

环形窄通道内流动沸腾换热及两相流型研究

李 斌¹, 赵建福¹, 周芳德², 唐泽眉¹, 胡文瑞¹

(1. 中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080;

2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049)

摘要 实验研究了垂直向上窄缝环形管内流动沸腾换热特性和流型变化, 窄缝宽度为 1~2.5 mm. 实验结果表明, 窄缝内沸腾传热有明显强化, 并出现了区别于常规尺寸管内的两相流型和局部换热特性.

关键词 窄缝环形管, 沸腾换热, 汽液两相流, 流型图

随着现代高新技术的发展, 在化工、航天、制冷、电子、生物工程等工业领域广泛地存在着狭小空间内流动与换热的现象, 例如航空航天飞行器散热、航空发动机涡轮叶片冷却、电子元器件冷却、化工过程以及其它热力控制系统都涉及到小空间或者小面积上高热流对设备的损害, 同时, 由于微尺度槽道内流动与换热出现了一些新的现象, 使得这一课题的研究具有重要的现实意义和科学价值. 越来越多的研究者开始关注和研究狭窄空间内的流动与传热特性. Ishibashi 等^[1]最早研究了环形狭窄通道(间隙为 1~20 mm)内静止液体的饱和沸腾传热, 区分了两种流型, 即孤立汽泡区和汽泡聚集区, 作者并没有将干涸区当作一种流型列出. 环缝内孤立汽泡区的沸腾传热特性与一般池沸腾类似, 窄缝尺寸的影响很小, 而聚合区的传热系数明显高于前者. 随窄缝尺寸变小, 传热性能增大, 此时传热特性与流体的表面张力无关. Yao 和 Chang^[2]研究了底部封闭的狭窄环形空间内水、R-113 和丙酮的沸腾换热特性, 窄缝间隙为 0.32~2.58 mm, 观察到四种流型, 小窄缝低热流时是变形汽泡孤立区, 少量底部扁平呈半球形汽泡附着在加热壁面上; 中等热流密度时出现了一些较大的汽塞, 称为变形汽泡聚集区, 汽泡沿加热面向上移动, 在这两个流型区域传热都得到了强化. 当热流密度接近临界热负荷时, 作者定义了干涸区. 对于环缝尺寸较大和热流较高时, 有轻微变形汽泡存在的核态沸腾发生, 特征是球形小汽泡和变形的大汽泡以及聚集的汽泡共同存在. 另外一些研究集中在窄矩形通道内, 研究结论大体与 Yao 的结论相同. 而 Sharon 等^[3]在研究环形间隙内(0.191mm, 0.317 mm)的流动沸腾换热时定义了四种沸腾机制, 比文献[1]多出的两种是干涸区和伴随有少量干斑出现的汽泡聚合区, 与普通管内对流沸腾比汽泡聚集区的换热系数要小, 这是不同于前面研究的一个论断. 可见, 流体在狭窄空间内沸腾时确实出现了不同于大尺寸流道内的流型, 但迄今对流型的界定和转换以及与传热特性关系的研究还不够深入, 现有的研究绝大部分限于绝热两相流的研究, 流动沸腾两相流型的研究还没有详细的报道. 本文详细研究了 R-113 在环形狭窄

① 收稿日期: 2002-12-25; 修订日期: 2003-2-17

基金项目: 973 资助项目(G1999022308), 国家自然科学基金资助项目(59995460)

