

方形组件棒束间空气-水两相流动特性

李晨飞, 王海军, 罗毓珊, 陈听宽

(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:在第四代核反应堆概念设计中,超临界水冷堆以其系统简化、高效率等优点而备受关注,成为下一代反应堆中最具竞争力的堆型之一。本工作以超临界压力水冷却反应堆方形堆芯概念设计为背景,以空气-水两相流为介质,在不同通道结构下,等同于气流速度 1.2 ~ 70 m/s、液体流速 0.2 ~ 2.8 m/s 内,对棒束间的气液两相流动过程进行可视化试验。试验观测到了 4 种主要流型,并给出了相应的流型图。同时,将实验数据与利用几种常用两相摩擦压降计算方法得出的结果进行比较,拟合出了两相摩擦压降的预测公式。

关键词:超临界水冷堆;可视化;两相流;流型;摩擦压降

中图分类号:TL41 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-6931(2007)S0-0062-06

Flow Characteristics of Air-Water Two-Phase in Bundles of Square Fuel Assembly

LI Chen-fei, WANG Hai-jun, LUO Yu-shan, CHEN Ting-kuan

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

Abstract: In the conceptual design of the generation IV nuclear reactor, supercritical water-cooled reactor (SWCR) is one of the most competitive reactor style because of its outstanding advantages such as simple system and high efficiency. In one conceptual design, the fuel assembly in SWCR is square. On the basis of this design, a visualization experiment was carried out to get the air-water two-phase flow characteristics in square fuel assembly. The superficial air velocities were taken as 1.2 to 70 m/s and superficial liquid velocities were taken as 0.2 to 2.8 m/s in this test. Four flow patterns were observed and corresponding flow pattern map was established. The friction pressure drop of air-water two phase flow in square fuel assemble under above test parameters was obtained and a correlation was given to predict the two-phase pressure drop in this flow channel.

Key words: supercritical water-cooled reactor; visualization; tow-phase flow; flow pattern; friction pressure drop

收稿日期:2007-05-08;修回日期:2007-07-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10505017)

作者简介:李晨飞(1983—),男,陕西西安人,硕士研究生,热能工程专业

在核反应堆的堆芯设计中,冷却剂在燃料棒束间的流动特性是需考虑的重要部分。本工作在超临界水冷堆方形堆芯概念设计的背景下,对其流动模型作了适当简化,以期得出基础性结论。

试验通道属于非圆管道。对非圆管道的两相流的研究一直在发展,但由于非圆管道的多样性,许多研究都局限于自身的特殊性而难以得出可靠性较高的归纳性结论。目前,许多关于非圆管道流动的研究仍依靠试验得出相应领域内的经验性结论。

本试验通过可视化研究,现场观察和对视频资料的分析,得到试验通道下可能出现的流型及其发展规律,为以后的研究提供参考依据。同时,对试验通道的单相摩擦阻力系数和两相摩擦压降的计算方法进行初步探讨。鉴于通道截面几何形状的特殊性,本工作着重于通过对多种计算方法的比较,得出对于类似通道可靠程度较高的计算式。

1 试验系统

试验选取的流动通道为第四代超临界水冷堆概念设计之一的方形堆芯的单排3根燃料棒之间的方形空间,试验工质为空气-水。试验系统的布置如图1所示。试验段竖直放置。图2、3分别为试验段的截面和前侧面简图。

空气压缩机作为气源,从它引出两路,一路通过过滤装置后经流量测量系统通入气水混合器,另一路作旁路排向大气。水从水箱经过离心水泵后也分为两路,一路经电磁流量计通入气水混合器,另一路通过旁路阀后流回水箱。水和空气在气水混合器中混合均匀后,经过系统的稳定段再进入试验段流出后,最后进入气水分离装置。分离后,空气直接排入大气,水则循环流回水箱。

试验中气路流量的测量采用均速管。管道中有静压和动压两个取压孔,测出差压后按标定出的差压-流量关系线得到流量值。为保证精度,管道按不同的测量范围分出内径不相同的4路,彼此并行,通过闸阀选择工作通路。

