

微小空间多孔表面临界沸腾实验与分析

赵孝保

(南京师范大学动力工程学院, 210042, 南京)

[摘要] 通过实验研究与观察,首次提出并证明了微小空间粉末多孔薄层表面上几个不同的沸腾传热阶段.与光滑表面上的沸腾有着本质的不同的是,多孔表面上临界沸腾只有在多孔薄层表面以上形成纯蒸汽膜时才能发生,而临界沸腾热流比光滑表面高1~2倍.综合实验结果得出多孔薄层表面上临界沸腾热流计算关联式.

[关键词] 微小空间,多孔薄层,临界沸腾,沸腾阶段

[中图分类号]TK124; [文献标识码]A; [文章编号]1672-1292(2002)02-0021-05

0 引言

粉末多孔表面是由金属粉末烧结在传热表面上的一种有效的强化沸腾传热表面,能在小温差下激发并维持沸腾,保持较高的沸腾相变传热系数,在高效传热设备中有非常广泛的应用^[1~4].由粉末构成的具有微小空间特征的薄层多孔表面上的沸腾与常规的光滑表面上的沸腾有所不同,小空间内孔层结构对汽液两相流动与传热有特殊的影响.因此,多孔薄层表面上的沸腾传热研究对这种高效传热表面在工程中的实际应用有重要意义.

本文通过实验与观察,分析了薄层多孔表面上几个不同的沸腾传热阶段,特别是临界沸腾的形成机理与特征.根据实验分析得到了粉末多孔表面上临界沸腾传热热流计算关联式.

1 实验装置与过程

实验装置如图1,辅助加热器(8)用于加热容器内液体并保持液体处于饱和状态;主加热器(5)用于加热多孔表面;补偿加热器(6)用于补偿主加热器向下的散热损失以保证主加热器加热功率全

部经多孔表面传递到液体中;检流计(14)用于监测补偿状态;实验用薄层多孔表面是由磷青铜粉末烧结在光滑紫铜表面上形成的,薄层厚度为0.4~4mm,粉末颗粒为40~300目,空隙率约为30%~60%.实验共使用了21个不同薄层结构的多孔表面.实验工质为乙醇和R113,实验在当地大气压下进行,多孔表面温度采用间接法得到^[5].

实验过程中,主加热器加热功率由低到高缓慢逐步增加,在接近临界沸腾时,细心调节,以得到比较

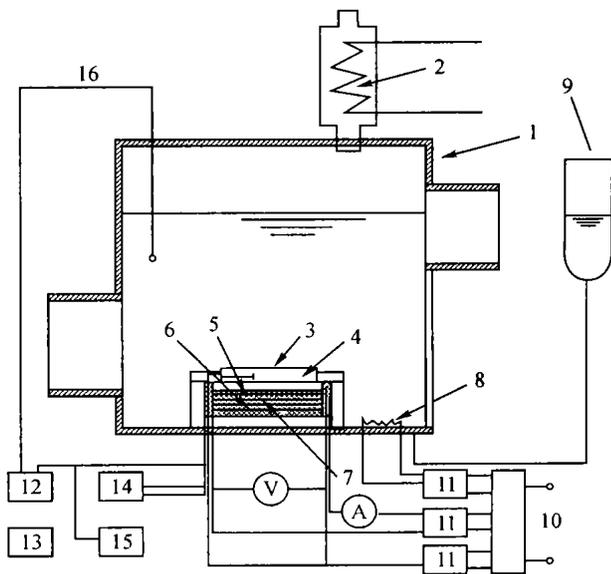


图1 实验装置

收稿日期:2002-01-07

基金项目:江苏省高校自然科学研究资助项目(编号01KJB47003).

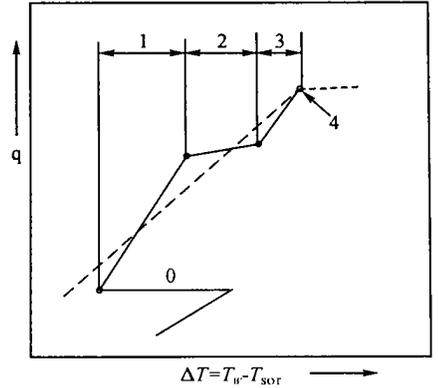
作者简介:赵孝保,1962-,工学博士,南京师范大学动力工程学院副教授,主要从事小空间汽液两相流动与传热、热管技术等方面的研究.

