

中国工程热物理学会

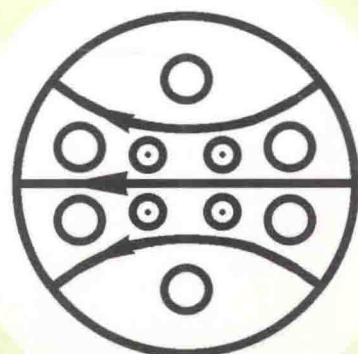
多相流学术会议

论文集（上册）

二〇〇六

重庆

中国工程热物理学会编



多相流学术会议论文集（上册）目录

邀请报告

- 066165 Aspects of Research and Development in PIV for Multiphase Flows.....
..... Fujio YAMAMOTO (1)
- 066166 A Novel Meshfree Method for Multiphase Flow in Reactive Porous Media.....
..... Hui Zhang (2)
- 066159 脉动热管可视化流型分析和换热研究
..... 刘 石 李惊涛 陈焕倬 董向元 (3)
- 066130 蒸发液层对流不稳定性的理论与实验研究.....刘秋生 刘 荣 朱志强 (15)
- 066017 气液段塞流气弹区相界面结构理论研究.....顾汉洋 郭烈锦 (22)
- 066081 低压旋流喷嘴内液固两相流动特性数值研究
..... 张 力 高振宇 冉景煜 蒲 舸 唐 强 (32)
- 066134 倾斜壁面附近上升气泡的直接数值模拟.....陈 斌 (39)
- 066146 气固两相流动直接数值模拟的研究进展.....罗 坤 樊建人 岑可法 (44)
- 066122 气举消除严重段塞流方法的实验研究王 鑫 郭烈锦 (62)
- 066141 歧管式微通道热沉换热性能的实验研究.....
..... 齐景智 夏国栋 刘 青 张忠江 (71)

一. 气液两相流与沸腾传热传质

- 066003 模拟研究推流式曝气池内横向水流对气泡生成过程的影响
..... 李彦鹏 关卫省 (77)
- 066029 涡旋发生器内部气液两相流动的数值模拟计算
..... 王 艳 俞 坚 马重芳 (84)
- 066030 管内低温垂直向上两相流弹状气泡上升速度的实验研究
..... 张 华 王 经 (88)
- 066077 基于两流体模型的低温循环预冷瞬态数值模拟.....
..... 刘晓晶 匡 波 陈炳胜 都立国 (95)
- 066079 2-T 型微通道气泡发生器可视化实验研究.....
..... 程 林 栾 涛 王立秋 张玉相(102)
- 066085 甲醇、水和柴油乳化液雾化锥角的定量分析
..... 吴东垠 盛宏至 张宏策 魏小林 杜 青 黄叶舟(107)
- 066089 超音速蒸汽浸没射流凝结汽羽形状的实验研究
..... 曹 岩 邵树峰 严俊杰 胡党辉(113)

066090	循环系统中闪蒸换热特性的实验研究	李鲁宁 胡中华 严俊杰 刘继平(118)
066116	微重力池沸腾现象中的气泡脱落直径	刘 刚 赵建福 万士昕 闫 娜(124)
066117	微细通道气液两相泡状流实验研究	赵建福 李国强 常士楠(130)
066118	窄缝内气液两相临界流实验研究	赵建福 张征明 张忠海(135)
066124	低压闪蒸液滴形态变化的研究	刘伟民 毕勤成 刘 璐(141)
066125	低压闪蒸液滴温度变化的研究	刘伟民 毕勤成 刘 璐 杨 冬(149)
066128	竖直上升管中截面含气率的实验研究	范广铭 阎昌琪 曹夏昕 孙立成(156)
066131	热振动对两相流层对流不稳定性的影响	周建英 王 安 刘秋生(162)
066138	平板混和层流动的可视化实验研究	郭富德 陈 斌 王智伟 郭烈锦 张西民(169)
066158	水平微细通道内气-液两相流突缩局部阻力特性	李 卓 俞 坚 马重芳(175)
066161	复杂结构微流体芯片中的瞬态流型研究	张 伟 徐进良(181)
066164	水平微肋管内基于气液环状流流型的沸腾传热理论模型	王跃社 白博峰 Hiroshi HONDA(193)

二. 气固两相流与燃烧及其污染控制

066001	两相湍射流喷口附近湍流度影响因素研究	燕小芬 王希麟(200)
066002	不同材料颗粒对湍射流场调制规律的研究	燕小芬 王希麟(205)
066004	颗粒对小突片喷口湍射流调制规律的研究	燕小芬 王希麟(211)
066006	气液固外循环流化床压力波动的实验研究	张少峰 王 琦 刘 燕 高川博(218)
066011	温度场内可吸入颗粒物运动特性的实验研究	杨瑞昌 周 涛 赵 磊 刘若雷(226)
066015	循环流化床中气固两相流对喷氨脱硝效率的影响	侯祥松 王玉召 张 海 岳光溪(231)
066019	颗粒粒径和气载比对湍射流调制规律研究	燕小芬 王希麟(239)
066020	高钙煤的成灰特性研究	秦 珂 惠世恩 周屈兰 徐通模 赵 科(247)
066025	颗粒分布不均匀性对颗粒碰撞率的影响	赵海亮 由长福 祁海鹰 徐旭常(253)
066026	自由下落微粒流中气固两相流的数值模拟	李小剑 刘泽勤 陆佩强(260)

