

中国工程热物理学会

2002 多相流学术会议

中国计量测试学会

第七届多相流测试技术会议

论文集

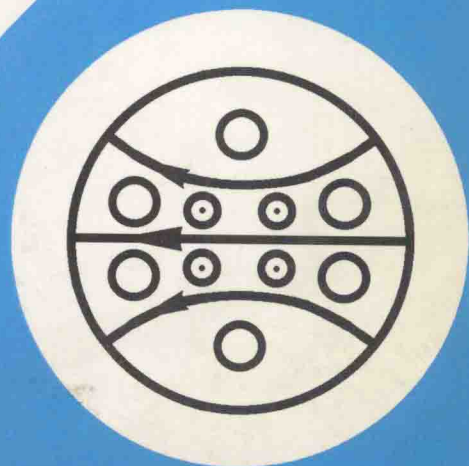
二〇〇二

大连

中国工程热物理学会

中国计量测试学会

联合主办



多相流学术会议论文目录

大会主旨报告

- 沸腾传热与一些蒸发操作的问题.....沈自求(1)
- 多相湍流模型的研究进展和前景.....周力行(11)
- 气液两相流压力波动过程及其工程应用.....白博峰 郭烈锦(23)
- 石油工业多相混输技术的进展.....宋承毅(24)

一. 气液两相流

- 026004 两相流气相湍流双时间尺度耗散模型.....于 勇 周力行(25)
- 026005 汽轮机湿蒸汽流动快速准确数值模拟方法.....张冬阳 刘建军 蒋洪德(32)
- 026006 部分重力条件下气液两相流型研究.....
.....赵建福 解京昌 林 海 胡文瑞 A.V.Ivanov A.Yu.Belyaev(40)
- 026010 翻越点后管内两相流动的数值模拟刘 刚 蒲家宁(45)
- 026011 水平剪切气流中升力在液滴扩散中的作用.....
.....王树众 咎元峰 李慧君 林 益 林宗虎(50)
- 026012 环形管环状流临界热负荷解析模型.....黄 蓉 白博峰 郭烈锦(56)
- 026015 在静止液体中气泡上升时形状演变的数值模拟.....李维仲 侯 明(65)
- 026017 水平管道中段塞流的跟踪模拟.....何利民 王 鑫 赵庆军 陈振瑜(71)
- 026018 倾斜往返式冷凝器液阻速度研究.....姜洪林 陈文仲(77)
- 026019 超临界 CO₂ 与胍胶液两相流流变特性研究.....
.....王志刚 王树众 林宗虎 王 斌 张爱舟(85)
- 026020 不等径水平三通的分相特性研究...王 栋 张修刚 林 益 林宗虎(91)
- 026021 水平混输管路清管操作试验与模拟研究.....李玉星 冯叔初 王新龙(95)
- 026022 气体/表面活性剂水溶液两相流流型的断层测量.....
.....夏国栋 彭 岩 马重芳 麦维斯(104)
- 026025 水平管气液两相流型压差波动的概率密度函数特征.....
.....孙 斌 周云龙 关跃波 洪文鹏(109)
- 026027 带定位格架棒束通道内两相流型研究.....
.....王小军 陈炳德 黄彦平(114)
- 026033 气液两相流过渡流型的判别及其压降计算.....
.....蔡一全 胡小虎 杨筱衡 宫 敬(119)
- 026035 用小波包和 IFS 分形研究两相流不稳定性.....尚 智 杨瑞昌(124)
- 026041 零净液流量下垂直管内的弹状流动.....负军贤 于志家 沈自求(130)
- 026043 水平管外强化凝结传热的数值解.....左建国 李维仲 徐士鸣(138)
- 026045 垂直管内气液两相流流型研究的进展.....
.....负军贤 于士君 于志家 沈自求(143)

026047 添加剂分子结构与其强化沸腾传热性能的神经网络分析.....	刘天庆 孙相玉 李香琴(152)
026050 窄缝环形管内沸腾两相流的可视化研究.....	李 斌 周芳德 赵建福 唐泽眉 胡文瑞(158)
026054 分层流与环状流中聚合物减阻效应研究.....	刘 磊 钱焕群 周芳德(164)
026055 环隙通道中引入空气强化传热的研究.....	苗 君 王 军 沈自求(170)
026058 FC-72 在浸泡于液池中的微小圆管内的沸腾传热.....	毕勤成 赵天寿 郭亚军 陈听宽(176)
026061 起伏管线中的多相流液弹发展特性研究.....	苏新军 张修刚 王 栋 林宗虎(182)
026066 ALR 中表面活性物质对氧的气液传质的影响.....	方 亮 刘延来 王 军(187)
026068 水平微肋管内汽液两相流空泡率实验研究.....	陈永昌 俞 坚 马重芳 小山繁(193)
026069 稀疏泡状流连续介质模型的改进.....	许兆峰 罗 锐 杨献勇(198)
026071 特征线法在气液两相流瞬态计算中的应用.....	江延明 李玉星 冯叔初(205)
026082 垂直上升管中油水两相流流型辨识方法研究.....	金宁德 聂向斌 任英玉 王微微(213)
026083 制冷剂在毛细管内闪发流动的研究.....	吴业正 曹小林 晏 刚 朱瑞琪(220)
026085 低进汽压力下超音速汽液两相流升压加热特性实验研究.....	刘继平 严俊杰 林万超 陈国慧 邢秦安(225)
026090 气液两相流流经文丘里管的动态差压信号分析.....	张 涛 许 建 徐立军(230)
026092 液滴在气流中破碎的数值模拟.....	蔡 斌 李 磊 王照林(235)
026094 圆管中气液两相流动空隙率规律的研究.....	韩洪升 杨树人(242)
026096 激波诱导液滴变形和破碎现象实验研究.....	耿继辉 叶经方 王 健 李鸿志(248)
026099 气侵期间环空气液两相流动研究.....	李相方 刚 涛 庄湘琦 隋秀香(254)
026100 气水两相流试井复合模型及资料解释.....	李相方 程时清 刘大宝 唐恩高(261)

二. 气固两相流

026002 颗粒在后台阶气粒湍流流动中扩散行为的研究	王 兵 张会强 王希麟 郭印诚 林文漪(267)
026003 双流体颗粒-壁面碰撞模型用于旋流流动.....	张 夏 周力行(275)
026016 方柱后流场气粒运动特性的实验研究.....	赵海亮 李 彦 徐旭常 Yongho Lee(281)
026023 射流悬浮床气固两相流动的数值模拟.....	杨 烨 王翠苹 李定凯 吕子安(287)

