

# 顺载和管径对管内水沸腾两相流流动性的影响

马启成 宋保银 单绍荣

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

**摘 要:** 利用地面转台旋转产生的离心力模拟飞行过载, 并在此过载作用下进行了不同管径内沸水两相流实验. 通过改变过载大小、管径、沸水流量等参数, 得到沸水流动特性的初步变化规律, 并对顺载作用下沸水的流型进行了拍摄. 结果显示顺载和管径对沸水的流动会产生明显的影响. 顺载作用使管内出现了一些新流型, 并且增加了流动的不稳定性. 压差随顺载的增大而减小, 且管径越大其减小的程度越大. 实验结果增加了动载下管道内工质流动特性的数据积累, 同时对飞行器上蒸发循环制冷系统的理论分析和设计提供一定的借鉴和参考.

**关 键 词:** 顺载; 管径; 沸水; 实验研究

**中图分类号:** V 211.1

**文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5965(2011)08-0943-05

## Effects of driving load and pipe diameter on flow characteristic of two-phase boiling water

Ma Qicheng Song Baoyin Shan Shaorong

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The centrifugal force resulted from a rotational platform was used to simulate the flying load and the experiment of two-phase boiling water flowing in different diameter pipes under driving load was conducted. By changing the parameters, such as driving load, pipe diameter, flow rate, and so on, some flow characteristics of the boiling water were obtained. The image of flow patterns under dynamic load was obtained with a video camera. The results reveal that the dynamic load whose direction is the same as the flow direction and pipe diameter dramatically influence the flow characteristic of the boiling water. Some new flow patterns were observed under dynamic load. In addition, the dynamic load weakens the flow stability of the boiling water. The greater the dynamic load, the lower the pressure drop. And for a bigger diameter pipe, the pressure drop will decrease more obviously. The experimental data can be added to the database in the flow characteristic of gas-liquid two-phase pipe flow under dynamic load, and can be a reference in developing the vapor-cycle cooling system for flying vehicles.

**Key words:** driving load; pipe inner diameter; boiling water; experimental research

尽管蒸发循环系统相比于空气循环系统有很多优点,如性能系数高、代偿损失小、无发动机引气等<sup>[1]</sup>,但是国内除了在直升机中有所使用外,该系统仍未广泛地应用到民用客机及军用飞机上,机载蒸发循环系统受动载影响的数据不足是限制其应用的重要原因.

通过地面转台旋转产生的离心力模拟空中过

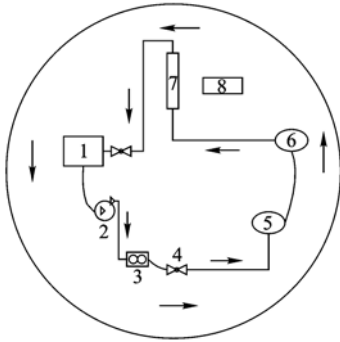
载,可在很大程度上减少空中实验的成本及危险,并且实验操作相对容易,因此地面模拟空中动载成为一种十分有效的途径.

从国内外的研究状况看,微重力下管道内两相流动沸腾换热已有了不少相关的研究<sup>[2]</sup>,同时也出现了些动载作用下两相流流动特性的报道<sup>[3-6]</sup>.为更深入地研究动载和不同管径对沸水

两相流的影响,本文在旋转平台上进行了动载下不同管径内沸水两相流实验.

## 1 实验装置

实验装置简图如图1所示,利用水泵2将水箱1中的热水抽出,经过流量计3的测量后先后被预加热器5、二次加热器6加热,加热后的热水变为沸水进入透明试验段7,最后沸水流回水箱.利用对着试验段的摄像机8拍摄、存储沸水在透明试验段中的流动过程.整个循环是在圆形旋转平台上进行的.通过控制箱的调节可以控制转台的转速,间接控制动载的大小.另外在试验段上安装有2个压力传感器和4个温度热电偶,以测量实验管段内的流体参数.



1—水箱;2—水泵;3—涡轮流量计;4—阀门;5—预加热器;  
6—二次加热器;7—透明试验段;8—摄像机.

