

文章编号: 1000 8055(2009)03-0542-05

动载作用下管内汽水两相流传热特性

赵 枚, 宋保银, 姚秋萍

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

摘 要: 设计搭建了旋转平台, 采用电加热的方法对过载状态下径向水平管内汽水两相流流动及传热特性进行了实验研究. 实验测试段为内径 20mm、长 400mm 的有机玻璃圆管. 通过调节转台转速来实现不同过载量, 进而研究过载状态下汽水两相流传热机理. 结果表明: 随着过载的增大, 管内两相流压力增大, 流阻急剧增大, 流量减小, 空隙率减小, 换热量减小, 管外传热系数增大.

关 键 词: 过载; 汽水两相流; 传热特性; 流动特性; 实验研究

中图分类号: V211.1

文献标识码: A

Heat transfer characteristic of steam-water two-phase pipe flow under high gravity

ZHAO Mei, SONG Bao yin, YAO Qiu ping

(College of Aerospace Engineering,

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

Abstract: In the present work, a rotating platform was established, whereby the experiment for investigating flow and heat transfer characteristics of the steam-water two-phase mixture flowing in a pipe positioned in radius direction of the platform was conducted by means of electric heating. The test section was a plexiglass circular tube with inner diameter of 20mm and length of 400 mm. Different gravities were obtained by changing rotational speed, and the effect of gravity on the heat transfer characteristic of steam-water flow was investigated. The results show that the bigger the gravity, the higher the pressure and flow resistance, and the lower the flow rate, the lower the void and the heat transfer capability, as well as the bigger the heat transfer coefficient in outside pipe.

Key words: high gravity; steam-water two-phase flow; heat transfer characteristic; flow characteristic; experimental research

随着航空航天技术的发展, 气液两相流技术已广泛应用于飞行器的能量管理和制冷系统. 飞行器的高机动性给机身带来较大的运动载荷, 机载蒸发制冷系统中制冷剂的凝结、蒸发及流动和传热过程都会受到过载作用的影响, 进而影响部件和系统的性能. 因此, 蒸发制冷循环的系统设计和运行的可靠性, 将在很大程度上依赖于对过载

作用下的汽水两相流机理尤其是其流动及传热特性的认识程度.

从国内外研究现状来看, 微通道内沸腾传热研究、两相流模化、两相流动结构研究较多^[1-4], 轴向旋转对单相流体传热的影响也有相关研究^[5-8], 但过载对两相流传热方面影响的研究甚少. 因此, 本文从实验出发, 对动载作用下两相流的传热特

收稿日期: 2008 03 12; 修订日期: 2008 05 20

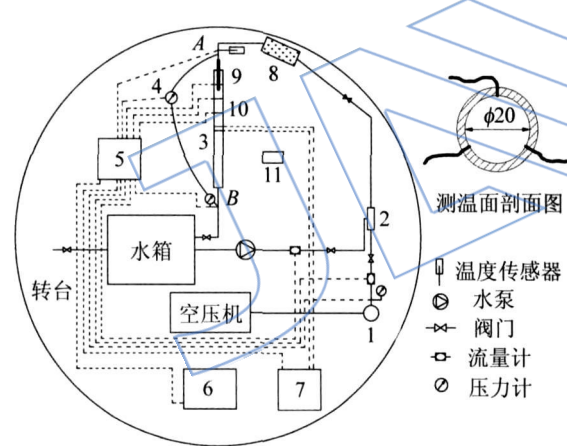
基金项目: 国家自然科学基金(50576035); 高等学校博士学科点专项科研基金(20040287017)

作者简介: 赵枚(1984-), 女, 河南周口人, 硕士生, 主要从事两相流流动与传热研究. E-mail: zhaomei0123@yahoo.cn

性进行初探性研究.

1 实验装置及过程

图 1 为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(图中实线为实验管路;虚线为信号传输线). 实验系统由电加热系统、工质循环系统、转台系统以及数据采集系统四部分组成. 工质循环系统采用的是经典的两相流模型——水和空气混合形成两相流, 包括水管路和气管路. 水管路采用泵驱动的方式从水箱中获取水相, 气管路由空压机的储气罐中获取气相, 两者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回流到水箱中, 形成一个封闭的循环系统. 系统既可以单独控制气、水的流量来研究动载对气液两相流传热的影响, 也可以对单相水加热至沸腾, 从而进行动载作用下管内流动沸腾换热研究. 所有设备均固定在转台上, 与转盘保持相对静止. 转盘的旋转由电机驱动, 通过调节变频器的电阻来调节转盘的转速, 从而实现不同过载量. 整个实验设备的供电通过电刷来实现无线供电.



