第 34 卷 第 3 期 力 学 进 展 Vol.34 No.3
2004 年 8 月 25 日 ADVANCES IN MECHANICS Aug.25, 2004

微尺度相变传热的关键问题*

甘云华 [1,2] 徐进良 [2] 周继军 [1,2] 陈 勇 [2]
[1] 中国科学技术大学热科学与能源工程系，合肥 230026
[2] 中国科学院广州能源研究所，广州 510640

摘 要 由于航天、信息、生物等高技术的发展，微尺度热物理问题得到了广泛的重视. 作为一种非常高效的能量转换方法，微尺度相变传热的研究远未成熟. 本文对微尺度相变传热作了较为系统的综述，论述了控制微尺度相变传热的准则数，分析了沸腾起始点、流型、压降、传热系数、不稳定性、临界热流密度六大关键问题. 建议从实验和理论两个方面对微尺度相变传热进行深入的研究，以进一步理解其机理，为微蒸发器的设计、制造及运行提供科学依据和指导.

关键词 微尺度，沸腾，流型，不稳定性，临界热流密度

1 引 言

相变是自然界中最普遍的现象之一，它是指工质在固、液、气三相或其中两相之间的转换，伴随有潜热的吸收或释放. 相变传热和单相传热最重要的区别在于能量转换可以发生在均匀的温度条件下. 时至今日，人类对相变现象进行了长达几十年的研究. 从微观的角度看，相变是由于与工质相接触的边界条件改变后，引起分子间距的变化，而导致分子间势能及时均动能的变化，从宏观的角度看，发生了能量的转化. 理论上，分子动力学方法可以在无任何假设的条件下解决相变问题. 遗憾的是目前计算机所能处理的分子个数太有限了，同时也由于描述分子间势能方程方面的困难，使得分子动力学在真正揭示相变现象时受到很大的限制，因而相变问题大多依赖于实验. 1960 年之前的相变传热研究主要针对锅炉传热管. 第二次世界大战后，人类开辟了核能和平利用的新天地. 由于燃料棒束极高的热流密度，引发了人们对相变研究的热潮. 在研究成果方面，获得了诸如 Chisholm 公式 [1] 及核态沸腾传热系数 [2]. 对相变中的其它问题，如不稳定性现象，临界热流密度等也进行了不少的研究 [3].

随着制冷工业的发展，逐渐采用了小直径的毛细管. 这种管径的尺寸一般在 3mm 左右. 随着空间、信息及生物等高技术的发展，紧凑式蒸发器的研制得到了广泛的重视. 除此之外，微尺度相变技术已被成功地应用于生物芯片的微泵、打印头的设计中. 在这些装置中，当量直径在 200 μm 及以下的通道被称为微通道 (microchannel). 因而 200 μm 当量直径将成为近几年微尺度蒸发器所感兴趣的尺寸. 然而，由于表面张力的作用，3 mm 以下当量直径通道的相变行为已与大通道内明显的不同，因而 200 μm 到 3 mm 间被称为细通道 (minichannel). 这里应特别说明的是微尺度的概念对于所研究的问题具有很大的相对性. 对于单相流，其特殊性，如分子力效应，电粘性效应，要在至少 100 μm 以下当量直径的通道内才能显现出来，因而研究 100 μm 以上当量直径的单相流问题失去了明显的意义. 但对于相变问题，如上所述，在 3 mm 当量直径以下时，表面张力的作用已非常显著.

200 μm 及以下当量直径的微通道的相变传热需要非常纯净的工作液体，除此之外，在该尺寸范围内，常规加工方法，如电火花、线切割等所获得的最好精度在几十微米，从而使得所得实验结果被加工误差所带来的不确定度所淹没，因而建议采用微电子机械系统 (microelectro mechanical system, MEMS) 加工工艺及技术，其通道的粗糙度一般在 ±1 μm 之内. 综上所述，按当量直径的范围，将相变传热的通道尺

收稿日期：2003-10-20，修回日期：2004-04-21
* 广东省自然科学基金 (32700) 资助项目

寸划分如下：

大通道： ⩾3 mm

细通道： 200 μm ~ 3 mm

微通道： 10 μm ~ 200 μm

本文主要就微、细通道内的相变传热的沸腾起始点、流型、压降、传热系数、不稳定性、临界热流密度六大关键问题进行了比较全面和系统的综述.

2 微尺度相变传热的准则数

在物理现象中，物理量之间存在着固有的内在联系. 单个物理量不是独立起作用的，而要受到支配这个物理现象的客观规律性的制约. 这种客观规律可以理解为问题的数学描写，也可以理解为物理量量纲之间的制约关系. 从理论上揭示这种物理量间的内在联系，将使得所要求取的函数关系式的变量大幅度减少，即变成为数不多的几个无量纲物理量群 (称为准则数) 的函数关系式. 这种关系式称为准则关系式或关联式. 由于对流换热问题的复杂性，直接通过纯理论推导的方法来获取关联式，通常难度很大. 因此，广泛采用在理论指导下的实验研究方法，将众多的影响因素归并成为数不多的几个无量纲准则数，通过实验确定所求解问题的具体实验关联式. 根据所求解问题的不同，分别称为对应问题的关联式，如压降关联式、传热关联式等等.

对于光滑管内充分发展的、稳定的汽液两相流，表征流动的参数是 ρ_L, ρ_G, μ_L, μ_G, σ, D, g, θ, ϕ, U_{LS}, U_{GS} (各项意义分别为液相密度、汽相密度、液相粘度、汽相粘度、表面张力、直径、重力加速度、管轴线与水平面的夹角、接触角、液相表观速度、汽相表观速度). 上述参数整理成 8 个无量纲准则数，可以描述相变系统中各种力对质量、动量及能量传递影响的相对重要性.

