

文章编号: 1000-8055(2007)06-0893-05

底部封闭竖直细管内纳米流体的 沸腾特性和临界热通量

吕伦春, 刘振华

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

摘 要: 以水-氧化铜纳米颗粒组成的纳米流体为工质,对底部封闭细小圆管内的沸腾特性以及临界热通量进行了实验研究.结果表明:沸腾时管内纳米流体的浓度不随加热时间长短而改变,沸腾液体的纳米颗粒除微量吸附在管壁外,其余全部被蒸汽携带走,同时吸附层厚度到了一定程度就不再变化.相对于纯水而言,随着纳米浓度的增加,纳米流体的沸腾特性有所劣化,这主要是因为纳米颗粒吸附在管壁上,减小了壁面粗糙度,从而减小了液体和壁面的接触角.随着纳米浓度的增加,纳米流体的临界热通量也随之增加.纳米流体的临界热通量不仅与管长与管径比有关,而且还与纳米浓度有关.

关 键 词: 纳米流体; 沸腾; 临界热通量

中图分类号: V231.1; TK123

文献标识码: A

Critical heat flux of nano-fluids boiling in vertical small tubes with closed bottom

L Ü Lun-chun, L IU Zhen-hua

(School of Mechanical and Power Engineering,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: An experimental investigation has been performed to study the nucleate boiling characteristics and the critical heat flux (CHF) of water and water based CuO nanoparticle suspensions (nanofluids) in vertical small tubes with closed bottom. The experimental results indicated that the CHF and the particle concentration of the nanofluid in the tubes had hardly change with the heating times in the boiling process. The boiling heat transfer of the nanofluids is somewhat poor compared with that of the base fluids, since the decrease of the active nucleate cavities results in the decrease of the solid-liquid contact angle on the heated surface with a very thin nanoparticle sorption layer. The boiling critical heat fluxes for the nanofluids increase significantly than that of the base fluids. An empirical correlation is proposed for predicting the CHF of nanofluids boiling in the vertical tubes with closed bottom.

Key words: nanofluids; boiling; critical heat flux

纳米流体(纳米悬浮液)作为一种新的功能性流体,具有许多独特的性能,把纳米技术应用于热能工程这一传统领域,是创新性的研究,把金属或非金属纳米粉体分散到水、醇、油等流体介质中,

制备成的均匀且稳定的纳米流体,是潜在的高性能的新型换热介质^[1].目前,纳米流体在传热传质领域的研究主要集中在管内单相强制对流传热^[2-3].对相变传热的研究虽然近年来也有一些报

收稿日期: 2006-05-17; 修订日期: 2006-08-08

基金项目: 上海市科委基础研究重点项目资助(04JC14049)

作者简介: 吕伦春(1974-),男,湖北黄冈人,博士生,主要从事传热传质学的研究.

道,但还十分有限,而且全部集中在池内沸腾方面^[4-7].

在航空航天、反应堆、微电子等许多领域都会遇到底部封闭的狭窄空间内的流动和沸腾换热问题,同时,此问题也是重力式热管的研究基础,许多研究者已经对此进行了一些研究,并提出了一些适用于纯工质的沸腾临界热通量(CHF)预测关联式.

Immura 等人^[8]测量了底部封闭圆管的临界热通量,并结合他人实验数据提出了如下的实验关联式

$$Ku = 0.16 \cdot (d/L) \cdot (\rho_l/\rho_g)^{0.13}$$

(1)

式中 $Ku = q_c/\rho_l H_{ig}/[\sigma g(\rho_l - \rho_g)/\rho_l^2]^{0.25}$; d 为加热管的当量直径, L 为加热管的管长; q_c 为临界热通量; H_{ig} 为蒸发潜热; σ 为汽液表面张力; g 为重力加速度; ρ_l, ρ_g 分别为工质的液相和汽相密度.

