

文章编号:1000-8055(2010)01-0028-07

动载对管内沸腾两相流传热特性的影响

姚秋萍, 宋保银, 赵 枚

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

摘 要: 对旋转状态下的单相水及加热单相水至沸腾的两相流进行了对比实验. 通过对热耗散、流型、流阻及传热的分析与计算, 研究了动载对流体流动与传热的影响. 结果表明: 过载强烈影响两相流动 (尤其是流阻) 和热传递方式, 增大了流体的流阻和热损失, 并削弱了流体的得热能力. 动载引起的冲击交混流改变了管壁温度的均匀性和变化规律, 即随着过载的增大, 在一定范围内, 管壁底部温度降低, 顶部温度升高.

关 键 词: 动载; 汽水两相流; 沸腾传热; 传热特性

中图分类号: V211. 1

文献标识码: A

Effects of dynamic load on the heat transfer characteristics of two-phase pipe boiling flow

YAO Qiu-ping, SONG Bao-yin, ZHAO Mei

(College of Aerospace Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: An experimental investigation was performed comparatively to obtain the flow and heat transfer characteristics of single-phase water flow and two-phase pipe boiling water flow under dynamic load in present work. By analyzing the effective heat, flow pattern, fluid resistance and heat transfer coefficient of the experimental data, the effects of dynamic load on the flow and heat transfer characteristics of single phase water and two-phase boiling water flow were investigated. The results show that the dynamic load significantly influences the flow characteristic and boiling heat transfer of the two-phase pipe flow. It will enhance the fluid resistance and heat dissipation toward the ambient environment, and also reduce the heat transfer capability of the two-phase boiling flow. The impact mixing flow caused by the dynamic load breaks the uniform and varying properties of the wall temperatures, so the greater the dynamic load, the lower the wall inner bottom temperature, and the higher the wall inner top temperature occurs in a certain extent.

Key words: dynamic load; steam-water two-phase flow; boiling heat transfer; heat transfer characteristics

对于加热沸腾的两相流动, 相变造成质传递和含气率变化, 运动流型不仅沿流道和过载大小不断发生变化, 而且也因传质伴随动量和能量的传递, 使连续、动量、能量方程更为复杂. 因此, 动

载作用下沸腾两相流传热, 是在饱和沸腾流动下进一步增添了过载因素对沸腾传热的影响, 是较为复杂、影响因素较多的两相流动现象之一, 在两相流研究领域中还属于新的范畴, 不确定因素和

收稿日期: 2008-12-29; 修订日期: 2009-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(50576035); 高等学校博士学科点专项科研基金(20040287017)

作者简介: 姚秋萍(1982-), 女, 江苏江阴人, 博士生, 主要从事两相流流动与传热研究.

未知现象比较多.

近年来,研究两相流机理主要从两个方面入手:一是流动特性;二是传热特性.现阶段国内外对动载作用下两相中固化和溶解机理的研究^[1-7]主要利用飞机飞行试验所产生的微重力及高过载来完成的.但从航空发动机涡轮叶片换热以及机载蒸发制冷循环来看,过载对其系统中两相流沸腾传热机理的影响还有待进一步研究.由于其固有的复杂性、多样性以及现阶段测量手段的局限性,其传热机理、流动特性、质量、动量和能量传递模型还缺乏深入的了解和较为肯定的表现形式.因此,动载作用下沸腾两相流传热机理还需先通过实验研究予以探讨.

本文通过参考静止状态下的一些实验方法,与现存的实验台相结合,利用旋转平台实现了动载模拟,解决了旋转状态下两相流动的加热、参数测量、数据采集和处理问题,并解决了实验的可视性问题,获得了运动载荷对两相流动相分布的影响.