爱特威数 (Eotvos)

$$Eo = \frac{(\rho_L - \rho_G) g D^2}{\sigma} = \frac{\text{浮升力}}{\text{表面张力}} \tag{1}$$

液相表观韦伯数 (Weber)

$$We_{LS} = \frac{u_{LS}^2 D \rho_L}{\sigma} = \frac{\text{液相惯性力}}{\text{表面张力}} \tag{2}$$

汽相表观韦伯数 (Weber)

$$We_{GS} = \frac{u_{GS}^2 D \rho_G}{\sigma} = \frac{\text{汽相惯性力}}{\text{表面张力}} \tag{3}$$

液相表观雷诺数 (Reynolds)

$$Re_{LS} = \frac{\rho_L U_{LS} D}{\mu_L} = \frac{\text{液相惯性力}}{\text{黏性力}} \tag{4}$$

汽相表观雷诺数 (Reynolds)

$$Re_{GS} = \frac{\rho_G U_{GS} D}{\mu_G} = \frac{\text{汽相惯性力}}{\text{黏性力}} \tag{5}$$

液相表观弗劳德数 (Froude)

$$Fr_{LS} = \frac{U_{LS}^2}{gD} = \frac{\text{液相惯性力}}{\text{重力}} \tag{6}$$

汽相表观弗劳德数 (Froude)

$$Fr_{GS} = \frac{U_{GS}^2}{gD} = \frac{\text{汽相惯性力}}{\text{重力}} \tag{7}$$

毛细常数 (Capillary)

$$Ca = \frac{\mu_L U_{LS}}{\sigma} = \frac{\text{黏性力}}{\text{表面张力}} \tag{8}$$

上述 8 个无量纲准则数对于大尺度及微尺度相变传热都是适用的. 特别的，对于微尺度相变传热而言，表面张力起相对主要的作用，因而 Eo ,We_{LS}, 及 We_{GS} 这 3 个无量纲准则数最为重要. 当 Eo, We_{LS}, 及 We_{GS} 均小于 1 时，相对于表面张力，重力与惯性力变得很不重要. 当 $Re_{LS} < 1$ 时，意味着与黏性力相比，惯性力较小. 在毛细管流中，相对于浮升力和惯性力，表面张力和黏性力起重要作用这一原理在工程上有许多应用. 对于本文所讨论的微通道，$Eo \ll 1$, 两相韦伯数之中的一个至少在 $1 \sim 10^2$ 的量级，且 Re_{LS} ⩾1. 因而，尽管表面张力比重力更重要，惯性力的影响也是重要的. 在微重力条件下也存在类似的情况，因而导致微尺度两相流与微重力两相流两类现象的相似性. 在这两类系统中，相变现象与装置的倾角无关.

3 沸腾起始点

沸腾传热是以汽泡形式进行的，汽泡的成核、形成、生长及其运动方式，便构成了汽泡动力学的主要内容. 在微尺度相变过程中，沸腾起始点规定了汽泡产生所需要的热流密度、壁面过热度等必要条件，是区分单相液体流动与汽液两相流动的界限.

Peng 等 [4,5] 发现在高热流密度下的微尺度沸腾系统中，几乎没有发现汽化核心. 并提出了 “拟沸腾” 的概念来解释这种物理现象. 但是后来 Kandilikar 等 [6,7] 在当量直径为 1 mm 量级的通道中进行了类似的工作，发现了直径仅为 10 μm 大小的汽泡. 可以看出，结合高分辨率的显微镜，采用高速摄影技术来鉴别沸腾起始是十分必要和有效的.

Hapke 等 [8] 对内径为 1.5 mm 的垂直蒸发管中去离子水的沸腾传热特性进行了实验研究. 采用红外热成像方法测量了微管外壁温度的轴向分布, 发现由于压力及质量流速的强烈脉动导致了壁温的脉动. 并基于实验数据提出了一个半经验模型来预测沸腾起始点及壁面过热度.

Ghiaasiaan 和 Chedester[9] 对微管 (直径在 (0.1 ～ 1) mm 范围内) 中水的沸腾起始点的数据进行了分析, 发现宏观尺度下的沸腾起始模型低估了微管中沸腾起始点处的热流密度. 假设热毛细力在抑制微小汽泡的成核方面起到至关重要的作用, 推导出了一个计算以水为工质的冷却微管中沸腾起始点处热流密度的模型.

假设受热通道在给定的入口温度及热流密度下工作, 图 1 表示受热通道的压差 (ΔP) 与质量流速 (G) 之间的关系. 按不同的传热机制可划分 4 个区域, 即单相液体区、壁面沸腾区、主流沸腾区及过热蒸汽区. 在主流沸腾区, 又包含欠热沸腾区及饱和沸腾区. 图 1 中存在 3 个关键点: ONB, OSV 及 OFI.ONB 为核态沸腾起始点 (onset of nucleation boiling), OSV 为显著空泡起始点 (onset of significant void), OFI 为不稳定流动起始点 (onset of flow instability). 对于大尺度相变传热, ONB 及 OSV 点可通过光学可视化或连续测定空泡份额随轴线的分布来获得. 在 ΔP-G 曲线上, 当实测的 ΔP-G 与纯单相液体的 ΔP-G 曲线开始发生分离的点即为 ONB 点, OFI 为 ΔP-G 曲线的最低点. 作为近似, 常将 OFI 点也处理成 OSV 点, 以便也可通过 ΔP-G 曲线的方法来获得 OSV 点.

