

# 液体内部汽化的汽化空间与拟沸腾

彭晓峰 王补宣

(清华大学热能工程系)

**[摘要]** 本文分析了几种不同的相变与沸腾传热现象,报道了实验考察到的微型槽内的液体流动沸腾,发现液体流动的空间尺度对相变与沸腾形态有重要影响,由此提出液体内部汽化的“汽化空间”与“拟沸腾”两个全新的重要概念,分析讨论了小尺度液体的相变传热机理,并对“拟沸腾”过程的可能机制及物理模型尝试作出定性分析。文中还引用新概念对核沸腾的传热机制作了某些新的解释。

## 一、引言

随着尺度的微小化,传统的宏观传热理论受到了挑战,而近年来微和毫微尺度传热现象研究的进展,也促使形成新的传热研究领域。直接的诱因是某些高、新技术的发展,如高速计算机、生物技术、材料加工、航天热控制等。Yang 和 Zhang<sup>[1]</sup>对这种研究趋向的现状和最新进展作了综述,提出这将是未来热科学及传热传质学研究发展的热点之一。

微尺度管槽内单相流体的流动与传热实验研究已发现了某些不同常规的特性<sup>[2-4]</sup>。有相变的微小尺度传热目前见诸文献报道的却不多,而且概括起来,已有的研究可大致分为三类:(1)微型热管,(2)微小液滴的对流与蒸发,(3)具有微型结构表面的强化沸腾。至于微型管槽内的流动沸腾以及微小尺度液体内部汽化、沸腾机理的分析和考察,尚未见到研究的正式报道。可以预计,微小尺度液体内部或者微小型管槽内的液体流动沸腾也会呈现独特的特性与规律。

最近,作者<sup>[5]</sup>实验观察了水在  $0.6 \times 0.7\text{mm}$  的矩形槽道内的流动沸腾特性。通过对测试数据的分析发现,微形槽内过冷液体流动沸腾时的沸腾曲线上没有明显的部分核沸腾工况,一开始沸腾便能进入旺盛核沸腾,而且核沸腾传热得到了很大强化,所需壁面过热度仅只  $3-8^\circ\text{C}$ ,远低于通常的内部流动沸腾。进一步的可视化观察则惊人地发现,按传统的沸腾曲线猜测本应处于旺盛核沸腾的微型槽道内的流动沸腾,却并没有任何气泡生成的脱离,即便借助于数十倍的放大镜也同样观察不到气泡的存在。这些使人更加坚信微小尺度的沸腾会有许多新奇的特性和实验现象。

本文试图分析几种已在实验中观察到的沸腾与相变现象,由此提出液体内部汽化的“汽化空间”与“拟沸腾”两个新概念,尝试用新的观点来解释某些沸腾传热机理。

本项研究接受国家自然科学基金、国家教委回国人员启动基金的资助。

本文于1993年1月29日收到。

120461

## 二、液体尺度对沸腾与相变形态的影响

实际上过去几十年对沸腾传热以及沸腾与两相流研究中,人们已注意到了尺度对传热的影响,但并未有意识地去注意液体本身尺度对沸腾形状的影响。例如,已公认:池内加热面温度高于液体饱和温度一定量时会出现核沸腾,高于 Leidenfrost 温度时则变为膜沸腾;对于加热面上的液滴,当表面温度高于 Leidenfrost 温度时会出现球状跳跃,液滴不能接触并润湿表面,即出现著名的 Leidenfrost 现象。也知道,表面温度高于饱和温度、而又低于 Leidenfrost 温度时,要视液滴大小而会有不同的现象:液滴足够大,比如说可认为是个小液池,肯定出现核沸腾;而在液滴较小时,实验通常所观察到的是液滴表面蒸发和内部出现微结构的对流状态<sup>[6]</sup>,并未见到滴内和液、固界面处出现汽泡生成和存在。液膜也有类似的情况:液膜足够厚,出现与池内加热沸腾时的同样现象;液膜较薄时,也不会观察到核沸腾形态。由此,我们发现一个疑问:静止或流动的液体尺度是否要大到一定程度才会出现液体内部汽化或相变?

