文章编号:0258-0926(2001)01-0001-06

# 热流密度对汽水两相流压力波动特性的影响

### 白博峰,郭烈锦,陈学俊

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室,陕西 西安 710049)

摘要:实验研究了螺旋管内绝热和沸腾汽液两相流动时压力波动特性,分析了热流密度对压力波动的影响规律。结果表明沸腾时波动的均方根和分形参数(分维数、关联维数和 Kolmogorov 熵)与绝热两相流明显 不同,加热热流密度的大小影响各特征参数的大小及其随干度的变化规律。未考虑热流密度影响的流型图或 流型转变准则只能在小热流密度时使用。

关键词:汽水两相流;热流密度;螺旋管;压力波动;分形理论 中图分类号:TK123 文献标识码:A

#### 1 引 言

由于螺旋管的几何结构特性导致流体出现 二次流现象,即汽液两相流混合物沿管道做周 向旋转运动,这导致螺旋管内两相流型与垂直 管内的流型有差异印。沸腾现象普遍存在于螺旋 管蒸汽发生器等换热设备的运行过程中,与绝 热两相流动相比,在加热表面的边界层内有大 量的汽泡产生,在汽泡的生成、长大或湮灭、 脱离以及液相补充等过程中,对近壁区流场的 扰动更加强烈;流动是不断发展、非均匀、非 平衡的,流型的高度依赖于上游流动的历 史;流型同热流密度密切相关,壁面热流密度 不同,汽泡的数量、生长速度等都不同,这些 因素都强烈影响着流型及其转变。目前各种流 型预测式在推广到沸腾两相流动时都有很大的 局限性,甚至建立沸腾流动的流型转变标准都 难以实现[2]。此外,螺旋管内沸腾两相流型的 可视化识别十分困难,因此有必要探索汽水沸 腾两相流动压力波动规律以及流型客观识别等 问题,研究热流密度对压力波动特性的影响,

这对了解和分析沸腾两相流流型转变的规律十 分有益,同时也为流动监测和控制提供理论支 持<sup>[3,4]</sup>。

#### 2 实验系统和方法

实验系统如图 1 所示。实验工质为去离子 水。系统运行所需的压力由安装于屏蔽泵后的 稳压器和与之相连的高压氮气瓶提供。螺旋管 实验段由  $\phi$ 15×2 的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管弯制 而成,总长 2.54m,其中加热长度为 1.90m。 螺旋直径为 100mm,节距为 40mm,其结构如图 2 所示。在距离螺旋管出口 1.125 圈的位置上布 置了两个相距为 33mm 的 CY-B 型应变式压力传 感器,用来测量壁面静压力的变化。为了减小 压力波的衰减,引压管尽量短,均为 150mm。 在  $P_1$ 和  $P_2$ 又安装了一个 DP1151 型压差变送 器,以测量  $P_1$ 、 $P_2$ 之间的压差。本实验设有两 个加热段,蛇型管预热段和卧式螺旋管加热 段,两者的最大加热功率都是 100kW。

所有测量参数的时均值通过 IMP3595 数据

收稿日期:2000-04-25;修回日期:2000-08-06

© 1募角项目00 电家自然科学混合资即项目(158992160tf) nic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



图 1 实验系统示意图



图 2 螺旋管结构及测点布置

采集板和 IBM-PC386/20e 计算机采集。压力波 动信号由 PCL818HG 高性能 A/D 板和计算机进 行采集,每个信号的采样频率为 500Hz,采样 点数为 4096。主要参数的最大不确定性为:压 力等于 ±0.52%,出口热平衡干度等于 ±7.5%。 本实验的热工水力参数范围:系统压力  $P_{sys} =$ 1.0,2.0MPa;质量流速  $G = 430 \sim 880 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ; 热平衡干度  $x_e = -0.15 \sim 0.5$ ;热流密度 q = $0 \sim 455 \text{kW/m}^2$ 。

3 实验结果与分析

3.1 均方根分析

绝热流动时,系统压力  $P_{sys} = 2.0 MPa$  下压 力波动过程的均方根(RMS)与热平衡干度  $x_s$ 的 关系见图 3。根据均方根随干度的变化,不同的