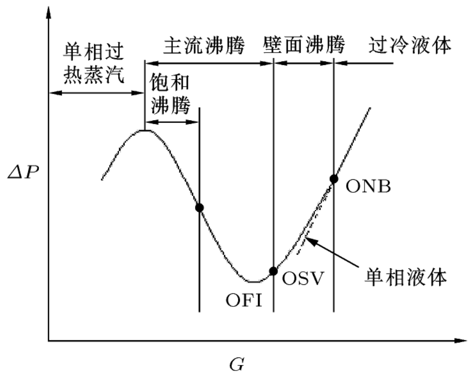


图 1 均匀加热通道内压差与质量流速的关系曲线 [9]

在微尺度条件下, 非常难以准确判定 ONB 、OSV 及 OFI 点间的界限, 特别是当核化汽泡直径与通道直径处于同一个量级时, 尤其如此. 一旦满足汽泡核化产生的临界条件, 小直径汽泡非常容易聚合而形成汽弹, 在通道的横截面上, 其空泡份额为 1, 不易形成小汽泡弥散在液体主流的情况.

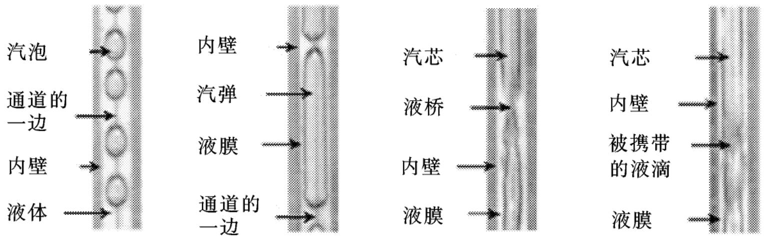
鉴于此, Qu 和 Mudawar[10] 提出了沸腾起始点 (boiling incipience) 来代替以上三者. 对含有 21 个矩形微通道 (每个微通道宽 231 μm, 高 713 μm) 的热沉中去离子水的起始沸腾热流密度进行了实验测量. 通过显微镜进行观察后发现, 汽泡在微通道出口处壁面上最先产生, 并由此确定沸腾起始点. 沸腾起始点包含了汽泡生长和汽泡脱离两个过程. 大尺度下的 ONB 不足以描述微通道内的沸腾起始点. 他们考虑到汽泡在矩形流道内 4 个侧面及角落区域内汽泡形成的复杂性, 提出了一个模型来预测沸腾起始热流密度. 并发现此模型与其实验结果吻合良好.

总之, 从实验方面看, 目前还未能真正地观察到微通道中第一个汽泡的产生与脱离; 从理论方面看, 大通道中的模型不适用于微通道, 少数研究者基于自己微通道的实验数据所提出的模型的适用范围还有待拓宽.

4 流 型

流型表征着两相系统中的流动结构, 它受力学因素所制约. 但反过来极大地影响传热, 两相系统中的压降、传热系数、临界热流密度等均与流型息息相关. 对于大通道中的流型已进行了深入的实验及理论研究, 但对于直径在 2 mm 以下的毛细管及更小尺寸的微通道中的流型研究相当少.

在这些少量的研究中, 主要是集中在绝热通道中空气 - 水等多组份的气液两相流流型的研究. 如 Xu 等 [11] 在垂直矩形通道内进行了空气 - 水两相流的实验研究. 三种实验段的总长均为 260 mm, 通道宽均为 12 mm, 而通道高分别为 0.3 mm, 0.6 mm, 1.0 mm. 他们在通道高为 0.6 mm, 1.0 mm 的通道内发现了泡状流、弹状流、混状流及环状流; 而在通道高为 0.3 mm 通道内的流型与前两者存在着巨大的不同, 分别是帽式泡状流, 弹状 - 液滴流, 混状流, 环状 - 液滴流. Zhao 和 Bi[12] 在等边三角形通道内进行了空气 - 水垂直上升两相流的实验研究. 实验所用的通道的当量直径分别为 2.886 mm, 1.443 mm, 0.866 mm. 采用高速动态分析仪对两相流的流型进行了可视化测量. 实验发现, 在大直径垂直圆管中所出现的流型, 如分散泡状流、弹状流、混状流及环状流, 在较大的两种通道 ($D_e = 2.886$ mm, 1.443 mm) 中也被观测到. 然而, 在最小的通道 ($D_e = 0.866$ mm) 内, 却没有发现分散泡状流. 在最小的通道 ($D_e = 0.886$ mm) 内所得到的典型的流型, 如图 2 所示. 其中, (a) 为毛细泡状流, $U_{LS} = 0.1$ m/s, $U_{GS} = 0.2$ m/s; (b) 为弹状流, $U_{LS} = 0.1$ m/s, $U_{GS} = 0.4$ m/s; (c) 为混状流, $U_{LS} = 0.1$ m/s, $U_{GS} = 5.5$ m/s; (d) 为环状流, $U_{LS} = 0.1$ m/s, $U_{GS} = 20$ m/s.



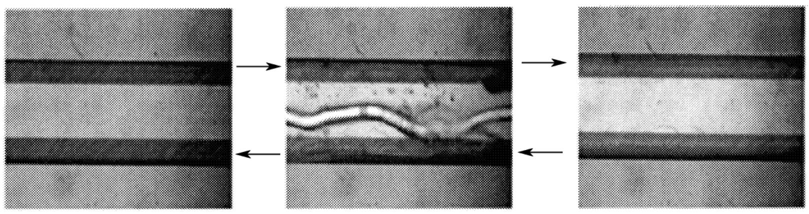
(a) 分散泡状流　(b) 弹状流　(c) 混状流　(d) 环状流

图 2 当量直径为 0.886 mm 等边三角形通道中空气 - 水两相流流型 [12]

从上述几位研究者对绝热通道中空气 - 水两相流的实验结果可以看出, 随着当量直径的减小, 表面张力的作用越来越显著, 从而导致了流型出现一些新的特点. 然而, 到目前为止, 在受热通道中两相流流型的研究方面却非常少.