文献[9]在研究热管的携带极限时,由溢流准则、质量守恒和能量守恒原理出发,推导出了底部封闭的管道内的临界热通量的关联式

$$Ku = 0.8 \frac{d}{L} \cdot \frac{[\tanh(0.5Bo^{0.25})]^2}{[1 + (\rho_g/\rho_l)^{1/4}]^2}$$

(2)

式中 Bo 为 Bond 数, $Bo = d/B = d[g(\rho_l - \rho_g)/\sigma]^{1/2}$, B 为毛细长度.

甲藤^[10]在楠田封闭套管实验数据的基础上,提出了底部封闭套管的临界热通量预测关联式

$$Ku = \frac{0.10}{1 + 0.491(L/d)[\sigma g(\rho_l - \rho_g)d^2]^{0.15}}$$

(3)

最近纳米流体作为一种新型工质被应用在热虹吸管的强化换热中^[11-12],虽然实验结果没有统一,但揭示了纳米流体可能是一种有潜力的强化热管换热的功能流体.目前对热管管内纳米流体的沸腾特性还没有任何研究.本文以水-氧化铜的纳米流体为工质,在一个大气压下对底部封闭的竖直细小圆管内的纳米流体沸腾特性及临界热流热通量进行了实验研究.以期对纳米流体在管内流动沸腾特性机理进行一些探讨,为纳米流体在强化微型、小型热虹吸热管换热能力的实际应用提供一些基础知识.

1 实验装置和实验步骤

图 1 给出了实验装置简图.它主要由试验段、直流电源、温度控制系统和测量部分组成.试验采用有机玻璃筒作为试验容器,上部通过塑料焊焊

接一有机玻璃法兰,然后通过螺栓连接圆形有机玻璃盖板组成一个封闭的容器.为了有效地防水,整个试验部件放在由黄铜管和电木盖板组成的小容器中,与周围的液体隔开.试验管段是用低压直流电加热的,它是由一输出功率可调节硅整流电源提供的.

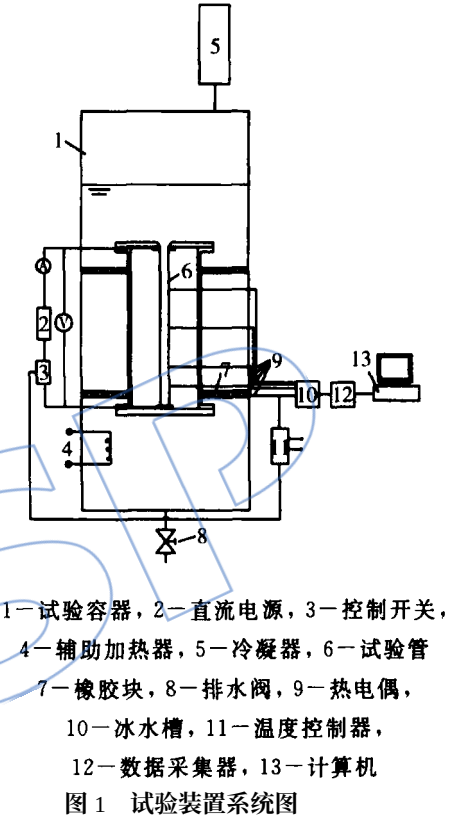


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus

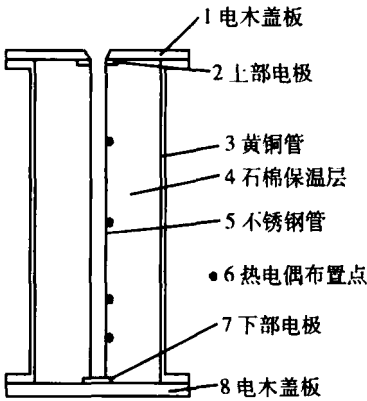


Fig. 2 Schematic of the test part

图 2 给出了测试段简图.实验部件的位置由两块厚橡胶片固定.实验加热件是薄壁不锈钢管,其两端焊接在内径等于钢管外径的环形紫铜电极上,电极通过螺栓固定在上下电木盖板上,同时,在电木盖板上用防水胶涂抹螺栓处防止水从螺纹