1 稳压器; 2 混合器; 3 实验透明管段; 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

图 1 实验系统简图

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

实验过程中, 水由泵驱动先经预热器预热后进入透明测试段, 流动方向从 A 流向 B 点, 再由管内电阻丝加热直至沸腾. 测试段为内径 20mm、长 400mm 的有机玻璃圆管, 内装电阻丝以通电加热, 进出口端装压力传感器和热电偶, 中部装有测量流体空隙率的环形探针, 试验段前部有 3 个测温面, 直接测量内壁温度和流体温度. 各数据由电信号传入 ADAM-4017、4018 采集模块, 通过模

块转换加以量化, 再由 ADAM-4520 输出传入计算机, 利用 VB 程序对各物理量进行实时采集, 室内温度由温湿度计直接读取.

空隙率的测量在两相流实验中至关重要. 现阶段, 空隙率的测量方法主要有: 电容法、快速关闭阀门法、射线法、光纤法等. 考虑到实验台对测量仪器的要求, 采用西安交通大学研制的电导探针测试系统对空隙率进行测量. 该仪器由电导探针和检测集成仪组成, 可直接测量截面持液率, 再通过采集程序将持液率转换为空隙率.

2 数据处理

为得到传热规律, 分析时需先将原始实验数据遴选, 在选定范围内求其平均值, 计算得到稳定转速下各实验参数的变化趋势, 进而研究动载作用下沸腾传热机理.

首先, 是确定运动载荷 G_x . 在实验过程中, 运动载荷是由转盘旋转时产生的向心加速度来实现的, 其载荷方向与加速度相反, 大小以单位质量物体的地球引力 G 来衡量, 单位为 N. 向心加速度的大小为

$$a = \left(2\pi \cdot \frac{n}{60} \right)^2 l \tag{1}$$

载荷大小为

$$G_x = \frac{a}{g} G = \frac{a}{9.81} G \tag{2}$$

其中 n 为转速 (r/min); l 为测试段中心到圆心的距离, $l = 0.56\text{ m}$; g 为重力加速度 (m/s^2).

动载作用下, 在汽水两相流的流动特性发生改变的同时, 其传热模型也随之发生相应变化. 测试段作匀速旋转运动时, 管内、外壁换热过程近似为准静态过程, 测试段换热模型如图 2 所示. 实验从管内对流体加热, 总加热量为 P , 其有效加热量 q_e , 用来表征流体换热能力的大小. 针对该换热模型来分析静止和旋转状态下系统的热平衡性, 即通过对测试段上直接采集的管内壁温度 T_{wi} 、加热段进出口温度 T_{in} 和 T_{out} 、工质的体积流量 Q 以及空泡份额 α 等参数, 进行总加热量、有效加热量以及热损失的计算.

总加热量 P , 是由电加热器的功率来确定的. 实验中利用数字万用表直接测量稳定电压下的加热电阻 R , 从而计算加热功率

$$P = \frac{U^2}{R} \tag{3}$$

有效加热量 q_e , 就是工质吸收得到的热量. 在单相流动时表现为温升, 当工质达到饱和温度后, 变

成两相流动, q_e 表现为工质的温升显热 $\dot{q}'$ 和蒸发潜热 $\dot{q}''$ 两部分, 即

$$q_e = \dot{q}' + \dot{q}'' \quad (4)$$

其中用于流体温升的显热为

$$\dot{q}' = mc_p (T_{out} - T_{in}) \quad (5)$$

用于汽化的潜热为

$$\dot{q}'' = 1000 \Delta h_{fg} \cdot m_v = 1000 \Delta h_{fg} \cdot mx \quad (6)$$

式中 Δh_{fg} 为水的汽化潜热 (kJ/kg); x 为加热段出口处的干度。

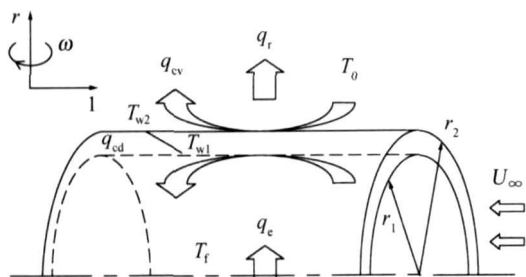


图2 测试段换热模型

Fig. 2 Heat transfer model for test section

热损失项 $\dot{q}_{loss}$ 包括辐射换热 q_r 和对流换热 q_{cv} 两部分. 对流换热静态时为自然对流换热, 动态时为强迫对流换热, 该过程可视为空气外掠圆管的对流换热过程; 壁内温度仅沿 r 方向发生变化, 为一维稳态导热过程. 将总加热量和有效加热量之差 $\dot{q}_{loss}$ 与计算热损失项 $\dot{q}_{loss}$ 进行比较, 分析系统的热平衡性, 进而验证热量的分配和守恒性, 以确定循环管路及数据采集系统的可行性和可信度.