Wu 和 Cheng[13] 对梯形截面并行硅微通道 ($D_e = 82.8\,\mu$m, $158.8\,\mu$m) 中水的沸腾流动, 进行了可视化与压力、温度等动态参数测量的同步实验研究. 借助于显微镜与高速摄影系统, 观察到了泡状流、弹状流、混状流及其它特殊的流型. 他们 [14] 还对梯形截面硅微通道 ($D_e = 186\,\mu$m) 中去离子水沸腾传热进行了实验研究. 在热流密度为 22.6 W/cm^2, 质量流速为 11.2 g/cm^{2}s 时, 由可视化测量发现一种特殊的两相流流型: 液相 / 两相 / 汽相间歇流. 图 3 表示一个完整的流动周期内流型的间歇性变化, 其中图 3(a) 表示液相流动阶段, 图 3(b) 表示汽液两相流动阶段, 图 3(c) 表示汽相流动阶段.

Hetsroni 等 [15] 在 3 种三角形微通道 (D_e = $103\,\mu$m, $129\,\mu$m, $161\,\mu$m) 中进行了汽 - 水两相流的实验研究. 他们按流动机制将汽液两相流分成低热流密度和高热流密度两种情况. 在低热流密度下, 并联通道的部分区域被液相所占据, 另外区域被汽相所占据. 整个通道壁面的平均温度低于水的饱和温度, 在壁面上产生汽化核心. 尺寸在 $30\,\mu$m 量级上的小汽泡形成、增长并向微通道下游掠过. 在高热流密度下, 所有通道中均出现类似周期性的蒸干和液相重新进入通道的现象, 并且汽泡会在入口联箱处聚集 (即两相回流现象).



(a)　(b)　(c)

图 3 液相 / 两相 / 汽相间歇流 [14]

如前所述, 流型研究的重要性不言而喻. 由于实验条件所限, 大多数学者进行绝热条件下双组份两相流流型研究. 而受热且相变条件下的两相流流型的研究较少, 在这有限的研究中发现了一些十分有趣的现象及一些特殊的流型, 其形成机理还有待进一步探明. 建议采用显微与高速摄影技术, 对微尺度相变条件下两相流流型进行光学可视化测量.

5 压　降

压降对于微蒸发器的设计具有重要意义, 它决定了液体循环系统所需的压头. 减小通道的尺寸可以获得很高的传热系数, 但与此同时却使得压降增加、压力脉动增大. 对于大通道中的两相压降, 采用现有的压降关联式或模型来进行预测, 其误差为 ±30% 左右. 而将其用于微通道时, 其误差则更大.

由于两相流的复杂性及考虑到工业应用的方便, 通常采用半理论的压降关联式来对两相压降进行估计. 这些压降关联式的共同特点是所有的变量均采用其时均值, 假设总压降由摩擦压降、加速压降和重位压降 3 部分组成, 并将两相压降表示成单相摩擦压降与两相倍率乘积的形式, 从而将两相压降的问题转化为确定两相倍率的问题. 比较经典的有: 基于均相模型的计算方法; 基于分相模型的 Lockhart-Martinelli 方法、Chisholm 方法; 还有针对微通道提出的 Tran 方法 [16] 等.

Zhang 和 Koo[17] 在硅微通道 (单通道, 横截面尺寸为 $50\,\mu$m $\times 70\,\mu$m) 中进行了水沸腾两相压降的

实验研究. 并将实验结果与 4 个压降关联式进行对比, 发现此 4 个压降关联式均不能对本实验结果进行较好的预测. 发现采用 Lockhart-Martinelli 关联式或采用均相模型时, 比实验结果大一倍以上; 采用 Tran 方法或 Chisholm 方法时, 比实验结果大 10 倍以上.

Wen 和 Kenning[18] 在垂直细通道 (横截面尺寸为 2 mm ×1 mm) 中进行了水沸腾两相压降的实验研究, 并将实验结果与 4 个压降关联式进行对比. 发现采用 Lockhart-Martinelli 关联式时, 不确定度为 35%; 采用均相模型时, 不确定度为 50%; 采用 Tran 方法时, 不确定度为 100%; 采用 Chisholm 方法时, 不确定度为 300%.

Pettersen[19] 在并行铝细通道 (25 个通道, 0.8 mm 内径, 0.5 m 总长) 中进行了 CO_2 沸腾两相流实验. 并将其两相摩擦压降的实验数据与 Tran 等所得出的压降关联式及 Zhang 和 Webb[20] 所得出的压降关联式 (均是针对细通道的) 进行比较, 发现平均偏差分别为 80% 和 40% 左右. 由此可见, 工质特性不同, 所造成的偏差是很大的.

综上所述, 利用现有的压降关联式对微尺度两相压降进行预测存在着较大的偏差. 另外在沸腾条件下可能产生压力脉动和回流现象, 而当前还没有任何模型能对此类现象进行预测.

6 传热系数

不管是对于大尺度的蒸发器, 还是对于微尺度蒸发器, 传热系数的计算都是必不可少的. 不少学者在这方面作了许多重要的工作, 并根据不同的传热机制给出了不同形式的传热关联式或模型.

Tran 等 [21] 以 R-12 为工质, 在内径为 2.46 mm 的单管和当量直径为 2.40 mm 的矩形单通道内进行沸腾传热的实验研究. 实验参数的范围: 质量流速 (44 ~ 832) kg/m^{2}s, 热流密度 (0.36 ~ 12.9) W/cm^2, 干度 0 ~ 0.94, 压力 820 kPa (部分实验在压力 510 kPa 下进行的). 实验发现在干度高于 0.2 时, 传热系数与干度无关. 并且发现, 在壁面过热度高于 2.75°C 时, 主要的传热机制为核态沸腾; 而在壁面过热度低于 2.75°C 时, 主要的传热机制为强制对流沸腾. 与 3 个基于大管径的传热关联式进行比较, 偏差均较大. 因此他们以沸腾数、韦伯数、液汽密度比为参数, 给出了一个新的传热关联式, 如式 (9) 所示. 而且发现在其实验范围内, 圆管与矩形通道内的传热特性没有明显的差别.

$$h = (8.4 \times 10^{-5})(Bo^2 We_L)^{0.3} \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{-0.4} \tag{9}$$

其中, h 为平均传热系数, $Bo = \dfrac{q}{G i_{LG}}$ 为沸腾数 (boiling), q 为热流密度, G 为质量流速, i_{LG} 为汽化潜热.