间隙渗入管内。钢管上端开口,底部封闭。在不锈钢管和黄铜管之间填满石棉绝热层。

在距离不锈钢管底部 $1/8, 1/4, 1/2$ 和 $3/4$ 管长处布置了 4 根直径 0.5 mm 的 K 型热电偶。所有热电偶的读数由数据采集系统处理后得到壁温数据。壁面热通量由测量得到的加热功率换算得出。预备实验表明,沸腾危机发生在管子的下部,正式实验时以 $1/8$ 管长处的热电偶测量临界热通量。

实验所用的纳米流体制备过程如下:分别将质量份额为 1% 扩散剂(十二烷基苯磺酸钠)溶于蒸馏水,然后加入不同质量份额的平均粒径 50 nm 的氧化铜纳米颗粒,最后在超声波清洗器中振荡 6 个小时。

实验用的不锈钢管内径分别为 $2.1, 3.0, 4.4\text{ mm}$,管长为 $200, 300, 500\text{ mm}$,实验采用的是蒸馏水和质量浓度分别为 $0.1\%, 0.2\%$ 和 0.5% , 1.0% 的氧化铜纳米流体。

实验步骤如下:将液体注入容器中,使液面高于试验管 10 cm ;开启冷却水系统并打开辅助加热器将液体加热到饱和状态,并维持该状态一个小时,以去除液体中溶解的空气;接着打开数据采集系统,设定温控仪的断开温度($200\text{ }^{\circ}\text{C}$),接通直流电源,开始给不锈钢管通电加热;等温度显示值稳定时(通常这一过程需要 10 min 左右)才开始采集数据,然后调节硅整流电源的输出以加大管子的热负荷,不断重复,当壁温出现大幅度跃升超过 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,也就是沸腾烧毁危机时,温控仪自动断开,然后从前一次稳定状态时的热通量开始,再次以 1% 的速率缓慢增加热通量直到出现沸腾危机,以断开前一次稳定状态时的热通量作为临界热通量的数值。

本实验热电偶的最大校正误差为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,由于本实验中测量的壁面过热度很小,过热度实验数据的测量误差很大,过热度数据只具有定性意义。热通量的最大测量误差 3% 。

2 结果和讨论

在实验中发现,一定大小的 CHF 对应一定的纳米流体浓度。为了考察试验管内纳米流体在通电加热过程中,其浓度是否与实验时间有关,首先测量了管内纳米流体的沸腾 CHF 的经时变化情况。在第一次测出 CHF 数值后,调节硅整流电源的输出功率使壁面热通量再下降到该 CHF 的 85% 左右,持续加热 $1\sim 2\text{ h}$ 后,再测出下一个时

刻的 CHF 数值。图 3 给出了内径为 4.4 mm ,长为 300 mm 的管的 CHF 在质量浓度分别为 $0.1\%, 0.2\%$ 时的实验结果。从图中可以看出,经过长时间运行后,浓度 0.1% 的纳米流体的 CHF 变化量不超过 3% ,而浓度为 0.2% 的纳米流体的临界热通量几乎没有变化。因而可以认为,临界热通量不随实验时间而变化,从而也说明管内纳米流体的浓度不随加热时间长短而发生变化,亦即沸腾时沸腾液体中的纳米颗粒全部被蒸汽所携带。