图 3 系统压力 2.0MPa 下壁面静压力波动均方根分析 流量都可以粗略分为三个区:低干度的 RMS 下 降区,中等干度 RMS 急剧增长区和高干度的 RMS 减小区。第一区的变化说明,由于干度很 低,汽相主要以小汽泡的形状运动,随着干度 增加,汽泡的分布也更加均匀,因此压力波动 的均方根反而减小;干度进一步增加,汽泡的 合并过程占优,汽泡直径增大,当出现直径远 远大于周围小汽泡的大汽泡时,由于大汽泡与 周围液相的压力差别很大,故压力波动的分散 程度急剧增加;当大汽泡进一步增大,最后合 并进入环状流时,流动的扰动主要来源于液膜 内汽泡运动和液膜与汽相核心之间的界面波 动,压力波动的分散程度减小。可以推论,当 流动进入高于度区后,相界面的波动更加剧 烈,受扰动波的影响压力波动的均方根又略微 增加。由于实验热流密度的限制,对高流量实 验所能达到的热平衡干度较低。第一区流量对 压力波动的均方根的影响不明显,在第二区和 第三区内,流量越大,压力波动的均方根也越 高。图 3 的实验结果表明:均方根随热平衡于 度的变化规律与 Wambsganss<sup>[5]</sup>的实验结果相似。

对沸腾两相流,相同系统压力 P<sub>sys</sub>为 2.0MPa、质量流速 G为 880kg/m<sup>2</sup>·s时热流密 度对压力波动过程的均方根的影响结果见图 4。 由图 4 得以下结论:沸腾两相流动时的壁面静 压力 RMS 高于相同条件下的绝热流动;在低热 平衡干度区,不同热流密度的压力波动 RMS 随 干度的增加而减小,随后都随干度增加呈增加 趋势;当热流密度较小时(实验中的 307kW/m<sup>2</sup>), 压力波动的 RMS 随热平衡干度的变化规律与绝 热流动相似, RMS 突升时所对应的热平衡干度 与绝热流动几乎相同;当热流密度较大时(实验 中的 455kW/m<sup>2</sup>),压力波动的 RMS 随热平衡干 度的变化规律与绝热流动明显不同, RMS 变化 更加复杂, RMS 随热平衡干度的增加经历了多 次上升和下降的过程,并且 RMS 出现第一次突



升所对应的热平衡干度明显减小,这意味着流 型转变提前发生, RMS 在中高于度区的变化也 说明了管内汽液两相流动结构与转变特性与绝 热流动并非一致。热流密度对压力波动的影响 说明,即使系统压力、质量流速和热平衡干度 完全相同,由于热流密度的不同,压力和压差 的波动特性却可以相差很大。根据汽泡动力学 理论<sup>[3,6]</sup>,在加热表面及其附近液体边界层所组 成的系统中的温度随时间和空间位置而变,这 种非均匀温度场决定了汽泡的成长及运动过程 的特殊性,而加热热流密度是造成温度场不均 匀的主要因素之一。当热流密度升高时,壁面 活化核心数增多且汽泡频率增高,加热面液体 边界层产生脉动,汽泡出现相互交叉和重叠的 现象,形成大汽泡或汽块。定性而言,热平衡 干度不同,汽泡(块)脱离加热表面后与主流汽 泡、液体的相互作用不同,出现了如图5中所  $\pi(q=455 \text{kW/m}^2)$ 的情形。目前卧式螺旋管的 流型图和流型转变准则都没有考虑热流密度的 影响<sup>[1,2]</sup>,因此已获得的结论或成果只能在绝热 流动或较小的热流密度下适用,难以推广到大 热流密度的沸腾两相流动。