实验中直接采集的参数为空隙率 α , 而研究沸腾两相流动体系时, 一般运用干度 x 进行分析计算, 两相流数学解析模型中, x 计算公式为

$$\frac{x}{1-x} = \frac{Sx_s}{1-x_s} \quad (7)$$

$S = u_v/u_l$ 称为两相滑速比, 对单相水加热至沸腾两相流动状态, 可近似认为无滑移即 $S = 1$. x_s 为准静态含气率, 相当于实时流场 (即当地) 内气液两相混合物中气相质量份额, 即

$$x_s = \frac{\rho_v A_v}{\rho_{A1} + \rho_v A_v} = \left[\frac{\rho}{\rho_v} \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) + 1 \right]^{-1} \quad (8)$$

一般实验中采用管外加热方法实现沸腾流动, 为了避免高温接触对有机玻璃的损坏, 实验中采用管内加热方式, 由于测量参数的有限性, 本文利用有效加热量 q_e 来表征对管内流体的传热能力. 管内流体对外的传热系数 h 通过热耗散量、散热面积以及散热温差确定, 其计算关系式为

$$h = \frac{q_{loss}}{A(T_f - T_{w1})} = \frac{1}{A} \frac{q_{loss}}{\frac{T_{in} + T_{out}}{2} - T_{w1}} \quad (9)$$

3 实验结果及误差分析

实验开始, 先在静止状态下控制液相流量在 0.15~0.18 m³/h 范围内, 加热单相水至沸腾两相状态. 保持流动和加热状态不变, 调节变频器使转盘作匀速旋转. 通过改变旋转速度对试验段进行不同过载下的流动沸腾实验和参数采集. 图3为沸腾两相流动参数随过载的变化曲线图, 视转台匀速旋转时产生的过载为稳定过载状态. 从图中可以看出, 随着过载增大, 压差增大, 出口压力增大, 液相流量减小, 空隙率减小. 分析其原因: 由于测试段径向布置在转台上, 管内流体流向沿半径指向圆心, 其加速度方向与流动方向相同, 过载可以看作是流体受到一个与流动方向相反的力的作用, 所以过载会增大管内流体的流阻, 阻碍其继续向前流动, 且过载愈大, 流动参数的变化趋势愈明显. 空隙率的变化, 反映了汽水两相流的两相比率的变化, 即动载对沸腾状态的影响. 在较小动载作用下时, 空隙率减少, 当载荷较大时, 空隙率变为零. 分析其原因: 当运动载荷作用于流体, 管内压力迅速增大, 致使液相饱和沸腾点的温度升高; 另一方面旋转增加了热量的散失, 降低了管内流体的温度. 因此, 流体温度低于饱和沸点温度, 两相流转变为单相水, 即空隙率减小至零. 实时的摄像资料也证实了这一点. 该实验结果与刘艺涛^[9]数值模拟结果以及马良军^[10]的实验结果具有相同的特点.

图4为汽水两相流动热平衡性随过载的变化趋势, 由图可知: 在静止状态下, 系统没有受到运动载荷的影响, 热损失比较小, 且 $\dot{q}_{loss}$ 与 $\dot{q}_{loss}$ 比较接近. 当过载量达到 0.5G 时, 对于 $\dot{q}_{loss}$ 而言, 在受过载作用的同时, 管内两相流空隙率的降低势必会影响到汽化潜热量的减小, 且减幅较大, 使得 $\dot{q}_{loss}$ 快速增加; 热损失明显增大, 热量耗散以管外壁的强迫对流散热为主, 即使为较小的对流速度, 强迫对流耗散的热量远大于自然对流状态下的散热量, 因此过载量在 0~0.5G 之间 $\dot{q}_{loss}$ 的增幅较大. 因此, $\dot{q}_{loss}$ 具有与 $\dot{q}_{loss}$ 相同的变化趋势. 随着转速的不断增大, 更强的运动载荷作用在系统上, 热损失继续升高, $\dot{q}_{loss}$ 与 $\dot{q}_{loss}$ 都相继缓慢增大. 在受到较小过载量作用时, 其热损失会明显增大, 当过

