

细圆管内流动凝结换热的流型研究*

王补宣 杜小泽

(清华大学热能工程系,北京 100084)

摘要 通过可视化观察实验,分析细圆管的管径、流量以及倾角对管内蒸气流动凝结过程流型的影响。研究表明,在小尺度下,重力的影响受蒸气剪切力和表面张力作用而降低,流动的分层受到明显削弱。随着管径的减小,凝结液分布比较均匀的近环状流在流型图上所占区域增大。现有用于常规尺度下的流型图不适用于细圆管内流动凝结流型的预测。

关键词 细圆管 流动凝结 两相流流型

Nusselt 的经典分析方法^[1]一直作为膜凝结换热的理论基础得到广泛应用。针对具体的凝结换热条件,对 Nusselt 理论进行了各种修正^[2~5]。结合实验研究,已提出的膜凝结换热准则关联式^[6~8]可满足大部分传统的工业应用的要求。随着科技的进步,在许多应用领域,如航天、家用电器、汽车空调以及微型机械和微电子机械等领域中,换热设备的小型化趋势日益明显,换热设备的管径不断减小。我们对小直径细圆管内流动凝结换热特性的研究^[9~13]发现,管径 $\leq 3 \sim 5$ mm 时,由于凝结液膜的弯曲,气液界面的表面张力和剪切应力对流动凝结过程的影响增加,重力的作用相对减弱。这些变化,在一定程度上偏离了 Nusselt 理论的假设,使得管径缩小时,凝结换热特性和常规尺度下有所不同。

流动凝结是一种界面现象,凝结换热照例总发生在具有特定形状的气液界面上。不同的气液界面结构对应不同的流型。微细小尺度下的超常换热特性,预示着流型演化规律和常规尺度下不同。通过可视化实验观察的结果,本文专门整理报道了细小管内流动凝结的气液两相流流型及其演化规律。

1 实验设计

实验系统参见文献^[9,11],如图1所示。电加热蒸气锅炉产生的正压饱和蒸气,经过绝热段稳定后,进入实验管,被管外逆流的冷却水凝结。实验段有效长度为1.2 m,分成4段,各是一个逆流式套管换热器。选取管径不同的透明玻璃管作为实验管,相邻实验分段之间露出50 mm 长的玻璃管用作流型观察窗。整个实验段,除视窗外,全部用热绝缘材料包裹,以尽量消除热损失。实验段支在可旋转支架上,可以固定为不同的倾角 β 。实验管中流出的凝结液经过过冷段后,进入凝液计量罐。恒温水浴用于调节冷却水温度并提供循环动力。

2000-01-12 收稿,2000-05-08 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号:59676012, 59995550-3)

实验中,测量:实验段进出口处蒸气/凝结液温度、压力;各实验分段进出口处冷却水温度;每个实验段中间位置实验管外周向上的 3 处壁温(对应于截面角坐标 $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$). 冷却水流量和凝结液流量分别用秤重法和体积法测定. 实验数据通过 HP34401A 数据采集器采集. 最后得到不同蒸气干度 x 下的气液两相表观速度 j_v, j_l 及 Weber 数 We_v 和 We_l .

电锅炉的加热功率可以通过调压器在 0~3.5 kW 的范围内调节;温度由我们自己标定的直径为 0.1 mm 铜-康铜热电偶测量,准确度为 0.1℃;压力表精度为 0.25 级;冷却水秤重精度为 0.5 g;计量罐经过标定,可精确至 0.1 mL. 实验前,对流经实验段的冷却水显热和凝结液的潜热进行热量平衡计算,绝大部分工况下热平衡相对误差小于 5%,最大误差不超过 10%.