026024	方截面循环悬浮床内流动特性的试验研究	王翠苹 杨 烨 李定凯 吕子安(294)
026028	流化床内气固两相绕流沉浸管的流体动力计算	何玉荣 刘文铁 刘 鹏 陆慧林(300)
026029	循环流化床内颗粒团流动的研究	陆慧林 王 强 刘文铁 别如山(305)
026030	二维流化床气-固流化系统流体动力特性的直接数值模拟	刘 阳 陆慧林(310)
026031	可压稠密气固两相流动过程的模拟计算	孙永立 赵广播 王 强 陆慧林(315)
026039	数值模拟 U-beam 管束内的气固两相流动	陈丽华 林建忠(320)
026040	气固两相圆柱绕流的直接数值模拟	樊建人 胡桂林 姚 军 岑可法(326)
026042	沙尘暴(气体-颗粒)两相流及其并行数值模拟	王夕华 张 军 王体健 汤健平 顾 璠(336)
026051	城市生活垃圾循环流化床气固冷态流场数值模拟	冉景煜 张 力 辛明道 熊可嘉(342)
026052	BFG、LDG 中颗粒及微质量动态测量的试验研究	刘剑军 崔国民 马 晋 卢洪波 张兴良 韩 晶(348)
026059	稀疏两相流动的 PIV 测量技术	郭福水 王汉封 柳朝晖 郑楚光(353)
026062	均匀各向同性湍流中的颗粒扩散研究	徐志锋 柳朝晖 郑楚光(360)
026072	三维均匀各向同性两相湍流的直接模拟	贺 铸 柳朝晖 郑楚光(367)
026073	气固两相三维湍流射流拟序结构及颗粒扩散的大涡模拟	罗 坤 金晗辉 李文春 樊建人 岑可法(373)
026077	基于非结构化网格的欧拉-拉格朗日数值模拟	高 晖 郭烈锦 顾正萌(383)
026080	后台阶气固两相流动的 PDPA 实验研究	任凯锋 王希麟 张会强 崔 峰 郭印诚 林文漪(389)
026084	颗粒碰撞模型与数值研究	张文斌 祁海鹰 由长福 包英捷 徐旭常(396)
026087	论风沙流的研究进展	周 芳 祁海鹰 由长福 程 旭 徐旭常(403)
026088	气固两相流动的无网格直接数值模拟初探	仇 秩 由长福 祁海鹰 徐旭常(411)
026093	粉煤灰微珠的气力分级原理与实验研究	周晓君 徐 忠 苗永森(418)
026097	负压差立管的气-固流态分析	魏耀东 刘仁桓 时铭显 韩光泽 华 贲(425)

三. 实验及其它

026007	受控两相流磁流体传热实验研究	李端勇 吴 锋 郭方中(430)
026013	柱状粒子在混合层中运动特性的研究	林建忠 游振江 石 兴(435)
026014	轻质分散相水力旋流器的分割尺寸 d_{50}	赵庆国 马重芳(444)

026026	并联管内两相流密度波脉动线性均相模型·····	周云龙 孙 斌 李 岩(452)
026032	水平管内油水乳状液相转变过程分析·····	穆 虹 宫 敬 陈 杰(458)
026034	油/气/水混输管道压降计算方法的改进·····	·····吴海浩 包 杰 余 洋 杨筱衡(466)
026036	平行场电磁层析成像的物理机制·····	熊汉亮 何 敏 刘 泽 徐苓安(474)
026037	空气受迫纵掠湿表面传递过程的不可逆热力学分析·····	张 旭 陈沛霖(482)
026038	自然循环过冷沸腾净蒸汽产生点的实验研究·····	·····杨瑞昌 王彦武 唐 虹 梁 玥(488)
026046	低粘液与可互溶高粘液接触的界面形态·····	·····谢 健 钱柏太 王 军 沈自求(494)
026048	气液固三相流载气蒸发的抗垢性能 ·····	于志家(501)
026053	含不凝气体时煤油在水平管束外的冷凝·····	顾红芳 陈听宽(506)
026056	含气率对 PTS 时压力容器内流动与传热的影响·····	·····罗毓珊 卢冬华 王海军 陈听宽 陈 骏(511)
026057	超临界锅炉内螺纹管传热特性的研究·····	·····陈听宽 孙 丹 罗毓珊 郑建学(519)
026060	Coriolis 流量计在油水两相流中的误差特性研究·····	·····张修刚 苏新军 王 栋 林宗虎(525)
026063	水力旋流器内固液两相分离理论---I 物理模型·····	·····林高平 邹 宽 章立新 杨 茉 林宗虎 胡利光(530)
026064	水力旋流器内固液两相分离理论---II 数学模型·····	·····林高平 邹 宽 章立新 杨 茉 林宗虎 胡利光(536)
026065	高炉污泥旋流分离中颗粒浓度场的计算·····	·····曹 玮 邹 宽 杨 茉 胡利光 林高平 章立新 林宗虎(543)
026067	基于声压振荡功率谱识别欠热沸腾工况·····	匡 波 崔晓钰 徐济鋈(548)
026070	高温熔融液滴的破碎特性研究·····	李会雄 罗朝霞 陈听宽(555)
026074	处理表面水平管外降膜蒸发传热的实验研究·····	·····马学虎 高大志 安家明 朱晓波 陈嘉宾(562)
026076	水平管油水两相分层紊流流动的数值研究·····	顾汉洋 高 晖 郭烈锦(567)
026079	潜热型热功能流体强化换热分析·····	白凤武 卢文强(572)
026086	沙漠的沙粒物理特性分析·····	程 旭 祁海鹰 由长福 周 芳 徐旭常(577)
026089	炉内喷钙脱硫对锅炉热效率的影响·····	段建中(583)
026095	CTAC 流体减阻机理试验研究·····	·····许 鹏 王德忠 徐济鋈 罗次申 金 浩(591)
026098	格子气自动机法模拟液滴微粒的形成·····	·····战洪仁 龚 斌 张恩祥 朱振华(602)

多相流测试技术会议论文目录

大会主旨报告

电容层析成像技术的发展.....王 师 杨 钢 陆增喜(607)

颗粒两相流及环境监测的实时在线测量.....蔡小舒(608)

MT02001 600MW 切向炉燃烧器区旋涡运动的形态.....