图 1 是熟知的管内流动沸腾时,流型与沸腾传热形态典型发展变化过程的示意图<sup>[7]</sup>。这种沸腾曲线表明,沸腾首先要从部分过冷核沸腾发展到旺盛的饱和核沸腾,液流在这一阶段始终充满整个流道,在管壁表面上的一些核化中心生

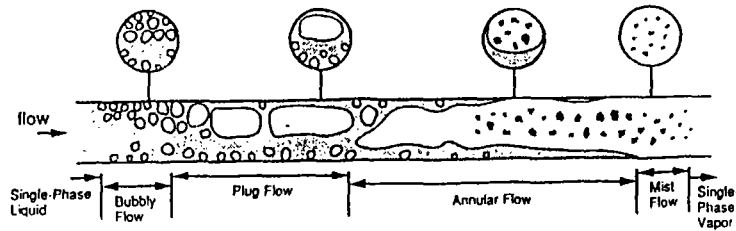


图 1 流型与沸腾传热形态典型发展

成汽泡、长大并脱离进入液流区,又被过冷液体所冷凝,把潜热输给液流。随着液体温度的提高,达到饱和后,进入液流区的汽泡将继续保持为汽态,并逐步积聚生成大汽泡而形成柱塞流。此时,液流区被挤近壁面,液流通道缩小,汽泡的生成与脱离就少多了,而大汽泡界面蒸发却增加。在液体环状流的流型区,只有一层较薄的液膜沿管壁壁面流动,液流区内无汽泡存在,是为常说的“对流蒸发”。这就清楚地表明,液流区尺度的变化将直接影响到相变时液流内部是否出现汽泡。然而,以往对这些实验事实,人们并没有从液流空间尺度这一角度去认识。

现在再来考察对微型槽内液体的流动沸腾实验。图 2 示出了进行这种可视化观察的实验段结构。微型长方形槽的尺寸为  $0.6 \times 0.7 \text{ mm}$ ,具体加工结构以及实验方法与步骤已见文献<sup>[5]</sup>。所观测到的水的典型流动沸腾曲线示于图 3。当加热负荷与壁温达到足够大,也即进入图 3 中沸腾曲线的核沸腾区时,在液体进口端液体联箱 A 中,可观察到通电加热的微槽表面上(图 2 中处于联箱内的垂直面)有小汽泡生成。出口端联箱 B 中,不但加热微槽板垂直面上有汽泡出现,整个联箱内都有大量汽泡。而微型槽内用数十倍的放大镜也未观察到有任何汽泡存在,只是当液体流经微槽后,刚一离开微槽出口处,便形成一串串汽泡珠,并以较大的汽泡由出口流出。

实验所观察到的,确实表明液体占有的空间尺度对液体内部汽化有着非常重要的决定性意义。实验中的联箱 A 和 B 尺寸约为  $14 \text{ mm}(\text{高}) \times 16 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,足以使液体内部或加热表面产生汽泡。微型槽内的尺寸太小,没有产生汽化的空间,即使在核沸腾区也无法生成汽泡。仔

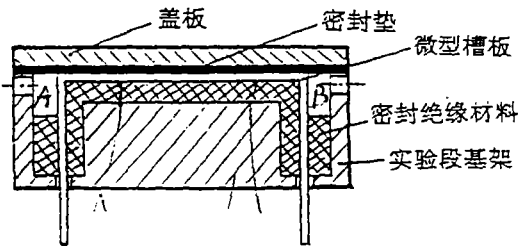


图2 实验段安装结构

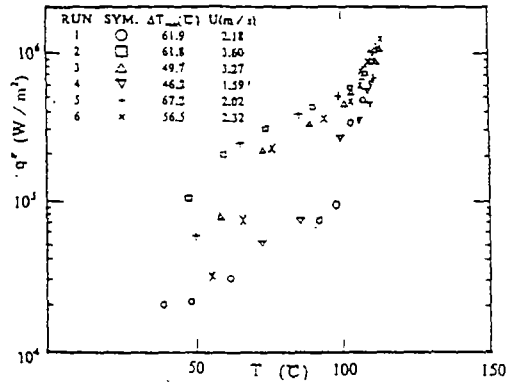


图3 典型实验结果

细地观察还发现,微型槽内流出的热流体即可在微槽出口或出口处加热面上、也可直接在联箱液体内部产生气泡。这足以表明液体已被加热到可汽化的程度,只是受空间的限制而未能汽化,一旦有足够的尺度液体便可立即汽化、产生气泡或在界面上蒸发。