准确的临界沸腾热流值. 在多孔表面温度急剧升高(飞升), 出现临界沸腾时, 迅速降低主加热器加热功率, 并进行加热功率由高到低的降负荷实验.

2 沸腾过程分析

微小空间构成的薄层多孔表面沸腾传热过程随热负荷增加, 经历了几个不同的阶段. 依次有沸腾滞后、全液膜蒸发沸腾、过渡沸腾、部分液膜蒸发沸腾和临界沸腾等, 如图 2 所示^[5].

多孔表面上的沸腾通常是在表面温度超过一定程度后才突然爆发的, 当沸腾爆发后, 表面温度急剧降低, 并在较低的壁面过热度下维持沸腾, 这种现象称为沸腾滞后. 沸腾爆发后, 蒸汽从多孔薄层内逸出, 容积液体在多孔薄层结构毛细力和蒸汽逸出后产生的抽吸力的作用下回流到多孔薄层中. 在低热负荷时, 液体能够回流到薄层底部, 在多孔层内壁面上形成薄液膜, 液膜连续蒸发并维持沸腾, 这一阶段定义为全液膜蒸发沸腾. 随热负荷升高, 液膜蒸发加强, 多孔薄层内汽液两相流动阻力增大, 当热负荷增加到一定程度时, 液体将不再能够回流到薄层底部, 蒸汽将在薄层底部局部区域积聚, 形成分散的蒸汽区域, 因为蒸汽区域的存在, 增加了加热表面与容积液体间的热阻, 沸腾传热性能降低, 这一阶段称为过渡沸腾阶段, 如图 3. a 所示. 随热负荷继续升高, 蒸汽在薄层底部会聚并连接成蒸汽膜, 随热负荷增加, 蒸汽膜厚度增大, 液体只能在薄层上部多孔结构内形成液膜, 但因为金属粉末与蒸汽复合导热能力大, 热阻变化较过渡沸腾阶段小, 该阶段称为部分液膜蒸发沸腾阶段, 如图 3. b 所示. 当热负荷进一步升高时, 蒸汽将在薄层多孔表面上形成一个纯蒸汽膜, 完全阻断液体回流到加热表面, 表面温度将急剧升高(飞升) 而达到临界沸腾状态, 如图 3. c 所示. 实验与分析表明, 多孔表面上的临界沸腾与光滑表面的沸腾不同, 在多孔薄层底部形成蒸汽膜时, 并没有出现临界沸腾, 因为金属粉末和蒸汽膜复合导热作用, 蒸汽膜只是增大了壁面与液体间传热热阻, 使传热性能下降, 只有在多孔薄层上表面形成纯蒸汽膜时, 才出现临界沸腾.



0. 沸腾滞后; 1. 全液膜蒸发沸腾;
2. 过渡沸腾; 3. 部分液膜蒸发沸腾; 4. 临界沸腾
图 2 薄层多孔表面上沸腾过程

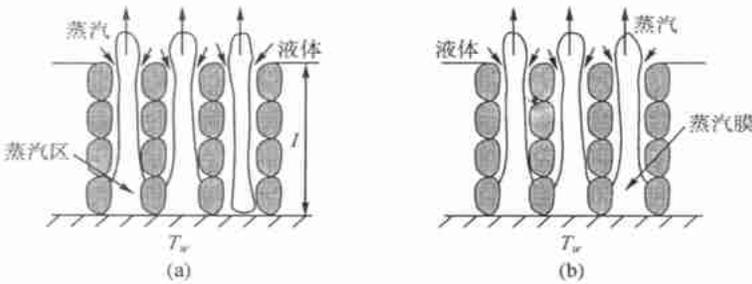


图 3 多孔薄层底部蒸汽区和蒸汽膜

3 传热分析

在一定热负荷下, 多孔薄层内所有空隙都将成为沸腾活化凹腔, 蒸汽将连续地从空隙内流出并形成蒸汽射流. 为了简化分析, 假设蒸汽射流间没有相互影响, 液体将从每个射流的缝隙处回流到凹腔中并在凹腔表面上形成薄液膜, 薄液膜蒸发后又形成蒸汽射流. 这种凹腔内逆向环状两相流动与微小空间热虹吸管内蒸发段相似, 因此, 用微虹吸管内蒸发段模型分析多孔薄层内两相流动与传热, 如图 4. a 所示. H 为蒸发段长度 ($H = c_1 l$); l 为多孔薄层厚度; d 为蒸发段当量内径 ($d = c_2 d_p$); d_p 为粉末颗粒直径;

$b(x)$ 为液膜厚度; H_b 为蒸汽膜厚度. 假设蒸汽膜以上蒸发段壁面温度均匀一致并等于液体饱和温度 T_p , 蒸汽膜与粉末颗粒复合层内温度呈线性变化, 则蒸发段内壁面温度分布如图 4. b 所示.