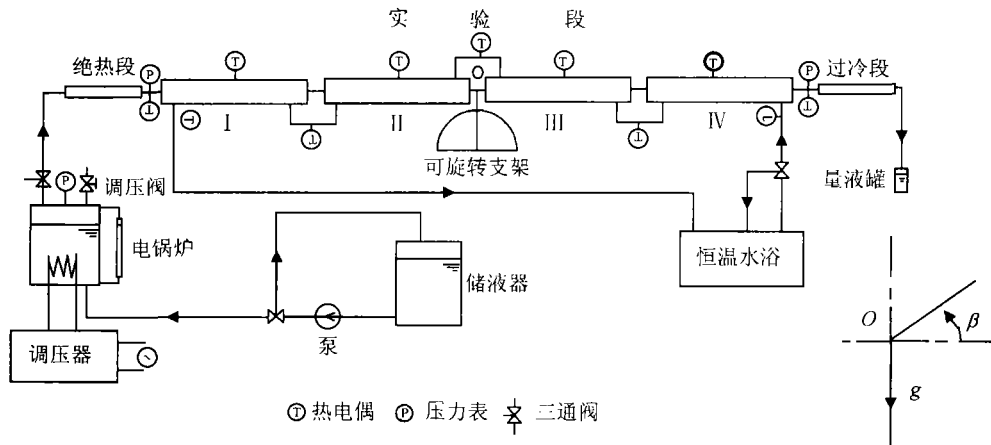


图 1 实验装置示意图

2 实验结果与分析

以水蒸气作为凝结工质,采用内径分别为 2.17, 3.58, 5.79 mm 的玻璃管作为流型观察的实验管. 实验段倾角 $\beta = 0^\circ$ 对应水平放置; $\beta = 90^\circ$ 对应蒸气流动方向与重力方向一致.

蒸气在特定管内流动凝结时,流体的流量和蒸气干度是最重要的两个影响因素. 在蒸气流速比较低的条件下,气液界面剪切力的作用尚不明显,垂直于流动方向的重力分量对流型起主导作用,由于蒸气凝结,有一层薄液膜附着在圆管截面内壁上部表面外,绝大部分液相会集中在圆管下部,流型一般为光滑分层流. 提高蒸气流速,由于 Kelvin-Helmholtz 不稳定性的影响,在液池表面、亦即气液界面上会出现表面波,称为波状流;继续增加蒸气流速,气液界面将更加不稳定,并且变得弯曲,界面波从两侧向管壁上方扩展,直到液相覆盖整个壁面,形成波-环状流. 此时,既可看作是下部液膜较厚的环状流,也可看作薄液膜区比较明显的分层流. 如果进一步提高蒸气的流速,低空泡份额条件下,气液界面上的表面波加剧,直到一部分波动的波峰和壁面相接,产生“液桥”现象,形成弹状流;在高空泡份额条件下,流速的增加导致气液界面上剪切力的作用增大,使重力分层的影响随之减弱;这与我们有关表面张力对低 Re 下细竖管内流动凝结的影响分析^[12]以及水平细圆管内气液两相流界面形状的理论分析^[13]相一致.

2.1 管径与流量的影响

表 1~3 所示分别为实验段水平放置时(倾角 β 为 0°), 不同流量下, 从观察窗中所观察到的流型随蒸气干度的变化. 对于不同的管径, 流型随流量的变化表现出一些共性: 随着流量的增加, 重力对流型形成的影响程度降低, 剪切力的影响则随蒸气速度的增加而变得显著, 流型逐步向凝结液趋于均匀分布的方向转换, 使流动分层受到削弱. 对于不同管径, 随着流量的增加, 环状流或近环状流所占干度区域随之增加.

表 1 内径 $d_i = 2.17$ mm 的管内不同质量流量下的流型

	$G/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	14.4	32.3	51.2	74.1
蒸气干度 x	0.93	环状流	环状流	环状流	环状流
	0.84	环状流	环状流	环状流	环状流
	0.72	环状流	环状流	环状流	环状流
	0.58	环状流	环状流	环状流	环状流
	0.44	环-波状流	环状流	环状流	环状流
	0.30	环-波状流	环-波状流	环状流	环状流
	0.14	环-波状流	弹状流	弹状流	弹状流

表 2 内径 $d_i = 3.58$ mm 的管内不同质量流量下的流型

	$G/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	9.2	22.3	47.1	68.2
蒸气干度 x	0.92	环状流	环状流	环状流	环状流
	0.81	环状流	环状流	环状流	环状流
	0.64	环-波状流	环状流	环状流	环状流
	0.51	波状流	环-波状流	环-波状流	环状流
	0.47	波状流	波状流	环-波状流	环-波状流
	0.37	波状流	波状流	波状流	波状流
	0.18	波状流	波状流	弹状流	弹状流

