

ZHANG Leigang, RU Meng, LI Hao, YUE Liwen, CHEN Zhenqian, MA Yanyang. Steam Condensing Characteristics in a Horizontal Circular Tube under Rotating Action (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(1): 149–161. CSTR:32142.14.cjss.2024-0004. DOI:10.11728/cjss2025.01.2024-0004

旋转作用下水平圆管内蒸汽冷凝特性*

张雷刚^{1,2} 茹梦¹ 李豪¹

岳利文^{1,2} 陈振乾³ 马艳阳⁴

1(郑州轻工业大学能源与动力工程学院 郑州 450001)

2(河南省能源高效转化与利用国际联合实验室 郑州 450001)

3(东南大学能源与环境学院 南京 211189)

4(河南旭通智能科技有限公司 郑州 450001)

摘要 冷凝是传热设备工作中一种重要的物理过程. 与传统的单相流回路相比, 冷凝相变释放的潜热相当大. 随着航天事业的不断发展, 高效的热控技术变得越来越重要. 目前, 营造微重力环境主要采用自由落塔和抛物飞行等方法, 但是其获得的微重力时间比较短且实验成本较高. 本研究采用离心力方法来模拟不同的重力条件, 结果表明由于重力的影响, 液体会在底部聚集, 导致管壁下部温度较低. 通过可视化分析也可以看到管内存在波状和螺旋状流态. 在重力条件改变时, 测得的温度普遍低于常重力条件下的温度. 传热恶化现象取决于工作条件. 蒸汽流速的增加会改善传热恶化, 但是改善程度有限, 测试段整体温度略微升高. 在低流量时, 测试段温度变化对重力条件更为敏感, 而在高流量时, 测试段温度变化对重力条件不敏感. 上述结论将有助于设计和优化传热设备.

关键词 离心力, 重力, 冷凝, 水平管

中图分类号 TK124

Steam Condensing Characteristics in a Horizontal Circular Tube under Rotating Action

ZHANG Leigang^{1,2} RU Meng¹ LI Hao¹ YUE Liwen^{1,2}

CHEN Zhenqian³ MA Yanyang⁴

1(School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001)

2(Henan International Joint Laboratory of Energy Efficient Conversion and Utilization, Zhengzhou 450001)

3(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 211189)

4(Henan Xutong Intelligent Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450001)

* 国家自然科学基金项目 (52106116), 河南省高等学校重点科研项目 (22A470011) 和郑州轻工业大学校科研基金项目 (2020BSJJ051) 共同资助

2024-01-08 收到原稿, 2024-03-10 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract Condensation is an important physical process in heat transfer equipment. Compared with the traditional single-phase flow loop, the latent heat released by the condensing phase change heat is quite large, so a very small amount of fluid flow can meet the thermal control requirements. With the continuous development of space industry, efficient thermal control technology becomes more and more important. Therefore, how to rationally use the two-phase transformation heat transfer technology must be seriously considered, and special attention must be paid to the influence of gravity on heat transfer. Traditional ground-based condensation techniques often rely on gravity to facilitate the discharge and flow of condensate, but in the weightless environment of space, these methods are no longer suitable. At present, methods such as free-fall tower drop and parabolic flight are mainly used to create microgravity environment. However, due to the short microgravity time obtained and the high cost of experiments, this study simulated different gravity conditions by centrifugal force method to study the influence of gravity, volume flow rate and tube diameter on the axial temperature change in horizontal tubes. Due to the influence of gravity conditions, the liquid will accumulate at the bottom, resulting in lower temperature of the tube wall. Through visual analysis, it can also be seen that there are wavy and spiral flow states in the tube. When gravity conditions change, the measured temperature is generally lower than that under normal gravity conditions. The deterioration of heat transfer depends on the operating conditions. The increase of steam flow rate will improve the deterioration of heat transfer, but the improvement is limited, and the overall temperature of the test section will be slightly increased. At low flow, test section temperature variations are more sensitive to gravitational conditions, while at high flow, test section temperature variations are insensitive to gravitational conditions. The above findings will help in the design and optimization of heat transfer equipment.

Key words Centrifugal force, Gravity, Condensation, Horizontal tube

0 引言

微重力环境下的冷凝现象研究对于航天技术的发展具有至关重要的意义. 特别是在各类空间飞行器中, 热控制系统是不可或缺的组成部分, 而冷凝是其中一个关键过程. 具体来说, 对于毛细抽吸两相回路 (Capillary Pumped Loop), 通过利用相变过程实现高效传热. 因此, 对这一领域进行深入研究, 有利于优化热控制系统的性能, 提高可靠性.