Lee 和 Lee[22] 在 3 个低高宽比的矩形单通道内进行了 R-113 的沸腾传热实验研究. 通道的宽为 20 mm, 而高分别为 0.4 mm, 1 mm, 2 mm. 实验参数的范围: 质量流速 (50 ~ 200) kg/m^{2}s, 热流密度 (0 ~ 1.5) W/cm^2, 干度 0.15 ~ 0.75. 实验发现在干度高于 0.15 时, 传热系数随干度的增加而增加. 他们认为主要的传热机制为强制对流传热. 对于较低的质量流速下, 基于环状流模型, 他们推导出了一个以单相传热系数、高宽比、修正的两相倍率作为参数的沸腾传热关联式.

Yu 等 [23] 在内径为 2.98 mm 的单管内进行了水的沸腾传热实验研究. 实验参数的范围: 质量流速 (50 ~ 200) kg/m^{2}s; 入口温度由环境温度至 80°C; 压力 200 kPa. 实验发现, 在壁面过热度低于 8°C 时, 主要的传热机制为核态沸腾; 而在更高的壁面过热度时, 壁温出现脉动, 表明过渡沸腾产生. 他们将实验结果与 Chen 关联式 [2] (如式 (10) 所示) 进行比较, 发现实验值以预测值为中心, 但分散度较大.

$$h = 0.001\,22 \frac{K_L^{0.79} C_{pL}^{0.45} \rho_L^{0.49}}{\sigma^{0.45} \mu_G^{0.29} i_{LG}^{0.24} \rho_G^{0.24}} \Delta T_{\rm sat}^{0.24} \Delta p_{\rm sat}^{0.75} S + 0.023 \left[\frac{G(1-x_G)D}{\mu_L}\right]^{0.8} \left(\frac{\mu C_p}{K}\right)_L^{0.4} \frac{K_L}{D} F \tag{10}$$

其中, C_p 为比热, x_G 为当地干度, K 为导热系数, $\Delta T_{\rm sat}$ 为壁面过热度, $\Delta p_{\rm sat}$ 为由壁温和流体温度计算出饱和压力的差值, 参数 S 的计算式为

$$S = \frac{1}{1 + 2.53 \times 10^{-6} F^{1.25} G(1-x)D/\mu_L} \tag{11}$$

参数 F 的计算式为

$$F = \begin{cases} 1.0, & 1/X_{\rm tt} \le 0.1 \\ 2.35(1/X_{\rm tt} + 0.213)^{0.736}, & 1/X_{\rm tt} > 0.1 \end{cases} \tag{12}$$

这里, $X_{\rm tt}$ 为湍流 - 湍流 Lockhart-Martinelli 参数

$$X_{\rm tt} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.9} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_L}{\mu_G}\right)^{0.1} \tag{13}$$

Warrier 等 [24] 以 FC-84 为工质, 在并行矩形通道 ($D_e = 0.75$ mm) 内进行沸腾传热研究. 实验参数的范围: 质量流速 (557 ~ 1 600) kg/m^{2}s, 热流密度 (0 ~ 5.99) W/cm^2, 入口温度为 26°C, 46°C, 60°C. 结果发现在干度大于 0 时, 传热系数随干度的增加而单调降低. 将实验数据与 6 个传热关联式进行比较, 差别都较大. 并以单相传热系数、沸腾数、干度为参数, 给出了一个饱和沸腾传热关联式.

Qu 和 Mudawar[25,26] 对矩形微通道热沉内水的饱和沸腾传热特性进行了实验研究. 此热沉包含 21 个平行微通道, 每个微通道的横截面尺寸为: 宽 $231\,\mu$m, 高 $713\,\mu$m. 实验参数范围: 质量流速 $(135 \sim 402)\,\mathrm{kg/m^2s}$, 入口温度 $30\,^\circ$C ～ $60\,^\circ$C, 出口压力 117 kPa. 结果发现, 干度接近于 0 时, 流型突变为环状流, 饱和沸腾传热系数与质量流速有很大关系, 而受热流密度的影响较小. 他们指出: 在中等到高热流密度范围内, 环状流是微通道中汽液两相流流型中起支配作用的流型; 支配微通道中的传热机制是强制对流沸腾而非核态沸腾. 与大通道中的趋势相反, 传热系数随干度的增加而减小. 形成这种独特的趋势主要原因有: 在环状流起始时有大量的小液滴被携带在汽芯内; 以及由于小液滴在下游的沉积而造成环状液膜质量流率的增加. 根据实验数据, 对 6 个广泛采用的大通道传热关联式及 5 个微 / 细通道传热关联式进行了比较. 结果表明从整体趋势上看都存在着严重的偏离, 因此需要新的预测方法来获取微通道传热的正确趋势, 并得到更准确的预测. 因此, 他们提出了一个环状流模型来预测饱和沸腾传热系数. 此模型考虑了微通道两相流的一些独特特点, 如液相、汽相的层流流动, 光滑界面, 强烈的液滴携带及沉积作用等. 此模型能够正确把握在低蒸汽干度区随着蒸汽干度的增加, 传热系数降低的趋势. 此模型的预测值与他们本人的实验结果吻合良好.

由上可知, 在宽广的工况条件下均能成立的传热关联式和模型十分缺乏. 而为了获得准确的传热关联式, 建立传热模型必须弄清特定的传热机制. 因此必须对沸腾起始点及流型等进行光学可视化研究, 在此基础上深入了解传热机制并获得准确的传热关联式及模型.