表 3 内径 $d_i = 5.79$ mm 的管内不同质量流量下的流型

	$G/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	8.1	19.6	41.8	59.7
蒸气干度 x	0.90	环状流	环状流	环状流	环状流
	0.82	环-波状流	环-波状流	环-波状流	环状流
	0.71	波状流	波状流	环-波状流	环-波状流
	0.64	波状流	波状流	波状流	波状流
	0.53	波状流	波状流	波状流	波状流
	0.38	波状流	波状流	波状流	波状流
	0.21	波状流	波状流	波状流	波状流

总的说来, 管径的变化对水平细圆管内流型转化位置的影响非常明显. 随着管径的减小, 环状流所占区域越来越大, 气液界面弯曲显著, 重力引起的流动分层受到削弱. 另外, 只有在流动凝结的后期, 管径比较小时才观察到弹状流的出现. 说明管径的减小可以削弱重力的影响; 同时蒸气干度的降低和管径的减小将使凝结液膜变得更加不稳定, 界面的波动加剧.

2.2 倾角 β 的影响

图 2 示出内径 d_i 同为 5.79 mm 的圆管在不同倾角 β 下, 所观测到的流型演变. 随着实验

管倾角 β 的增加,垂直到动方向的重力分量减小,削弱了流动的分层效应. 尽管实验中的数据点不多,但是在流型图上还是可以明显地表现出基本的趋势:随着倾角的增加,各流型之间的边界普遍向出口段移动,环状流和环-波状流区域逐渐增大.