作者简介: 李斌(1972—), 男, 博士后

空间内小流速下流动沸腾时流型的发展过程及对应的换热特性,给出了竖直环形狭窄空间内沸腾两相流型的转换图,并得到了不同流型对应的换热特性规律。

1 实验装置与方法

试验装置见图 1。工质从储液箱流出经泵升压后分为两路,一路作为旁路系统进行流量调节,另一路经由流量计和预热器

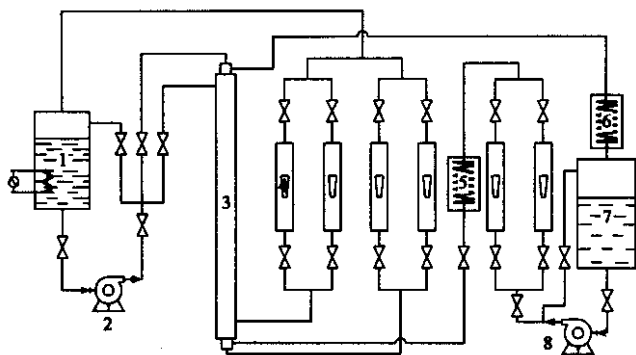


图 1 窄缝环形管内对流沸腾换热试验系统图

1. 热水箱 2. 水泵 3. 试验段 4. 玻璃转子流量计
5. 预热器 6. 冷凝器 7. 储液箱 8. 防腐泵

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

量调节,另一路经由流量计和预热器进入试验段,经冷凝器冷却后返回储液箱。这一路为二回路,及氟利昂侧。一回路的热热水通过泵升压后分为三路,一路作为旁路系统进行流量调节,另外两路作为窄缝两侧的加热介质进入试验段后,分别流经各自的流量测量系统返回水箱。一回路热水温度由温控仪(PID 控制系统)控制。实验系统的两个回路完全独立,只在试验段进行热交换。

试验段内外管均由拉制的紫铜管制成,内管直径为 $\phi 10 \times 1$ mm,环缝尺寸大小的变化通过改变外管的

尺寸来实现。实验中壁温和流体温度均用 $\phi 0.1$ mm 的 NiCr—NiSi 热电偶测量。试验段结构如图 2 所示。试验段前的稳定段长度大于 500 mm,有效加热长度为 1025 mm。实验参数范围是二回路工质流量 2 ~ 100 kg/h;一回路热水温度 45 ~ 75 °C;一回路热水质量流量 10 ~ 400 kg/h;二回路系统压力 $(1.14 \sim 1.49) \times 10^5$ Pa。试验的主要测量参数是一回路热水流量、热水进出口温度和二回路氟-113 流量、系统压力、试验段压差、氟-113 进出口温度及管壁温度。系统所有回路的流量都采用玻璃转子流量计来测量,测量前用称重法标定。二回路侧的压力和差压均采用 1151 差压变送器,实验前用精度等级为 0.05 级的浮球式压力计进行标定。传感器的最大不确定度分别是:温度测量 2.5%,压力测量 2.5%,压差测量 7.5%,流量测量 0.5%。除流量外,其它仪表输出的信号都直接送往计算机数据采集系统。采集系统由微型计算机和英国 Solartron 公司的 IMP3595 系列数据采集单元构成。本文用高速摄影机直接拍摄记录沸腾两相流型。

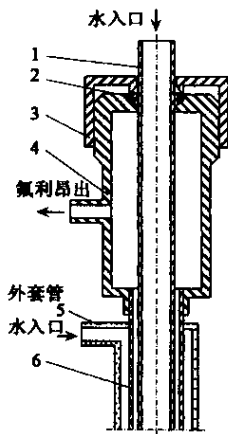


图 2 试验段装配示意图

1. 内管 2. O型密封圈 3. 压紧螺帽
4. 氟利昂出口腔 5. 外套管 6. 外管

Fig.2 Schematic diagram of test section

2 数据处理

在流动沸腾实验中,二回路的氟利昂总是以一定的过冷度进入试验段,因此在数据处理时必须确定过冷段的长度,以便于准确计算饱和沸腾段的换热系数.

过冷段的计算如下式:
$$L_{sc} = \frac{C_{pF} G_F (T_{sta} - T_{iF})}{\pi D q}$$
式中 C_{pF} 为 R-113 的定压比热容, G_F 为质量流量, T_{sat} 为饱和温度, T_{iF} 为 R-113 的入口温度, D 为加热管的直径, q 为热流密度;

局部换热系数由下式确定:内管:
$$h_{tpi} = \frac{q}{T_{wi} - T_{sat}}$$
式中 T_{wi} 为受热壁面 i 处的温度;

由热平衡可以计算出截面 z 处的干度:
$$x_z = \frac{\pi D (z - z_{sc}) q}{A G i_{fg}}$$
式中 z_{sc} 为过冷段长度, i_{fg} 为 R-113 的潜热, A 为流道截面积.