7 不稳定性

大尺度中的两相流流动与传热不稳定性, 得到了十分广泛的研究. 而对于微尺度下的两相流流动与传热不稳定性却知之甚少. 近期的研究工作表明, 微尺度相变传热具有很多与大尺度中不同的特点, 特别是具有周期性的流动特点.

Hetsroni 等 [27] 在当量直径为 $130\,\mu$m 的 21 个并行三角形微通道热沉上进行了以 Vertrel XF 为工质的沸腾传热实验研究. 对均匀受热条件下的微通道内流动不稳定性进行了可视化与动态参数测量的同步实验研究. 发现了微通道内周期性沸腾的特点, 在一个整周期内汽液两相存在的时间约为 0.05 s, 单相液体存在的时间为 $(1.5 \sim 2)$ s. 正是由于这种汽液两相和液体间歇地流过通道, 导致了压力的脉动与传热系数随时间的变化. 而且发现温度脉动的实时特性是与压力脉动相对应的. 压力脉动的最大值与通道上的压降值差别不大.

Wu 和 Cheng[13] 在梯形截面的并行硅微通道中, 进行了水沸腾流动的可视化与测量的同步实验研究. 所采用的两组并行微通道的当量直径分别为: $158.8\,\mu$m 和 $82.8\,\mu$m. 可视化研究结果表明: 沸腾一旦产生, 两相流与单相液体流交替出现. 其结果导致了温度、压力、质量流速随时间作大幅度 / 长周期的脉动. 单相流与压差的降低及质量流速的增加相对应, 而两相流与压差的增加及质量流速的减小相对应. 他们首次报道了这种微系统中发生的大幅度 / 长周期的脉动现象. 温度和压力的脉动是同相的, 而压力和质量流速的脉动是不同相的, 导致了自维持的周期性沸腾. 此实验证实了 Wang 等 [28] 所提出的观点: 如果压降的脉动与质量流速的脉动存在相差的话, 可以维持这种大幅度 / 长周期的脉动. 除了上述大幅度 / 长周期的脉动外, 他们还观测到在入口压力升高及质量流速降低的这个期间, 入口温度及质量流速存在着小幅度 / 短周期的脉动. Wu 和 Cheng[14] 还在当量直径为 $186\,\mu$m 的受热梯形硅微通道内进行了去离子水沸腾传热实验研究. 发现在高热流密度 $22.6\,\mathrm{W/cm^2}$, 低质量流速 $11.2\,\mathrm{g/cm^2s}$ 下存在一种液相 / 两相 / 汽相间歇流的不稳定的流动模式. 同时, 对通道进出口水温及壁温随时间的变化情况进行了测量. 由可视化观察到的脉动周期与由温度测量得出的脉动周期是吻合的.

Brutin 等 [29] 阐述了在当量直径为 $899\,\mu$m 的单微通道内发现两类流动. 第一类流动属于稳定流动, 伴随有小幅度的压差信号的脉动, 幅度在 $(0.5 \sim 5)\,\mathrm{kPa/m}$ 之间, 无特征频率. 第二类为不稳定流动, 压差作大幅度脉动, 幅度在 $(20 \sim 100)\,\mathrm{kPa/m}$ 之间, 其脉动频率在 $(3.6 \sim 6.6)$ Hz 之间. 稳定与不稳定取决于两个控制参数: 热流密度与质量流速.

Zhang 等 [30] 在内径 1.18 mm 的脉冲热管内进行了 FC-72 、乙醇和水的实验研究. 分析了此脉冲热管中产生热力型脉动的原因, 采用高速动态数据采集系统测量了各自的热力型脉动曲线, 获得了各自的脉动周期、脉动幅度等. 实验发现由于 FC-72 具有较小的表面张力及汽化潜热, 使得其脉动周期较短、脉动幅度较小. 水的热力型脉动曲线极不规则, 在低功率下工作时而停滞、时而脉动. 由实验结果, 他们建议在低功率下采用 FC-72 和乙醇, 而在高功率下采用水.

徐等 [31] 发现了在高热流密度条件下, 水在不锈钢单管 (内径 $500\,\mu$m) 内产生一种长周期 / 小幅度间歇性欠热沸腾现象. 它发生在入口温度从室温到

80°C 的范围内，出口温度及压差呈现非常有规律的小幅度脉动，且呈现反相. 当热流密度略大于沸腾起始点时，脉动周期长达 (50 ～ 100) s. 随着热流密度的增大，脉动周期变短. 当热流密度接近临界值时，脉动周期在 (5 ～ 10) s. 实验还发现在宽广的热流密度范围内，时均质量流速对于热流密度的变化不敏感，推断出在一个完整周期内，汽泡产生及逸出的时间相对较短. 而且，他们 [32] 在相同的实验系统里，还发现了一种在高热流密度下产生的长周期 / 大幅度液体 / 两相间歇流. 它发生在贮液容器内的液体处于近乎饱和温度的条件下，表现出实验段压差，质量流速，通道进出口温度及壁温作有规律的长周期 / 大幅度脉动. 通道内发生液体和两相流的间歇流动，实验证实该类流动是由于通道内质量流速与入口温度间的负反馈效应引起的.

已经发现在大多数情况下，沸腾一旦产生于微通道，各参数如压力、温度、流量及流型均随时间作有规律或无规律的脉动. 其产生的原因可能来自于汽液两相的可压缩性，表面张力及系统自身的设计等因素. 与大尺度下的密度波型脉动、压力降型脉动及热力型脉动产生的原因，表现的形式均有所不同. 需要从实验和理论两个方面对微尺度相变条件下的不稳定性现象进行深入研究.

8 临界热流密度

当热流密度增加到一定程度后，再略微增加加热流密度即会引起壁温不可控地急剧升高，此时的热流密度称为临界热流密度 (critical heat flux, CHF). 在大尺度垂直上升流中 CHF 的产生机制，已经进行了广泛的研究 [33]，获得了一些成功预测偏离核态沸腾点的半理论模型 [34]. 而水平通道中的 CHF 数据却相对较少 [35]，微尺度下 CHF 研究则更少.