通过蒸汽膜与粉末复合层的传热可以看作是导热过程, 热负荷大小与蒸汽膜厚度(H_b) 有关, 即:

$$q = m(T_w - T_p)/H_b$$

式中: $m = v + (1 -) p$, 为多孔层空隙率, v 和 p 分别为蒸汽和粉末颗粒的导热系数.

同时, 蒸汽膜上部通过薄液膜导热并蒸发而传递的热负荷可以表述为

$$q_1(x) = l(T_p - T_{sat})/b(x)$$

根据分析推导, 并认为当多孔薄层内全部充满蒸汽, 即 $H_b = H$ 时, 沸腾达到临界状态, 则薄层多孔表面上临界沸腾热流可以用下式关联

$$\frac{q_{crit} vl}{h_{fg}} = f(We, vl/v_v, l/v)$$

式中: $We = \rho_l / [(1 - v)gd_p^2]$, 定义为表面张力与重力之比, 反映了液体回流到多孔薄层内所受力的作用.

4 实验结果与分析

部分实验结果表示在图 5 中, 图中实验结果充分地说明了薄层多孔表面上沸腾传热的几个阶段. 图 6 是从全液膜蒸发沸腾到临界沸腾过程中几个有代表性的实验照片图. 当热负荷逐渐达到临界热负荷时, 由多孔薄层表面上逸出的细蒸汽射流明显减弱并最终消失, 在多孔表面上形成了一个纯蒸汽膜, 此时, 加热表面温度急剧飞升, 沸腾达到临界状态. 虽然, 在壁面温度急剧飞升时, 迅速降低加热负荷, 但蒸汽膜仍然维持了较长一段时间. 在这段时间内, 可以观察到一个大的蒸汽团间断地从蒸汽膜表面上脱离而进入容积液体中. 当蒸汽膜逐渐消失时, 沸腾又回复到核态沸腾状态, 加热表面温度显著降低.

图 7 反映了临界热流与多孔层结构的关系. 图中可见, 粉末多孔表面上的临界沸腾热流比光滑表面高, 一般来讲, 前者约高于后者 1~ 2 倍. 其原因是粉末多孔层结构使蒸汽从多孔层内以细射流形式逸出, 细射流不仅缩短了蒸汽在多孔层上表面停留时间, 减弱了对液体回流的阻碍作用, 而且因为毛细力作用和蒸汽射流产生的抽吸力作用, 汽液两相流动与传热得到了改善. 因此, 薄层多孔表面临界沸腾热流比光滑表面有显著提高. 图中, 临界热流随多孔层厚度变化关系不明显, 在实验数据中, 临界热流基本上与多孔层厚度无关. 通过实验数据回归分析, 可以得到薄层多孔表面上临界沸腾传热热流半经验计算公式:

$$\frac{q_{crit} vl}{h_{fg}} = 1.0 We^{-0.089} (vl/v_v)^{1.427} (v/l)^{2.218},$$

无量纲参数变化范围为: $q_{crit} vl / (h_{fg}) = 1.649 2 \cdot 10^{-5} - 5.738 6 \cdot 10^{-5}$, $We = 3.891 3 - 210.074 8$, $vl/v_v = 4.383 1 - 12.706 7$, $v/l = 1.889 8 \cdot 10^{-3} - 4.907 \cdot 10^{-3}$.

计算式与实验数据比较如图 8, 计算值与实验值误差在 20% 范围内.