066031	双喷嘴矩形导流管喷动床流动性能研究	王淑华 王 经 张少峰 张 华(268)
066040	磁流化床中气固两相流场的数值模拟	王迎慧 归柯庭 施明恒(275)
066044	湍动流化床内气固两相流动特性的数值模拟	沈志恒 李 巍 何玉荣 陆慧林(283)
066045	提升管内纳米颗粒流化特性的研究	郑建祥 沈志恒 金记英 陆慧林(290)
066046	喷动床内 Geldart-D 类颗粒流动特性的研究	孙巧群 刘文铁 曾令艳 陆慧林(297)
066047	TiO ₂ /H ₂ O 纳米流体管内流动和对流换热行为的数值模拟研究	何玉荣 赵云华 刘亚宁 陆慧林 丁玉龙(307)
066048	颗粒旋转对鼓泡流化床内气体颗粒两相流动特性影响的研究	赵云华 孙巧群 刘文铁 何玉荣 陆慧林(315)
066049	颗粒进入颗粒聚团过程中流动特性的研究	尹丽洁 赵云华 何玉荣 刘文铁 陆慧林(322)
066053	700MW 锅炉改烧混煤 NO _x 生成的模拟	吴阿峰 李明伟 谭灿荣(328)
066054	700MW 锅炉内两相流动和混煤燃烧数值模拟	谭灿荣 张新铭 吴阿峰(333)
066055	微粒撞击高参数汽轮机调节级喷嘴壁面特性研究	王顺森 刘观伟 毛靖儒 丰镇平(338)
066069	风沙流中沙粒速度的 PDPA 实验研究	亢力强 郭烈锦 顾正萌(345)
066070	高温高速条件下汽轮机叶片材料抗固粒冲蚀磨损能力的研究	刘观伟 王顺森 毛靖儒 丰镇平(352)
066073	沉浸管流化床内气固两相流动数值模拟	李 云 顾兆林 王梓入(358)
066084	颗粒对各向同性湍流中温度场的影响	贺 铸 柳朝晖 刘亚明 王子国 郑楚光(368)
066095	石灰石溶解特性的实验研究及数学模拟	孙 博 周屈兰 惠世恩 徐通模(373)
066097	圆管突扩气固两相湍流变动的实验研究	李 飞 祁海鹰 由长福(380)
066099	磁流化床强化烟气脱硫反应机理研究	张 琦 归柯庭(388)
066100	粉煤加压密相输送特性试验研究	梁 财 赵长遂 陈晓平 蒲文灏 鹿 鹏 范春雷(394)
066104	圆管内超细颗粒凝并的模拟	黎春梅, 柳朝晖, 郑楚光(400)
066109	循环流化床不同密相区形状对固态医疗垃圾颗粒运动特性的影响	冉景煜 张 力 辛明道(406)
066110	燃烧室内燃油空气混合定量比较分析	余 皎 赵昌普 苏万华(413)
066111	PLIF 在柴油喷雾混合过程研究中的应用	余 皎 赵昌普 苏万华(423)

066121	气流床煤气化炉内熔渣沿壁面流动数值模拟	刘 升 郝英立 许忠林	(428)
066126	燃煤飞灰孔隙结构对汞吸附的影响	江贻满 杨祥花 杨立国 段钰锋	(437)
066127	高浓度水煤浆的流变特性和滑移修正	王秋粉 陈良勇 任 远 段钰锋	(446)
066133	旋转气固两相流动与分离数值模拟	唐 强 张 力	(454)
066139	直方槽道中二次流对颗粒运输的影响	邹罗明 郭印诚	(461)
066140	下行槽道气粒两相流中颗粒速度的 PIV 测量	吴 昊 郭印诚	(468)
066143	气固两相圆湍射流颗粒对气相湍流调制规律的数值模拟	容 易 张会强 王希麟	(473)
066144	气固两相圆湍射流颗粒对气相湍流调制的机理分析	容 易 张会强 王希麟	(479)
066145	自由剪切流动中颗粒扩散的自相似特性	罗 坤 樊建人 岑可法	(485)

三. 多相流数理模型和数值方法

066028	简单剪切流条件下液滴破碎和碰撞模拟	陈 硕 尚 智 王 丹 赵 钧 范西俊	(493)
066037	基于 VOF 方法的带相变的自由界面的计算	袁明豪 杨燕华 李天舒 胡志华	(501)
066042	多重 Monte Carlo 算法描述三维空间的颗粒凝并过程	赵海波 郑楚光	(509)
066050	湍动雾化射流液雾粒径分布的数值模拟	钱丽娟 熊红兵 林建忠	(515)
066083	气液两相双流体模型的修正与鼓泡床反应器 CFD 模拟	顾兆林 阮耕茂 李 云 王梓入	(525)
066094	颗粒系统数量平衡方程的直接矩积分求解	苏军伟 顾兆林 李 云	(537)
066096	细颗粒间相互作用力的研究	赵海亮 由长福 祁海鹰 徐旭常	(547)
066105	均匀各向同性湍流中气粒两相流湍流变动附加项的模型与模拟	何森棋 柳朝晖 林 钊	(556)
066137	蒸汽热采稠油数值模拟的自适应网格 (AMR) 法	王晓宏	(564)
066147	修正内嵌边界法对颗粒运动的直接模拟	王则力 罗 坤 樊建人	(574)
066149	均匀湍流内湍流-布朗颗粒碰撞的直接数值模拟研究	甘 莉 柳朝晖 李瑞霞 郑楚光	(581)
066154	细颗粒在气管-二叉管内运动的人涡模拟	林 江 胡桂林 樊建人	(586)
066156	细长颗粒流化特性的数值模拟	徐大勇 耿 凡 袁竹林 王宏生 李 斌	(591)

Aspects of Research and Development in PIV for Multiphase Flows

Fujio YAMAMOTO
University of Fukui, Japan

Abstract Many types of algorithms for PIV and PTV have been developed in the last two decades from simple cross correlation method to binary image cross correlation method, Delaunay tessellation method, velocity gradient tensor method, and recursive cross correlation method. In parallel, useful post-processing schemes for PIV/PTV such as ellipsoidal equation method and inverse analysis method were proposed so that detailed flow structure could be evaluated. Recently some new PIV-CFD hybrid systems have been proposed. This paper concerns with such a history of the research and future possibility for further advance in the PIV/PTV which are applied to multiphase flow measurement.