### 三、内部汽化的“汽化空间”与“拟沸腾”

上述实验观察与分析表明,液体内部或加热表面要产生并存在气泡,除了有通常所说的过热器和汽化核心等条件外,还要求液体本身有一定尺度。为此,把液体内部产生汽化并形成气泡所需要的最小液体尺度简称为“汽化空间”。只有液体尺度大于所必需的“液化空间”时,液体内部才会产生沸腾、出现气泡。显然,汽化空间的大小要受液体边界所施加条件的影响;具有自由液面的液体或液滴,将主要取决于液体的表面张力和其他物性参数;而管槽内流动液体不只受物性参数影响,更要由流道大小来决定似的。至于封闭刚性容器内所充满的液体则是另一种情况,不属于这里讨论的对象。

实验与理论研究已反复证实,象液滴的蒸发、静止或流动液膜的对流蒸发等无沸腾的相变传热过程,其传热效果不但不比旺盛核沸腾低,而且更好。用表面蒸发潜热及液体显热吸收也无法解释这些过程的高传热率,究竟是什么机理至今仍无定论。如果说具有自由界面的液滴和液膜尚可用表面蒸发与内部对流的机理作不完备的粗略说明,那么,前面描述的微型槽内的实验结果就更难理解。处于核沸腾曲线时,热壁面只有  $10^\circ C$  以内的过热度,液体过热度还要低一些,依赖显热吸收完全不可能达到  $10^6 W/m^2$  量级的高传热率。为此,我们提出一种称之为“拟沸腾”传热的概念。

所谓的“拟沸腾”过程包括两层含义:(1) 液体已具备通常核沸腾的条件,但不产生内部汽化并形成气泡的传热过程;(2) 当这种已被加热的液体进入具有超过所需汽化空间的尺度处时,液体内部将立刻汽化而生成气泡或在自由表面上蒸发。处于拟沸腾过程的液体无疑是不稳定的热力学非平衡态。这种拟沸腾传热假设的机制是:

(1) 非平衡态液体具有与通常平衡态非常不同的热物性参数,比热远高于平衡态时的值,可以吸收并贮存很大的能量而并不汽化,只有达到自由表面或满足汽化空间条件的尺度处才汽化,高传热强度主要靠液体吸热传送;

(2) 在液体内部,尤其是加热面上,实际上有无数用普通方法观察不到的微型汽泡产生,促使液体向非平衡态过渡,大大增强了液体内部的吸热能力,使拟沸腾传热明显高于通常核沸腾传热。

这种设想有可能统一解释前面所提到的沸腾、液膜和液滴蒸发等几种相变传热现象。拟沸腾的要点是热力学非平衡性,具体来说是由所导致的热物性参数变化或微型汽泡的生成。因此,液体边界将影响拟沸腾强度,例如:液膜表面较之液滴对流体限制较小,对非平衡性影响较小,拟沸腾强度也相对较小;液滴在表面张力作用下形成较紧密的边界,拟沸腾强度加大,所以传热比液膜更好;微型槽内边界限制更强烈,偏离平衡态的程度更大,拟沸腾的过程就更明显。

#### 四、对核沸腾传热的重新理解

尽管几十年来已对核沸腾提出过众多的传热机理模式,但至今仍没有统一的定论。人们已经逐步认识到这种传热过程中的潜热传递虽占据能平衡中的主导地位,然而频繁的汽泡生长和脱离所产生的对流,特别是微对流对核沸腾传热过程却有着重要的贡献,而对流所带走的显热传递又并不能构成高传热率的主要原因。