近年来, 不同重力条件下的冷凝换热过程研究不断受到关注. 常重力 ($1g$) 环境^[1,2]与微重力环境下^[3]的传热特性存在明显差异, 在空间应用方面^[4]提出了一些经典的技术问题, 推动了两相流相关研究的发展. 这包括深入研究流型转变^[5]以及压降经验关联式^[6,7]和传热模型^[8,9]的建立和完善.

冷凝传热过程受到多种因素的影响, 例如流动模式、质量通量、重力和几何形状等. Liu 等^[10]在外径为 1.50 mm 圆形小通道内观察到流动模式为环状、间歇和气泡流态. 小通道流动中重力已经不再占主导地位. 随着饱和温度的升高, 环状流动范围减小, 间歇

流动范围和气泡流动范围变化不大. Nebuloni 等^[11]运用理论模型预测圆形和非圆形通道中 R134 a 蒸汽凝结, 由于表面张力作用引起边角方向变薄, 传热系数的增强明显可见. R134 a 在相似的水力直径^[12]下, 流动模式的转变都会遵循相似的规律, 而不会受到通道形状或长径比的显著影响. 在不同重力条件下, Bai 等^[13]进行了收敛型小通道的研究, 结果表明尺寸最小、收敛角最大的通道提供的总冷凝换热系数最大. 在此通道中, 随着重力的减小, 总冷凝换热系数最大增幅可达 73.49%.

重力的改变可以通过改变管道倾斜角度来实现. 对管内冷凝现象的研究结果表明, 在特定条件下, 可以认为流动是与重力无关的^[14]. 例如, 在倾斜的光滑管内, 高质量通量 ($G \geq 300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 和高蒸汽质量 ($x > 0.6 \sim 0.7$) 条件下, 流动可以认为是与重力无关的. 此外, 表面倾角^[15]对蒸汽和凝结水的分布也有很大的影响. 低表面倾角会出现环状流, 而大倾角下则会出现泡状流. 一些研究结果表明, 水平管中液体的分层现象^[16]会导致通道上部分热通量更高. 例如, 在直径为 1 mm 的圆形小通道内, 当质量流量 $G = 100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

时, 管内上部液体在重力作用下被排至底部, 管内上部的膜厚保持均匀导致通道上半部分的热通量比底部的高得多。

在微重力状态下, 由于缺乏重力, 液膜的流动会受到影响, 使用离心力替代重力可使液膜像在正常重力条件下一样流动, 从而解决液膜堆积的问题. Sparrow 等^[17-19]让饱和蒸汽在旋转状态的圆台上冷凝, 形成的冷凝液由于受到离心力的作用, 降低了液膜厚度, 并发现当地的热流率与角速度的 0.5 次方成比例关系. 此外, 其考虑了气液间剪切力对液膜的影响. 结果表明, 当蒸汽的普朗特数大于 1 时, 剪切力对液膜的影响可以被忽略。

重力对流动特性有很大的影响. 进行微重力实验的理想环境是地球轨道飞行器, 例如空间站或航天飞机等. 然而由于实验机会和经费等限制, 通常只能利用飞机进行抛物线飞行或者在落塔内以自由下落的方式模拟失重环境. Berto 等^[20]在 Novespace 空客 A310 飞机上对内径 3.38 mm 的水平圆管用 HFE-7000 进行了可视化研究. 在微重力条件下, 圆管顶部的液膜比正常重力条件下更厚. 然而在低蒸汽质量 ($x < 0.4$) 和低质量速度 ($G = 30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 条件下, 底部的液膜较厚, 顶部甚至无法观察到. 相比正常重力, 微重力会导致传热损失增加, 尤其是当质量速度降低时, 传热损失会更为严重. Lee 等^[21]发现 FC-72 在低质量速度下, 会明显受到重力的影响, 在微重力条件和高质量速度下, 由于湍流和波浪度增加, 冷凝换热系数在下游再次增大。

进行抛物线飞行的飞机在进入和退出失重阶段时重力变化剧烈, 失重阶段持续时间过短 (飞机约 20 s, 而落塔往往仅有数秒). 这些缺陷对相应实验的设备、过程及测量结果都有很大的不良影响. 随着数值模拟技术的发展, 越来越多研究者对冷凝过程开展了数值研究^[22]。

近期对于正常重力和微重力条件下通道中冷凝现象进行了不断深入的实验和数值研究. 然而这些研究的实验中所用到的方法成本较高, 而数值研究结果也需要通过实验进行验证. 因此, 本实验通过使管道旋转产生离心力与重力抵消来模拟不同重力条件. 值得强调的是, 尽管离心力模拟的重力条件并非完全等同于真实的微重力环境, 但是其仍然提供了一种有效的途径, 研究和理解不同重力条件下的冷凝传热, 为

