芯计算单元尺寸为 5 mm×5 mm,多孔介质孔隙率为 0.611,循环工质为甲醇(常压下的蒸发温度为 64 ℃)。在 CPL 启动初期,多孔芯处于液体饱和状态,CPL 启动过程中,多孔芯的底部保持恒温,液体入口温度设定为 61 ℃(过冷度为 3 ℃)。

在建立饱和和多孔介质数学模型时,根据 CPL 在太空中的应用环境,不考虑重力对流动的影响,多孔芯内的工质运动没有浮升力。因此,作以下假设以简化数学模型:(1)多孔孔隙内蒸气的压力为饱和压

\* 王强,刘伟,刘志春,黄晓明. CPL 蒸发器多孔芯温压变化的数值模拟[J]. 华中科技大学学报,2004,32(5):87-89.