◎ 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

#### 3.2 分维数分析

混沌动力系统主要有以下两个特性[7]:(1) 相空间内混沌系统的轨迹不形成任何简单的几 何形状,而是构成分形几何结构:(2)混沌动力 系统对初始条件非常敏感。对于决定系统长期 演化的任一单变量的时间演化,均包含了系统 所有长期演化的信息。因此可通过决定系统长 期演化的任一单变量时间序列来研究系统的混 沌行为。吸引子的不变量,如分维数、Kolmogorov 熵、Lvapunov 指数在表征系统的混沌性 质方面起着重要作用。分维数能够揭示非线性 波动过程的长程相关特性,同时描述了波动曲 线的光滑程度。分维数与 Hurst 指数(H)的关系 为  $f_{d}=2-H$ 。当 H=1/2 时,过去增量与未来 增量之间相互独立; H<1/2 时为负相关, 过去 的增加(减少)意味着未来的减少(增加): H>1/ 2 时为正相关,过去的增加(减少)意味着未来的 增加(减少)趋势。

在实际计算中网格维数由于计算简单,应 用较多。网格计数维数定义为:

$$d_N(F) = -\liminf_{n \to \infty} N_r / \ln r \tag{1}$$

上式中,  $N_r$ 为集合 F 与空间  $R^n$  上的 r 网格相 交的网格格子数。对离散信号  $f(t) \subset F$ , 将  $R^n$ 划分为尽可能细的  $\Delta$  网格,将集合 F 离散化成 数字点集。这样,  $N_{\Delta}$  相当于在离散空间(分辨 率即点间间距为  $\Delta$ )上集合 F 的点计数。将  $\Delta$  网 格放大为  $k\Delta$  网格,令  $N_{k\Delta}$  表示分辨率为  $k\Delta$  上 集合 F 的点计数。最后有 k 个不同网格的点计 数:  $N_{k\Delta}$ , k = 1, 2, ..., K, 其中 K充分大, 使得  $N_{k\Delta}$ >1。 $N_{k\Delta}$  由下列方法求得, 令

$$D(k\Delta) = \sum_{j=1}^{N_{b}/k} \left| \max(f_{kj-(k-1)}, f_{kj-(k-1)+1}, \Lambda, f_{kj+1}) - \min(f_{kj-(k-1)}, f_{kj-(k-1)+1}, \Lambda, f_{kj+1}) \right|$$
(2)  
$$N_{k\Delta} = D(k\Delta) / k\Delta$$
(3)

式中, $N_0$ 为离散信号的长度。由公式(1)知,  $\ln N_{k\Delta} \approx - d_N(F) \ln k\Delta + \ln C$ ,于是容易由最小二 乘法得到网格分维数的计算公式

$$d_N(F) = \frac{K \sum \ln k \ln N_{k\Delta} - \sum \ln k \sum \ln N_{k\Delta}}{K \sum \ln^2 k - (\sum \ln k)^2}$$
(4)

组热流密度分别为0、307、405kW/m<sup>2</sup>,两组质 量流速分别为 580、880kg/m<sup>2</sup> · s 的实验结果。 由图 5 得到以下结论: (1) 螺旋管内沸腾两相流 的压力波动的分维数与热平衡干度的关系不 大,基本维持在某一值附近。这同时说明了流 型对沸腾两相流的分维数影响不大。(2)分维数 随热流密度的增加而增加。当热流密度为0时 (绝热流动)分维数最小,对  $G = 880 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ , 分维数约为 1.02; 对  $G = 580 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ,分维数 约为 1, 12。在高热流密度下,分维数接近干 1.50,即压力波动接近随机运动过程。(3)质量 流速对分维数的大小有一定的影响,对绝热流 动和有加热的沸腾过程,580kg/m<sup>2</sup> · s 下的分维 数比  $880 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$  时的分维数大。文献[8]中给 出了沸腾汽液两相流的压力波动过程,在低压 下分维数为 1.15, 高压时的分维数为 1.36。但 作者没有给出具体的低压和高压的数值以及质 量流速、热平衡干度的大小。本文的结果表明 加热热流密度对压力波动的分维数有很大影响。