实验误差分析 虽然采用恒热流加热方式得到的临界热流值存在不准确性, 但半经验计算式可以

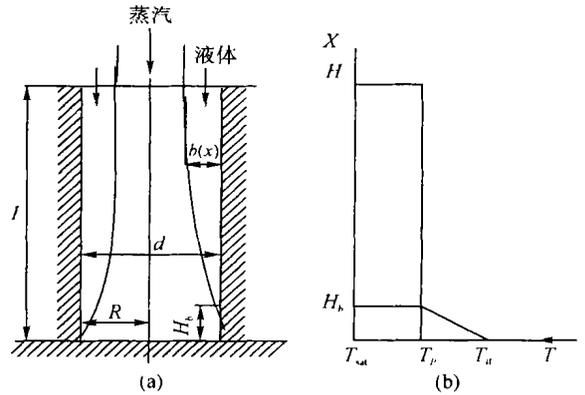


图 4 蒸发段模型与壁面温度分布图

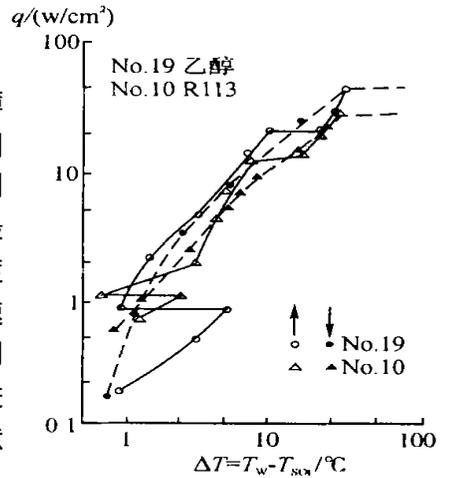


图 5 沸腾实验曲线图

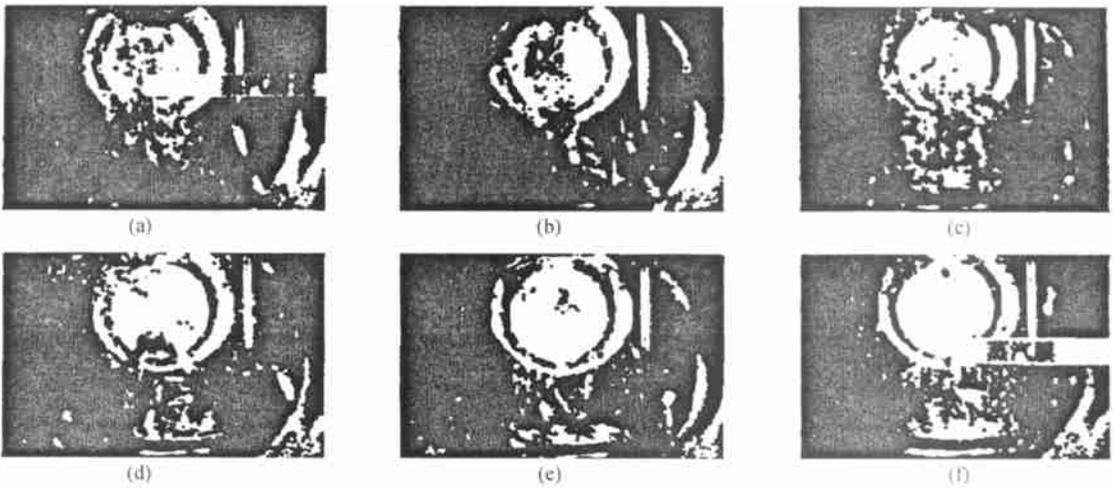


图 6 核态到膜态沸腾转变过程(实验照片图)

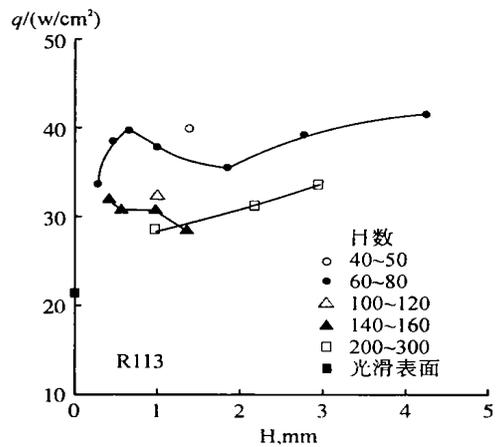
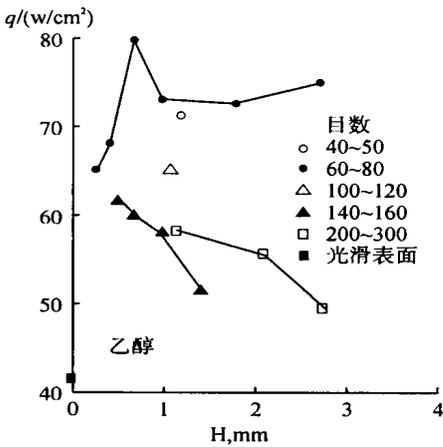


图 7 沸腾临界热流与多孔薄层结构关系曲线图

为工程实际应用提供参考。

5 结论

(1) 本文揭示了具有微小空间特征的粉末多孔表面上临界沸腾的特征, 建立了一个半经验临界沸腾热流计算式. 研究结果表明, 多孔表面上临界沸腾与光滑表面存在显著的不同, 只有在微小空间多孔层内充满蒸汽, 并在多孔表面上部形成纯蒸汽膜时, 临界沸腾才会产生. 粉末多孔薄层表面上的临界热流远比光滑表面高, 所以, 多孔表面扩大了强化传热的热流范围.