Yu 等 [23] 在内径 2.98 mm，加热长度 0.91 m 的水平管中进行了水的 CHF 实验研究. 实验参数范围：系统压力 200 kPa，质量流速 (50 ～ 200) kg/m^2s，入口温度从环境温度至 80°C. 实验发现在较高的干度 0.5 ～ 1.0 下出现 CHF. 此干度比大管径 (在更高的压力及质量流速下) 中的临界干度要高. 发现临界干度随质量流速的降低而降低，此趋势与大管径中相反. 采用 Groeneveld-Cheng-Doan 方法 [36]，虽然能对本实验所得出的 CHF 数据的趋势进行正确地估计，但由图 4 可以看出，误差较大.

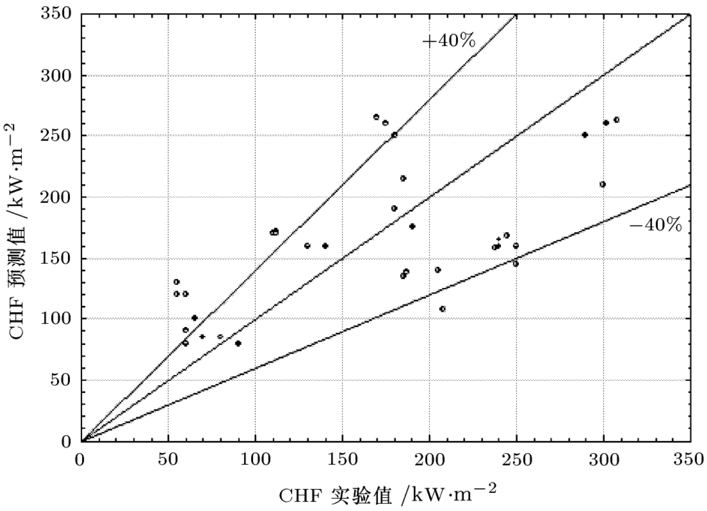


图 4 CHF 实验值与 Groeneveld-Cheng-Doan 方法预测值的比较 [23]

Stoddard 等 [37] 在 0.66 mm 环形间隙实验段 (内径 6.45 mm，外径 7.77 mm，加热长度 18.5cm) 内进行了水的 CHF 实验研究. 实验参数范围：出口压力 (0.344 ～ 1.034) MPa，质量流速 (100 ～ 380) kg/m^2s，热流密度 (0.231 ～ 1.068) MW/m^2，入口温度 30 °C ～ 65 °C. 实验所得出的 CHF 值远远低于垂直管内 CHF 的预测值. 并且发现 CHF 均在较高的干度下出现.

由于人们对微通道 CHF 规律的认识极其缺乏，一方面应进行更多的实验研究，以获得准确的 CHF 数据，另一方面应从理论上加以深入研究，以揭示其机理.

9 结 语

微尺度相变传热在 MEMS 中有着广泛的应用前景. 其实验研究的难度大，对于实验技术是一种挑战. 另一方面，需要以大尺度两相流理论为基础，进行不断的深入和创新，以揭示微尺度相变传热的规

律，丰富两相流这门学科的内涵. 本文对微尺度下相变传热进行了较为系统的综述, 论述了控制微尺度相变传热的准则数, 分析了沸腾起始点、流型、压降、传热系数、不稳定性及临界热流密度等六大关键问题.

仅就作者的知识, 微尺度相变传热中存在的困难和问题可综述如下：

(1) 由于各研究者采用的加工方法，采用的实验设备及运行参数的各异, 导致目前国际上公认的如压降及传热系数等的基准数值 (benchmark data) 极其缺乏.

(2) 沸腾起始点规定了沸腾产生的起始条件，CHF 规定了微型蒸发器所能运行的上限，而这两方面的数据同样非常缺乏.

(3) 目前人们对微尺度空间内汽泡的成核、长大、聚合及流型知识也十分缺乏.

(4) 近期的研究工作表明，微尺度相变传热具有很强的周期性，其不稳定现象应得到较大的关注.

建议开展以显微与高速摄影技术为基础的光学可视化研究，以获得流型及不稳定性等的规律性的认识，提出更加准确地预测沸腾起始点、压降、传热系数及临界热流密度的关联式. 在此基础上进行深入的理论研究，以获取更加准确的数学模型.

参 考 文 献

1 Chisholm D. Pressure gradient due to fiction during the flow of evaporating two-phase mixtures in smooth tubes and channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1973, 16: 347～358

2 Chen J C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow. *I&EC Process Design Develop*, 1966, 5: 322～329

3 Celata G P, Cumo M, Mariani A, et al. Rationalization of existing mechanistic models for the prediction of water subcooled flow boiling critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1994, 37(Supplement 1): 347～360

4 Peng X F, Wang B X. Evaporating space and fictious boiling for internal evaporation of liquid. *Science Foundation in China*, 1994, 2: 55～59

5 Peng, X F, Liu D, Lee D J, et al. Cluster dynamics and fictitious boiling in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43: 4259～4265

6 Kandlikar S G, Stumm B S. A control volume approach to predict departure bubble diameter in flow boiling. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1995, 117: 990～997

7 Kandlikar S G, Spiesman. Effect of surface characteristics on flow boiling heat transfer. In: Engineering Foundation Conference on Convective and Pool Boiling, Irsee, Germany, May 18-25, 1997

8 Hapke I, Boye H, Schmidt J. Onset of nucleate boiling in minichannels. *International Journal of Thermal Science*, 2000, 39: 505～513