试验段用有机玻璃加工而成。图3中的实心部分为模拟燃料棒,直径 d 为 10 mm,它与棒束侧面的管壁之间的间距 s 为 1 mm,燃料棒

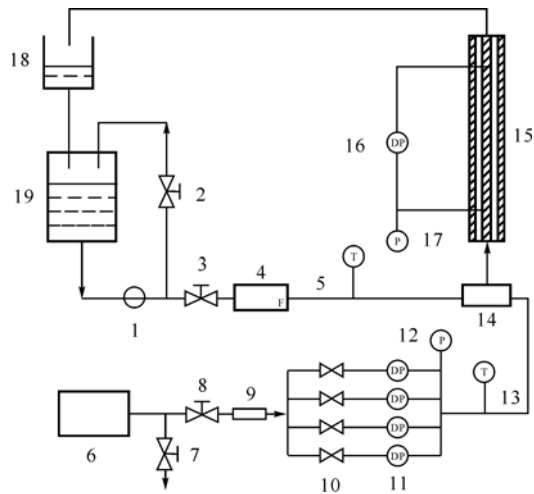


图1 试验系统简图

Fig.1 Experiment system

- 1——泵; 2,3,7,8,10——调节阀; 4——电磁流量计;
- 5,13——热电偶; 6——空气压缩机; 9——过滤器;
- 11,16——差压变送器; 12,17——标准压力表;
- 14——气水混合器; 15——试验段;
- 18——气水分离装置; 19——水箱

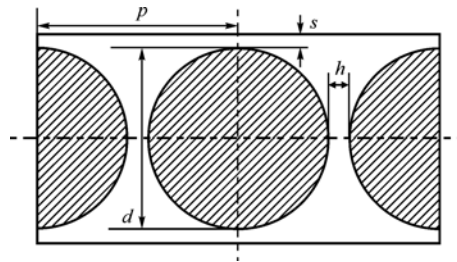


图2 试验段截面示意图

Fig.2 Cross section of test channel

$d=10\text{ mm}; s=1\text{ mm}$

之间间距为 h 。考虑到棒间距对通道的几何尺寸对流动特性的影响,试验中采用两种棒间距的通道,分别为: 1) $p/d=1.15$, 即 $h=1.5\text{ mm}$; 2) $p/d=1.3$, 即 $h=3\text{ mm}$ 。

可视化系统由摄像机、视频捕捉卡、计算机及视频处理软件组成。试验使用 Sony Digital Video Camera Recorder DCR-TRV900E 数码摄像机,快门速度为 $1/6000\text{ s}$,架设在试验段前侧面中部;由该摄像机采集的原始视频录像通过视频捕捉卡输入计算机;用软件进行处理,筛选出典型瞬态照片。

系统中所使用热电偶为铜-康铜热电偶丝。电磁流量计为开封仪表厂生产的 E-mag 型。

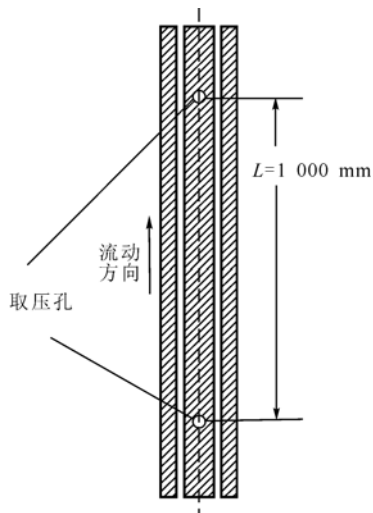


图3 试验段前侧面示意图

Fig. 3 Front side of test channel

差压通过 RosementU3051 差压变送器测量。除标准压力表外,其余原始测量数据皆通过 IMP3595 数据采集板进行采集并保存。

2 流型的可视化研究

2.1 流型的分类和定义

由图2可以看出,试验通道外围相通,整体形状类似于环状,但连通区域在两个对称轴上存在4个狭窄缝隙。由于通道自身特殊的几何形状,试验中观察到的流型及其发展规律与常见的上升圆管有所不同。在两种通道的试验过程中,都观察到了以下4种比较稳定的流型(图4)。