1 动载下的两相基本模型

由于旋转状态下的坐标系为非惯性系,要考考虑离心力和哥氏力的影响,再加上重力、浮力效应以及温度场的非稳定性,导致旋转状态下流体的流动与传热问题极端复杂化,标准的 Navier-Stokes 方程已不适用,动量、能量方程应增添附加项.动载下的流动沸腾传热,其传热过程为:热流通过壁面温度附面层,经流体导热、汽化潜热传递、汽液搅混对流换热带入流动中心,因此,理论研究时做出以下假设:

- 1) 流体为不可压缩、连续流动的混合介质;
- 2) 微时间、微控制体的传热为稳态过程;
- 3) 两相间速度无滑移,滑速比 $S = 1$;
- 4) 流动沸腾下,能量守恒方程式中动能变化远小于焓升变化;
- 5) 在旋转状态下,管内流体所受体积力包括重力、离心力(过载)和哥氏力.在过载不超过 $2g$ 的情况下,忽略了哥氏力的影响.

基于以上假设,等角速度旋转时微时间、微流体的控制方程组为

质量方程

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho_m \dot{u}) = 0 \tag{1}$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho_m \dot{u}^2) = - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho_m (\overline{F_m} + \ddot{a}) + \frac{C_m^w \tau_m}{A} + M_m \tag{2}$$

能量方程

$$C_m^h \dot{q}_m = h_{fg} G \frac{dx}{dz} + (F_m + a) G \tag{3}$$

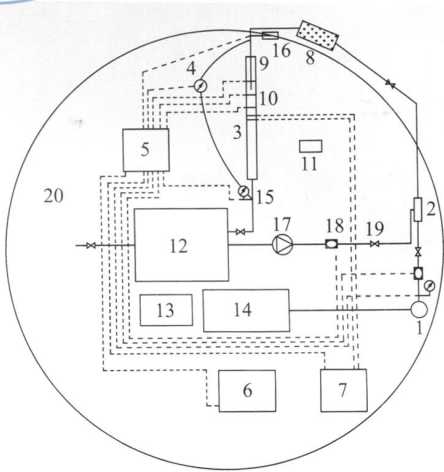
壁面边界条件

$$\dot{\Phi} = - \lambda \frac{\partial t}{\partial n} \tag{4}$$

式中 C_m^h 为加热周界(m); a 为由旋转引起的加速度(m/s^2); G 为质量流量(kg/s); x 为两相流干度, $0 \leq x \leq 1$; $\dot{\Phi}$ 为壁面热通量.动量和能量方程中等号右边的第二项均为由重力和旋转引起的过载力的综合作用项.

2 实验装置

整个实验装置由封闭的管路循环系统、转台系统、加热系统、实验测试系统、可视化系统和数据采集系统组成,具体的旋转状态下径向水平管内水的流动沸腾换热特性研究的实验装置简图如图 1 所示,图中实线为实验管路,虚线为信号传输线.所有设备用电均由配电箱供给.



1 油分离器; 2 混合器; 3 透明实验管段; 4 压差计; 5 数据采集模块; 6 笔记本电脑; 7 空隙率测试仪; 8 预热器; 9 电阻丝加热器; 10 测温面; 11 摄像机; 12 水箱; 13 配电箱; 14 空压机; 15 压力计; 16 温度传感器; 17 水泵; 18 流量计; 19 阀门; 20 转台

图 1 实验系统简图

Fig 1 Schematic diagram of experimental apparatus

管路循环系统采用的是经典的两相流模型,即水和空气混合形成两相流,包括水管路和气管路.水管路采用泵驱动,从水箱中抽水;气管路则

从空压机的储气罐中获得空气,水和气经混合器充分混合后加热,进入测试段,经过一系列测量后再流回水箱,形成一个封闭的循环系统.流量采用上海虹益公司生产的 LWGQ 型涡轮流量计进行测量,量程为 $0 \sim 4 \text{ m}^3/\text{h}$. 该系统既可控制气、水的流量来研究动载对气水两相流传热的影响,也可将单相水加热至沸腾,从而研究动载作用下管内水流动沸腾换热. 本文主要是对后者进行研究. 系统运行中,为保护水泵和空压机,气、水管路均装有止回阀,且空压机出口安装了油分离器.

转盘为直径 2 m、厚度 20 mm、材料为 Q235 的钢板,由电压为 380 V 的电机驱动,最大转速可达 200 r/min. 通过调节变频器的电阻可调节转盘的转速,从而实现不同过载量. 整个转台通过电刷来实现无线供电. 旋转时转台上的仪器所受离心力较大,所有设备都用螺栓固定在转台上,质量较大的仪器则固定在靠近转台中心,位势较高的管道安装有支架以支撑其质量. 为保障实验操作者的安全,在转台的周围安装了金属防护网. 具体实物见图 2.