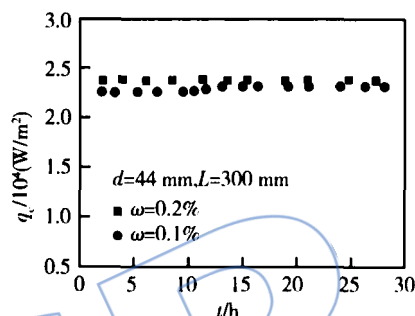


图 3 临界热通量随时间变化图

Fig. 3 Change of CHF with time

图 4 给出了 $d=2.1\text{ mm}, L=300\text{ mm}$ 的不锈钢管的 $1/8$ 管长处测量得到的不同浓度纳米流体的沸腾曲线图。横坐标是壁面过热度,纵座标是壁面热通量。图中实线是 Nishikawa 等人^[13]的池内纯水沸腾曲线预测关联式。从图可以看出:由于窄缝效应对沸腾换热的强化效果,水和纳米流体在管内的沸腾曲线都发生了左移,与池内沸腾相比,其换热特性有了显著提高。但是相对于水的沸腾曲线而言,纳米流体的沸腾曲线又向右有所偏移,亦即和水相比纳米流体的沸腾特性有所劣化。而且随着纳米浓度的增加,沸腾曲线向右偏移有所加大。由于管子不同截面处的含汽率不一样,气液界面的作用力也不一样,因而管子不同截面处的沸腾曲线也有所不同。由于 CHF 首先发生在管底部,因此本文只讨论了管底部的沸腾特性。

图 5~图 7 分别给出了管长为 $200, 300, 500\text{ mm}$ 时,不同管径的管子的 CHF 随纳米流体浓度变化的实验结果。从这些图可以看出:在管径与管长不变的情况下,随着纳米浓度的增加,纳米流体的 CHF 逐渐变大。而管长和管径对纳米流体 CHF 的影响和对纯液体 CHF 的影响则是相同的。从公式(1)~(3)都可以看出,随着气液表面张力减小,CHF 也将减小。本实验中纳米流体的表面张力相当于纯水的 75% ,因而按照上述公式,纳米流体的 CHF 将为纯水的 93% 左右。而实

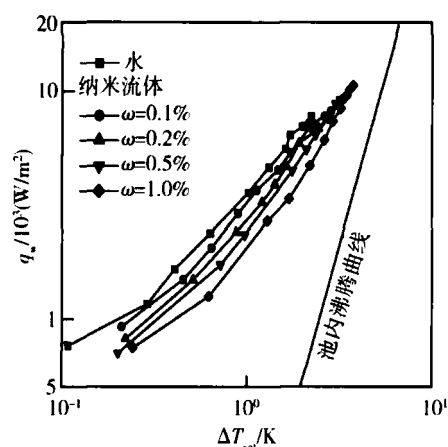


图 4 $d = 300\text{ mm}$, $L = 2.1\text{ mm}$ 管内纳米流体的沸腾曲线

Fig. 4 Boiling curves in the tube with $d = 2.1\text{ mm}$ and $L = 300\text{ mm}$

验发现,与纯水相比纳米流体的 CHF 有了显著增加.当水内添加 1 % 氧化铜颗粒后,CHF 能够增加 35 %左右.

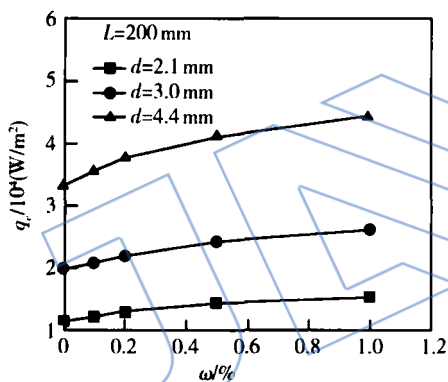


图 5 $L = 200\text{ mm}$ 的管内纳米流体浓度对临界热通量的影响

Fig. 5 Effect of concentration on the critical heat flux for $L = 200\text{ mm}$

在纳米流体实验结束后,对传热面的表面状态进行了原子力电子显微镜 2 维和 3 维拍照.实验结束后的传热表面呈现无光泽的黑色,可以观察到表面粘有一层黑色纳米颗粒吸附层.经测试黑膜厚度在数十纳米左右.从能谱图分析其成分是 Cu 和 O.这一层黑膜应该是纳米颗粒在传热面上形成的吸附层,它们由粘贴在金属表面微小缝隙中的颗粒团聚体组成.测量证明传热面表面粗糙度大幅度减小(从 120 nm 降低到 60 nm),同时传热面接触角也大幅度减小(从 65 °降低到 30 °).定性讨论看,纳米颗粒浓度的增加,会增加颗粒吸附层的厚度,从而减小表面粗糙度,导致沸腾换热劣化.同时传热面接触角减小也会使沸腾