9 Ghiaasiaan S M, Chedester R C. Boiling incipience in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45: 4599～4606

10 Qu, W L, Mudawar I. Prediction and measurement of incipient boiling heat flux in micro-channel heat sinks. *International Journal of heat and mass transfer*, 2002, 45: 3933～3945

11 Xu, J L, Cheng P, Zhao T S. Gas-liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini/micro gaps. *International Journal of Multiphase Flow*, 1999, 25: 411～432

12 Zhao T S, Bi Q C. Co-current air-water two-phase flow patterns in vertical triangular microchannels. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, 27: 765～782

13 Wu H Y, Cheng P. Visualization and measurements of periodic boiling in silicon microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46: 2603～2614

14 Wu H Y, Cheng P. Liquid/two-phase/vapor alternating flow during boiling in microchannels at high heat flux. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2003, 30: 295～302

15 Hetsroni G, Mosyak A, Segal Z, et al. Two-phase flow pattern in parallel micro-channels. *International Journal of Multiphase Flow*, 2003, 29: 341～360

16 Tran, T N, Wambsganss M W, France D M. Two-phase pressure drop of refrigerants during flow boiling in small channels: an experimental investigation and correlation development. In: International Conference On Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industry, Banff, Canada, 1999-07-18-23. 293～302

17 Zhang L, Koo J M. Measurements and modeling of two-phase flow in microchannels with nearly-constant heat flux boundary conditions. In: ASME International Mechanical Engineering Congress Exposition, Florida, 2000. 129～135

18 Wen D S, Kenning D B R. Two-phase pressure drop of water during flow boiling in a vertical narrow channel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2004, 28: 131～138

19 Pettersen J. Flow vaporization of CO_2 in microchannel tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2004, 28: 111～121

20 Zhang M, Webb R L. Correlation of two-phase friction for refrigerants in small-diameter tubes. *Experimental Thermal Fluid Science*, 2001, 25: 131～139

21 Tran T N, Wambsganss M W, France D M. Small circular and rectangular channel boiling with two refrigerants. *International Journal Multiphase Flow*, 1996, 22: 485～498

22 Lee H J, Lee S Y. Heat transfer correlation for boiling flows in small rectangular horizontal channels with low aspect ratios. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, 27: 2043～2062

23 Yu W, France D M, Wambsganss M W, et al. Two-phase pressure drop, boiling heat transfer, and critical heat flux to water in a small-diameter horizontal tube. *International Journal of Multiphase Flow*, 2002, 28: 927～941

24 Warrier G R, Dhir V K, Momoda L A. Heat transfer and pressure drop in narrow rectangular channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, 26: 53～64

25 Qu W L, Mudawar, I. Flow boiling heat transfer in two-phase micro-channel heat sinks-1. Experimental investigation and assessment of correlation methods. *International*

Journal of Heat transfer, 2003, 46: 2755～2771
26 Qu W L, Mudawar, I. Flow boiling heat transfer in two-phase micro-channel heat sinks-2. Annular two-phase flow model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46: 2773～2784
27 Hetsroni G, Mosyak, A, Segal Z, et al. A uniform temperature heat sink for cooling of electronic devices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45: 3275～3286
28 Wang Q, Chen X J, Kakac S, et al. Boiling onset oscillation: a new type of dynamic instability in a forced-convection upflow boiling system. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1996, 17: 418～423
29 Brutin D, Topin F, Tadrist L. Experimental study of unsteady convective boiling in heated minichannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46: 2957～2965
30 Zhang X M, Xu J L, Zhou Z Q. Experimental study of a pulsating heat pipe using FC-72, ethanol, and water as working fluids. *Experimental Heat Transfer*, 2004, 17: 47～67
31 徐进良，甘云华，周继军，等．微通道在高热流密度下的欠热沸腾．见：中国工程热物理学会多相流学术会议论文集，昆明市，2003-10-28-31. 77～83
32 徐进良，周继军，甘云华，等．一种长周期 / 大幅度液体 / 两相间歇流．见：中国工程热物理学会多相流学术会议论文集，昆明市， 2003-10-28-31. 84～90
33 Katto Y. Critical heat flux. *International Journal of Multiphase Flow.* 1994, 20(Supplement 1): 53～90
34 Katto Y. A prediction model of subcooled flow boiling CHF for pressure in the range 0.1-20.0 MPa. *International Journal of heat and mass transfer.* 1992, 35: 1115～1123
35 Merilo M. Fluid- to- fluid modeling and correlation of flow boiling crisis in horizontal tubes. *International Journal of Multiphase Flow*, 1979, 5: 313～325
36 Groeneveld D C, Cheng S C, Doan. T. 1986 AECL-UO critical heat flux lookup table. *Heat Transfer Engineering*, 1986, 7: 46～62
37 Stoddard R M, Blasick A M, Ghiaasiaan S M, et al. Onset of flow instability and critical heat flux in thin horzoontal annuli. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, 26: 1～14

KEY ISSUES RELATED TO MICROSCALE PHASE CHANGE HEAT TRANSFER*

GAN Yunhua[1,2] XU Jinliang[2] ZHOU Jijun[1,2] CHEN Yong[2]
[1]Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
[2]Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract With the fast advancement of aeronautics, information, and biology technologies, microscale thermophysical issues have received a great attention. As an effective energy conversion method, the microscale phase change heat transfer is far from mature. The non-dimensional parameters commonly used in the microscale phase change heat transfer are discussed in this paper. A comprehensive review is given on the six key issues, including boiling incipience, flow pattern, pressure drop, heat transfer coefficient, flow instability, critical heat flux. Suggestions are made on the study of the microscale phase change heat transfer to enhance the basic understanding of the complicated phenomena from the experimental and theoretical point of view. Such understandings may be used as the guidelines for the design, manufacture, and operation of the micro evaporators.

Keywords microscale, flow boiling, flow pattern, flow instability, critical heat flux

* The project supported by the National Natural Science Foundation Guangdong Province of China (32700)