流体的物性按流体的平均温度 T_f 取值:
$$T_f = \frac{T_{sat} + T_{iF}}{2}$$

3 流型观察

沸腾时气泡的生长、运动以及汽液两相流体的流动特点与沸腾机理紧密相关.为此,本文集中研究了窄缝通道内流动沸腾的流型对应的传热特性.图 3 是在间隙 δ 为 1mm 环形管中由进口到出口观察到的 5 种典型流型.

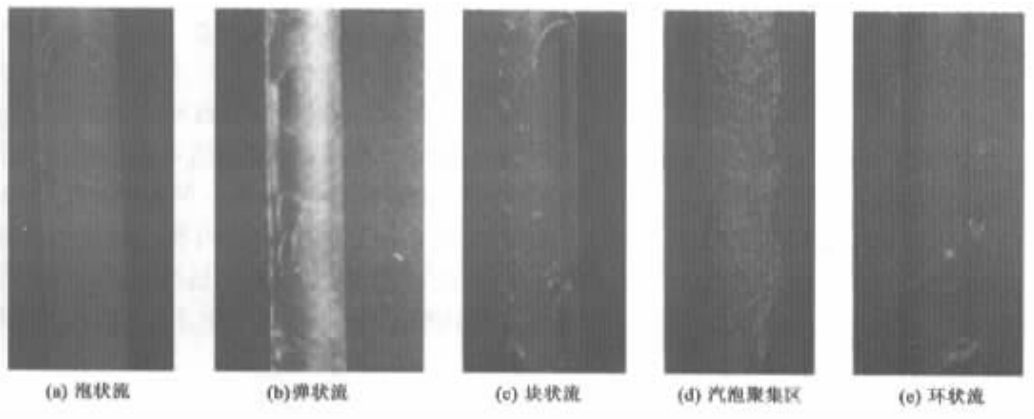


图 3 窄缝内汽液两相流动时的流型($\delta = 1 \text{ mm}$)

Fig.3 Flow patterns in narrow gap annular gap

(1)泡状流(图 3(a)).热流密度较小时,实验段的入口段出现球形的小气泡,气泡直径大约有 0.5 mm(或更小),呈弥散状分布在连续的液相中,沿直线缓慢向上运动.气泡在上升过程中持续受热,随着沿程压力减小,气泡直径逐渐增大.当增大到一定程度时,受到窄缝空间的限制,变形为椭圆形或扁平月牙形,这些变形的气泡几乎占据了窄缝宽度方向上的整个空间,气泡的运动呈不规则螺旋的绕流.

(2)弹状流(图 3(b)).中等热流密度下,气泡产生频率加快,气泡间相互碰撞的频率增加,脱离直径增大,气泡普遍发生聚合,形成弹状汽团.不同于圆管内的弹状流,环缝内

的弹状流汽团较长.在环缝宽度 δ 为 1 mm 时,这种汽团会马上破裂变成间歇式的喷泉,转变为块状流和汽泡聚集区交替出现的流态.

(3) 块状流(图 3(c)).汽团上升一小段后,由于壁面的持续加热,通道内的干度增大,汽团与管壁上液膜的相对运动速度增大,导致液膜上下波动,出现液泛现象,汽团遭到破坏,形成块状流.

(4) 汽泡聚集区(图 3(d)).该流动形态极不稳定,是有别于普通圆管两相流的特殊流型.大量汽泡聚集在一起,且经常和大块汽团交替出现.汽团破裂导致的“喷泉”经过后,汽泡聚集区被喷泉冲散,随后转变为环状流.流速较低时,汽泡聚集区停留的时间长一些.

(5) 环状流(图 3(e)).随着汽量的增加,汽泡/团聚并形成连续的汽相,并可夹带有少量液滴.液相主要以液膜的形式沿管壁连续稳定地向上流动.液膜内没有汽泡,表明核态沸腾被抑制.汽流的冲刷使得液膜出现波纹,象一系列整齐的小环套在汽芯周围.和圆管流动不同,狭缝内、外管壁上的液膜很容易发生桥接,桥接处被汽流冲破后形成间歇式的喷泉.随热流量的增加,环状流向入口延伸,靠近出口段的内管外壁面上会出现鳞片状的干涸区,随后被液膜润湿,干涸区停留的时间随热负荷的增加而延长,此时管壁温出现较大幅度的波动.