.....刁永发 何伯述 许晋源 陈昌和(609)

MT02002 基于像素相关的速度分布测量研究.....邓 湘 张宝芬 徐苓安(616)

MT02003 基于涨落复杂性的颗粒流化特性分析.....黄春燕 蔡小舒 赵志军(621)

MT02004 流化床多传感器信号特征分析.....黄春燕 盛绍儿 陈伯川(626)

MT02005 光学层析成像系统若干关键技术研究.....

.....郑莹娜 李 扬 陈 健 刘 强 陈长缨(630)

MT02006 多相流相分率的模型预测与检测方法综述.....姚海元 宫 敬(636)

MT02007 使用 PDA 测量两相流边界层时零点修正.....

.....薛 元 姚 强 张金成 奚 波 张成锋(643)

MT02008 用于管线混输关键技术的一些模拟试验.....

.....郑之初 吴应湘 李东晖 赖英旭 劳力云 马艺馨(647)

MT02009 压力传感器测量水平管液弹瞬态特性参数.....

.....苏新军 张修刚 王 栋 林宗虎(658)

MT02010 利用振动管的科氏力与谐振特性的两相流测量.....

.....刘 磊 胡志华 周芳德(663)

MT02011 燃煤锅炉炉膛断面温度场可视化实验研究.....

.....刘 浩 周怀春 娄 春 刘尧平 吴 秋(669)

MT02012 极限扩散电流技术在气液两相流研究中的应用.....刘克菲 于志家(676)

MT02013 基于 ERT 的气液两相流分层流相含率研究.....

.....董 峰 乔旭彤 姜之旭 徐苓安(682)

MT02014 垂直管道中气泡位置的判别.....董 峰 姜之旭 乔旭彤 徐苓安(687)

MT02015 集流型生产测井仪在倾斜流动环路中的实验研究.....

.....王向荣 吴世旗 钟兴福(692)

MT02016 应用平均值法在线监测烟尘颗粒浓度.....

.....赵延军 张学峰 陆 勇 王式民(696)

MT02017 基于冲蚀耦合的透平叶片振动频率修正模型·····	鲁嘉华 凌志光(703)
MT02018 高炉瓦斯泥旋流脱锌后含锌率的实时监控·····	章立新 邹 宽 杨 荣
·····林高平 周 扬 曹 玮 殷 俊 赵 明 胡利光 林宗虎(710)	
MT02019 基于照度变化特征的气泡图象识别方法·····	
·····邵建斌 陈 刚 许联锋 金上海(715)	
MT02020 电容层析成像高速通讯模块的设计·····	
·····王 雷 王保良 冀海峰 黄志尧 李海青(724)	
MT02021 稠油热采注汽两相流测量新技术·····	仲朔平 李胜强 孙 勇(731)
MT02022 磁稳流化床除尘装置的设计与实验研究·····	王迎慧 归柯庭 施明恒(737)
MT02023 电容层析成像图象重建算法之一: 原理·····	
·····邹 璐 彭黎辉 姚丹亚 张宝芬 杨五强(743)	
MT02024 电容层析成像图象重建算法之二: 评价·····	
·····邹 璐 彭黎辉 姚丹亚 张宝芬 杨五强(750)	
MT02025 等熵系数和雷诺数在四孔楔型探针气动测量中影响的研究·····	
·····苏海林 蔡小舒 J. Messner(757)	
MT02026 光学 PT 扇束扫描图象的 ART 迭代重建法·····	
·····李 扬 郑莹娜 邹旭华 葛 李 汪仁煌(762)	
MT02027 基于交流激励的电容层析成像系统·····	陆 耿 彭黎辉 姚丹亚 张宝芬(768)
MT02028 基于色彩的辐射温度测量·····	符泰然 程晓舫 王安全(774)
MT02029 泡状流“失稳”时空隙率波及其非线性·····	孙宝江 赵欣欣(781)
MT02030 利用流体电容传感器识别油井高含水层·····	庄海军 梅 艳 李志民(788)
MT02031 气液两相流下离心泵性能测试·····	李东晖 吴应湘 郑之初 赖英旭(794)
MT02032 消光法在线监测污染源排放颗粒物技术研究·····	
·····付敬业 李树荣 蔡小舒 赵志军(800)	
MT02033 小波分析技术在多相流领域的应用·····	冀海峰 黄志尧 李海青(805)
MT02034 多传感器信息融合在两相流流型辨识中的应用·····	岳伟挺 张宏建(812)
MT02035 竖直管内空气—水环状两相流的传热特性理论分析·····	
·····易 杰 王 经 刘振华(819)	
MT02036 近似熵应用于多相流检测的实验性研究·····	李晓华 陈伯川(825)

沸腾传热与一些蒸发操作的问题

沈自求

大连理工大学 化学工程研究所 大连 116012

Tel:0411-4623092, email:shenzq@dlut.edu.cn

1 引言

沸腾传热速率高,需要的传热温差小,在各种工业中获得了广泛应用,是取出热量十分有效的方法。数十年来,对沸腾传热已进行了广泛的研究,积累了大量实验数据,获得了不少经验的或唯象的关联式,用于工程设计和技术分析,起了重要作用。然而,这一些关联式常常只能局限于较窄内使用,在推广时往往带来相当大的偏差。究其原因,过去传统的对沸腾传热的研究,常常是测定其宏观的位置与时间的平均参数值;但实际上沸腾是包含着众多的沸腾泡核生成、长大、脱离等一系列子过程的十分复杂的现象,而且加热壁面的性状及与沸腾液体间的相互作用还起着重要作用。这样一个复杂现象,难以用一个宏观的关联式来综合。同时,这些关联式常常以无量纲数群来综合,虽然考虑了沸腾泡核的作用、热通量及汽化热等的影响,引入了有关参数;但大多是把沸腾传热依作者的认识模拟为一定形式的对流传热,分析其机理,组成相应的特征数来进行关联。我们认为,沸腾传热速率之所以要较一般对流传热大得多,是由于沸腾泡核生长时形成了极薄的液体微层,产生了十分显著的“界面汽化热阱效应”,使传热大为增强^[1];同时汽泡脱离引起的液体扰动亦使其对流传热加大,它们还相互作用,交错在一起。而从相似理论的观点来看,这种“热阱效应”难以用相似特征数来表达,要把这些复杂的子过程组成无量纲特征数,放在一起综合数据,显然也是很困难的。