3.3 关联维数分析

根据非线性动力学理论,时间序列有着非 常丰富的信息,它蕴藏着参与动态的全部变量 的痕迹,这是因为各变量之间有关联作用。分 维数不能反映这一特性,关联维数能够提供关 于系统动态的更多信息,能够描述时间序列蕴 藏着参与动态过程的全部变量的相互关联的程 度。对理想的动力系统,D<sub>2</sub>=1时,系统处于 自持周期振荡,D<sub>2</sub>=2时系统处于两种不可约 频率的准周期振荡,当 D<sub>2</sub>不是整数或大于 2 时,系统表现出对初始条件敏感的混沌态。

Grassberger 和 Procaecia 根据嵌入理论与重 建相空间的思想提出了从时间序列直接计算关 联维数  $D_2$  的算法<sup>[9]</sup>。记压力波动时间序列{ $x_k$ , k = 1, ..., N},将其嵌入到 m 维空间  $R^m$ 中, 得到一个点集,其元素记作

 $x_n(m, \tau) = (x_n, x_{n+1}, \Lambda, x_{n+(m-1)\tau}),$ 

 $n = 1, 2, \dots, N_m$  (5)

从这  $N_m$  个点中任意选定一个参考点  $X_i$ , 计算 其余  $N_{m-1}$  个点到  $X_i$  的距离  $r_{i,j}$ , 然后计算关联 积分函数

不同热流密度的压力波动的实验结果见  

$$C_m(r) = \frac{2}{N_m(N_m-1)} = \sum_{k=1}^{N_m} H(r-r_{ij})$$
 (6)  
图 599 图 50 中小给出了系统压力为 1 E0MPartic Publishing House, Am Inghts reserved, http://www.cnki.net

关联积分的物理含义为吸引子相空间内小于距 离 r 的点对数。对充分小的 r , 关联积分函数逼 近下式

$$\ln C_{m}(r) = \ln C + D_{2}(m) \ln r$$
(7)

当 *D*<sub>2</sub>(*m*)不随相空间维数 *m* 升高而改变时即为 最终所求的关联维数 *D*<sub>2</sub>。

热流密度对压力波动关联维数的影响结果 见图 6。图 6 说明关联维数与热平衡干度有一定 关系,也同具体的热流密度的大小关系密切。 对绝热流动,压力波动的关联维数最小,随着 热流密度的增加,关联维数也增加。由于实验 系统总加热量的限制,热平衡干度范围比较 小,难以发现关联维数随干度完整的变化规 律。质量流速对关联维数的影响不大。



图 6 热流密度对压力波动关联维数的影响

#### 3.4 Kolmogorov 熵分析

Kolmogorov 熵是在相空间中刻画混沌运动 最重要的量度,可以区分规则运动、混沌运动 和随机运动。对规则运动, $K_2=0$ ;在随机系统 中, $K_2 = \infty$ ;若系统表现为确定性混沌,则 $K_2$ 是大于0的常数。 $K_2$ 越大,信号的混沌程度越 大,或说明系统越复杂。时间序列 $K_2$ 熵与关联 积分函数 $C_m(r)$ 的关系如下:

 $C_m(r) \approx r^{p_1} \exp(-m\tau K_2)$  ( $m \to \infty$   $r \to 0$ ) (8) 或流型转变准则只能在小热流密度时使用。沸 两边驱对数 (分集因对充分小的ourn当 Dec不随emultis 腾西相流的分形参数(分集数、 杀联集数积 Keltinet

改变时,有

$$K_2 = \lim_{\substack{r \to 0 \\ m \to \infty}} \frac{1}{\tau} \ln \frac{C_m(r)}{C_{m+1}(r)}$$
(9)

热流密度对压力波动 Kolmogorov 熵的影响 结果见图 7。主要结论如下:(1)对绝热流动, Kolmogorov 熵的大小及其变换规律与热平衡干 度有关,质量流速的影响不明显;(2)热流密度 影响 Kolmogorov 熵的大小及其变化。在较低的 热流密度(307kW/m<sup>2</sup>)下,Kolmogorov 熵高于绝 热流动,但高热流密度时相反。说明压力波动 由于系统的耗散所造成的信息损失与加热热流 密度的大小关系密切;(3)质量流速的大小影响 Kolmogorov 熵在不同热流密度下的变化,但具 体原因有待进一步研究。