Keywords: Flow visualization, PIV, PTV, PIV-CFD hybrid system, Multiphase flow

A Novel Meshfree Method for Multiphase Flow in Reactive Porous Media

Hui Zhang

Department of Mechanical Engineering
State University of New York at Stony Brook
Stony Brook, NY 11794

Multiphase, multicomponent flow in reactive porous media has many applications such as powder synthesis, air filter, solid fuel combustion, and composited material production. The volume or mass averaged models are traditionally used to simulate the fluid flow and heat transfer in porous media, whereas analytical formulation for permeability is usually used by assuming a porous medium is constructed by orderly uniform sized spherical particles. Existing numerical models are incapable of describing multiphase multicomponent flow in reactive porous media. An advanced process model will be developed in this proposal consisting of (i) a system level model and (ii) a pore level model. The system level model will be developed based on porous media concept to study transient heat and mass transport for the sublimation growth at the macroscopic level. The pore level model will be simulated to particle reaction occurred at the particle surface. The pore-level model will only be applied to a small region and interface evolutions of particles will be dynamically tracked. Since the existing grid generation technology is incapable of dynamically tracking the movements of complex interfaces during powder sublimation, an advanced numerical scheme based on smoothed particle hydrodynamics (SPH) meshfree method will be developed. In the SPH method, the continuum medium is represented by a discrete set of particles each with a given mass and velocity and the macroscopic field equations are represented by particle dynamics. Simulation results at the pore level will provide the permeability and effective properties required for the system level modeling, while the system level simulation will provide local conditions for the pore level modeling. Through iteration between two level models, a quantitative understanding of multiphase multicomponent flow in reactive porous media can be achieved. The integrated process model will be applied to various materials processing including sublimation crystal growth, methane hydrate recovery, and composited material production. It is demonstrated that the new model is capable of predicting multiphase flow in porous media and calculating porous media reaction due to particle decomposition.

脉动热管可视化流型分析与换热研究

刘石, 李惊涛, 陈焕倬, 董向元

中国科学院工程热物理研究所, 北京 2706 信箱, 北京 100080

联系电话: 01082871891, email: s.liu@mail.etp.ac.cn

摘要: 本文利用电容层析成像方法, 从流型和流向两个方面, 对脉动热管进行了可视化测量研究。同时, 结合流型进行了换热特性分析。对不同流型的影响因素、运行与传热特性进行了探讨。在较宽的充液率和热负荷变化范围内研究多种流型的形成和变化, 观察并分析塞状流、环状流以及两者共存的混合流; 并且根据受力分析, 对脉动热管的结构进行了改进, 以促进管内工质的稳定单向循环流动, 改善由蒸发段到冷凝段的工质输送, 强化热量传递, 提高脉动热管的传热性能。

关键词: 脉动热管, 电容层析成像, 可视化, 传热

1 引言

脉动热管 (Pulsating or Oscillating Heat Pipe, PHP) 是解决微小空间高热流密度的散热方案中一种很有前途的传热元件, 得到了科学界和工程界的高度关注^[1]。虽然脉动热管的结构比普通热管简单, 但其内部工质的运动和传热机理非常复杂, 是涉及多学科、多参数的汽液两相流系统, 其理论和实验研究还处于初级阶段。至今各国学者对脉动热管的研究以实验为主, 主要是观察其运行的过程和现象, 研究几何参数、运行参数和物理参数对脉动热管运行和传热的影响, 认识其运行特性和传热机理。流型方面, 在可视化实验中分别观测到塞状流、溪流、环状流等不同的流型^[2-3]; 从流向上则观测到局部振荡、整体单向流等不同流动状况^[4-5]。然而, 对脉动热管内部工质的流动和传热特性, 目前还没有一个清晰、统一的认识。

由于脉动热管内部工质运行通道较小, 因此在测量方法上受到很多限制, 一些较为成熟的方法 (如热电偶测温法、红外成像法) 通过测量脉动热管的通道外表面温度来研究脉动热管的传热特性, 难以直接掌握管内流型、液膜厚度等重要参数。而现有的可视化测量往往局限在玻璃管热管上进行。因为玻璃管热管与真实的金属热管的热阻和表面状况差别较大, 测量的结果不能很好地代表真实热管中的实际情况。另外, 由于玻璃管壁的曲率作用, 即使采用摄像技术, 也不易测量液膜的厚度。

电容层析成像 (Electrical Capacitance Tomography, ECT) 是一种新型的两相流过程层析成像技术。自上个世纪 90 年代以来, 受到了国际研究领域的关注。ECT 类似医学 CT, 以非干扰断面扫描的方法测量物质的分布, 然而却能够以比医学 CT 高的多的速度

(每秒数百幅图像)进行实时测量,并具备同时呈现微尺度和宏观尺度下两相流中各相分布结构的能力,是在线流型识别、浓度测量、流量测量的有力工具。

本文就脉动热管的可视化测量和换热特性进行研究,结合摄像和 ECT 测量技术,实现真实条件下脉动热管内工质流动状况的可视化流型识别,并对液膜厚度进行测量。在此基础上,深入研究脉动热管的换热特性及其与流型的关系;并根据模型分析,提出了增进脉动热管流动和传热性能的改进结构。通过试验,验证了新型脉动热管的优点。

2 ECT方法简介

如图 1 所示,ECT 测量系统包括三部分:电容传感器、信号采集系统和计算机。其中传感器通常包含测量电极和屏蔽层,环绕在流动通道外部,以非侵入的方式进行测量。由于两相流体中各相具有不同的介电常数,当各相组分分布或浓度(含率)发生变化时,将使测量电极间的电容值发生变化。信号采集系统测量电容,并进行滤波、放大等处理。其后信号输送到计算机,通过图像重建算法,重建出测量区域的物质分布的图像。