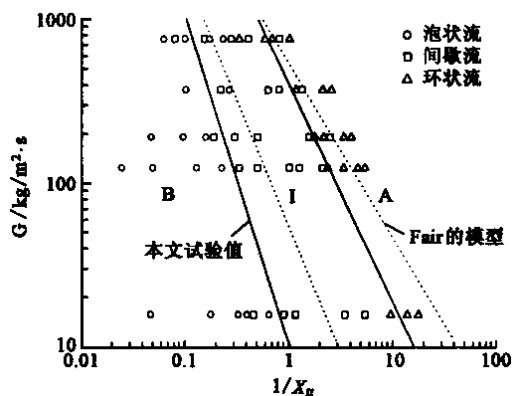


图 4 窄缝环形管中沸腾流型图

Fig. 4 Flow regime transition comparison with Fair model for narrow annulus gap

图 4 给出了窄缝环形管内 R-113 沸腾时的流型图.与圆管两相流动相比,窄缝中质量流速对流型转换的影响要弱一些.这与 X_{if} ^[4] 在研究窄矩形通道中空气-水两相流型时的结论一致.对于氟利昂沸腾系统, $Fair$ ^[5] 流型图预测准确率最高,因此图 4 也给出了 Fair 流型图的转换边界.与 Fair 的流型图比,在本文实验工况范围内,窄缝内流型转变边界向左方发生了明显的偏移,且较陡一些,说明在窄缝内较小干度时就发生了相应的流型转变.

窄缝中的流型转换特点既与本身狭小的通道结构尺寸有关也与壁面持续受热有关.沸腾空间变小后,受挤压的小汽泡很容易聚集到一起,发生泡状流向汽泡聚集区的转变,流速较低时更是如此.空间变小后,汽液界面的剪应力增加,也使得大一点的汽泡容易发生变形以至于被撕裂,汽液两相的紊流度增加,发生向块状流的转变.间歇流的特点就是弥散有大量汽泡的液塞上下振荡,要想形成理想的环状流,必须使液膜波动形成的液滴连同汽芯一起向上运动.由于窄缝内汽泡聚集区的泡底平均液膜厚度变小强化了传热,利于蒸发,且窄缝内局部阻力的增加都会大大增加局部截面含汽率,从而有利于间歇流向环状流的转变.

4 传热特性

将实验数据与 A. M. 库捷波夫推荐的氟利昂在单管壁面上旺盛汽泡状沸腾情况下的

计算式(以 F-113 为介质): $\alpha = 0.7574q^{0.75}$ 比较可以看出(如图 5),环缝内沸腾换热明显强化,两相区平均换热系数比库捷波夫推荐公式计算值高 1.7~2 倍。

图 6 是不同窄缝尺寸环形管内局部换热特性变化曲线(B 为泡状流, I 为间歇流, A 为环状流),换热系数随热流密度的增加而增加,在间歇流动区域换热系数最大,由于间歇流动区域主要以汽泡聚集区和块状流态为主,可见这两种流型是窄缝内强化传热的主要原因。随着干度的增加,在环状流的后期由于贴壁液膜变薄,换热系数有上升的趋势。图 6(a)(b)是不同质量流速时,间隙 δ 为 1 mm 管内局部换热系数的变化,质量流速提高时换热系数相应提高。在图 6(c)中可以看出,提高系统压力换热系数也相应增加,试验段出口为一个大气压时热流密度为 3060 W/m^2 时的换热系数明

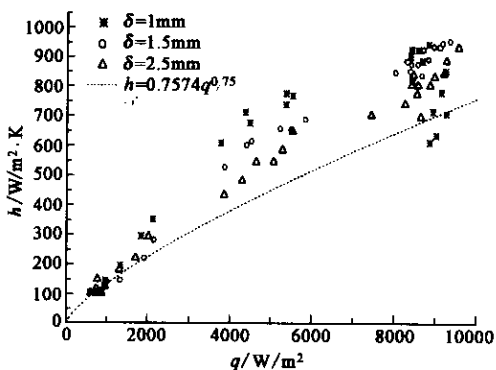


图 5 常规尺寸管与窄缝环形管内沸腾换热系数的比较
Fig.5 Boiling heat transfer characteristics in annular gap