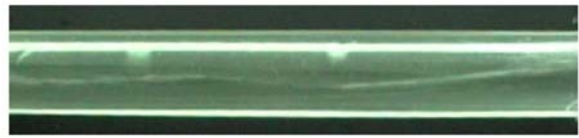
图1 实验装置简图

## 2 实验结果分析

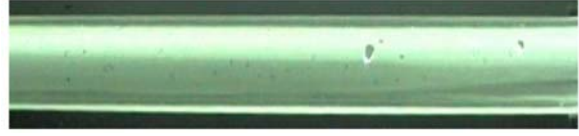
实验工质为沸水,实验的参数范围:沸水流量: $0 \sim 0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,管道内压力: $0.1 \sim 0.2 \text{ MPa}$ ,空隙率: $0 \sim 1$ ,实验转台提供的过载: $0 \sim 35 \text{ m/s}^2$ ,实验管道内径:D15(内径为15 mm)、D20(内径为20 mm)和D25(内径为25 mm)3种规格.

### 2.1 顺载下沸水的流型

实验过程中利用高速相机记录了沸水在3种试验段中的流动情况.通过观察发现,并不是以下所有流型都在每一种管径中出现,其中弹状流仅在D15中能观察到,由此可推测在相同顺载条件下管径对沸水的流型产生了明显的影响.图2为顺载 $a$ 从0到 $35 \text{ m/s}^2$ 过程中在D15中依次出现的主要流型分别为:波状流(图2a)、分层流(图2b)、界面流(图2c)、弹状流(图2d)、泡状流(图2e)、单相流(图2f).图中管道内流向与顺载作用方向均为从右向左.当没有动载或动载较小时,重力效应显著,导致相分布不对称.管内的蒸汽相流速较液相流速快,蒸汽吹拂液面并产生波动,同时



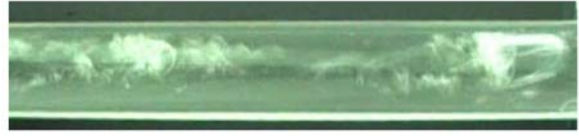
a 波状流( $a = 0.56 \text{ m/s}^2$ )



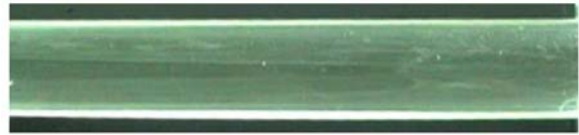
b 分层流( $a = 3.12 \text{ m/s}^2$ )



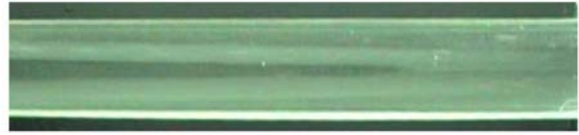
c 界面流( $a = 8.61 \text{ m/s}^2$ )



d 弹状流( $a = 16.94 \text{ m/s}^2$ )



e 泡状流( $a = 20.29 \text{ m/s}^2$ )



f 单相流( $a = 22.09 \text{ m/s}^2$ )

图2 试验段主要流型

拖着液面向前流动出现波状流.当动载稍大时,蒸汽相在流道上部,液相在流道下部.随着动载的增大,分层流的蒸汽相逐渐占据了流道大部分截面积,液相只占了很小的截面,但液相流动迅速,流速较高.随着动载的增加重力效应迅速减小,同时动载成为主导流型的主要因素.流道的下游首先出现了倾斜的汽液界面,且此界面几乎截断流道.上游分层流中的液相迅速进入界面流向后续的流道,同时界面上的部分蒸汽在高速液相的带动下进入后续流动并开始聚集,形成了界面下游的弹状流.随着实验进行,动载继续增大,界面流的汽液界面逐渐向上游移动,直至离开视场,此时流型转变为弹状流.随着动载继续增大,大块弹状气泡开始分裂成小气泡,流型开始向泡状流变迁.当动载大到一定程度时系统散热量大于加热器功率,此时管内没有蒸汽相产生,流动最终转变为单相流.

### 2.2 顺载下沸水的流动特性

图 3 ~ 图 9 为沸水流动参数随顺载的变化情况.从图 3 可以看出 3 种管道内的沸水流量随顺载的变化趋势一致:沸水流量随顺载的增大而减小.主要原因是:随着转台的旋转,虽然作用在流道内流体上的顺载作用方向与流动方向相同,加速了流道内流体流动,但是同时顺载下也形成了阻碍流动的压差,并且转台转速越高,管道内沸水受到的阻碍作用就越大,压差形成的原因是由于整个流体回路在平台上形成了一个连通器.当平台旋转产生动载的同时,衍生了以平台中心为圆心的环形等压面,而连通器的进出口没有严格在同一等压面上.因此动载形成的同时阻碍流动的压差也产生了,且动载越大,这种压差的作用就越明显.同时可以看出随着顺载增大不同管径内的沸水流量变化幅度接近,只是管径小的下降速度略微快些,管径为 25 mm 中的流体流量在加速度为 20 ~ 25 m/s<sup>2</sup>阶段处于较低水平,而后又有所回升,这主要是质量力与阻力的交互作用造成的.