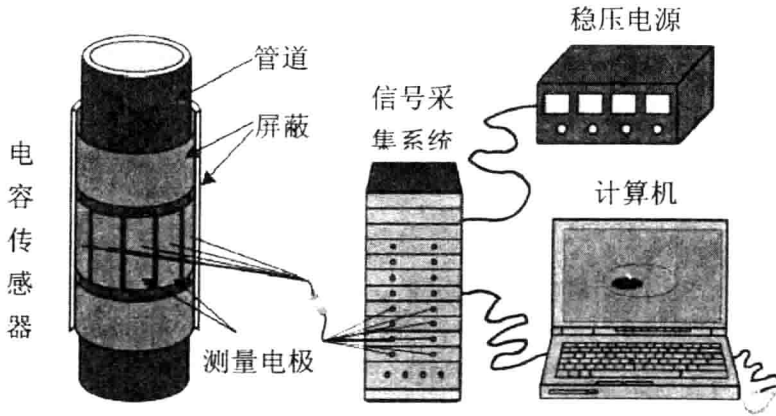


图 1. ECT 成像系统

对于 L 个电极的传感器,数据采集的方式是:当第 i 个电极激励时,第 $i+1$ 到第 n 个电极检测。当 i 由 1 顺序增至 $n-1$ 便完成一个测量周期,获得一幅截面图像的数据。如此循环,周而复始获得截面图像数据。设每测量周期采集的电容值的数量为 m , 则 $m = C_L^2 = L(L-1)/2$ 。这 m 个电容值在成像过程中常以向量 $\mathbf{C}=(C_1, C_2, C_3, \dots, C_m)^T$ 表示。而对于被测区域,常将其剖分为许多个(如 n 个)像素。各个像素上的灰度值代表该像素上的物质浓度值。 n 个像素的灰度值形成一个图像向量 $\mathbf{G}=(G_1, G_2, G_3, \dots, G_n)^T$ 。具有灰度值的各个像素的集合组成一个完整的物质分布图像。通常,如果 $\mathbf{G}$ 为已知,即物质分布已知,则 $\mathbf{C}$ 可以通过适当算法(如电磁场的有限元求解)加以确定。一个简化的方法利用线性函数联系 $\mathbf{C}$ 与 $\mathbf{G}$, 即:

$$\mathbf{C}=\mathbf{S}\mathbf{G} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 为一个常数矩阵。 $\mathbf{S}$ 反映电容 $\mathbf{C}$ 受物质分布 $\mathbf{G}$ 变化的影响,被称为敏感场(Sensitivity Map)。敏感场的计算方法的文献很多,例如[6]。

ECT 图像重建是一个逆问题求解问题，即依据观测数据和模型反演确定被研究对象的模型参数。常见的方法主要有线性反投影，正则法和迭代法等，下面依次予以介绍。

a. 线性反投影法

ECT 的发展历史中，最早也是最常用使用的成像方法是线性反投影（Linear Back Projection, LBP），为速度最快的一种成像算法。LBP 假设灵敏度分布和介质分布无关，认为各像素灰度和各测量投影为线性关系，即对电容测量值采用灵敏度加权后反投影回整个管道截面来得到介电分布，如下式所示：

$$\mathbf{G} = \mathbf{S}^T \mathbf{C} \quad (2)$$

由于传感器电极个数有限，所获的电容数据较少，而像素的个数则可能大大超过电容的数据量。既公式 1 的逆过程求解是一个不适定性逆问题求解过程。由此，LBP 仅适用于简单分布的成像。对于复杂的分布，其成像质量较差。

b. Tikhonov 正则法

Tikhonov 正则化方法是解决病态逆问题的一种有效方法^[7]，通过对解施加限制条件，将不适定性问题化为有条件适定问题，恢复解估计对测量数据的连续依赖性，使解稳定。基本原理可通过如下公式揭示：

$$\min \left(\|\mathbf{S}\mathbf{G} - \mathbf{C}\|^2 + \mu \|\mathbf{L}\mathbf{G}\|^2 \right) \quad (3)$$

对于给定的正则化算子 $\mathbf{L}$ ，适当地选取正则化参数 μ ，可求得正则化解 $\mathbf{G}$ ：

$$\mathbf{G} = \left(\mathbf{S}^T \mathbf{S} + \mu \mathbf{L}^T \mathbf{L} \right)^{-1} \mathbf{S}^T \mathbf{C} \quad (4)$$

其中 $\mathbf{L}$ 是根据需要确定的线性算子，若取单位矩阵，则称标准 Tikhonov 正则化，即：

$$\mathbf{G} = \left(\mathbf{S}^T \mathbf{S} + \mu \mathbf{I}_n \right)^{-1} \mathbf{S}^T \mathbf{C} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{I}_n$ 为 n 阶单位矩阵。正则化参数 μ 对图像重建重要影响。 μ 越大，正则化程度越高，重建结果受噪声的影响越小，但模糊现象也越严重；反之， μ 越小，模糊作用越弱，但受噪声干扰越严重。

c. 迭代法

迭代图像重建算法通过迭代过程，不断减小成像过程中的误差，因此往往具有较好的成像质量。这类迭代法主要包括 Landweber 迭代法、正则迭代法、同步迭代法等。其中 Landweber 法应用较为普遍^[8, 9]。它是以最小二乘准则为优化的主要依据，在数据残差的负梯度方向上对解进行修正，数据残差的梯度表示如下：

$$\nabla \frac{1}{2} \|\mathbf{S}\mathbf{G} - \mathbf{C}\|^2 = \mathbf{S}^T (\mathbf{S}\mathbf{G} - \mathbf{C}) \quad (6)$$

相应的成像迭代公式为：

$$\mathbf{G}^{(k+1)} = \mathbf{G}^{(k)} + \alpha \mathbf{S}^T (\mathbf{C} - \mathbf{S}\mathbf{G}^{(k)}) \quad (7)$$

