

窄缝内汽液两相临界流实验研究

赵建福¹ 张征明² 张忠海²

(1. 中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080; 2. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要 本文实验研究了高过冷水在窄缝内形成的汽液两相临界流动现象, 考察了水的泄漏率与容器内压、温度、流道几何尺寸等影响因素之间的关系, 给出了一个简单的拟单相流预测关系式, 和实验数据的比较表明, 该关系式可以较好地预测高过冷水在窄缝内形成的气液两相临界流动现象。

关键词 临界流动; 汽液两相流; 窄缝; 过冷度

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2007)Suppl.1-0173-04

EXPERIMENT ON TWO-PHASE CRITICAL FLOW THROUGH NARROW CHANNELS

ZHAO Jian-Fu¹ ZHANG Zheng-Ming² ZHANG Zhong-Hai²

(1. National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080;

2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract In the present paper, the phenomenon of two-phase vapor-liquid critical flow of high sub-cooled water through narrow channels is studied experimentally. The flow rate of water are measured under different conditions of the vessel pressure, the inlet temperature and the geometrical parameters of narrow channels. A pseudo-single phase correlation has been proposed to predict the flow rate in this phenomenon. Comparing with the experimental data, the agreement is satisfactory.

Key words critical flow; two-phase vapor-liquid flow; narrow channel; subcooling

1 引言

汽液两相临界流动在核能、化工、航天等领域是一类常见的具有十分重要影响的流动现象。对于已知的流道几何特性与系统运行条件, 准确预测两相临界流率(即最大流动速率)至关重要, 尤其是在核安全领域更是这样, 例如, 在核电站破前漏(LBB)分析中, 能够准确估算泄漏率的模型是正确推演裂纹尺寸, 进而利用结构力学分析, 判断在既定负荷与材料条件下裂纹稳定与否及管道是否破裂的关键。

过去 40 余年里, 两相临界流得到广泛的关注, 发展出了许多预测两相临界流动的经验或分析的模型。Elias 和 Lellouche^[1] 对相关模型进行了系统评估, 通过和大范围实验数据的比较, 对最常使用的一些预测模型进行了检验, 发现模型对不同条件的适用能力依赖于模型所采用的控制方程及对界面传递过程的经验关联。对于复杂流道, 目前尚无公

认的预测模型, 这主要源于难以正确估计相间非平衡效应及流道内局部流动损失和摩擦损失等不确定因素。因此, 对现有两相临界流模型, 漏率计算结果往往需要增加一个高达 10 余倍的调整因子。

图 1 给出了初始过冷的单相液体在等截面直管道内的两相临界流动及相关物理量演变情况的示意图。 P 、 T 、 x 分别代表压力、温度、干度, Z 为自管道进口计算的位置坐标, 下标“0”、“F”、“c”和“b”分别代表进口(或滞止)条件、闪蒸开始位置、临界流发生位置和环境条件, D 为管道水力学直径, L_R 表示闪蒸开始后的两相流动段长度。

由于液体在进口处是过冷的, 即液体进口压力大于进口温度对应的饱和压力, 因此在进入流道后将先以单相流动形态出现。在进口损失和沿程摩擦阻力作用下, 压力不断降低, 并达到饱和状态。但是, 一般条件下在饱和状态, 液体并不发生相变产

收稿日期: 2007-03-09; 修订日期: 2007-05-30

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(No.KJ CX2-SW-L05); 国家自然科学基金资助项目(No.10432060)

作者简介: 赵建福(1967-), 男, 河南南阳人, 研究员, 博士, 主要从事微重力气液两相流动与传热的研究。

生蒸汽, 而是需要压力进一步下降(“过冲”), 形成一定的过热度, 在 F 点发生闪蒸或暴沸。在闪蒸点以前, 液体温度可以认为是恒定的, 干度也恒为 0。经过闪蒸点后, 汽泡大量产生, 干度增加, 而相变会吸收液体显热, 导致液体温度下降。若环境压力低于临界值, 在流道出口将发生临界现象, 流量达到最大。此时, 进一步降低环境压力将不再能影响流道内的流动状态及其流量。