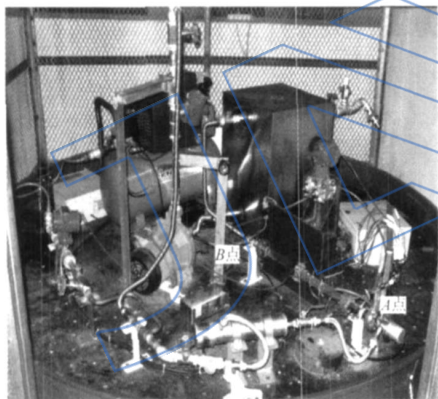


图2 动载作用下沸腾两相流实验系统实物图

Fig. 2 Photo for experimental system

电加热系统实现了均匀加热水至沸腾两相流. 考虑到管道外壁无绝热层,系统存在热耗散现象,因此加热分预加热和沸腾加热两部分. 预热由电阻线圈缠绕在管道外壁来实现加热,缠绕线圈由不锈钢管套封装起来. 沸腾加热器为带绝缘层的电阻丝,置于实验段的前端来维持测试段的流动沸腾状态. 为了保证测试时管内介质为两相流,电加热系统在整个操作过程中都处于工作状态. 电加热器与配电箱直接连接,其供给电压为 220 V 的交流电,实验时只需测量加热电阻即可获得加热功率,加热电阻大小由深圳市俊晶辉电子仪表公司生产的数字万用表直接测得.

实验测试段为内径 20 mm、长 400 mm 的有机玻璃圆管,分前后两部分,如图 3 所示. 前半段为加热区,在相隔 5 cm 的 3 个测温截面(沿流体流动方向依次为 I, II, III 截面)上均装有 3 个热电偶,分别置于截面的正上方、左下方、右下方,且相隔角度为 120° . 热电偶采用上海南浦仪表厂生产的型号为 WRC、分度号为 T 的铜-铜镍热电偶,测量精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$,推荐使用温度范围为 $-200 \sim 350^\circ\text{C}$. 测温截面 II 在加热器的出口端, a 点热电偶球形探头在圆管中心,测量流体主流温度,除此之外的热电偶均测量内壁温度. 后半段为拍摄区,两段的中间安装了西安交通大学研制的电导探针测试系统,以测量空隙率. 进出口测压点之间,流体先通过管径为 10 mm 的细钢管,经突扩管、法兰与直径为 20 mm 的实验管段连接,再经法兰、突缩管流入小管径管内. 在测试段的入口端接有压差计高压侧的导压管和热电偶,出口端接压差计低压侧的导压管、压力计. 压差计采用横河川仪有限公司生产的 EJA110A 差压变送器,量程为 $0 \sim 10 \text{ kPa}$. 压力计则采用 XCY200 压力变送器,量程为 $0 \sim 1 \text{ MPa}$. 室内环境温度由温湿度计直接读取. 由此,测试段就可以实现加热段的进出口流体温度、内壁温度、空隙率、进出口压差以及出口压力的测量.

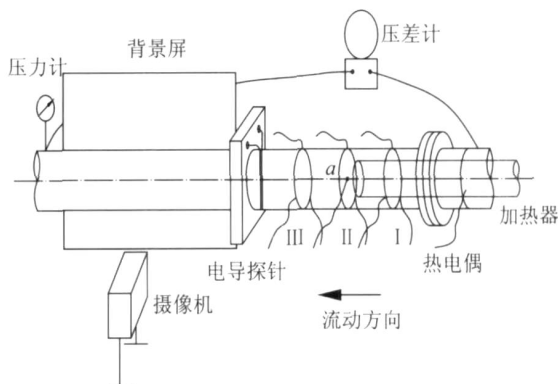


图3 实验测试段详图

Fig. 3 Test section

可视化系统用来观测动载下沸腾两相流型的变化. 实验中将摄像机固定在转台上与测试段同步旋转,从而记录流型的瞬态变化情况. 实验选用普通家用摄像机,型号为佳能 MVX150i,可以达到 16 倍光学变焦、320 倍数字变焦的要求,静态下的像素可达 133 万,动态像素可达 80 万,适于近距离、长时间的拍摄. 测试段后方安装了黑色无反光背景屏,照明光由 105 W 的三基色节能灯管

供应. 灯管安装在转台圆心正上方的房顶上,既可避免旋转拍摄时的采光不均匀,也可防止光线从管壁反射到镜头上而影响流型拍摄的清晰度.