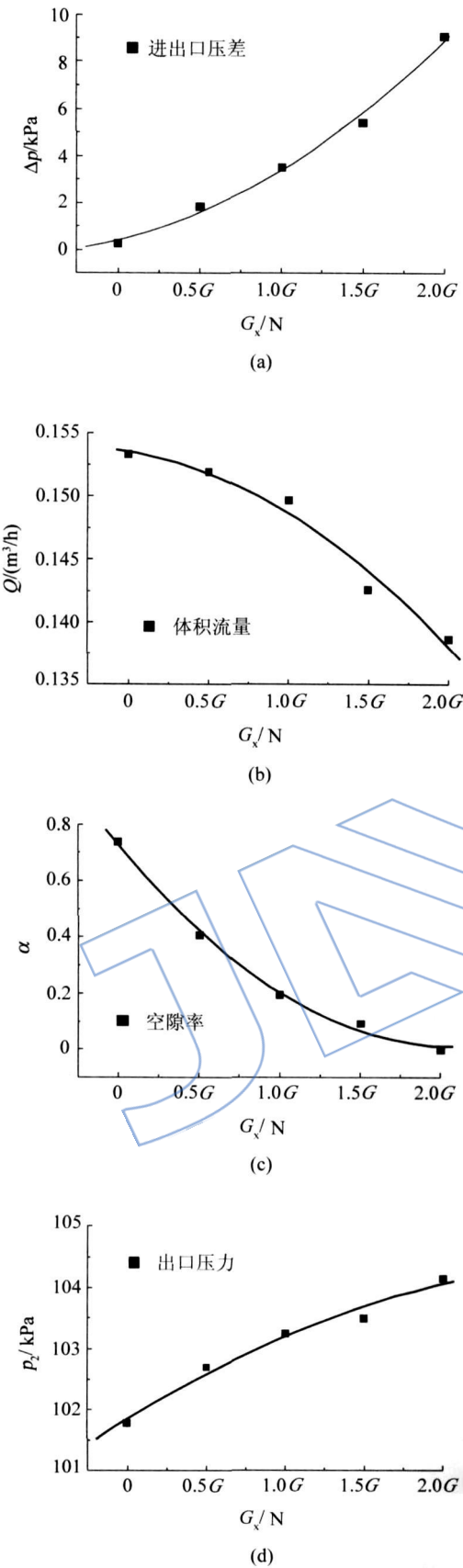


图 3 流动参数随过载的变化
Fig. 3 Variation of steam water two phase flow parameters with gravity

载量继续增大时, 热损失继续增大, 但其增幅相对会小一点. 比较沸腾两相流的两种热损失值, 在非旋转状态下, 系统的热平衡性较好, 旋转状态下, 实际的热损失高于计算的热损失, 且随着转速的增加, 这种差值越明显. 这是由于过载使得换热强度沿管远离旋转中心推移的缘故. 因此, 旋转增强了管道与外界的换热能力, 也就是说, 过载增大了系统的热量损失.

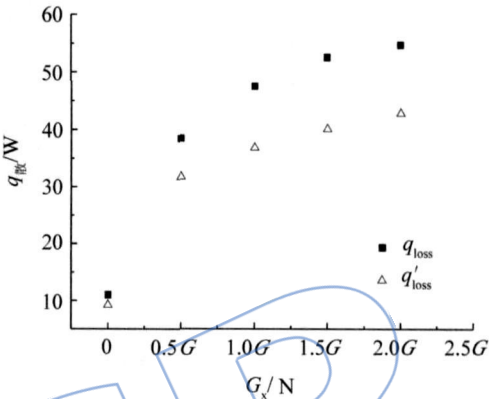


图 4 过载对两相流动热平衡性的影响
Fig. 4 Effect of gravity on thermal balance of two phase flow

图 5 为管外传热系数随过载的变化图, 从变化趋势可以看出, 管外传热系数在过载为 0~ 1G 之间快速增大, 这是热损失快速增加的结果, 当过载量超过 1G, 空隙率接近为 0, 流体逐渐变为单相水, 此时 h 有减小的趋势.