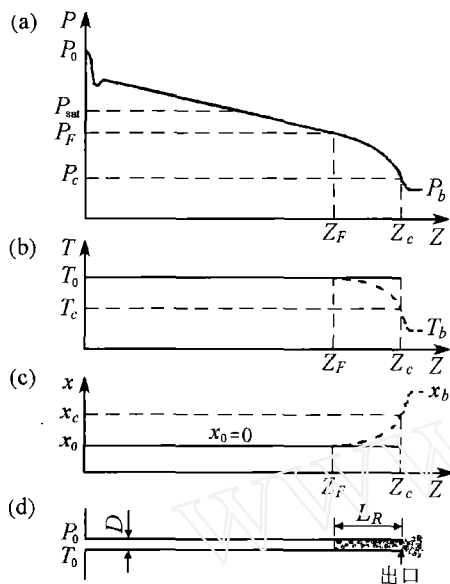


图 1 两相临界流动示意图

对于非等截面和 / 或非直管道, 加速压降及弯头损失将进一步加剧液体压力的下降, 临界流动也有可能发生在出口之前。这里, 由于研究的主要目标是承压容器出现贯穿整个壁厚的裂纹后容器内水的泄漏率与容器内压、温度、裂纹几何尺寸、流道表面粗糙度等影响因素之间的关系, 并鉴于初步的模拟实验是采用一个矩形截面的窄间隙流道来代替真实的裂纹张开面, 对非等截面和非直管道情形不再赘述。

2 实验装置及流程

本实验主要是考察当承压容器出现贯穿整个壁厚的裂纹后, 容器内水的泄漏率与容器内压、温度、裂纹几何尺寸、流道表面粗糙度等影响因素之间的关系。实际裂纹的表面形状是相当复杂的。作为初步的模拟, 本实验采用一个矩形截面的窄间隙流道来代替真实的裂纹张开面。

用一个小型的压力罐来模拟反应堆压力容器内的介质条件、压力和温度等因素。容器的一侧连接有实验段。实验段的外侧是一个厚壁圆筒, 中心是

一个用两块平行的钢板组成的窄间隙流道, 用以模拟贯穿裂纹(图 2)。其中上部的钢板是一个滑块, 通过更换滑块即可改变流道的长度 L , 通过调整定位螺栓和调节螺栓即可使滑块上下移动, 从而改变流道的高度 d , 而流道宽度 W 则是定值 14 mm。在流道的下游装有一个可快速开闭的球阀, 流道的背压为常压 (0.1 MPa)。

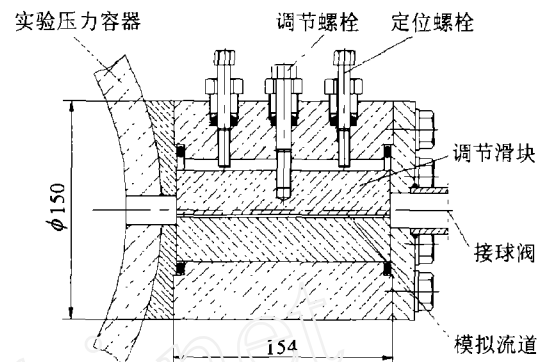


图 2 实验段示意图

在一次实验过程中, 首先将某个滑块装入实验段, 确定流道长度 L , 然后通过调整该滑块而设定流道高度 d 。将压力罐注入约 2/3 容积的水后, 测量整个实验装置的重。然后通过氮气瓶向罐内剩余的空间注入氮气并加压。压力罐外表面缠绕有电加热带, 待压力罐及其内部的水加热到设定值后, 在某一时刻打开球阀, 水流经窄间隙流道后排出压力罐, 经过一段时间后关闭球阀以切断水泄漏, 测量压力罐内的压力降和球阀从开启到关闭的时间, 并测量实验结束后整个实验装置的重, 根据这几个参数, 就可以计算得到容器内的水的泄漏率。改变容器内的介质参数及流道的几何参数, 即可重复进行实验, 最终得到泄漏率与诸影响因素之间的关系。