其中 k 是迭代的步数， α 是迭代步长，常取 2 以内的常数，或以动态方式优化选取^[9]。

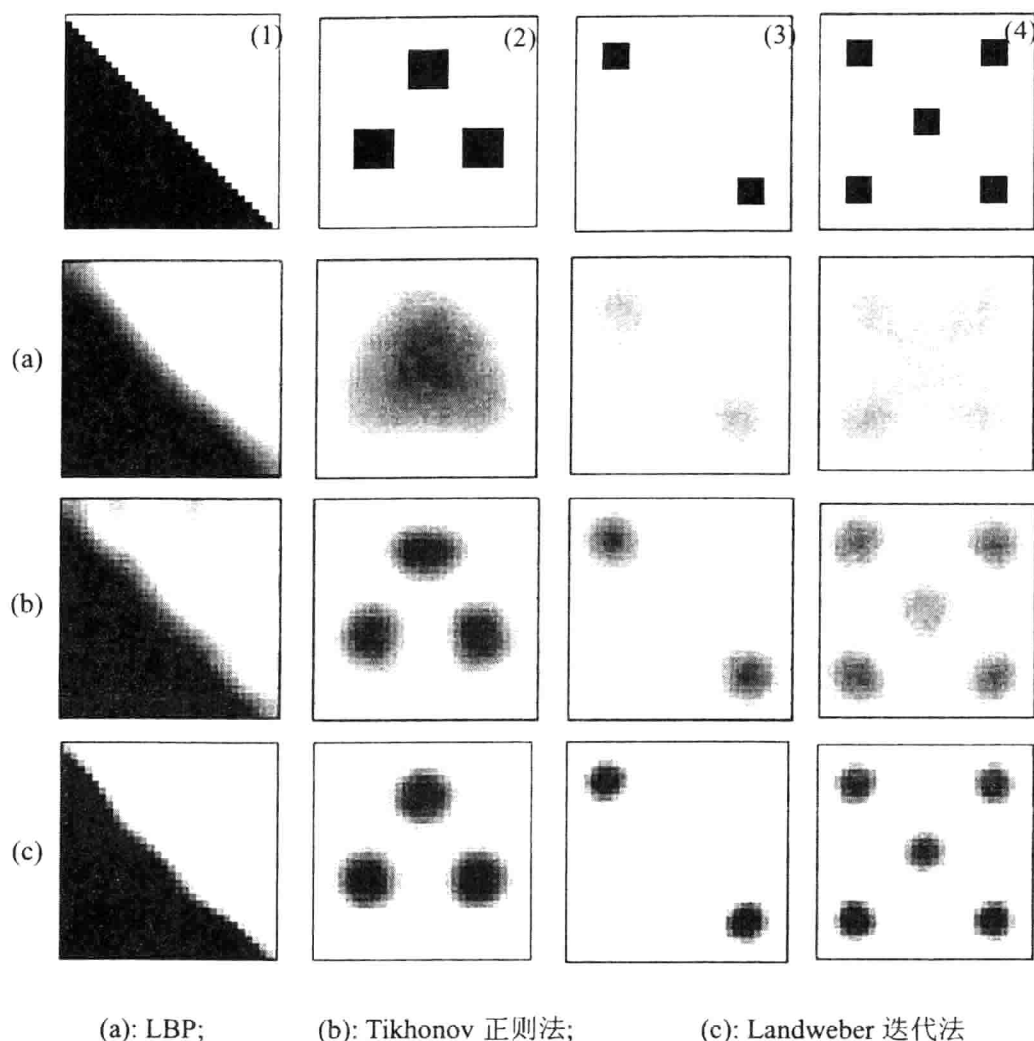


图2 方形传感器内不同算法重建结果比较

图2是上述三种成像法的比较。其中第一行给出(1)、(2)、(3)、(4)四种真实分布；(a)、(b)、(c)三行分别显示了LBP、Tikhonov正则法和Landweber迭代法的图像。可见，LBP对于简单的分布（即(1)号分布）具有较好的成像效果；而对较为复杂的分布（即(2)、(4)号分布），则具有较低的空间分辨率。Landweber法效果最好。但迭代法会消耗较多的时间。Tikhonov法的结果介于二者之间，但其为一步成像算法，速度与LBP相当。

3 脉动热管内液塞运动分析及结构优化

本研究中所采用的脉动热管系统如图3所示，由玻璃或紫铜脉动热管、抽气充液装置、框架、底部的电加热系统、顶部的冷却水箱、温度点1-8和采集系统，以及摄像机（未标出）组成。其中热管的顶部管段置于一个流通冷却水的冷却水箱作为冷凝段，而底部的蒸发段则置于一个温控加热油箱中。

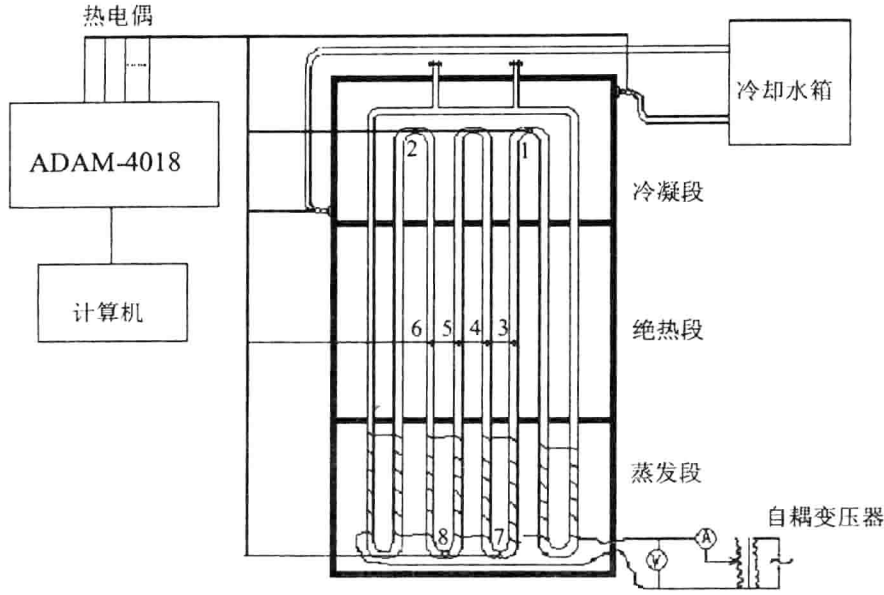


图3 可视化脉动热管实验台

现在考虑竖直管道内的一段液塞，对其受力的分析，可得如下公式：

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\rho g - \frac{dP}{dz} - \frac{4\tau}{d} \quad (8)$$