1) 泡状流

出现于折算气速和折算液速均较低时,表现为不规则的小气泡散布于液相中,气泡多为圆球或椭球形,主要分布于被窄缝分割成的4个近似三角形的小通道中。

2) 弹状流

随折算气速的增大,由泡状流发展而成。小气泡增多后碰撞聚集,形成较大的气弹。与上升圆管相比,试验通道中观察到的弹状流型有以下几点不同。

(1) 由于通道形状的直接影响,泡状流向弹状流过渡的过程中,首先分别在4个近似三角形的小通道中聚集成小气弹,彼此具有基本相同的尺寸和周期(图5)。气量继续增大到一

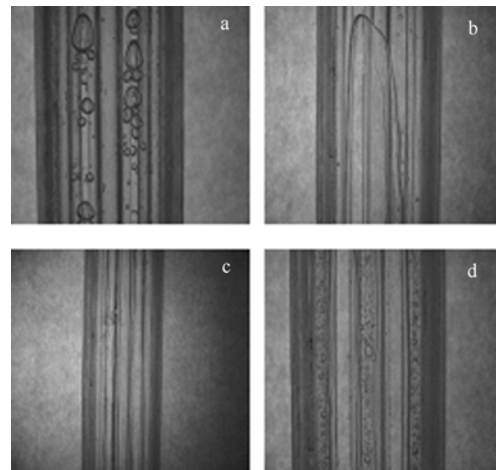


图4 试验观察到的主要流型

Fig. 4 Steady flow patterns observed during experiment

a——泡状流; b——弹状流; c——环状流; d——乳化环状流

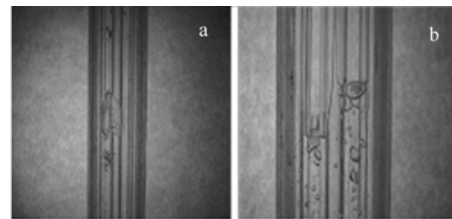


图5 通道中的小气弹

Fig. 5 Small slugs in small triangular channels

a——刚形成的小气弹; b——融合前的2个小气弹

定程度后,几个小通道中的小气弹融合成为基本填满通道截面的大气弹。(2) 大气弹的头部形状类似斜切柱面,气弹尖端位于4个小通道其中之一,并呈非对称形状(图4b)。其主要原因应归结于小通道下的表面张力作用。(3) 气泡融合不充分,气弹尾部气泡数量明显多于一般的圆管弹状流。试验通道空间狭小,表面张力和粘性力的作用明显变大,通道内紊流较弱,气泡横向运动减少,气泡的融合比圆管中的慢。

3) 环状流

试验观察到的环状流与圆管的基本相同。气速较高时,液相被挤向管壁,在管壁上形成一层液膜,气相通道被液膜包围。液膜在方形通道的4个角上较厚。

4) 乳化环状流

大量出现于两种通道的高流速测点。折算液速较低时,随折算气速的增大,由环状流发展

而成。现场观察时,表现为随气速增大,环状流逐渐显出白色,通道透明度下降,充分发展后呈乳白色。通过对视频图像的分析发现,其相界面分布与环状流的相似,流体整体上仍由相界面分为液膜与气芯两侧,但液膜中夹杂有大量尺寸微小的气泡,气泡较多时整个液膜呈泡沫状(图 4d)。此流型较少见,有待深入研究。