近些年来,对于沸腾传热的这种十分复杂性,已有一些作者注意到并进行了一些实验研究和理论上的分析与探索^[2-5]。

本文将就泡核沸腾传热以及一些蒸发操作的问题,进行分析与探讨。

2 简要的回顾

沸腾是人类很早利用并十分熟悉的现象,然而一直来未为人们所深刻认识。对于沸腾的研究,1934年 Nukiyama^[6]把一细铂丝浸没在水中通电加热产生沸腾,考察铂丝温度与传热速率间的变化关系,以此作出了沸腾曲线,是人们对沸腾过程初步认识的一个基础。在以后,由于热能、核能等工业发展的需要,沸腾传热的研究工作迅速发展。研究各项因素对沸腾传热的影响,并以无量纲参数来综合数据获得关联式。早期的应该提到 Rohsenow 等的工作^[7],他们以方程(1)的形式用无量纲特征数来关联数据:

$$Nu = (Const)(Re)^a (Pr)^b \quad (1)$$

在组成这些特征数时,引入了与沸腾泡核有关的表面张力等参数,考虑了沸腾时相变

的汽化热、热通量等问题。在 Rohsenow 以及其他的一些关联式中,从概念上来讲,基本上都是把沸腾传热模拟为一种对流传热的形式来组成无量纲参数进行关联的。

前苏联对沸腾传热的研究,获得的无量纲参数关联式可以说是大量的。他们获得的关联式,可以用一般式(2)来表示:

$$\text{Nu}^* = A \text{Pr}^{n_1} \text{Pe}^{*n_2} K_p^{n_3} K_i^{n_4} \text{Ar}^{*n_5} \quad (2)$$

随着各研究者对问题分析观点的不同以及自己的实验结果,在式(2)中采用不同的无量纲特征数,由实验关联获得的系数 A 及各个指数 n 等亦往往有不同的数值。

在这一时期,由于在单相流体力学与传热等领域中,用量纲分析和相似特性数来处理问题获得了巨大成功,在沸腾传热研究中用相仿的方法来处理是很容易被采用的路子。然而我们若是仔细分析一下 Rayleigh 与 Buckingham 的论文^[8,9],就会注意到用无量纲数群来关联数据,是应该在过程是在相似的条件下去进行的。对于沸腾这样一个十分复杂包含着一系列子过程相互交替的现象,以测得的各个参数的时间空间平均值组成无量纲参数来进行关联,是否合理还是需要探讨的。

加热面上沸腾泡核的生成是一个非匀相成核问题。对这种成核的研究是说明核沸开始所需条件的基础^[10]。沸腾泡核一旦形成长大,加热壁温就行变化。Moore 与 Mesler^[11]测得核沸时壁温周期变化的特征,对理解其传热机理很有价值。Burdukov 等^[12]用 LDCT 测得的数据说明了核沸中对流传热的作用。这些都有助于对核沸过程的认识。

在这一段时期,对沸腾所作的工作,在解决工程技术问题上和对沸腾过程的认识上是起了一定的重要作用。但显然,其中还存在不少矛盾。人们对沸腾的本质的认识上还是比较表面的、模糊的和不够确切的。

我们知道,在二十世纪后半期,尤其是 70 年代以后,人们对自然界一些复杂问题的认识有了一个很大的飞跃。H.Haken (1976) 创立了“协同学”,提出了“自组织”的概念。诺贝尔奖金获得者 I.Prigogine 建立了“耗散结构”理论,也使用了“自组织”的概念。“突变论”的创立给研究复杂性和过程提供了数学工具和基础。同时,“混沌”(Chaos, Lorenz) 和“分形”(Fractals, Mandelbrot) 的提出,使人们对一些复杂而又常见的自然界现象的认识在改变着。自然界的本质是非线性的,但传统科学对自然界的研究基本都建立在线性模型之上。20 世纪下半期非线性科学的诞生对传统的线性思维模式提出了一系列挑战。近数十年来,所有这些飞跃和巨大发展正在改变着人们对自然现象和问题的描述、分析以及思维的路子,正在渗透到并冲击着各个认识和研究的角落。

沸腾是一个十分常见的现象,人们也注意到了它的复杂性和非线性。一些作者对传统的研究方法提出了质疑,进行一些新的实验研究,提出一些新的观点和研究的思维路子。如 M.Shoji^[12]用一细铂丝在常压下进行水的饱和沸腾以研究其总体效果,用微尺寸系统测定其体积平均的壁温波动在各沸腾区域的特征。由其获得的时间序列数据用时滞方法重构获得吸引子,计算了分维数。在核沸阶段的分维数达 6 左右,说明核沸现象具有相当高的复杂性,反映了它的过程动力学具有混沌性。泡核沸腾是在具有众多活化空穴的加热壁面上产生沸腾泡核的传热过程,加热面上活化空穴间的相互影响

与沸腾泡核之间的相互作用被一些研究者关注到^[4,13,14]，提出了不同的机理与模型。Kenning 等^[4]更注意到加热壁面对核沸传热的重要影响，在一薄不锈钢片上进行水沸腾实验，以通直流电加热，在不锈钢片的背面涂以液晶，利用液晶的颜色会随温度改变测定了壁温的分布与变化情况，来研究其与沸腾核化中心的关系，提供了很有价值的信息。

Sadasivan 等^[15]注意到加热面上各活化点上的行为对加热壁面的作用，认为它是核沸过程呈现非线性的重要原因。他分析了沸腾过程中所包含的子现象具有的潜在的非线性特征，而以其中活化点的活化与脱活为主来研究过程的非线性以至混沌性。他建立了数模并进行“数值实验”。他认为研究沸腾传热的目的可从“更好地预测”和“更好地理解”两个方面来考虑。他的模型以及研究问题是要达到更好的理解，希望通过更好的理解最终能达到更好的预测。我们十分同意他的观点，对沸腾这样复杂的问题，当前主要应着眼于深入分析，研究过程的实质，才能使工作得到突跃发展。

沸腾汽泡的脱离一直为人们所关注。Mei 和 Klausner 等^[16,17]对沸腾汽泡的脱离和长大进行了比较系统的研究。这对进一步深入研究核沸传热是很有价值的。

上面所作的回顾是很不全面的，只能是本文分析和探讨问题的一个认识基础。

3 核沸传热的过程动力学分析

3.1 核沸传热的基本特征

核沸过程十分复杂，归结起来可认为它具有如下的基本特征：

(1) 核沸传热中包含着众多沸腾泡核的生成、长大、脱离和酝酿着下一个泡核的生成等子过程，这些子过程相互交替、相互影响，使过程呈现明显的波动和复杂性，也是核沸传热具有非线性特征的基本原因。