式中 ρ 是液体密度， u 为液塞速度， g 为重力加速度， P 为压力， τ 为壁面和局部阻力， d 为管径。对于一段液塞，假定其运动时相当的流量为 $\dot{m}$ ，则上式可化为：

$$\frac{d\dot{m}}{dt} \int_b^f \frac{1}{A} dz + \frac{\dot{m}^2}{2} \left[\frac{1}{(\rho A^2)_f} - \frac{1}{(\rho A^2)_b} \right] = -\rho gh - (P_f - P_b) - 4 \int_b^f \frac{\tau}{d} dz \quad (9)$$

式中 h 为液塞高度， A 为面积，下标 b 为尾部， f 为前部。式中左端第二项反映了流道面积变化的作用。右端第一项为重力作用，第二项为压差所产生的对液塞的推动力。

对于图3所示的脉动热管系统，其加热段为热管的下部。理想情况下，每个U段上的电热丝发热功率相同，此时每个竖直段所受的向上的推动力，即 $P_b - P_f$ ，相当，造成各个管道间受力的对称（相似）性。这种对称性使得热管内的流体难以有一个单一的流向。这是常规脉动热管启动困难，常见液面上下振动，却难以形成单一流向的原因之一。

基于上述分析，我们提出一种改进脉动热管内流体流动的思路，即破坏上述的对称条件，使脉动热管各管间形成不对称的受力条件，从而促成液体在管内的单向循环流动。对此拟定两个方案：

（1）某管道中增加一段粗管：首先，如图4所示，假定左—右两个管道内液体体积相同，则一定体积的液塞，在细管中将形成更高的液柱，即 $h_1 > h_2$ 。对应公式9，则有 $\rho g h_1 > \rho g h_2$ 。其次，由于 P_b 和 P_f 分别为加热段和冷凝段的饱和蒸汽压力，这里可以认为 $P_b - P_f$ 基本不变，最后，当液塞由下方的细段向上流入粗段，阻力 τ 中由于管道扩张会增加一定的局部阻力，

但在循环流建立以前，流体的流速很低，这个局部阻力可以认为能够忽略。

上述三个作用的主导结果（即公式9中右端得三个作用力的综合）是由于液塞变短导致的重力作用的降低。这样，液塞在具有粗管的脉动热管部分将比只有细管的部分有更加有利的上升条件。这样的脉动热管比常规的热管具有更强的单向循环流动的能力。

（2）交替的粗一细管布置：从上面的分析可知，粗管道内的液塞有更强的上升流动的趋势。同样道理，细管则更有利于液塞的下降流动。因此，将脉动热管竖直段布置成粗一细一粗一细...的交替组合，则有利于所有粗管的液塞上升，然后在上部的U段冷凝并流动到相邻的细管而下降的底部的加热段；如此促使整体循环流的产生和维持。

本实验中，我们对常规脉动热管作了两种特殊的结构改进，一种是相邻管道内径粗细交错变化，另一种是安装一段粗管，目的都在于减少脉动热管流道的对称性和均衡性，使某一方向的流动占优。期望通过实验研究，探索改进型脉动热管的流体流动和传热的特性。

4 实验装置及过程

4.1 脉动热管试验系统

三种脉动热管的结构如图 5 所示，分别采用耐热玻璃管和紫铜管制成，弯数均为 8，高 250mm，管道外径均为 8mm，总宽 200mm。三种脉动热管的不同之处在于内径的变化。热管 A 内径为 1.6mm；热管 B 的相邻管道内径交替变化，分别为 1.6mm 和 2.0mm；热管 C 在最右端管道安装了一段长 100mm，内径 2mm 的粗管，其余均为 1.6mm 细管。热管顶部水平管上留有抽气/充液端口和真空计端口。热管充液时的真空度为 5kPa（绝对压力）。

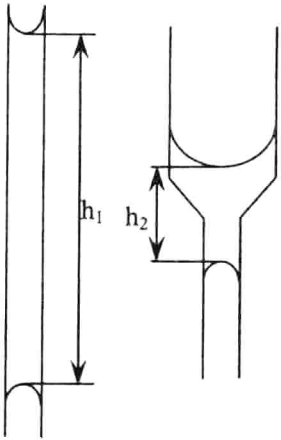


图 4 液塞长度变化示意

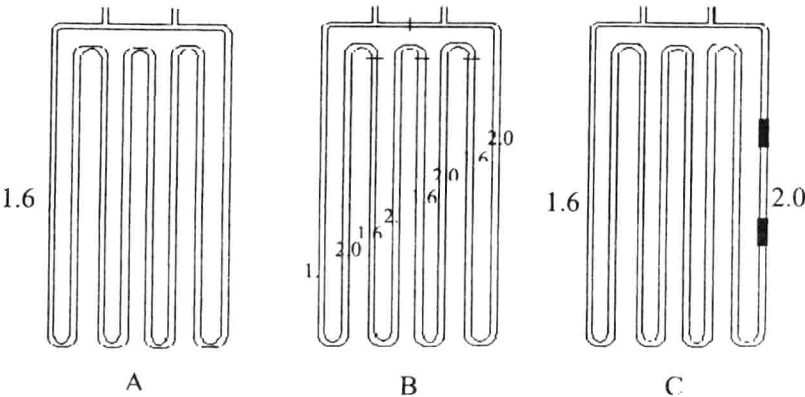


图 5 三种脉动热管结构示意图

脉动热管的每个竖直段分为蒸发段、绝热段和冷凝段三部分，长度分别是 60、110、80 mm。蒸发段以电阻丝加热，以隔热材料密封。冷凝段采用循环水冷却。ECT 传感器可根据需要布置在任意部位；摄像仪对准绝热段中部。从蒸发段到和冷凝段共装有 8 个 K 型（镍铬—镍硅）热电偶，安装位置如图 3 所示。采集信号通过 8 路热电偶输入模块 ADAM-4018（精度 $\pm 0.1\%$ ）输入主机处理。抽气充液装置包括真空泵、真空阀、真空计、充液装置等。