3 实验结果及讨论

实验表明^[2,3], 对于进口高过冷状态的水流而言, 闪蒸往往发生在非常靠近出口的地方, 两相流动段(即 L_R/D) 非常小, 可以忽略不计。另一方面, 闪蒸点压力“过冲”与进口压力相比也是可以忽略不计的。这样, 可以将进口高过冷条件下流道内的实际流动简化为单相流动, 其进口压力为 P_0 , 出口压力为进口温度 T_0 对应的液体饱和压力, 即 $P_{SAT}(T_0)$, 临界流率 G_c 可以表示为:

$$G_c = \sqrt{\frac{2\rho_0[P_0 - P_{SAT}(T_0)]}{1 + K_i + fL/D}} \quad (1)$$

其中， ρ_0 、 L 分别代表液体密度和流道长度。进口损失系数 K_i 对图 1 所示直角进口一般取为 0.5。对水力光滑流道湍流摩擦系数 f 可按 Blasius 公式计算，

$$f = 0.316Re^{-1/4}, \quad Re = G_c D / \mu_0 \quad (2)$$

其中， μ 为液体动力粘性系数。

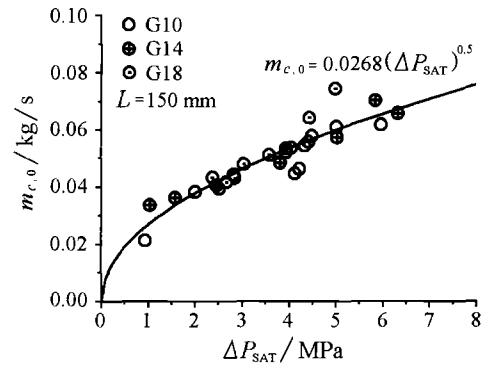
下面还用到了临界泄漏率 m_c ，它与临界流率间关系如下：

$$m_c = G_c A \quad (3)$$

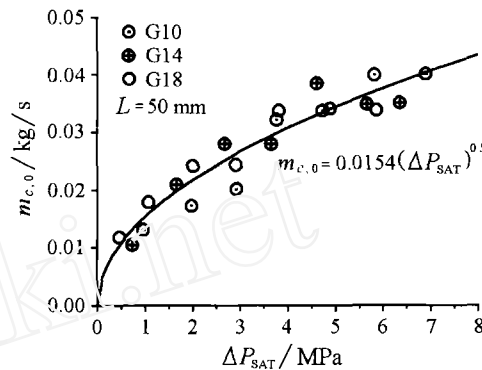
其中，截面积 $A = Wd$ ， W 、 d 分别代表缝隙宽度和高度。

实验中，测量了流道高度 $d=0$ mm 时的残余泄漏率 $m_{c,0}$ ，以确定残留缝隙内的流动，并对其他缝隙高度时的测量结果进行修正。图 3 给出了 2 种流道长度时残余泄漏率的变化，不同进口温度条件下的残余泄漏率很好地归并为同一条曲线，并和基于 $P_{SAT}(T_0)$ 的压力差平方根呈正比关系，符合前述进口高过冷态两相临界流的特征，说明残余缝隙内的流动，与实验所要测量和分析的流动，适用同样的规律，尽管其流道形状可能会有极大的差异。图中，G10、G14 和 G18 分别代表进口温度 100°C、140°C 和 180°C。严格地讲，泄漏率应该和 $(\rho_0 \Delta P_{SAT})^{1/2}$ 相关联。不过，在实验参数范围内，饱和水的密度变化很小，可以忽略不计。

图 4 给出了不同长度和缝隙高度时临界泄漏率的变化情况。图中，不同进口温度的数据同样很好地归并为同一条曲线，并与基于 $P_{SAT}(T_0)$ 的压力差平方根呈正比，定性表明前述模型能够描述实验参数范围内窄缝流道中的临界流动现象。临界泄漏率和缝隙高度间的依赖关系，绝大部分情形中都符合前面的讨论，即缝隙高度大，临界泄漏率高；反之则临界泄漏率低。不过，对于 $L=150$ mm 情形， $d=1/2$ mm 时临界泄漏率接近甚至略低于 $d=1/3$ mm 时的数值，表明实验中存在较大的系统误差，其根源很可能在于该情形中残留缝隙尺寸远大于其他情形，因此，实验中调整缝隙高度时，偏离理想状态的可能性大大增强。另一方面，对于较长的窄缝流道，若因加工精度或调整误差使滑块两端有极微小的倾斜，就很可能使流道进、出口高度产生与流道高度同量级的差别。例如， $L=150$ mm 时， 0.05° 的倾斜即可造成进、出口高度相差 0.13 mm，接近 1/6 mm；而 $L=50$ 和 5 mm 时，同样的加工精度和调整误差条件下，流道进、出口高度差分别只有 0.044 mm 和 0.0044 mm。这是长流道、窄缝隙两相流动实验最大的困难，也是实验误差最主要的来源。