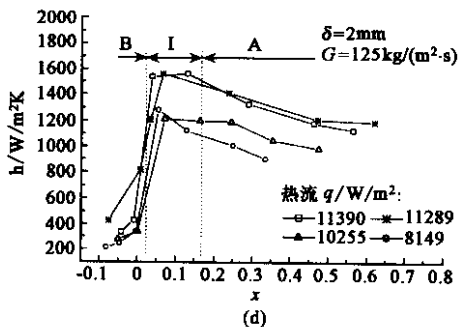
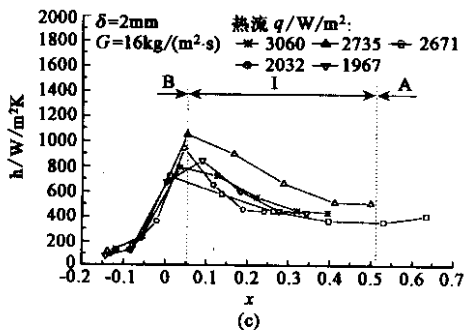
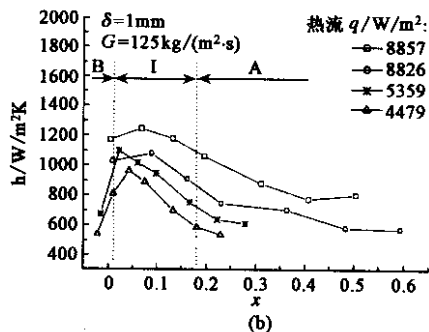
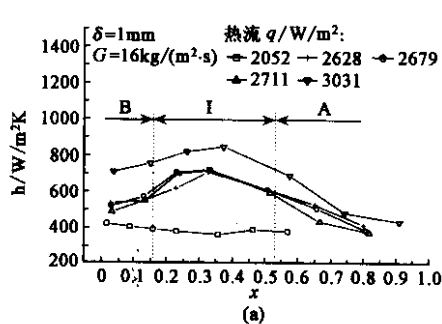


图 6 不同窄缝间隙各流型区流动沸腾换热特性

Fig.6 Local heat transfer characteristics of different flow regime

显低于 1.5 个大气压下热流密度是 2735 W/m^2 时的换热系数值。比较图 6(a)和 6(d),当

质量流速相等时(都为 $125 \text{ kg/m}^2\text{s}$) 随着窄缝间隙 δ 的增加($1 \sim 2.5 \text{ mm}$ 范围内), 换热系数增加, 随干度增加, δ 为 1 mm 时的换热系数下降的更快, 可见减小窄缝宽度会降低临界热负荷.

参 考 文 献

- [1] Ishibashi E, Nishikawa K. Saturated boiling heat transfer in narrow spaces[J]. Int J Heat Mass Transfer , 1969 , 12 :863-894
- [2] Yao SC , Chang Y. Pool boiling heat transfer in a confined space[J]. Int J Heat Mass Transfer , 1983 , 26(6) :841-848
- [3] Sharon A , Chen L , Bankoff SG. Convective boiling heat transfer in a concentric annular gap[J]. Int J Multiphase Flow , 1983 , 9(5) :545-560
- [4] Xu JL , Cheng P , Zhao TS. Gas-liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini/micro gaps[J]. Int J of Multiphase Flow , 1999 , (25) :411-432
- [5] Fair JR. What you need to design thermosiphon reboilers[J]. Petroleum Refiner , 1960 , 39(2) :105-123

Study of Flow Boiling and Two-phase Flow Patterns in Narrow-gap Annular Tubes

LI Bin¹ , ZHAO Jianfu¹ , ZHOU Fangde² , TANG Zemei¹ , HU Wenrui¹

(1. National Microgravity Laboratory , Institute of Mechanics , CAS , Beijing 100080 ; 2. National Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering , Xi'an Jiaotong University , Xi'an 710049)

Abstract

Experiments are conducted to investigate the characteristics of boiling heat transfer of F-113 flowing through annular tube with gap of 1 , 1.5 and 2.5 mm . The data show that due to the limitation of narrow space the two-phase flow regime changes , and the boiling heat transfer is enhanced obviously.

Keywords narrow-gap annular tube , boiling heat transfer , two-phase flow , flow pattern