试验中也观察到了其他的圆形管道中的经典流型,如块状流和带纤维的环状流,但因其出现区域较小,将其认定为过渡流型。

2.2 流型图

通过实验分别整理出了两种试验通道的流型图(图 6)。其中,由于泡状流仅在折算气速接近零的极小区域出现,故未在图 6 中绘出。

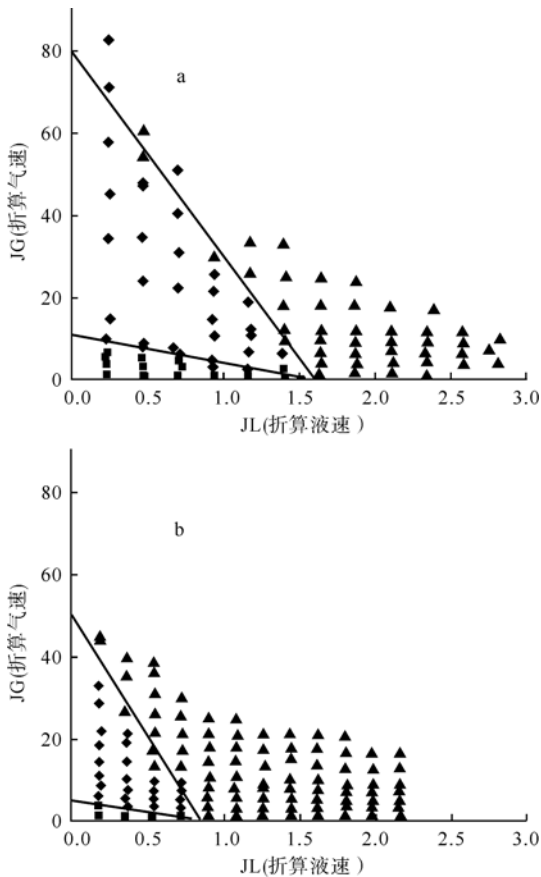


图 6 试验通道的两相流型图

Fig. 6 Flow pattern maps of test channels

a——通道 1; b——通道 2
 ■——弹状流; ◆——环状流; ▲——乳化环状流

由图 6 可以看出,两种通道的各种流型分布位置和形状近似,通道 2 与通道 1 相比,其弹

状流和环状流区域都有明显缩小,说明通道几何参慢 p/d 值对两相流型有较大影响。

3 单相摩擦阻力系数的研究

试验通道的单相摩擦阻力系数按照常用的 Fanning 公式计算得到:

$$\Delta p_F = \frac{\lambda L G^2}{D_h 2 \rho} \quad (1)$$

式中: λ ,单相流体摩擦阻力系数; L ,计算通道长度; G ,单相流体质量流速; D_h ,通道当量直径; ρ ,单相流体密度。

Sadamoti 等认为,在计算非圆形管道的摩擦阻力时,需考虑管道的几何形状参数,并对非圆形截面的几何形状因子做了较系统的研究。紊流时, λ 的计算式为:

$$\lambda = C_f Re^{-0.25} \quad (2)$$

其中:

$$C_f/C_{f0} = 3 \sqrt{\left[0.0154 \frac{C_f}{C_{f0}} - 0.012\right] + 0.85} \quad (3)$$

式中: C_f ,非圆形管道的紊流几何参数; C_{f0} ,圆形管道的紊流几何参数,在水利光滑区域, $C_{f0}=0.3164$; C_f/C_{f0} ,分别为非圆形管和圆形管的层流几何参数。

按照传统的 Blasius 公式,即 $C_f=0.3164$ 计算,在以水为工质时,由图 7 可以看出,计算结果与试验值相差较大。对通道 1 偏低,而对通道 2 偏高。而且,随着 Re 增大,在 $Re < 4000$ 的区域, λ 下降的比试验值慢。按照 Sadamoti 对环形通道的计算方法,两试验通道的 C_f/C_{f0} 值都取为 1.5,通过式(3)对 C_f 进行修正,得 $C_f=0.3395$ 。但从图中可看出,这一结果仍不理想。最终,按照试验值进行修正,得出本文试验范围内通道 1 和通道 2 对应的 C_f 值分别为 0.3801 和 0.2586。通道 1 和通道 2 的当量直径相差不大,但按照 Sadatomi 方法最终所得的几何因子却相差近 30%,表明了通道的摩擦阻力系数与其几何参数 p/d 值相关。此外,通道 1 和通道 2 中 h 分别为 1.5 和 3 mm,都属于狭窄缝隙,其微小变化对于通道流动特性的影响可能被放大。由于试验中只完成了两种通道的测试,关于棒间距对通道摩擦阻力系数的影响程度及其变化趋势,有