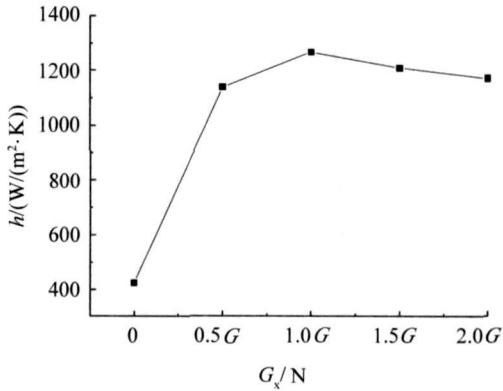


图 5 管外传热系数随过载的变化
Fig. 5 Variation of heat transfer coefficient with gravity

图 6 为管内换热量随过载的变化曲线图, 从图中可以明显看出: 随着过载的增大, 换热量降低, 且减幅也呈现逐渐减小的趋势, 这主要是由于换热量中汽化潜热量的变化和对外强化换热所引起的. 当过载为 0 时, 潜热量为最大值, 换热量达

到最高;随过载量由 0 增大到 1*G*,向外散热快速增加,空隙率快速减小,潜热量急剧减小,换热量也相应降低;当过载量达到 2*G* 时,向外散热达到最大值,空隙率为 0,此时流体介质为单相水,不存在潜热量,对流体的有效换热量降为最低.由此可见,过载削弱了管内流体的换热能力.

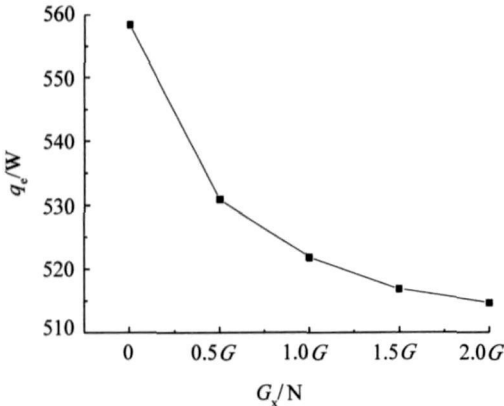


图 6 换热量随过载的变化

Fig. 6 Variation of effective heat with gravity

基于实验系统测量仪器的精度,对测量参数和性能参数进行了误差分析和计算,确定了相关数据的准确度和可靠性,如表 1 所示.

表 1 测量参数误差

Table 1 Error of measurement parameters

测试仪器	精度	性能参数	参数误差/%
温度热电偶	± 1℃	P	0.8246
涡轮流量计	0.5%	q_e	10.1118
压力传感器	0.5%	Re_1	0.2828
压差变送器	0.075%	h	10.1651
空隙率	10%	Nu	10.1651
万用表	0.8%	q_{loss}	1.7549
调频器	0.2%	a	0.3605

4 结 论

本文主要针对过载状态下水平管内汽水两相流动和传热特性进行了实验研究,通过对实验数据分析整理,获得如下结论:

1) 过载作用会影响管内流体的流量、压力、流阻以及空隙率.过载与流动方向相反时,随过载增大,管内流体压力增大,流阻急剧增大,液相流量减小,空隙率减小.

2) 过载破坏了系统的热平衡性,促进了管外散热.静止时,管壁散热以辐射换热为主,而过载状态下,管外散热以强迫对流散热为主,且随着过载的增大,外掠圆管外壁的空气流速增加,其对流散热量迅速增大.因此,管外散热系数随过载增大而增加.

3) 过载削弱了管内流体的换热能力.静止时,两相流传热能力高于单相流,其主要因素就是潜热量的存在,而在过载增大过程中,管外换热量增大,两相流逐渐转变为单相流,其换热量降低.

参考文献:

[1] 纪军,刘涛,林宗虎,等.两相流研究的国际动向[J].国际学术动态,2005:25-26.
JI Jun, LIU Tao, LIN Zonghu, et al. International trend of two phase flow [J]. International Academic Trend, 2005: 25-26. (in Chinese)

[2] Pettersen J. Flow vaporization of CO₂ in microchannel tubes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2004, 28(23): 111-121.

[3] 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[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002, 28(6): 927-941.

[4] Ohta H, Kawasaki K, Okada S, et al. On the heat transfer mechanisms in microgravity nucleate boiling [J]. Advances in Space Research, 1999, 24(10): 1325-1330.

[5] Seghir Ouali S, Saury D. Convective heat transfer inside a rotating cylinder with an axial air flow [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 45(12): 1166-1178.

[6] Aus der Wiesche S. Heat transfer from a rotating disk in a parallel air crossflow [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 46(8): 745-754.

[7] Chiu H C, Jang J H, Yan W M. Combined mixed convection and radiation heat transfer in rectangular ducts rotating about a parallel axis[J]. International Journal Heat and Mass Transfer, 2007, 50(21-22): 4229-4242.

[8] Song F, Ewing D, Ching C Y. Experimental investigation on the heat transfer characteristics of axial rotating heat pipes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(22): 4721-4731.

[9] Liu Y T. Numerical evaluation of two phase flow in horizontal and orthogonal pipes under high *G* condition [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.

[10] Ma L J. Experimental research on flow characteristic of two phase flow in pipes under high *G* condition [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.