(2) 在沸腾泡核成长时，形成一极薄的液体微层，产生显著的“界面汽化热阱效应”，使传热增强。这种增强是沸腾传热速率较一般对流传热高得多的基本原因。

(3) 可以把一个核沸传热问题分成为三个子问题来分析：①沸腾液体和加热壁面间的传热和相互作用，包括泡核的生长、脱离等子过程，是核沸传热中要研究的最主要问题。②加热壁中的传热对沸腾亦有重要影响，加热面上沸腾泡核的生长和脱离影响加热壁中的温度分布与导热过程，后者又反过来影响壁面上的核沸和传热过程，关系亦是十分复杂的。③在加热面上沸腾液体的主体层中，上升汽泡与液体间传热也是在继续进行的，这是第三个子问题。对于饱和沸腾，这一汽—液主体层中的液体是过热的，当沸腾汽泡上升经过时，过热的液体把显热释放成为潜热，使汽—液界面上液体汽化，进入上升的蒸汽泡内，成为蒸汽而逸出。对于过冷沸腾，沸腾汽泡在与过冷液体接触的界面上冷凝，将热量传给过冷液体，像是起了一个热管的作用，使热的传递得到增强。

下面本文的内容主要是分析探讨第一个子问题。

3.2 单个泡核沸腾过程的机理

对单个泡核沸腾机理的分析是深入研究核沸传热过程的基础。

沸腾，首先要在加热壁面生成一个沸腾泡核，这必须要有一个过热度 ΔT_{sat} ，满足

方程 (3) 所示的条件:

$$\Delta T_{\text{sat}} = T_w - T_{\text{sat}} \geq \frac{2\sigma}{r} \frac{RT_{\text{sat}}^2}{i_{\text{LG}} MP_L} \quad (3)$$

而沸腾泡核一旦形成, 便会自行长大。由于它与加热壁面间形成的极薄的液体微层迅速汽化, 产生了十分显著的“界面汽化热阱效应”, 使壁面温度 T_w 迅速下降。在 Moore 与 Mesler 所测得的单个泡核沸腾时壁温的变化曲线^[11] (见图 1 中的(a)) 上可以看到, 在壁温波动的一个周期中, 于沸腾开始的 2ms 内 T_w 可迅速下降 11.0—16.6°C, 而后在 10—20ms 内又逐步曲折地回升到下降前的水平, 下一个波动周期又行开始。

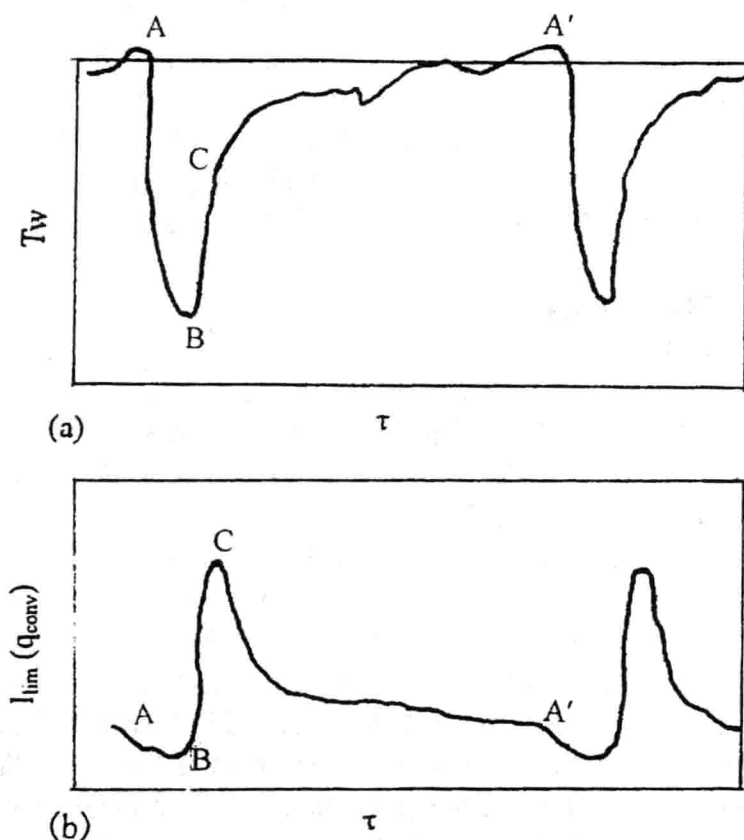


图 1 单个泡核沸腾传热机理的分析

(a) 单个泡核沸腾时壁温的变化曲线

(b) 单个泡核沸腾时由 LDCT 测得的对流传热速率 q_{conv} 的变化

沸腾中包含了液相的汽化, 但汽化本身不是一种传热方式。在沸腾传热中的传热方式还仍然是加热壁面与液相间的对流传热与导热。Burdakov 等^[12]曾以 LDCT 测定了单个泡核沸腾时的极限扩散电流值 I_{lim} , 如图 1 (b) 所示。

由于 I_{lim} 即代表了对流传热速率 q_{conv} ，因之这一 $I_{\text{lim}} (q_{\text{conv}})$ 曲线即表示了单核沸腾时 q_{conv} 随着过程进行的变化。

今将这两个曲线图联系起来，如图 1 所示，来分析泡核沸腾过程的传热机理。考虑一个沸腾泡核的形成，其加热壁面必须有一过热，其相应的 T_w 如图 1 (a) 中的 A。而泡核一旦形成长大，由于形成了液体微层，有十分显著的“界面汽化热阱效应”， T_w 迅速下降，如图 1 (a) 中的 $A \rightarrow B$ ；此时，汽泡底下的液体微层迅速扩展，使“界面汽化热阱效应”继续加大，增强了传热速率。然而，此时沸腾汽泡下的液体微层，上为蒸汽泡所阻隔，周围与液相主体的交换亦很少，像是被关在这一极薄的液体微层中；因之它的对流传热很差，表现在图 1 (b) 的曲线中为 $A \rightarrow B$ 一段， q_{conv} 是整个过程中最低的。在沸腾气泡长大到脱离时，在流体中产生一强烈扰动，对流传热骤然增大，如图 1 (b) 中所示， q_{conv} 由 B 突然上升 C，达过程中的最大值；此时，由于汽泡脱离，“汽化热阱”消失，沸腾液主体中温度较微层蒸发时的气液界面温度要高的液相进入到加热壁面处，与之接触，使 T_w 较快地升高，如图 1 (a) 中的 $B \rightarrow C$ 所示。在 C 以后，由于汽泡脱离时产生的扰动逐渐平静下来，其对流传热速率 q_{conv} 又逐渐变小，这即是图 1 (b) 中的 $C \rightarrow A'$ 段。在这一阶段，由于加热壁面与沸腾主体中的液相接触， T_w 又逐渐升高，酝酿着下一个沸腾泡核的形成，如图 1 (a) 中的 $C \rightarrow A'$ 。在 A' 处， T_w 又满足方程 (3) 的要求，下一个沸腾泡核形成，下一个核沸周期开始。