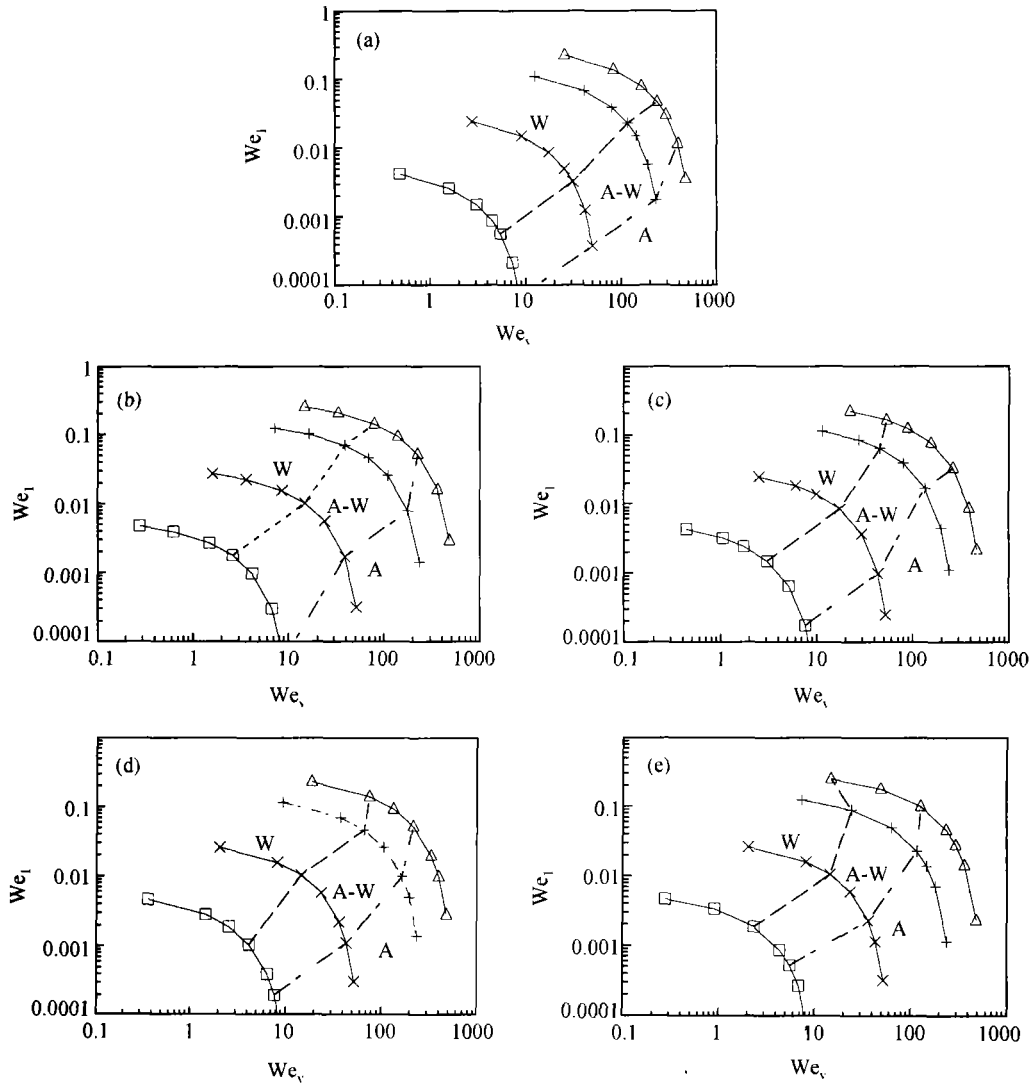


图2 倾角对流型的影响

(a) $\beta = 0^\circ$; (b) $\beta = 7^\circ$; (c) $\beta = 17^\circ$; (d) $\beta = 34^\circ$; (e) $\beta = 45^\circ$

A 环状流; A-W 环-波状流; W 波状流

2.3 与现有通用流型图的比较

选择 Mandhane 等由将近6 000组两相流动的数据综合而成的流型图^[14]与本文的实验数据进行了对比. 该流型图的气液密度比接近本文的实验条件,且以表观速度为坐标,便于使用,是目前应用最广泛的流型图之一. 但 Mandhane 等的流型图所适用的管径范围在 12 mm 以上,又与本文的实验条件不同;本文实验的流量条件接近该流型图适用范围的下限,也会带来某些

偏差。因此,如图 3 所示,本文数据与该流型图预示的流型存在一些明显的不同。首先,Mandhane 等的流型图中,波-环状流被分别归到波状流和环状流流区,并未单独专列,而在本文实验的管径下,波-环状流具有明显的特征,波状流反而较难界定;其次,尽管实验的流量比较低,但是除凝结的初始阶段液膜比较薄,气液界面基本光滑之外,在 3 种管径条件下,液膜的波动都比较明显,没有观察到流型图所预示的光滑分层流。考虑到实验管水平放置时,波-环状流基本属于环状流范畴;而且在管内流动凝结的后期,波状流界面的弯曲也非常明显,不同于传统意义上的分层波状流,对比表明,用于小管径条件下,该流型图所预示的光滑分层流范围偏大。