实验中采用无水乙醇、蒸馏水两种工质。在不同充液率下，改变加热功率，对管内流动现象及换热特性进行测量研究。脉动热管先抽真空，充装一定量工质。试验中调节加热电压改变蒸发段的输入热量，从 10W 开始，一直到 125W。同时，调节冷却水流量，维持冷却水箱温度不变。每次调节电压和流量后，等脉动热管达到新的热平衡，保持十分钟，准备下步测试。改变充液率（10%—100%），重复上述过程。整个实验过程中，温度采集系统和 ECT 持续采集数据，摄像仪拍摄管内工质流动状况。

4.2 ECT 传感器

在玻璃热管和铜质热管上均安装了 ECT 传感器测量管内的液膜形状。玻璃热管上的传感器的结构与图 1 中的电容传感器相同：其电极以 0.2mm 铜箔粘贴于玻璃管外壁形成测量电极管道上的屏蔽电极。而外部的屏蔽电极由大孔径稀疏铜网制成，籍以减少对外部绕流流体的影响。

而对于铜管热管，微型 ECT 传感器的关键问题是在进行测量的同时，还应允许通过管壁的传热继续进行。为此设计了特殊的传感器，如图 6 所示。该传感器采用与脉动热管相同的铜管制成；内、外径均与脉动热管一致。传感器与前后的脉动热管间衬一层极薄的绝缘薄层。8 个铜制电极间隔以极薄的绝缘层。因为绝缘层极薄，传感器的导热系数与铜管脉动热管基本一致，使得在测量的同时，对热管的传热特性的影响将至最小。

因为脉动热管的直径仅为 1.6-2mm，沿仅仅数毫米的周长要布置 8 个电极，每个电极之间还有非常细微的隔离层，传感器十分精密和复杂，其电极由激光切割方法加工制成。外部的屏蔽属可选，材料和形状与上述玻璃管的 ECT 传感器相同，以减少对传热的影响。当外部干扰较小时也可省略，排除对热管换热的影响。



图 6. 铜管脉动热管 ECT 传感器

ECT 的采集速度可调。本试验中，为兼顾时间分辨率的需要和避免过大量的数据，选取的采集方式为每次连续采集数据 4000 组，采样时间为 200 秒，每秒采集 20 组数据。

5 实验结果及分析

5.1 摄像仪流型观察与分析

图 7 是用摄像仪对脉动热管 A 实拍的不同流型的图片。其中 S 代表塞状流，管内工质以液柱—汽塞串的形式存在，汽塞的存在形态有离散汽泡 (1)、小气泡 (2)、汽塞 (3)、长汽塞 (4)；离散汽泡和小气泡由蒸发段的核态沸腾所产生，或因汽塞冷凝变短或汽塞分裂。离散汽泡直径远小于脉动热管内径，小气泡直径则接近热管内径。汽塞的直径接近于管道内径，但其长度大于管道内径。长汽塞的长度可以和脉动热管高度相比，难以稳定存在，因为壁面液流易失稳生成液桥，将长汽塞分裂成尺寸较小的短汽塞。

SA 代表混合流，管内塞状流 (5) 和环状流 (6) 共存，并相互影响，相互转化。A 代表环状流 (7、8)，管道中芯蒸汽流动，凝结液顺管壁流动，流型类似于重力热管

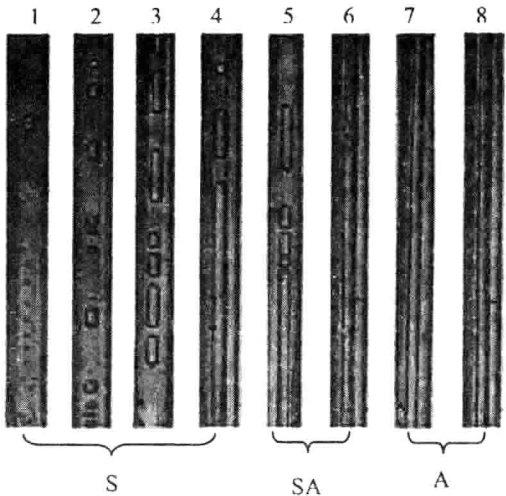


图 7 三种流型的对比图片

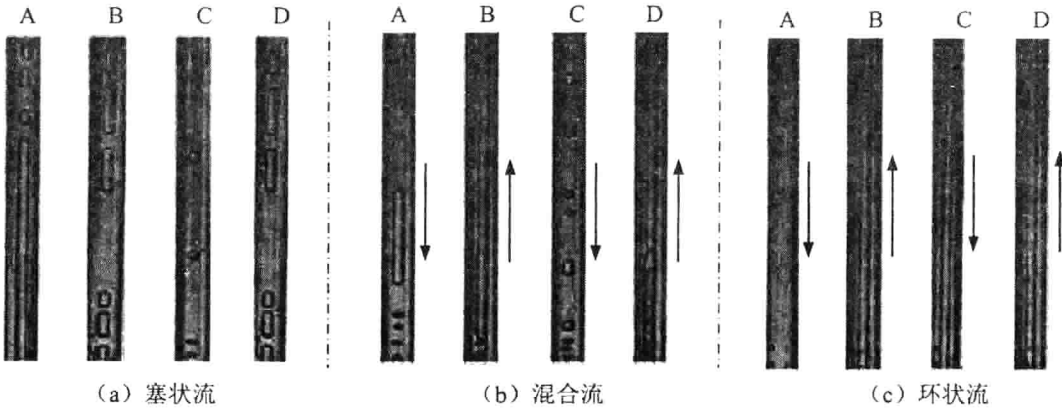


图 8 三种流型的实拍图片

在正常运行时的环状流。

塞状流

图 8(a)是流型为塞状流时，四根相邻管道绝热段的实拍图片。此时充液率为 50%，加热功率为 20W。

塞状流一般发生在传热功率较小和充液率较大的区域。在这种流型下，工质较多呈现往复振荡，并会周期性的停滞。停滞期间，液柱—汽塞串在停滞位置附件高频率小幅度的振荡。能量累积到一定程度后，突然爆发，驱动管内工质朝某一方剧烈运动。传热量较小时，工质振荡频率及振幅小，停滞时间长，各管间振幅与频率不一致。随传热量的增大，振荡频率及振幅加大，停滞时间缩短。