由上分析可见，核沸中包含着几个子过程，这些子过程的交替体现出核沸具有不同的传热阶段。图 1 (a) 说明了 T_w 随这些子过程交替时的变化，图 1 (b) 说明了 q_{conv} 相应的改变。然而，在这些阶段中热的传递都是以对流传热或微层导热的方式进行的。在 AB 段， q_{conv} 虽然最小，但由于“界面汽化热阱效应”的强烈作用，其总传热速率却是最大，这时传递过去的热量，直接使液相转化为汽相，以汽化热的形式带走。在 BC 和 CA' 段，传递的热量使加热面以上的液体过热，当沸腾汽泡上升通过液层时，又在汽泡的界面上使液相汽化成为蒸汽，以汽化热的形式由蒸汽带出。

3.3 沸腾泡核间的相互作用

在实际沸腾传热的加热壁面上常具有无数不同大小与分布的活化空穴。这些活化空穴上的核沸过程并不是孤立的，它们相互影响，相互干扰，使情况更为复杂。一个活化空穴上的沸腾，可以激活邻近的空穴，也可抑制其邻近空穴的活化。

为了分析核沸时活化空穴间的相互影响，先来考虑沸腾汽泡在活化穴上的长大形式，不外图 2 所示的两种情况。由于一般沸腾液体是能浸润加热面的，因之不太可能形成 (a) 的形式。而且若是成为 (a) 的形式，随着泡核的长大，汽相与加热壁的接触面加大，会使传热变差，壁面温度增高，导致向过渡沸腾转化。但实际上，一般泡核沸腾时 T_w 是要下降的，图 1 (a) 的 T_w 曲线是一个很好的说明。因之，在沸腾泡核长大时，应该以图 2 (b) 的形态来考



图 2 沸腾泡核的长大

虑。

今分析核沸时沸腾泡核间的相互作用。作为一个初步的分析,设想有一空穴已经活化,形成了沸腾气泡 A 并在长大;其邻近有一空穴 B,尚未活化,如图 3 (a) 所示。由于 A 穴上沸腾气泡的长大,其下形成了液体微层,产生的“汽化热阱效应”使微层中的液相温度降低,其

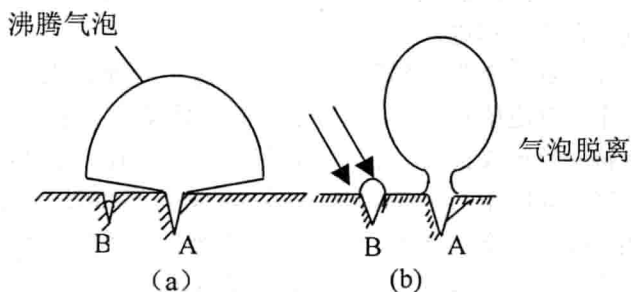


图 3 活化空穴上的沸腾对其临近空穴的作用

旁 B 穴中留存气核的界面温度亦相应降低,满足不了方程 (3) 的要求。这样就抑制了 B 穴的活化。但当 A 穴上的气泡长大脱离时,形成了如图 3 (b) 所示的情况, B 穴已不为温度较低的液体微层所覆盖;而且由于 A 穴上气泡脱离时引起的扰动,使液相主体中温度较高的液体进入,当 B 穴上气核的温度提高到满足方程 (3) 的要求时,就开始活化。而对于 A 穴,由于气泡刚行脱离,其上沸腾泡核的下一次形成活化反较 B 穴为晚。在这种情况下, B 穴上的沸腾泡核先于 A 穴生成长大,在微层蒸发阶段亦抑制了 A 穴的活化,而当 B 穴上的气泡脱离时,又可能会使 A 穴激活,形成沸腾泡核并行长大。如此, A 穴和 B 穴上的沸腾就会交替进行,形成震荡。

为了考察加热壁温变化与沸腾活化中心之间的关系, Kenning 与 Yang^[4]在一薄不锈钢片上进行水沸腾的实验研究是很有意义的。他们在实验中以高速照相记录沸腾气泡在加热面上的变化,确定了活化穴上沸腾气泡的脱离直径和它可能对壁温产生影响的区域。以液晶随温变色的特性测定了活化穴上壁温随时间的波动。图 4 中的下图表示 A、C、D、E 四个活化穴的位置,其外的圆圈表示它们能对壁温产生影响的范围。图 4 中的上图是在活化穴 A 上测得的温度波动曲线,可以见到它亦具有如图 1 (a) 所示的特征,在沸腾泡核生长时壁温迅速下落而后再逐步回升。在该图的温度波动曲线上,有四处标有记号 C,一处标有记号 D,是表示活化穴 C 与 D 上形成沸腾泡核时温度下降亦影响到 A 穴处,当然其幅度较小。在标有记号 E 的两处,其 T_w 下降要小得多,这是由于活化穴 E 距 A 穴较远,影响

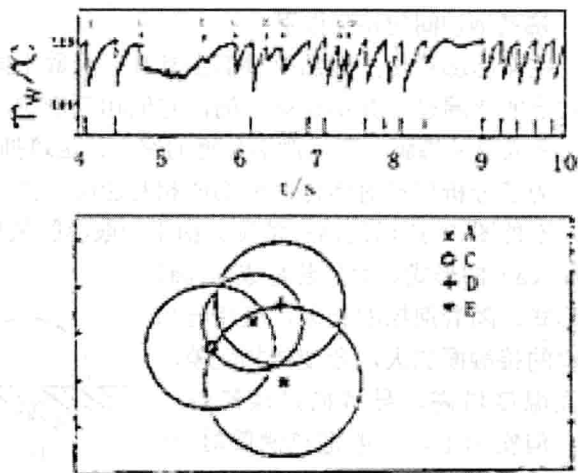


图 4 0.13mm 厚不锈钢片上水饱和沸腾热通量为 50.8kW/m^2 时活化穴 A 上壁温变化的波动曲线^[4]