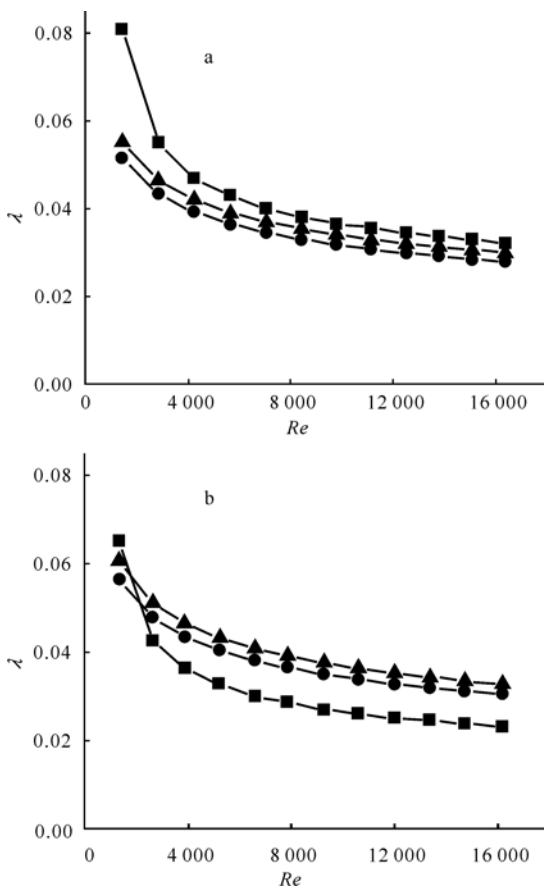


图7 摩擦阻力系数和雷诺数关系曲线

Fig. 7 Fitted curves of friction factor and Re

- a——通道1;b——通道2
 ■——试验拟合曲线;
 ●——按 Blasius 公式算得;
 ▲——按式(3)算得

待继续深入研究。

试验结果表明,对于类似的复杂非圆管道,考虑几何尺寸对摩擦阻力系数的影响是非常重要的,不能套用当量直径概念进行计算,这也支持了王树众等^[3]的结论。

4 两相摩擦压降的研究

本文中两相摩擦压降的试验值通过式(4)得到,有:

$$\Delta p = \Delta p_F + \Delta p_g + \Delta p_a \quad (4)$$

其中: Δp 为总压力降; Δp_F 为摩擦阻力压力降; Δp_g 为重位压力降; Δp_a 为加速度压力降。

试验模型简化后为绝热流动,计算中忽略 Δp_a 项以及试验段中截面含气率的微小变化对 Δp_g 的影响。

关于气-液两相摩擦压降,积累至今的计算式繁多,但彼此间的计算结果差别往往不小。由于通道截面特殊,故本文将试验值分别与苏联1950锅炉水循环算法、Lockhart-Martinielli算法、Chisholm算法和王树众等的改进方法的计算结果进行了比对分析。

苏联1950计算式的计算结果与试验值有一定偏差,通道1整体大约相差30%,通道2稍低。在试验测点中折算液速较低而折算气速较高的小部分区域,偏差超过200%。从整体上观察,其计算结果与试验值的变化趋势一致,能够反映出摩擦压降随折算气速、折算液速和干度等特征因素的发展方向。本文对此不再做进一步讨论。

Sadamoti后来在研究非圆管道的摩擦压降时,曾经使用过 $C=21$ 和 $C=26$,并认为 C 取21时结果良好。为此,将其两值分别代入式(5)与试验值进行了比较。