测试段上各参数的测量仪器都与信号采集模块相连接,模块可与电脑进行串口数据通信,再利用 Visual Basic 程序实现数据的实时采集. 程序接收电压信号后,利用电压与仪表量程呈线性关系的计算公式得到各参数的物理量,并保存数据. 信号采集模块包括 AD 转换器和 I/O 输入输出模块. AD 转换器有两个,分别为研华公司生产的 ADAM-4017 模拟量输入模块和 ADAM-4018 热电偶输入模块. I/O 模块采用研华公司生产的 ADAM-4520,是 AD 转换器同电脑进行数据传输及控制的设备.

3 实验结果及分析

3.1 动载对流体热量耗散的影响

热量耗散项有两种计算方法:一是总加热量与有效加热量之差 q_{loss} ;二是认为热损失仅由壁面上对流散热和辐射散热两部分组成,分别计算这两种散热量,从而得到总的热量损失 q_{dis} .

对于单相水加热流动,分别计算了入口温度为 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $83\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,系统状态在 0 g , 0.5 g , 1 g , 1.5 g , 2 g 稳定过载下的两种热损失,计算结果见图 4. 两种计算结果都表明,热耗散量 q_{dis} 随转速增加而增大. 但 q_{loss} 与 q'_{loss} 在静止和过载时相差不大,且当入口温度较高时, q_{loss} 与 q'_{loss} 比较接近.

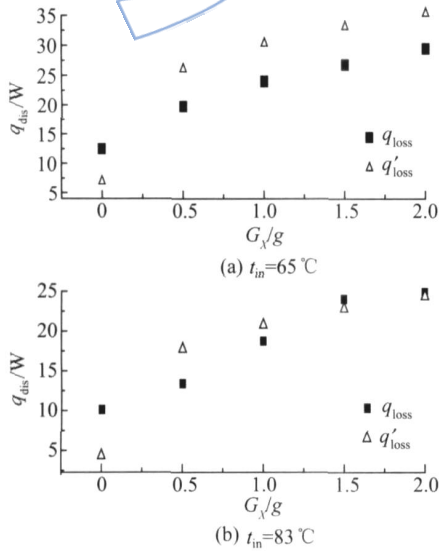


图 4 过载对单相水流动热耗散影响

Fig 4 Effect of dynamic load on heat dissipation of single-phase water

当流动介质为汽水两相流时,在不同稳定过载状态下的两种热损失计算结果如图 5 所示. 静止时,系统不受运动载荷的影响,热损失较小,且 q_{loss} 与 q'_{loss} 比较接近. 当过载量 G_x 达到 0.5 g 时,热损失明显增大. 这主要是因为从总加热量与有效加热量之差上看,在过载作用下,管内两相流流型的变化会影响有效加热量的大小,空隙率的降低会减小汽化潜热量,且减幅较大,使得 q_{loss} 快速增加;而在汽水两相流饱和沸腾时,其流型为波状分层流,当受到动载作用时,热量耗散以管外壁的强迫对流散热为主,即使强迫对流速度很小,其散热量也远大于自然对流的散热量,因此 $0\text{ g}\sim 0.5\text{ g}$ 过载量之间的热损失增加幅度会较大一点, q_{loss} 的变化趋势与 q'_{loss} 相同. 随着转速的不断增大,作用在系统上的运动载荷也增大,热损失继续升高, q_{loss} 与 q'_{loss} 都缓慢增大. 但由图可见,在较小过载时,热损失会明显增大,而当过载继续增大时,热损失也随之增大,但其增幅相对减小. 比较这两种热损失值可见,在静止时的系统热平衡性较好,旋转时的系统热平衡性变差,且随转速增加而越差. 这主要是由于在旋转条件下相分布的非均匀性和管壁热惯性等因素造成的. 因此,旋转增强了管道与外界的换热能力,即过载增大了系统的热损失,削弱了流体的得热能力.