要小得多。显然,在实际加热面常具有众多活化空穴,它们相互影响,情况更十分复杂。在图 4 的壁温波动曲线上,我们还看不到有相同的波动形式的周期,这正说明了这一过程的复杂性和混沌性。

3.4 核沸过程的自组织

核沸,要在一个匀相液体中形成一个新的蒸汽相,它必须在远离平衡的条件下进行。在过程启动后,外界还不断提供能量,除供给液相汽化所需的汽化热外,还使之能不断克服表面张力形成沸腾泡核,又不断克服流体运动时的磨擦,使其中所包含的这些子过程形成一个有序并保持一定稳定性的“耗散结构”。过程就在这些子过程的相互影响,不断交替的演化中进行。

前面 3.2 节中已经阐述,在一个活化穴上进行核沸,当 T_w 满足方程 (3) 时,沸腾泡核即形成长大,其中所包含的一系列子过程-沸腾泡核的形成长大、脱离、酝酿下一泡核的生成等,即行交替演化。它们不断相互协作、相互竞争,在时间上形成了一个序列。每个子过程都为下一个子过程准备了条件,而当某一子过程占有优势时,它就替代了其它子过程而进行。如此循环演化,按照自组织的原理,它具有一定的时间序列,形成了一定形式的时间结构。

当然,对于一个实际的加热面上的沸腾,情况还要复杂得多。加热表面常常包含着无数不同大小和分布的可以作为沸腾核化中心的空穴,它具有一定的分形特征。这些活化穴上的沸腾还相互影响,前面曾对邻近的活化穴上核沸间的相互作用作了十分初步的分析,由 Kenning 等的实验结果中,更可以见到加热面不同位置活化穴上核沸间的相互影响的复杂性。在 Kenning 等的论文^[4]中,还列出了活化穴 A、C、D、E 上的不同的壁温波动曲线。这说明由于沸腾加热壁面具有不同大小与分布的活化穴,还形成了核沸随不同位置而变化的空间结构,要解决核沸的空间结构将是十分困难的。然而, Sadasivan 等工作^[15]给了我们一点启发,如果按照前面所阐述的对核沸过程机理的理解,设定一定的条件,建立模型,进行“数值实验”,则要对核沸过程获得一些更好的理解,是完全有可能的。

4 核沸开始时的壁温过冲

核沸开始时的壁温过冲,也有的把它叫作“沸腾滞后”现象来研究。这在 20 世纪 50 年代就已发现,但近些年来,由于在微电子设备技术中采用高介电有机液体以沸腾传热来取出热量以强化微电子元件的冷却;而这类液体对固体表面具有高润湿性,在核沸开始时产生严重的壁温偏离和波动,导致微电子器件在操作时产生噪音,严重地影响了它们的操作性能与使用寿命。因之,从实际生产的需要来讲,核沸开始时的壁温过冲亦受到了人们的关注^[18,19]。

核沸开始时要有一个壁温过冲的根本原因,是沸腾是要在匀相液体中产生一个沸腾泡核新相;这常常需要在远离平衡的条件下进行,因之要有一个较高的传热温差。而沸腾泡核一旦形成,其底部形成了一极薄的液体微层,微层面上液相的迅速气化,取出潜热,使其温度下降,从而导致微层导热大为增强,壁温相应地显著下降。因之,在核沸开始的壁温下降可以用“界面汽化热阱效应”来进行说明。

在加热面上沸腾时获得的壁温过冲是测得的一个宏观值。由自然对流传热转变核沸开始是一个临界相转变现象。设想这时稍稍提高一点壁温,有少数几个空穴得到活化,形成沸腾泡核,这些泡核的沸腾激活了其邻近空穴产生沸腾,这邻近空穴沸腾又激活其周围的活化穴形成更多的核沸。瞬息间,像是突然暴发,使自然对流传热转变成了泡核沸腾传热。这从混沌的观点来考虑,像是产生了一个小小的“蝴蝶效应”。由此亦可看到,核沸开始时的壁温过冲与加热面的结构和加热的方式之间有着密切的关系。

沸腾本身就是一个十分复杂的现象,由自然对流传热突然转变为泡核沸腾当是一个更为复杂的现象。它必然与沸腾中所包含的各个子过程的演化与时间的经历有关,与加热壁面的结构及性能有关,还与操作的方式及过程的历史有关。对这样一个复杂现象,当前要提出一个模型,导出一个方程来表达或预示,都很不容易。首先还需要对这一复杂现象作深入的机理分析与过程动力学的研究,并进而解决有关的问题。

5 一些蒸发操作的问题

工业上的蒸发操作大多是在流动沸腾的状态下进行的,有些溶液当其中某些物质的浓度达到过饱和时会成固体析出,在加热管壁面上形成结垢,显著的增大了传热热阻,甚至产生堵管,造成损失。为了改进蒸发操作,研究防止结垢的途径,我们曾到一些工厂考察。氧化铝厂曾对铝酸盐碱液的大蒸发器加热管中的结垢情况作过研究分析,对于加热管长 9m 的大型外循环式蒸发器,在 9m 长加热管下端入口处 0.2m 的距离内结垢均不严重,结垢严重的是在离下端 0.2m 以上直至约 8m 处,在最上端的 1m 左右处未见结垢。分析这一情况,在加热管下端溶液入口的一段刚好是单相对流传热的一段,到 0.2m 以上泡核沸腾开始;而在最上的一段,由于管子长,而其中蒸发的蒸汽量已很大,管内汽液两相呈环状流上升,由于汽速大,推动环状液膜迅速上升,从而亦抑制了泡核沸腾的产生,不易形成结垢。因之,要防止蒸发时的管壁结垢,应设法抑制泡核沸腾的产生。

泡核沸腾时容易形成结垢,可以用前述核沸时形成微层蒸发的机理来说明。核沸时,由于形成了极薄的液体微层,导热极快,微层面上液体蒸发迅速。另一方面,这一液体微层极薄,按 Hospeti 和 Mesler 用含有示踪原子的饱和 CaSO_4 溶液进行的泡核沸腾实验研究^[20],由检测到的 CaSO_4 的沉积量推算出了沸腾蒸汽泡下液体微层的平均厚度为 $0.77\ \mu\text{m}$ 。由此可见,在如此薄的液体微层上溶液迅速蒸发,会使溶液中的易结构物质很快浓缩析出,附着在加热管面上形成结垢。这确是核沸时易产生结垢的一个主要原因。