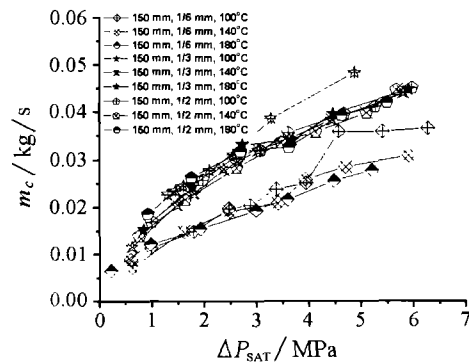


(a)

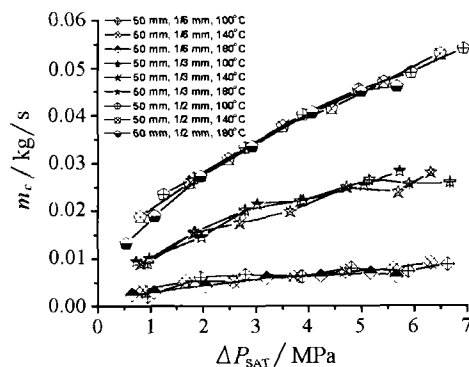


(b)

图 3 缝隙高度为 0 时的残余泄漏率与压力差间的关系



(a)



(b)

图 4 临界泄漏率随压力差及缝隙高度的变化

图 5 给出了实验数据与预测结果间相对误差 ε 的分布 (横轴为数据编号, 没有实际意义)。这里, 相对误差定义为:

$$\varepsilon = |G_{c_exp} - G_{c_cal}| / G_{c_cal} \quad (4)$$

图中显示相对误差大体上随流道长径比 L/D 下降迅速降低: 当 $L/D > 200$ 时, 相对误差高达 100% 以上; 当 $L/D < 160$ 时, 相对误差不超过 40%; 当 $L/D < 80$ 时, 相对误差不超过 15%。究其原因, 正如前文所述, 加工精度和缝隙高度调整所引起的系统误差对实验结果的影响极为显著。随着缝隙高度的增加, 预测结果和实验值的差别迅速降低, 这是因为缝隙高度较大时, 加工精度和缝隙高度调整所引起的系统误差对实验结果的影响将随之下降。

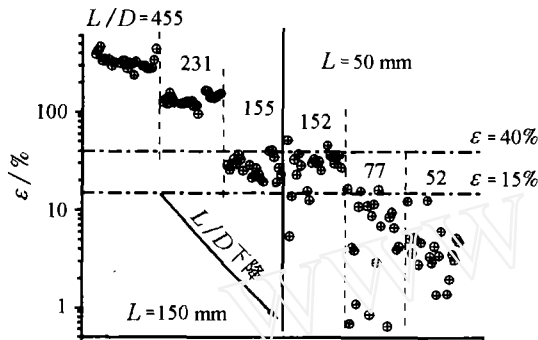


图 5 窄缝气液两相临界流率实验数据与模型预测间的比较

总体上, 目前两种流道长度条件下, 超过 60% 的数据点位于 $\pm 40\%$ 误差带内, 表明该模型能够很好地适应工程估算的需求。

4 结 论

本文实验研究了高过冷水在窄缝内形成的气液两相临界流动现象, 考察了水的泄漏率与容器内压、温度、流道几何尺寸等影响因素之间的关系, 给出了一个简单的预测关系式, 并比较了预测结果和实验数据, 讨论了实验过程中误差的主要来源。研究表明, 本文所采用的简单的拟单相流预测关系式, 可以较好地预测高过冷水在窄缝内形成的气液两相临界流动现象。

参 考 文 献

- [1] Elias E, Lellouche G S. Two-Phase Critical Flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 1994, 20(Sup.1): 91-168
- [2] Celate C P, Cuma M, D'Annibale F, et al. The influence of non-condensable gas on two-phase critical flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 1988, 14(2): 175-187
- [3] Fraser D W H, Abdelmessih A H. A Study of the Effects of the Location of Flashing Inception on the Maximum and Minimum Critical Two-Phase Flow Rates: Part I — Experimental. *Nucl. Eng. Des.*, 2002, 211(1): 1-11