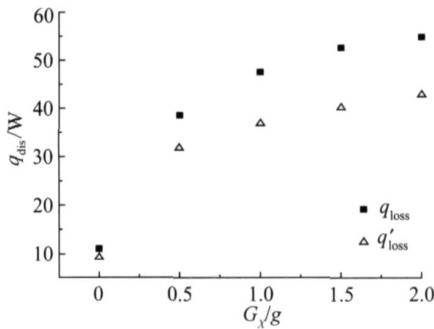


图 5 过载对两相流动热耗散的影响

Fig 5 Effect of dynamic load on heat dissipation of two-phase flow

与流体介质为单相水时相比,两相流的热平衡性较差,且单相水时 q'_{loss} 大于 q_{loss} ,而两相流时则相反. 这是因为 q'_{loss} 是以加热段中心位置的参数来计算的,在两相流动系统中,由于相间存在密度差,过载作用使得液相后壅,截面含汽率减小,且局部散热量与其部位到旋转圆心的距离成正比,导致相界面在加热段的前部较后部的热耗散量大,因此 q_{loss} 会相对增加,出现略高于 q'_{loss} 的情

况.而两相流的热损失值高于单相水是因为在热量耗散中还存在以其他形式传递热量的情况,如两相流时管内加热面温度高于单相水的加热面温度,因此其辐射散热量要稍大于单相水.但由于其差值相对于有效加热量而言较小,因此热量耗散仍以管外壁的对流散热和辐射散热为主,且管内流体的传热能力仍可用流体的有效加热量来衡量.

3.2 动载作用下水平管内单相水和汽水两相流传热特性对比

本文对单相水在水平光滑管内的流动沸腾换热进行了一系列的实验,获得了多组流动及传热的有效数据.实验工况范围为:体积流量 $0.1 \sim 0.25 \text{ m}^3/\text{h}$;热流率 $95 \text{ kW}/\text{m}^2$;入口温度 $10 \sim 97^\circ\text{C}$;干度 $0 \sim 1$;过载量 $0 \text{ g} \sim 2 \text{ g}$.

图 6 为动载作用下单相水和汽水两相流的流阻及有效加热量的对比图.单相水时管内流量为 $0.1782 \text{ m}^3/\text{h}$,沸腾两相流时管内水的流量为 $0.1533 \text{ m}^3/\text{h}$.从流动特性看,在非旋转状态下,即动载为 0 g 时,两相流的流阻与单相水相差不大;但随着转速的增加,流体流阻迅速增大,且两相流流阻的增幅大于单相水.当动载为 2 g 时,两相流流阻约为单相水的 1.5 倍.可见测试段管内的流阻大小受流体介质和状态的影响,且动载对沸腾两相流流动损失的影响相对单相水更为强烈.

从传热特性看,由于加热壁面的温度未知,这里用有效加热量来表征管内流体传热能力的强弱.由图 6 可见,静止状态下沸腾两相流的有效加热量 q_{etp} 略高于单相水的有效加热量 q_{el} .沸腾两相流的液相流量在小于单相水时还具有较高的传热能力,说明两相流在达到相同换热效果时所需的流体流量较小,因此以两相流为传热介质可节省能源和减小系统的总质量.动载作用时,随着转速的增大,两种介质的得热量都减小.单相水仅为温升传热,其传热量随过载增大而缓慢降低,且减小幅度也连续变小.而两相流的得热量不仅包括温升传热,还包括汽化潜热.在过载从 0 g 增加到 1 g 期间,流型变化剧烈,汽化潜热迅速减小,得热量急剧下降; 1 g 之后得热量减小幅度渐缓.至于对外传热系数的变化情况,两相流大于单相水,这与前面分析的动载对热耗散影响的结果相一致.