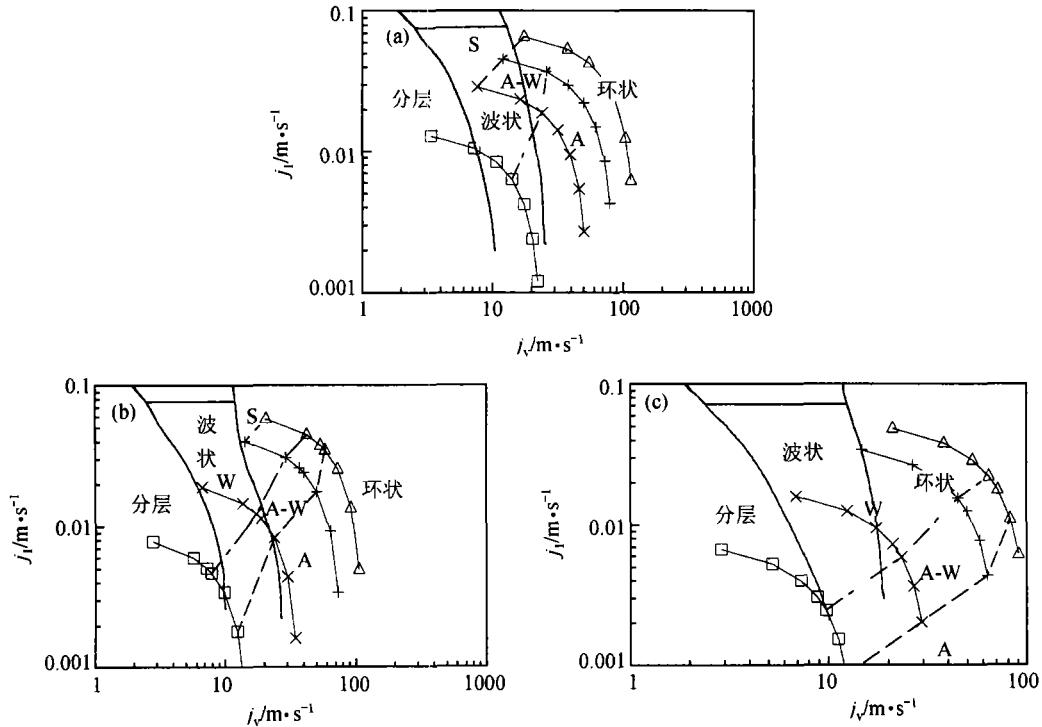


图 3 水平管内的实验数据与 Mandhane 等流型图^[14]的比较
 实线为 Mandhane 流型图中流型的边界;虚线和点画线为本文实验得到的流型边界

(a) $d_i = 2.17 \text{ mm}$; (b) $d_i = 3.58 \text{ mm}$; (c) $d_i = 5.79 \text{ mm}$

A 环状流;A-W 环-波状流;W 波状流;S 弹状流

3 结论

在本文报道的实验条件下,随着蒸气干度的降低,依次可以观察到 4 种流型:环状流,环-波状流,分层波状流或弹状流。除弹状流之外,上述流型都具有明显弯曲的气液界面,且随着管径的减小更加明显。另外,与常规尺度条件下不同,环-波状流并非只是作为一种过渡流型存在,而是具有明显的特征,占据重要地位;相反,尽管波状流已处于分层流范畴,由于是凝结过程的后期,细管中气相流动通道变得很小,从出口处观察发现,界面弯曲液非常明显,实际上与环-波状流的区别很难界定。可见,在小管径条件下,重力对流型形成的影响降低,气液两相流的分层受到削弱。

参 考 文 献

- 1 Nusselt W. Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes. VDI, 1916, 60: 541
- 2 Rose J W. Effect of pressure gradient in force convection film condensation on a horizontal tube. Int J Heat Mass Transfer, 1984, 27(1): 39
- 3 Suzuki K, Hagiwara Y, Izumi H. A numerical study of forced-convective filmwise condensation in a vertical tube. JSME Int J, Ser II, 1990, 33(1): 134
- 4 Rohsenow W M, Webber J H, Ling A T. Effect of vapor velocity on laminar and turbulent film condensation. Trans ASME, 1956, 78(4): 1 637
- 5 Rose J W. Condensation heat transfer fundamentals. Trans IChemE, 1998, 76(1): 143
- 6 Aker W W, Rossen H F. Condensation inside a horizontal tube. Chem Eng Prog Symp Ser, 1960, 30(1): 145
- 7 Shah M M. A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes. Int J Heat Mass Transfer, 1979, 22(3): 547
- 8 Traviss D P, Rohsenow W M, Baron A B. Forced convective condensation in tubes: a heat transfer correlation for condenser design. ASHRAE Trans, 1973, 79(1): 157
- 9 Wang B X, Du X Z. Study on laminar film-wise condensation for vapor flow in an inclined small/mini-diameter tube. Int J Heat Mass Transfer, 2000, 43(8): 1 859
- 10 王补宣, 杜小泽. 细竖管内流动凝结的换热特性. 上海交通大学学报(自然科学版), 1999, 38(8): 970
- 11 王补宣, 杜小泽. 水平和竖直细圆管内流动凝结换热特性的对比研究. 工程热物理学报, 2000, 21(1): 66
- 12 王补宣, 杜小泽. 表面张力对低 Re 下细竖管内流动凝结的影响. 自然科学进展, 1999, 9(8): 723
- 13 王补宣, 杜小泽. 水平细圆管内气液两相流动界面形状的分析. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(7): 1
- 14 Mandhane J M, Gregory G A, Aziz K. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. Int J Multiphase Flow, 1974, 1(3): 537