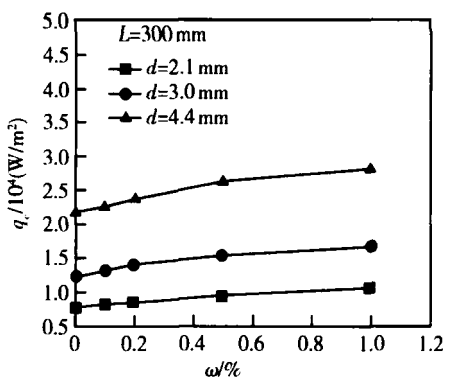


图 6 $L = 300\text{ mm}$ 的管内纳米流体浓度对临界热通量的影响

Fig. 6 Effect of concentration on the critical heat flux for $L = 300\text{ mm}$

曲线右移^[5,14].因此,从定性上比较容易解释纳米流体核态沸腾特性降低的原因.但对纳米流体的 CHF 增加的原因还难于解释.其中部分原因可能是由于传热面粗糙度和接触角减小后,液膜不容易破裂引起的.

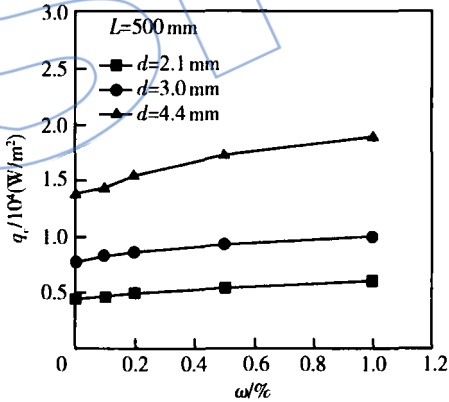


图 7 $L = 500\text{ mm}$ 的管内纳米流体浓度对临界热通量的影响

Fig. 7 Effect of concentration on the critical heat flux for $L = 500\text{ mm}$

本实验中,纯水的 CHF 实验值与公式(2)的误差最小,最大误差为 16 %.本研究在公式(2)的基础上,利用最小二乘法对纳米流体的 CHF 数据进行整理,得出如下经验关系式

$$Ku = 0.8 \frac{D}{L} \cdot \frac{[\tanh(0.5Bo^{0.25})]^2}{[1 + (\rho_g/\rho_l)^{1/4}]^2} \rightarrow (1.04152 + 0.89527\omega - 0.47174\omega^3) \quad (4)$$

式中 ω 的单位是质量百分浓度,适用于质量浓度小于等于 1 %.图 8 给出了公式(4)和实验数据的比较.在相对误差在 $\pm 4\%$ 的范围内,纳米流体的所有实验数据与公式(4)吻合得很好.