结合实时拍摄图像、测试的沸腾两相流的空隙率以及压力、温度等测量参数,分析过载对两相流流型及传热特性的影响.由图 7 可知,静止状态

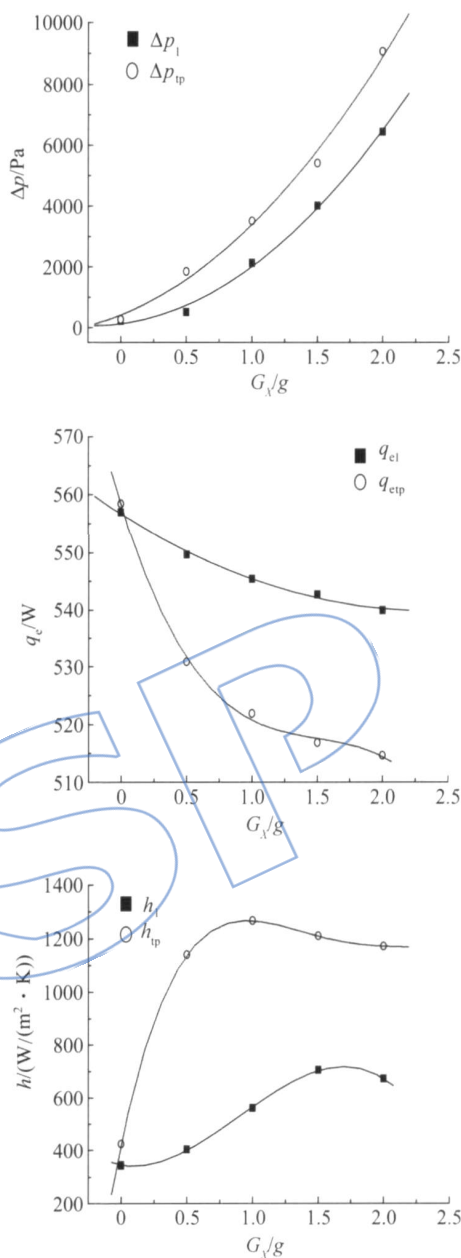


图 6 过载下单相水与汽水两相流传热能力对比

Fig 6 Comparison of heat transfer of single-phase water and steam-water two-phase fluid

下流体为波状沸腾流,当开始旋转时,管内两相流的流型出现冲击波,使其传热量迅速减小.当过载达到最大 2 g 时,流体的热耗散达到最高值,得热量降至最低,流体的温度和压力达不到沸腾要求,流动介质变为单相水,其传热量中的汽化潜热量变为 0.而在流型迅速转变的过程中,得热量减小的幅度最大.

3.3 动载作用下内壁面周界温度的变化

由上述传热特性分析可见,影响传热系数的关键因素是传热温差的变化,而在温度测量中,内壁温度的变化幅度最大.因此内壁温的变化规律

成为传热系数的最基本参数。

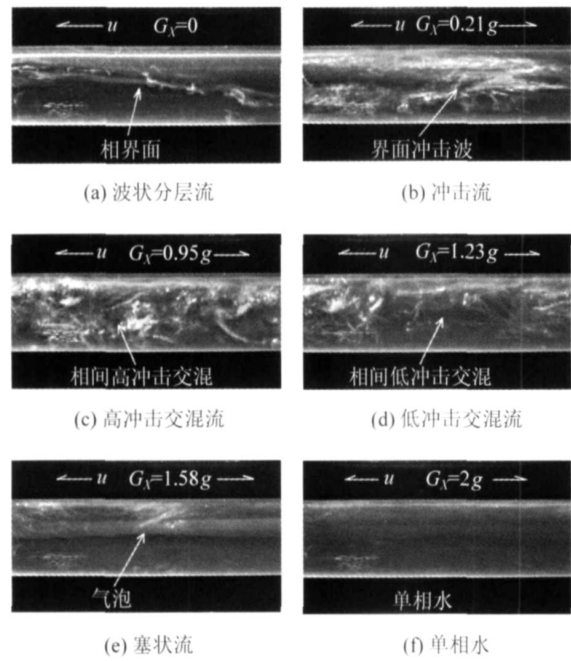


图 7 过载逐渐增大时的流型图

Fig. 7 Steam-water two-phase flow pattern photos during increasing dynamic load

转台匀速旋转时,测试段作匀速圆周运动,此时近似认为该状态为空气绕流圆管流动,见图 8. 管外壁边界层内流体的压强、流速以及流向都将沿水平圆管的弯曲面发生很大的变化,从而影响换热. 此时系统热量损失以空气绕壁面的强迫对流换热占优,壁面边界层的流动状况决定了热量传递的特征. 圆管周围的换热变化规律完全取决于流体横向绕流特性. 因此,强迫对流换热的多少直接影响管外壁温度及内壁温度的高低.