沸水流速的表达式为

$$v = \frac{4 \times Q}{3600 \times \pi \cdot d^2} \quad (1)$$

雷诺数为

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (2)$$

其中,  $Q$  为沸水流量, m<sup>3</sup>/h;  $d$  为管道直径, m;  $v$  为沸水流速, m/s;  $\nu$  为沸水的运动粘度, m<sup>2</sup>/s; 由上述关于流量的分析并结合式(1)、式(2)不难理解沸水流速和雷诺数随顺载的变化情况(图 4、图 5).

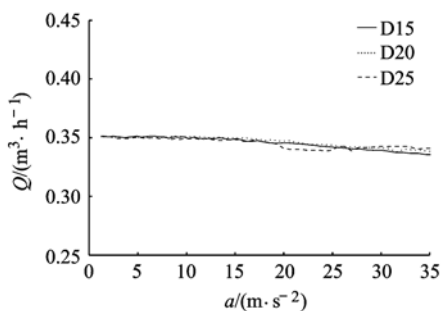


图 3 流量  $Q$  随顺载的变化

图 6 和图 7 为试验段进出口压力的变化,可以看到各管径内沸水的进口压力都随动载的增大而增大.由于进口较出口离旋转台的中心比较近,因此出口处的压升较进口处更为明显,表现在图上就是出口的压力线斜率更大.试验段出口与回水管道的连接段为突缩管,管径越大突缩的程度也越大,速度一定时,局部阻力损失也就越大,这

导致了在顺载不大且为同一定值时,管径越大出口压力越小.实验表明:D25 中的出口压力随顺载增加得最快,D20 次之,随后是 D15.这是因为:局部阻力损失与速度的平方成正比,随着顺载的增大,管径越大,速度减小的幅度越小(图 4),局部阻力损失的程度就越小,因此出口压力攀升的幅度越大.

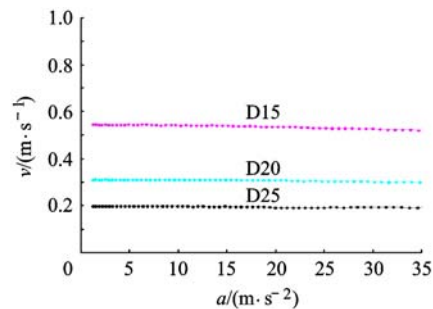


图 4 流速  $v$  随顺载的变化

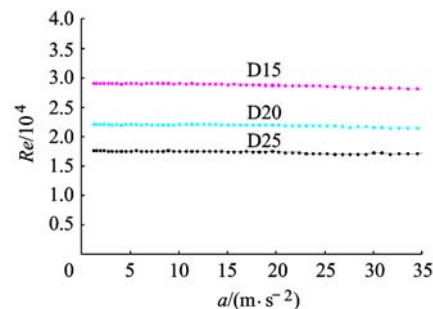


图 5 雷诺数  $Re$  随顺载的变化

综上关于各管径内沸水进出口压力变化幅度的分析可以得出各管径内压差的变化幅度(图 8):D25 中的压差变化最大,D20 次之,随后是 D15.可是不同管径内沸水的压差都呈下降趋势的原因却是:①静止时由于沿程阻力等原因沸水沿流动方向压力应该降低,即进口压力大,出口压力小,进出口的压差值为正值;②试验段沿转台径向布置,沿流动方向各点的绝对压力会在顺载增大时增大,并且下游点的绝对压力较上游增加的幅度更大,这就导致随着顺载的增大,进出口的压力差值为负值,并且顺载越大,压力差的绝对值越大.当顺载产生压差的影响大于流道内阻力时,就会呈现沸水压差随顺载减小的趋势.

顺载不大时空隙率随顺载的增加而增大,当顺载大到一定程度时,空隙率迅速下降为 0,并且整个过程中基本上是管径越大空隙率也越大.这是因为随着顺载的增大,管道中沸水依次经历了多种流型(图 2),而空隙率与流型有密切的关系<sup>[7]</sup>.随着顺载的增大,液相向出口处壅集,测试点液相的截面积逐渐减小,而汽相的截面积却逐渐增大,依次出现波状流、层状流、界面流等流态,

因此在顺载不太大时随着顺载的增大空隙率不断增大. 当层状流向界面流转变的界面越过空隙率测点时, 空隙率迅速下降, 紧接着在很短的时间内依次出现弹状流和泡状流, 当流型出现近似单相流时, 空隙率将会变得极小(图9). 同时从流型转变的持续时间上可以看出顺载越大流型转变得越快. 从传热的角度讲, 顺载越大, 裸露的试验段与周围环境的换热就会越剧烈. 当顺载大到一定程度, 外界对流换热由层流向湍流过渡, 系统散热量显著攀升, 加热器难以维持高散热下沸腾<sup>[8]</sup>时, 流体将会出现接近单相水的流态, 这就是空隙率在高顺载下相当小的原因.