按照L-M方法,通过试验得出了两个通道的液相摩擦压降因子 Φ_L^2 与L-M系数 X^2 之间的对应关系(图8)。式(5)为Chisholm对L-M方法改进后提出的液相摩擦因子的关联式为:

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (5)$$

由图8可看出, C 值取21要比26更稍接近于试验值,但两者都在 X 较低的一侧与试验值存在较大偏差。对于此偏差,王树众等在文献[3]中指出,这与工质的质量含气率 x 相关,并作了理论分析。本试验的 x 范围主要集中在30%以下,按照其提出的改进方法对通道1的实验数据进行了拟合,求得其 C 值与质量含气率 x 的关系为:

$$C = 20.0914 - 89.8797x + 106.8733x^2 \quad (6)$$

从图8a可以看出,由式(5)与式(6)结合计算得出的结果与试验值吻合很好。作者又将式(6)直接应用到通道2的计算中,结果仍然与试验值吻合良好。从图8b可以看出,其准确度比Chisholm计算式有明显提高。上述结果表明,式(5)、(6)结合的计算式在本试验范围内具有较高的准确度和可靠度,可作为两相摩擦压降的预测计算式,同时可作为同类通道的参考计算式。

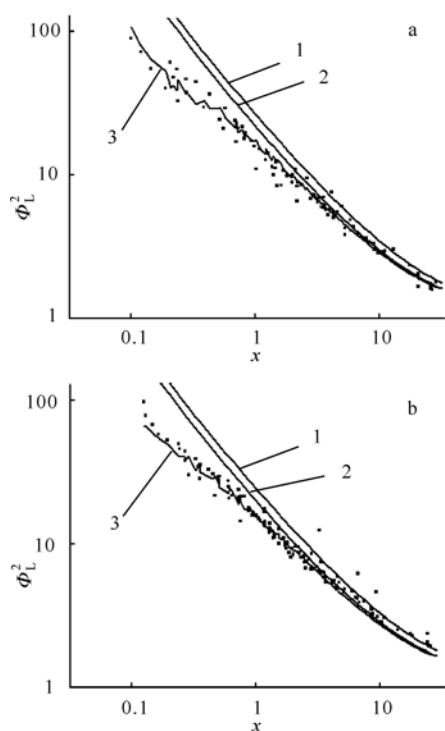


图8 几种方法与试验值的比较

Fig. 8 Comparison of different methods

a——通道1;b——通道2

1—— $C=26$;2—— $C=21$;3——式(6)的计算结果

5 结论

1) 本试验范围内,试验通道下主要存在泡状流、弹状流、环状流和乳化环状流4种稳定流型,与普通圆形管道有所不同。通道几何参数 p/d 对其流型分布与发展有一定影响。

2) 对于类似试验通道的复杂非圆管道,单相摩擦阻力系数的计算不能简单套用传统计算式,需要考虑通道几何尺寸进行修正。试验通道的摩擦阻力系数与通道的 p/d 值相关。

3) 试验通道的两相摩擦压降可用式(5)、(6)结合进行计算,其准确度较高。这一方法可作为类似通道两相摩擦压降的参考计算方法。

参考文献:

- [1] SADATOMI M, SATO Y. Two phase flow in vertical nincircular channels[J]. Int J Multiphase Flow, 1982, 8(6):641-655.
- [2] CHISHOLM D. Two phase flow in pipelines and heat exchanges [M]. London: George Godwin, 1983: 112-113.
- [3] 王树众,王栋,林宗虎. 竖直环形通道内的两相流摩擦阻力研究[J]. 西安交通大学学报,1994, 28(5):101-107.
WANG Shuzhong, WANG Dong, LIN Zonghu. A study of the two-phase frictional pressure drop in vertical annular channels[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1994, 28(5): 101-107 (in Chinese).
- [4] 杨朝初,毕勤成,杨冬,等. 非圆小通道内水-空气垂直上升流动流型研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(5):787-790.
YANG Zhaochu, BI Qincheng, YANG Dong, et al. Air-water upward flow in noncircular vertical minichannel[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(5):787-790(in Chinese).