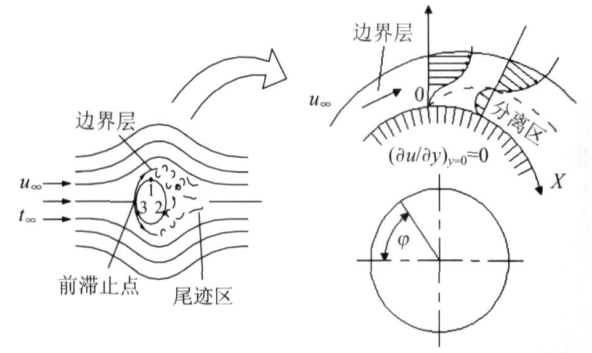


图 8 测试段旋转时空气绕流及边界层特性

Fig. 8 Air flow around a column and its boundary layer

图 9 为单相水时同一截面上点 1,2,3 (各点位置如图 8 所示) 的内壁面温度随旋转时间的变

化曲线图. 定热流密度下管内单相水充分发展流动时,调节转台转速,使过载从 0g 增至 1g,再减小至 0g. 静止时三处的内壁温测量值在误差范围之内,且随持续加热而缓慢上升;但在旋转状态下,由于过载的影响,温度随过载增大而减小,随过载减小而增大. 同一截面不同位置的温度大小并不相同,点 1 处的温度略高于点 2 处,且比较接近,而点 1,2 两处的温度均高于点 3 处. 这是因为此时外掠圆管雷诺数在 1800~6000 之间,属于较低雷诺数工况,一般从滞止点向后 80°左右的位置发生分离现象,努塞尔数 Nu 的最小值就在分离点附近. 因此点 1 处的强迫对流换热 Nu 数最小,即对外散热量最小,内壁温最高. 而在旋涡区的点 2 处的 Nu 数会相应增大,对外散热量略大于点 1 处,内壁温也略低一些. 处于边界层发展前缘的点 3 处的 Nu 数最高,即点 3 处的强迫对流散热量最大,内壁温最低.

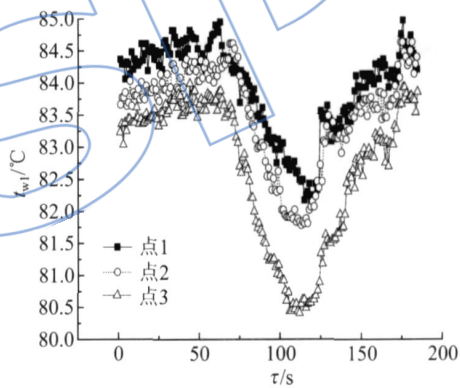


图 9 单相水周界内壁温随时间的变化图

Fig. 9 History of inner wall temperatures of single-phase water

图 10 为汽水两相流时同一截面不同周界位置的内壁面温度随旋转时间的变化曲线图. 定热流密度下管内汽水两相流波状流动时,调节转台转速,使过载由 0g 增至 1g,再减小至 0g,静止后再连续进行两次该过程,并选取中间一个过程的数据. 由图可见,点 2,3 处壁面温度随过载的变化趋势与单相流相同,均随过载增大而减小,随过载减小而增大. 而点 1 处内壁温度的变化趋势跟点 2,3 两处则刚好相反,即随过载增大而增大,随过载减小而减小. 这种变化趋势普遍存在于本实验所有沸腾两相流的测量数据中,也是与单相水流动时壁温随过载变化规律的不同之处. 仅靠管外空气绕流的强迫对流换热已不能解释该现象,需具体分析管内流体的流动和传热特性. 实验中测