无论是池内核沸腾还是流动核沸腾,人们已观察到在汽泡生成后汽泡底有一个液体薄层附着在壁面(如图4所示)。薄液膜是过热的,比汽固接触时的导热能力强得多,且膜内不可能生成通常可观察到的汽泡。也就是说,在核沸腾发生的同时,也会伴随有成为尚未脱离前汽泡底垫的薄液膜层内的拟沸腾发生,其吸热量远高于通常液体的显热吸热。这种贮存有很大能量的液体将随着汽泡生长、脱离所产生的微对流而被带走,成为传热的媒体之一。拟沸腾液体所带走的热量比通常认为的液体对流所带走的显热大得多,这也许是拟沸腾液体对流使核沸腾具有高传热率的潜在因素之一。

图5比较了微型槽内水的流动沸腾曲线测试结果<sup>[6]</sup>和通常管内水的流动沸腾的实验结果<sup>[8]</sup>。可以清楚地看到,微型槽内的流动沸腾和通常管内流动沸腾相比,得到了很大程度的强化。既然微型槽内的实验不是真正的核沸腾,而是一个拟沸腾过程,而且比通常管内核沸腾过程时所伴随的薄液膜热层内的拟沸腾强烈得多。由拟沸腾的概念似能较好地解释微型槽内流动沸腾传热的强化效果,也能帮助说明通常核沸腾的传热机理。

#### 五、可以进一步开发的研究工作

如上所述,汽化空间和拟沸腾的概念有可能较好地统一解释诸如液滴、液膜及微型槽内流动沸腾等相变传热现象,同时也有可能对核沸腾的传热机理提供较好的补充作用。当然,任何

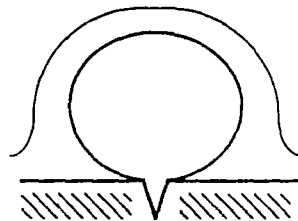


图4 汽泡下的薄液层

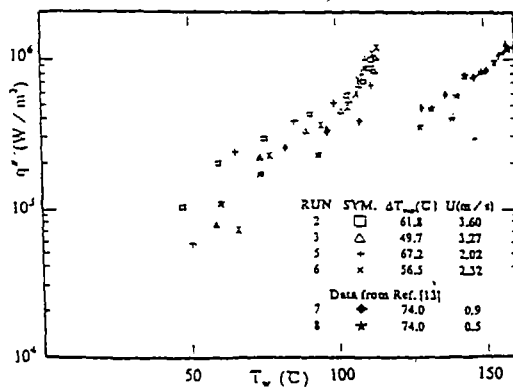


图5 微型槽与圆管内实验结果比较

新概念的引进和新物理模型的建立,都需要更多的实验检验,并在经受考验中充实和发展,这将带来一些新的有意义的研究课题。

1. **汽化空间和拟沸腾特性的研究** 汽化空间的特性及影响因素还有待于深入的实验观察、理论分析和定量描述。而拟沸腾可能是解释相变传热机理的一个全新的重要概念,拟沸腾过程特性直接影响到相变传热的强度。因此,值得对拟沸腾过程的流体流动特性、传热机理、影响拟沸腾的参数和物理量、拟沸腾过程流动和传热的数学描述与定量分析开展研究。

2. **用新概念分析研究相关沸腾等相变现象** 实际上,流体尺度大小对其不同沸腾形态和相变过程都同样有影响,可能不同程度地存在着拟沸腾现象,可以引用新的物理模型和机制对它们作进一步定性和定量的分析研究。

3. **热力学基础研究** 汽化空间与拟沸腾的核心是热力学非平衡性,这与经典平衡态热力学的概念和理论不相适应,而要转变观念到非平衡态热力学。汽化空间是从平衡态到非平衡态的分界线,研究沸腾时流体的非平衡热力学特性是认识拟沸腾过程传热机理的关键。处于非平衡态的流体热力学性质势必会有质的变化,非平衡态流体热力学性质的研究将是有意義的未来研究中的重要内容,并带来崭新的测试方法和技术难题。