图 7 热流密度对压力波动 Kolmogorov 熵的影响

#### 4 结论

螺旋管内汽液两相流动时压力波动 RMS 分 析表明: 热流密度对压力波动过程的影响很 大,当热流密度较小时,波动过程的 RMS 随热 平衡干度的变化规律与绝热流动相似,当热流 密度较大时,波动规律与绝热流动明显不同, RMS 变化更加复杂。未考虑热流密度的流型图 或流型转变准则只能在小热流密度时使用。沸 腾两相流的分形参数(分维数,关联维数和 Kole mogorov 熵)与绝热两相流明显不同,热流密度 的大小影响分形参数的大小及其变化规律。在 高热流密度下,分维数接近于1.50,即压力波 动接近随机运动过程;关联维数随着热流密度 的增加而增加;较低的热流密度的 Kolmogorov 熵高于绝热流动,但高热流密度时相反。

#### 参考文献:

- [1] 郭烈锦.卧式螺旋管内汽(气)液两相流体动力学特性[D]. 西安:西安交通大学博士学位论文,1989.
- [2] Hetsroni G. 多相流动和传热手册[M]. 鲁钟琪等译, 北京:机械工业出版社, 1993, 151~163.
- [3] Jain P K, Roy R P. Stochastic Characteristics of Vapor Fraction and Wall Pressure Fluctuations in Boiling Flows

[J]. Int. J. Multiphase Flow, 1983, 9(5): 463 ~ 489.

- [4] 白博峰. 汽(气)液两相流参数波动特性与流型在线 自动识别的理论和实验研究[D]. 西安:西安交通大 学博士学位论文,1999.
- [5] Wambsganss M W, Jandrzejczyk J A, France D M. Determination and Characteristics of the Transition to Twophase chug Flow in small Horizontal Charnels[J]. ASME J. of Fluid Engineering, 1994, 116: 140 ~ 146.
- [6] 林瑞泰.沸腾换热[M].北京:科学出版社,1988, 86~188.
- [7] 李后强,汪富泉.分形理论及其在分子科学中的应用[M].北京:科学出版社,1993,191~194.
- [8] 郑维敏.正反馈[M].北京:清华大学出版社, 1998,118~122.

## Effect of Heat Flux on Fluctuating Pressure in Steam-Water Two-Phase Flow

BAI Bo-feng, GUO Lie-Jin, CHEN Xue-jun

(State Key Lab of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University ShanXi Xi'an, 710049 China)

**Abstract**: Experiments are carried out in the present paper to study the feature of pressure fluctuating in helical coil for both adiabatic and boiling steam-water two-phase flows. And the effects of heat flux on the fluctuations are stressed study. It shows that heat flux has great influence on the fluctuation feature. The root mean square (RMS) of the fluctuation process under the condition of low heat flux is similar as that of adiabatic flow, while the RMS of great heat flux differs greatly for that of adiabatic flow. The fractal dimension is close to 1.50 under the condition of great heat flux, which means the pressure fluctuating is approaching stochastic process. The correlation dimension increases with increase of heat flux. The Kolmogorov entropy on the condition of low heat flux is greater than that of adiabatic flow, while the contrary appears under the condition of great heat flux. It can be concluded that the flow pattern map and transition theories for flow patterns on basis of adiabatic flow just can be extrapolated to boiling flow with low heat flux.

Key words : Steam-water two-phase flow ; Heat flux; Helical coil ; Pressure fluctuation ; Fractal theory

作者简介:

白博峰(1972—),男,讲师,1999年毕业于西安交通大学热能工程专业,获博士学位,现从事多相流动智能检测 理论和热科学的研究工作。

郭烈锦(1963—),男,教授,1989年毕业于西安交通大学热能工程专业,获博士学位,现从事多相流热物理和氢能转化的研究工作。

陈学俊(1919—),男,教授,中国工程院院士,1946年毕业于美国普渡大学机械工程系,获硕士学位,现从事多 相流与传热研究工作。 © 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net