量内壁温度采用的方法是在管壁上钻孔,将热电偶插入管壁内,由触头直接测量靠近壁面的流体温度,近似为内壁面温度。在沸腾两相流动中,由于重力和浮力效应,蒸汽相位于管道顶部,波状流相界面处于管道轴心位置。转台旋转时,点1测量的内壁温度理论上应为蒸汽相在边界层底层的温度。由于离心力的作用,由图7也可明显看到汽、水两相冲击交混在一起,相间没有明显的界面,载荷为 $1g$ 时,管内仍为两相流体,相间的冲击较强烈,热电偶所测量的内壁温会受到轴心高温介质冲击的影响,从而随转速增加而升高。对于点2,3处内壁温度的变化与单相水类似,其原因这里不再赘述。停止旋转后静止时的内壁温度基本恢复到旋转前静止时的温度。因此,水平管内流体加热至汽水两相流时,旋转对同一截面上不同位置的内壁温度会有不同程度的影响。

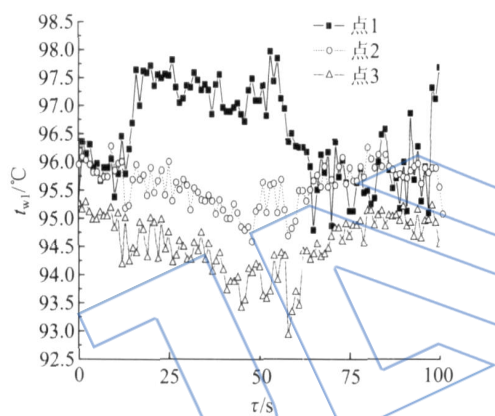


图10 两相流周界内壁温随时间的变化图

Fig. 10 History of inner wall temperatures of two-phase flow

4 结 论

本文利用旋转实验台以及沸腾流动装置,通过摄像机对旋转过程中沸腾两相流的流型变化进行可视化拍摄,获得了动载作用下水平管内沸腾两相流的流型图和相应的流动及传热参数,为以后在过载状态下的两相流型图的绘制奠定了基础。主要结论归纳如下:

1) 单相水加热流动时两种方法计算的热量耗散比较接近,过载对系统的热平衡性影响不大。而汽水两相流时,过载增大了系统的热损失,削弱了流体的热量获得。

2) 过载强烈影响管内两相流动。管内的流阻大小受流动相数影响,动载对沸腾两相流动损失的影响比单相水更强烈。

3) 过载促进管外散热,管外传热系数随过载增大而增加。过载还削弱了管内流体的得热能力。静止时,两相流因潜热量的存在,其传热能力高于单相流;而随着过载的增大,两相流逐渐转变为单相流,其换热量降低。

4) 过载会降低管内壁面温度,但两相流动也会提高内壁面顶部的温度。

参考文献:

- [1] Kim J, Benton J, Mcquillen J, et al. Subcooled pool boiling heat transfer in microgravity and high-g[J]. Journal of Heat Transfer, 2001, 123(1):620.
- [2] Chen R T N. Flight dynamics of rotorcraft in steep high-g turns[R]. AIAA Paper 82-1345, 1982.
- [3] Curreri P, Downey J P, Ramachandran N, et al. Experimental results and numerical modeling of solidification during aircraft high-g arcs[R]. AIAA Paper 92-0843, 1992.
- [4] Naoumov V, Parang M, Shough C, et al. Droplet entrainment in two-phase flow under reduced gravity[R]. AIAA Paper 2007-743, 2007.
- [5] Barry J, Crowley C. Simulation of two-phase systems in variable gravity[R]. AIAA Paper 2001-0929, 2001.
- [6] 刘艺涛. 动载作用下水平和直角弯管内两相流动的数值模拟[D]. 南京:南京航空航天大学, 2005.
LIU Yitao. Numerical evaluation of two-phase flow in horizontal and orthogonal pipes under high-g condition [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
- [7] 马良军. 动载作用下管内两相流流动特性实验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2007.
MA Liangjun. Experimental research on flow characteristic of two-phase pipe flow under high-g condition [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)