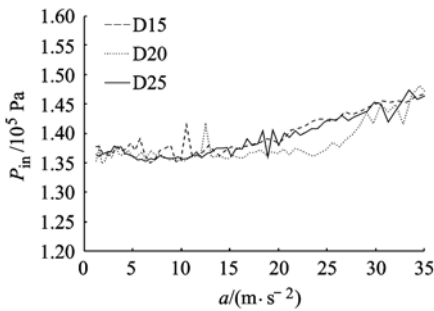


图6 入口压力  $P_{in}$  随顺载的变化

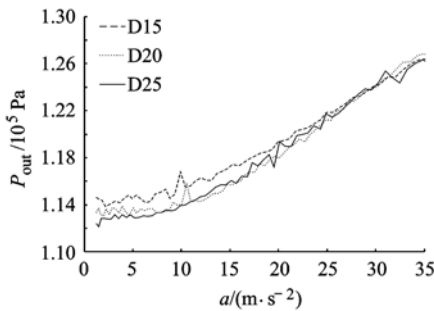


图7 出口压力  $P_{out}$  随顺载的变化

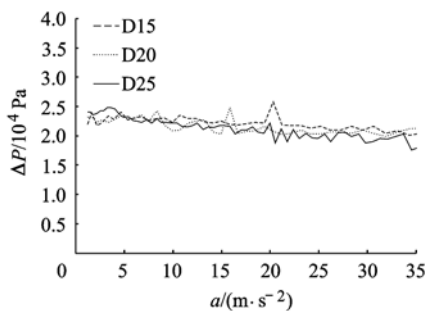


图8 压差  $\Delta P$  随顺载的变化

就整个试验段而言不同流型的转变过程需要一定的时间, 可是对某一管径的测点, 流型的转变是瞬时的, 因此空隙率会出现突变的现象.

### 2.3 顺载下沸水的流动不稳定性简析

由于旋转状态下的坐标系为非惯性系统, 要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, 导致顺载状态下流体

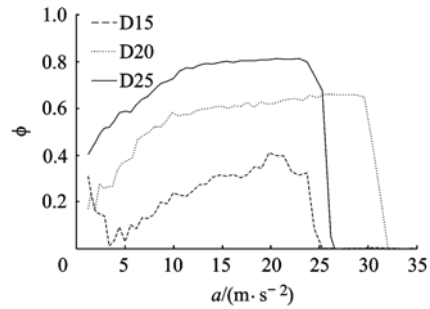


图9 空隙率  $\phi$  随顺载的变化

的流动问题极端复杂.

为观测到相关现象, 试验段裸露在环境中, 由于温差很大, 其与环境的换热剧烈, 从而反过来影响到试验段内流体的温度, 出现温度的非稳定性, 而温度的变化又会影响到沸水的物性. 随着实验的进行, 环路中不断地有蒸汽的产生与消亡. 同时由于顺载的作用, 使环路中的沸水流量发生着变化, 出现流量漂移. 从图2可知实验中出现过多种流型, 而不同流型之间的过渡与蒸汽含量、沸水流量的大小有关, 顺载的大小更是对流型的变迁起决定性作用. 然而这些参数在实验过程中却是不断变化的, 这就使得流动的不稳定性极端复杂.

## 3 结论

本文通过地面模拟空中动载, 对不同管径内沸水流动进行了一系列实验研究, 获得了沸水两相流在顺载下随管径的一些变化参数, 并对变化规律进行了一定的分析, 实验结果增加了机载蒸发循环系统的数据积累.

在管径为 15 ~ 25 mm, 过载为 0 ~ 35 m/s<sup>2</sup> 范围内, 本实验获得了顺载和不同管径对沸水的影响关系如下:

- 1) 由于顺载的作用使管道中出现了诸如泡状流、波状流、光滑分层流、搅拌流、弹状流等流型.
- 2) 相同顺载下, 管径越小管道中的流量、流速和雷诺数变化越大.
- 3) 进出口压力随顺载的增大而增大, 管径对进口压力的影响不大, 可是出口压力的攀升速度却随管径的增大而增大; 然而压差却随顺载的增大而减小, 并且管径越大其减小的程度越大.
- 4) 通过空隙率可以看出, 过载增加了流动的不稳定性, 且顺载越大流型变迁得越快.