(2) 通过实验与观察首次提出并证明了多孔薄层表面上几个不同的沸腾阶段.

(3) 本文提出的微虹吸管蒸发段模型可作为微小空间内的多孔结构传热与临界热流分析.

(4) 本文得到的半经验计算式, 可以为换热设备设计者进行相类似的多孔表面上临界热流计算, 确定设备相应的使用安全值.

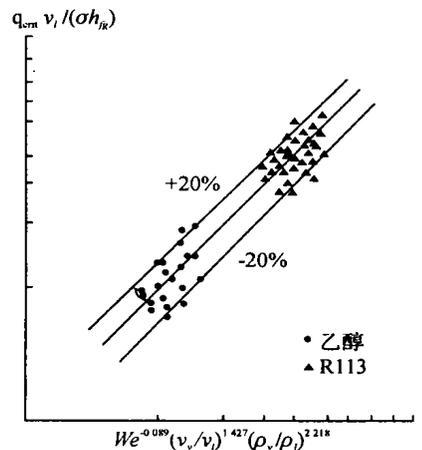


图 8 计算值与实验值的比较

符号说明

b : 液膜厚度 / m;	d_p : 粉末颗粒直径 / m;	d : 蒸发段内径 / m;
h_{fg} : 蒸发潜热 / (J/kg);	H : 蒸发段长度 / m;	H_b : 蒸汽膜厚度 / m;
k_f : 相对渗透率, 无量纲;	K : 渗透率 / m ² ;	m : 质量流量 / [kg / (m ² s)];
p : 压力 / pa;	q : 加热表面热流 / (W/m ²) 或 (W/cm ²);	q_w : 蒸发段壁面热流 / (W/m ²);
r : 径向坐标 / m;	T : 温度 / °C;	u : 轴向速度 / (m/s);
v : 径向速度 / (m/s);	x : 轴向坐标 / m;	δ : 多孔层厚度 / m;
ϵ : 空隙率, 无量纲;	λ : 导热系数 / [W / (m·°C)];	ν : 运动粘度 / (m ² /s);
ρ : 密度 / (kg/m ³);	σ : 表面张力 / (N/m).	

下标

crit: 临界; l : 液体; d : 粉末颗粒; sat: 饱和; v : 蒸汽; w : 壁面.

[参考文献]

- [1] P S O'Neill, C F Gottzmann, J W Terbot. Novel Heat Exchanger increases Cascade Cycle Efficiency for Natural Gas Liquefaction[C]. in Advances in Cryogenic Engineering, Timmerhaus, K D, ed. Plenum Press, New York, 1972: 420~ 437.
- [2] R L Webb. Nucleate Boiling on Porous Coated Surface[J]. Heat Transfer Engineering, 1983: 71~ 82.
- [3] K Nishikawa, Ito T. Augmentation of Nucleate Boiling Heat Transfer by Prepared Surfaces[C]. in Heat Transfer in Energy Problem, Mizushima, T. and Yang, W J eds. Hemisphere Publishing Corporation, D. C., Washington, 1983: 119~ 126.
- [4] N H Afgan, L A Jovic, S A Kovalec. Boiling Heat Transfer from Surfaces with Porous Layers[C]. Int J of Heat and Mass Transfer, 1985: 415~ 422.
- [5] X B Zhao, H J Zhang. Analysis and Experimentation on Boiling Heat Transfer in Thin Powder Porous Layers at High Heat Flux[J]. Chinese Journal of Engineering Thermophysics, 1990: 323~ 333.

Experimentation and Analysis about Critical Boiling Heat Transfer on Micro Porous Surface

Zhao Xiaobao

(College of Power Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

Abstract: The theories about different boiling stages on micro porous surface are put forward first time and tested by experiment (by using video) in this paper. Being qualitatively different from boiling on smooth surface, the temperature of critical boiling on micro porous surface only takes place when a pure vapor film forms above the porous surface, critical heat flux on micro porous surface is 1~ 2 times higher than that on plain surface. A calculating equation of critical heat flux on the porous surface is gotten on the basis of the experiment.

Key words: micro space, porous surface, critical boiling, boiling stage

[责任编辑: 刘健]