流型为塞状流时,热量的传递主要依赖于液柱—汽塞在蒸发段和冷凝端之间的脉动流动,显热传递居主导成分,蒸发和冷凝产生的压力波动提供驱动工质脉动的动力。

塞状流中,离散汽泡、汽塞和长汽塞共同存在,沸腾、蒸发、冷凝、汇合和分裂的作用复杂。离散汽泡尺寸小,易冷凝消失,也可能汇合变大;长汽塞不稳定,易分裂,在塞状流中,汽塞是工质汽相的主要存在形态。

混合流

适当的充液率和传热量下,部分管道内流型会转为环状流,与其它管道内的塞状流共存,形成混合流。混合流中环状流成分增加,使工质流动阻力减小,整体单向流动趋势增强。相比纯粹的塞状流,潜热传递(相变传热)份额增加,传热性能得以提升。

图 8(b)是流型为混合流时,四根相邻管道的实拍图片。此时充液率为 50%,加热功率为 60W。A 管内,塞状流往下运动进入蒸发段,通过 U 型管后,液柱蒸发。蒸汽在 B 管内向上运动进入 U 型冷凝段冷凝。其后一部分冷凝液沿 B 管壁面回流,但这部分冷凝量小,液膜很薄,不会出现液桥形成液柱,冷凝液流型呈条索流或环状流;更大部分冷凝液在压差的驱动下进入 C 管。因流量较大,液膜较厚,加上弯管对流动的干扰,液膜易失稳形成液桥,在冷凝段或绝热段发展成液柱,形成塞状流。同样, C 管中的塞状流进入 U 型蒸发段,变为蒸汽流经 D 管到达冷凝段,部分冷凝液回流形成环状流。

需要说明的是,单向流动虽然出现,但尚不易稳定维持,会周期性地与随机振荡、停滞、反向倒流等流态交错出现。流型为混合流时,管内流动情况非常复杂,塞状流和环状流会相互作用、相互转化,同一管道内的流型也会随机发生变化。

环状流

随着传热量的继续增加,混合流中环状流的成分越来越多,单向循环速度越来越快,停滞时间越来越短,形成稳定的单向循环流,传热性能显著提升。

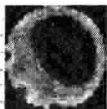
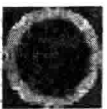
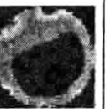
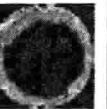
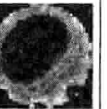
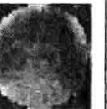
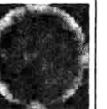
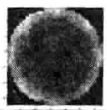
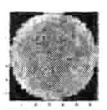
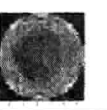
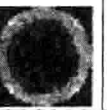
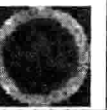
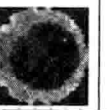
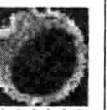
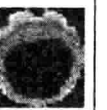
图 8(c)是流型为混合流时, A、B、C、D 四个相邻绝热段的实拍图片。充液率 50%,加热功率 125W。此时环状流为主导。只有在冷凝段顶部的水平管,由于蒸汽的充分冷凝,才能形成液柱。液柱随即被汽流冲到与水平冷凝管相接的 A 管的绝热段和蒸发段,蒸发成蒸汽,继而在管道 B、C、D 内高速流动,同时在各段的冷凝段冷凝形成环状液膜回流。高速蒸汽经过八根直管后,又回到顶部水平管冷凝成液柱,如此循环,其运行特性类似于一根微型热虹吸管,由于蒸发段和冷凝段是连通的,可以保证蒸发段的回液。这种运行方式下,热量传递中显热所占比例很小,传热量已逼近传热极限,如果继续增加传热量,容易发生烧干现象。

5.2 ECT 流型观察与分析

ECT 获取大量的图像,揭示了各个流态下热管内流体的各种流动特征。作为一个典型案例,针对最复杂的混合流,表 1 ECT 的在线成像结果。为最快的速度,采用了 LBP 算法,像素分辨率为 32×32 。图中,蓝色对应低介电常数(蒸汽),红色对应高介电常数(液体)。脉动热管在运行中,液柱—汽泡流、环状流两种流型经常会同时或交替出现,且相互作用。表中的图像,显示了测量区域内环状流被液柱—汽泡流打断,随即恢复的情况。

前 6 幅是环状流，维持时间较长，每隔 20 帧取一幅图像；中间 6 幅是液柱—汽泡流，液柱快速通过测量区域，每隔 2 帧取一幅图像；后 4 幅表示液柱通过后，环状流恢复，每隔 20 帧取一幅图像。

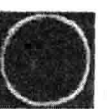
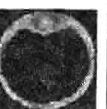
表 1 混合流

帧	1670	1690	1710	1730	1750	1770	1790	1792
图 像								
帧	1794	1796	1798	1800	1820	1840	1860	1880
图 像								

实验结果说明：微型传感器可以满足 ECT 系统在微尺度下两相流参数测量的要求，实现脉动热管流型的可视化监测和在线识别。

前面为了最快成像速度采用了 LBP 成像算法和较少的像素。为了更细致分析，在此，进一步采用优化步长的 Landweber 迭代算法^[9]和定义更密集的像素（61×61），以实现高精度的液膜成像。表 2 显示三组环状流的液膜。第一组是均匀的膜状流，从 1 到 8，液膜厚度逐渐增加；第二、三组表示液膜厚度不均，出现波动，其中，第三组比第二组波动更强烈。从 1 到 8，平均液膜厚度逐渐增加。

表 2 采用迭代法的环状流测量图像

	1	2	3	4	5	6	7	8
第 一 组								
第 二 组								
第 三 组								

以 ECT 重建图像表征汽液两相介质在截面上的分布情况，具有如下优点：
(a) 非侵入测量，不影响管内的流动；