### 参考文献 (References)

[1] 吴晓丽, 张兴娟, 袁修干. 直升机蒸汽循环制冷系统技术现状与展望[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(6): 57 - 59

- Wu Xiaoli, Zhang Xingjuan, Yuan Xiugan. Current status and perspective of cooling system of helicopter using steam cycling technique[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(6): 57 - 59 (in Chinese)
- [2] 吕成道, 李佛金, 程尚模, 等. 微重力下两相流动沸腾换热综述[J], 上海航天, 1997(5): 44 - 48  
Li Chengdao, Li Fojin, Cheng Shangmo, et al. Review of two-phase flow boiling heat transfer at microgravity[J]. Shanghai Astronautics, 1997(5): 44 - 48 (in Chinese)
- [3] 闫旭东. 旋转状态下倾斜管内两相流动与传热特性[D]. 南京: 南京航空航天大学航空宇航学院, 2008  
Yan Xudong. Flow and heat transfer characteristic of two-phase fluid in inclined pipes on a rotation platform[D]. Nanjing: College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008 (in Chinese)
- [4] 姚秋萍, 宋保银, 马良军. 动载下水平管内气水两相流流动特性[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(8): 1327 - 1330  
Yao Qiuping, Song Baoyin, Ma Liangjun. Flow characteristic of air-water two-phase flow in a horizontal pipe under high gravity [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(8): 1327 - 1330 (in Chinese)
- [5] 单绍荣. 管径及侧向载荷对管内沸腾两相流流动和传热影响[D]. 南京: 南京航空航天大学航空宇航学院, 2010  
Shan Shaorong. Effects of pipe diameter and dynamic load on the flow and heat transfer characteristics of two-phase boiling flow [D]. Nanjing: College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010 (in Chinese)
- [6] 闫旭东. 机载蒸发循环系统两相流换热特性试验研究[J]. 制冷与空调, 2008, 22(6): 7 - 11  
Yan Xudong. Experimental investigation on the heat transfer characteristic of two-phase flow in an onboard vapor cycle system [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2008, 22(6): 7 - 11 (in Chinese)
- [7] 姚秋萍, 宋保银, 赵枚. 动载下水平管内流动水沸腾两相流型实验研究[J]. 中国科技论文在线, 2009, 2(10): 1111 - 1116  
Yao Qiuping, Song Baoyin, Zhao Mei. Experiment research on two-phase flow pattern of boiling water flowing in a horizontal pipe under Hi-G condition [J]. Science Paper Online, 2009, 2(10): 1111 - 1116 (in Chinese)
- [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

(编辑:李晶)

## (上接第 936 页)

- [3] Campbell M. Analyzing countermeasures with real-time, complex scene simulation[J]. Aircraft Survivability, 2010(Fall): 29 - 31
- [4] 郭晓辉, 宋笔锋, 王旭. 具有电子对抗功能的飞机生存力评估方法[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(6): 71 - 75  
Guo Xiaohui, Song Bifeng, Wang Xu. Evaluation of survivability to an aircraft with electronic countermeasures system [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2005, 25(6): 71 - 75 (in Chinese)
- [5] 朱宝璠, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006  
Zhu Baoliu, Zhu Rongchang, Xiong Xiaofei. Effectiveness evaluation of battle planes [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2006 (in Chinese)
- [6] 苏畅, 张恒喜, 吴兆强. 对地攻击摧毁能力和生存能力的关系研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(1): 57 - 62  
Su Chang, Zhang Hengxi, Wu Zhaoqiang. A study of relation between execution and survivability in air-to-ground strike [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(1): 57 - 62 (in Chinese)
- [7] Fielding J P, Nilubol O. A design assessment methodology for combat aircraft operational effectiveness[R]. AIAA 2003-6551, 2003
- [8] Ito H. A study of the measures of effectiveness for the JMSDF Aegis destroyer in a littoral, air defense environment [R]. AD-A306533, 1996
- [9] 陈军, 张会生, 张继光. 基于 TOPSIS 理论的导弹武器系统性能评估[J]. 计算机仿真, 2010, 27(9): 83 - 87  
Chen Jun, Zhang Huisheng, Zhang Jiguang. Performance evaluation of missile weapon systems based on advanced TOPSIS theory [J]. Computer Simulation, 2010, 27(9): 83 - 87 (in Chinese)

(编辑:李晶)