由对流传热转变到泡核沸腾,是一个临界突变现象。当一个沸腾泡核生成后,它会自行长大;但若使壁温降低,满足不了方程(3)的条件时,泡核又会缩小以至消失。因之,寻求一个方法使壁温降低而蒸发过程仍能进行就有可能使泡核沸腾受到抑制。在实验中,我们在蒸发的加热管下部入口处引入少量惰气(一般可用空气),当惰气泡与即将沸腾的液体刚一接触时,气泡与液体接触的界面上液相立刻迅速汽化,使温度下降。在实验中见到了本来在管内加热壁面上正在产生的蒸汽泡核立即消失,而且由

实验测得的加热管壁温度下降 $4-5^{\circ}\text{C}$ ^[21]。由此可见,引入惰气可明显抑制蒸发时加热壁面上的泡核沸腾,使蒸发操作的机制发生了转变,由加热管壁上的液体沸腾过程转变而为在液相主体中的气-液两相界面上的液体汽化过程。这样,即使在液相主体中气-液界面上液相汽化浓缩产生了垢质固体微粒,也会悬浮在剧烈扰动的两相流主体中,不容易粘附在壁面上形成结垢。由这一工作使我们想到,对于具有临界突变性质的过程,有可能设法改变一点条件,使过程向另一个我们所希望的方向进行。这可以说是“差之毫厘,失之千里”,是混沌现象的一种特征。这也不失为进行技术开发的一种思维路子。

这种通入惰气的蒸发,叫作“载气蒸发”,在真空蒸发中,较一般的循环蒸发器能更多的提高液体的循环速度和传热速率。它在葡萄糖溶液蒸发、丙烯酰胺溶液浓缩以及一些盐类溶液蒸发等工艺中应用取得了显著效益。

6 结语

沸腾传热是一个复杂的具有液相转变为气相的传热过程。对于泡核沸腾,要在液相中产生沸腾泡核,必须要有一个过热度。而沸腾泡核一旦形成长大,形成了一极薄的液体微层,产生了十分显著的“界面汽化热阱效应”,使传热大为增加,壁温显著降低。实际上,核沸是由众多沸腾泡核的生成、长大、脱离和酝酿沸腾泡核再形成等多个子过程组成的复杂现象。在沸腾过程中,这些子过程相互交替、演化,还与加热壁面的细微结构和特性有关。在过程的进行中,它们依照自组织的原理构成了一定的时间序列与空间序列,形成了一定的时空结构。对于这样复杂的过程,应该要作更为深入的分析,进行更为精细的实验,寻求一个更为本质的认识和思维的路子,从它的本质特征和其包含的一系列子过程相互作用、演化的过程动力学来进行研究,以求创造一个新的局面。

在文中还涉及了一些与流动沸腾有关的蒸发问题。说明在蒸发操作中引入少量惰气,可以增加传热和减少结垢。

参考文献

- [1] Shen Z. Principle of heat transfer augmentation by interfacial vaporization heat sink. Prog Nat Sci, 1999, 2(10): 730-739.
- [2] Shoji M. Boiling chaos and modeling, Heat Transfer 1998, Proceedings of 11th IHTC. Kyongju, Korea, 1998.
- [3] Nelson R, Kenning D, Shoji M. Nonlinear dynamics in boiling phenomena. J Heat Transfer Soc Japan, 1996, 35 (136):22-34
- [4] Kenning D, Yang Y. Pool boiling heat transfer on a thin plate: Features revealed by liquid crystal thermography. Int. J. Heat Mass Transfer, 1996, 39:3117-3137
- [5] Sadasivan P, Unal C, Nelson R. Nonlinear aspects of high heat flux nucleate boiling heat transfer. ASME J Heat Transfer, 1995, 117: 981-989
- [6] Nukiyama S. The maximum and minimum values of the heat q transmitted from metal to boiling

water under atmospheric pressure, *Int J Heat Mass Transfer*, 1966, 9 :1419-1433. (Translation from J Japanese Society of Mechanical Engineering, 1934, 37 :367-374)

[7] Rohsenow W. M. A method of correlating heat transfer data for surface boiling liquids. *Trans. ASME*, 1952, 74 :969-976

[8] Rayleigh, The principle of similitude, *Nature*, 1915, March 66.

[9] Buckingham J. On physically similar systems. Illustrations of the use of dimensional equations. *Phys. Rev*, 1914, vol. IV, Ser. 4.

[10] Cole R. Boiling nucleation. *Adv. Heat Transfer*, 1974, 10:86-164.

[11] Moore F D, Mesler R B. The measurement of rapid surface temperature fluctuation during nucleate boiling of. *Water AICHE J*, 1961, 7:620-624.

[12] Burdakov A P, Kuvshinov G G. Investigation of the boiling mechanism by the electrodiffusion method. *Heat Transfer-Soviet Res*, 1981, 13 (3): 101-117

[13] Kenning D B R. Wall temperature patterns in nucleate boiling. *Int J heat Mass Transfer*, 1992, 35 (1): 73-86

[14] Mallozzi R, Judd R. L, Balakrishnan N. Investigation of randomness, overlap and the interaction of bubbles forming at adjacent nucleation sites in pool boiling. *Int J Heat Mass Transfer*, 2000, 43 :3317-3330

[15] Sadasivan P, Unal C, Nelson R A. Nonlinear aspects of high heat flux nucleate boiling heat transfer, *ASME J Heat Transfer*, 1995, 117:981-989.

[16] Zeng L E, Klausner, Mei R. A unified model for prediction of bubble detachment diameter in boiling systems - I. Pool boiling. *Int J Heat Mass Transfer*. 1993, 36 (9):2261-2270.

[17] Mei R, Chen W, Klausner. Vapor bubble growth in heterogeneous boiling-I. Formulation. *Int J Heat Mass Transfer*, 1995, 38 : 909-919

[18] Bar-Cohen A, Simon T W. Wall superheat excursions in the boiling incipience of dielectric fluids. *Heat Transfer Eng*, 1988, 9 (3): 19-30

[19] You S M, Simon T W, Bar-Cohen A. Experimental investigation of nucleate boiling incipience with a highly-wetting dielectric fluid R-113. *Int. J Heat Mass Transfer*, 1990, 33 : 105-117

[20] Hospeti N B, Mesler R B. Deposits formed beneath bubbles during nucleate boiling of radioactive calcium sulfate solutions. *AICHE J.*, 1965, 11:662-665.

[21] Shen E Q, Xu W Q, Ding J et al. A study of "gas carrying evaporation". In: 3rd world congress of chemical Engineering, Tokyo 1986, 2:540-543