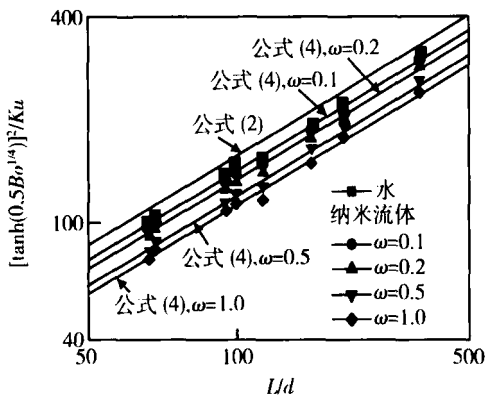


图 8 临界热通量与管长/管径以及纳米浓度的关系

Fig. 8 Relations of CHF with length/ diameter and concentration

3 结 论

- (1) 底部封闭管内纳米流体沸腾时,纳米流体的浓度不随加热时间长短而发生变化,蒸发液体的纳米颗粒全被蒸汽所携带走。
- (2) 纳米流体的沸腾曲线相对于水的沸腾曲线向右有所偏移,沸腾特性有所劣化.这主要是由于纳米颗粒吸附在管壁后,壁面的表面粗糙度和固液接触角减小引起的.随着纳米浓度的增加,沸腾特性劣化现象略有加重。
- (3) 纳米流体的沸腾 CHF 相对于水的沸腾 CHF 有显著增加.纳米流体的沸腾 CHF 与纳米颗粒浓度有明显对应关系。
- (4) 公式 (4) 能够较好的预示纳米流体在底部封闭管内沸腾时的 CHF。

参考文献:

[1] Choi S U S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles [A]. Proceedings of the 1995 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition [C]. San Francisco ,CA ,USA :1995.

[2] Xuan Y M ,Li Q. Heat transfer enhancement of nanofluids [J]. Int. Journal Heat Fluid Flow ,2000 ,21 :58-64.

[3] Xuan Y M ,Li Q. Investigation on convective heat transfer

and flow features of nanofluids [J]. ASME Journal Heat Transfer ,2003 ,125 :151-155.

[4] Das S K ,Putra N ,Roetze W. Pool boiling characteristics of nanofluids [J]. Int. Journal Heat Mass Transfer ,2003 ,46 :851-862.

[5] Vassallo P ,Kuman R ,Amico S D. Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nano-fluids [J]. Int. Journal Heat Mass Transfer ,2004 ,47 :407-411.

[6] Bang I C ,Chang S H. Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃-water nanofluids from a plain surface in a pool [J]. Int. Journal Heat Mass Transfer ,2005 ,48 :2407-2419.

[7] Wen D S ,Ding Y L. Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based alumina nanofluids [J]. Journal of Nanoparticles Research ,2005 ,7 :265-275.

[8] Imura H ,Sasaguchi K ,Kozai H. Critical heat flux in a closed two-phase thermosyphon [J]. Int. Journal Heat Mass Transfer ,1983 ,26 :1181-1188.

[9] Tien C L ,Chung K S. Entrainment limits in heat pipes [J]. AIAA Journal ,1979 ,17 (6) :643-646.

[10] 甲藤好郎. 制限流路内の自然流动沸腾の限界热流束の无次元整理について [A]. 日本机械学会论文集 [C]. 1978 ,44 :3908-3911.

[11] 彭玉辉,黄素逸,黄锟剑. 热管中添加纳米颗粒 [J]. 化工学报 ,2004 ,55 (11) :1768-1772.

PENG Yuhui ,HUANG Suyi ,HUANG Kunjian. Experimental study on thermosiphon by adding nanoparticles to working fluid [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering ,2004 ,55 (11) :1768-1772.

[12] 彭玉辉,黄素逸,黄锟剑. 纳米颗粒强化热虹吸管传热特性的实验研究 [J]. 热能动力工程 ,2005 ,20 (2) :138-141.

PEGN Yuhui ,HUANG Suyi ,HUANG Kunjian. Experimental study of the intensified heat transfer characteristics of a thermosiphon through the addition of nanoparticles [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power ,2005 ,20 (2) :138-141.

[13] Nishikawa K ,Fujita Y. Advances in heat transfer [M]. Edited by Hartnett J P ,Irvine T F Jr. New York :Academic Press ,1990 ,20 :1-82.

[14] Kandikar S G. A theoretical model to predict pool boiling CHF incorporating effects of contact angle and orientation [J]. Journal of Heat Transfer ,2001 ,123 :1071-1079.