总之,新的概念和物理模型会给相变传热研究提供新的内容,从而有可能形成独特的理论体系。

## 六、结束语

1. 本文在对微型槽内流动沸腾实验考察的基础上,发现液体尺度对相变或沸腾形态有重大影响,由此提出液体内部汽化的“汽化空间”和“拟沸腾”两个新概念。

2. 用新的概念重新考察了核沸腾、液膜和液滴蒸发的传热过程,有可能得出统一的机理解释。

3. 提出了有待开展的崭新研究设想,对相关科学技术的发展将起相应促进作用。

## 参考文献

- [1] W. J. Yang and N. L. Zhang, Micro-and nano-scale heat transfer phenomena research trends, *Transport Phenomena Science and Technology* 1992, pp. 1-15, Higher Education Press, Beijing, 1992.
- [2] D. B. Tuckermann and R. F. W. Pease, High-performance heat sinking for VLSI, *IEEE Electron Device Letter*, Vol. EDL-2, No. 5, pp. 126-129, May 1991.
- [3] D. B. Tuckermann and R. F. W. Pease, Optimized convective cooling using micro-machined structure, *J. Electrochemical Society*, 129(3), C98, March 1992.
- [4] J. Pfahler, J. Harley, H. H. Bau and J. Zemel, Liquid and gas transport in small channels in microstructures, *Sensors, and Actuators-DSC-*, Vol. 19, pp. 149-158, ASME, N. Y., 1990.
- [5] 彭晓峰,王补宣,微型槽内流动沸腾的实验研究,中国工程热物理年会第八届年会, No. 923038, 北京, 1992.
- [6] N. L. Zhang, B. X. Wang and Y. Xu, Thermal instability of evaporating drops on a flat plate and its effect on evaporation rate, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 30(3):469-478, 1987.
- [7] J. G. Collier, *Convective Boiling and Condensation*, McGraw-Hill, Inc., 1972.
- [8] 贺建刚,关于高分子聚合物添加剂对于较高流速下的过冷核沸腾强化的实验研究,清华大学硕士论文,北京,1988.

## THE EVAPORATING SPACE AND THE FICTITIOUS BOILING FOR INTERNAL EVAPORATION OF LIQUID

Peng Xiaofeng      Wang Buxuan

(Thermal Engineering Department, Tsinghua University)

### Abstract

Several phenomena for liquid-vapor phase change and boiling heat transfer have been analysed in this paper. It was found from the experiments on the liquid flow boiling in microchannels that the space scale for the liquid flow may have important effects on phase change and corresponding mode of boiling. Hence, we propose two new concepts—the “evaporating space” (i. e., the necessary space for evaporation) and the “fictitious boiling”. We discuss the physical mechanism for liquid-vapor phase change on very small scale of flow space and try to analyse qualitatively the possible “fictitious boiling” and its physical model. Meanwhile, using the supposed new concept, we have proposed some new explanations on the mechanism of flow film boiling.

## 1993 年国家自然科学基金资助的前 20 所高等院校

金额单位: 万元

单 位 名 称	资 助		获 准 率	
	项 数	金 额	项数(%)	金额(%)
清华大学	119	746.60	31.9	24.6
北京大学	112	707.77	50.0	29.0
南京大学	63	411.10	36.0	25.4
复旦大学	58	346.50	36.9	20.5
北京农业大学	54	339.10	31.6	19.6
浙江大学	54	312.65	23.8	17.6
北京医科大学	56	307.70	26.7	18.3
中国科学技术大学	50	285.80	34.0	19.5
南开大学	46	267.74	30.1	18.8
天津大学	40	249.00	18.7	12.8
北京航空航天大学	35	225.8	26.5	18.7
中国人民解放军第四军医大学	34	211.50	17.2	9.5
武汉大学	42	210.10	25.6	14.9
西安交通大学	35	209.20	23.6	16.4
华中理工大学	37	208.40	19.9	13.0
上海医科大学	36	199.60	15.1	10.9
厦门大学	27	187.60	22.9	19.3
东北大学	25	187.50	28.4	24.2
上海第二医科大学	35	187.20	21.2	15.6
哈尔滨工业大学	31	186.10	20.1	17.8

(不含重点项目经费, 统计数据截止至 1993 年 11 月底)

(综合计划局供稿)