未来在空间应用技术研发中克服天地重力差异提供了新思路。

由于航天器在进入空间的过程中不断受到不同重力条件的影响, 这要求航天器内部系统在不同重力条件下高效运行, 为此, 本文研究了不同重力条件下水平管内冷凝换热的两相流动及其相应的热行为. 这里以水蒸气为工质, 体积流量 (V_m) 分别为 30, 40, 50 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 管径分别为 12 mm 和 10 mm. 重力加速度在常重力条件下为 1 g; 重力减小条件分别为 0 g, 0.37 g, 0.75 g; 重力增加条件下分别为 2 g, 1.63 g, 1.25 g。

本研究的主要目标是确定不同重力条件下水平管内冷凝过程的主要流型, 探索温度的轴向变化, 推进未来空间飞行器的热控制系统设计。

1 实验装置与方法

1.1 实验装置

如图 1 所示, 冷凝实验装置主要由三部分组成, 即蒸汽产生系统、测试段和数据采集系统. 在实验过程中, 蠕动泵将储液罐中的蒸馏水供应给蒸汽发生器, 蒸汽发生器的输出功率为 3000 W. 当蒸馏水被加热至沸点后, 蒸汽发生器会产生大量的蒸汽, 然后通过不锈钢管输送到冷凝室. 为防止热量损失, 将电加热带缠绕在管上, 由温度开关控制保证进口蒸汽温度为 $100 \pm 0.1^\circ\text{C}$. 蒸汽进入测试段后, 在段内冷凝. 此外, 循环系统装有安全气囊, 保持压力约为 0.1 MPa。

按照图 1 连接各仪器设备, 实验开始时, 打开电机使测试段旋转, 电机最大旋转速度可达 $1154 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$. 当电机转速逐渐增加时, 测试段离心力的作用逐渐增强, 逐渐与重力相抵消. 在某一特定转速下, 离心力与重力完全抵消, 测试段顶端液体处于零重力状态. 接着预热蒸汽发生器, 通过数据采集仪器监测温度. 当其变得稳定时, 蠕动泵被打开, 蒸馏水慢慢流入蒸汽发生器, 产生连续的蒸汽流. 然后打开排气阀, 用新产生的蒸汽去除系统中的非冷凝气体, 减少非冷凝气体的影响. 在实验开始时打开风扇 (额定功率为 60 W), 使风扇保持最大风量 $\geq 60 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, 带走冷凝释放的热量。

实验中, 通过调整电机旋转速度, 可以控制产生的离心力大小, 模拟从微重力到超重力不同程度的重

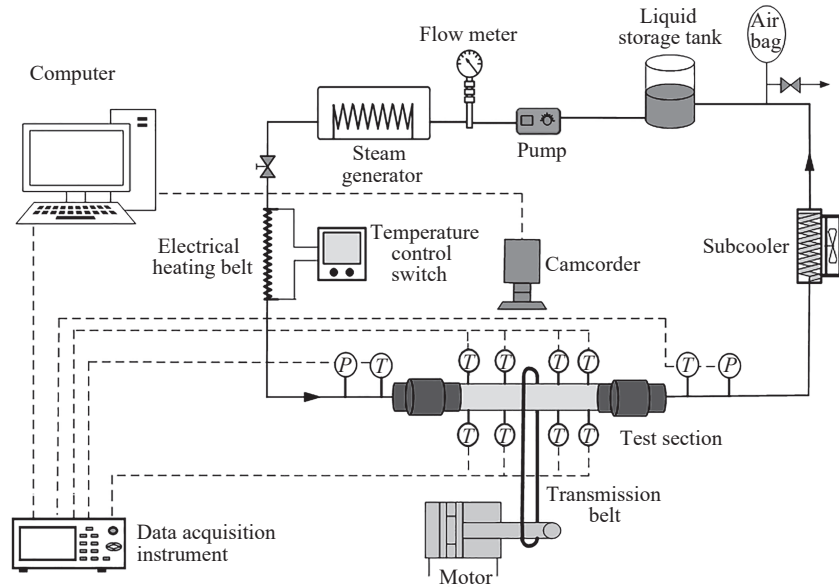


图1 实验装置

Fig. 1 Experimental installation

力条件, 从而更好地理解重力对冷凝传热的影响.

1.2 数据处理

实验中的不同重力是通过电机旋转进行模拟的, 因此离心加速度为

$$a_c = v^2/R. \quad (1)$$

式中, v 为线速度, 单位 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; R 为铜管半径, 单位 m . 旋转角速度

$$\omega = v/r. \quad (2)$$

其中, r 为电机转轮半径, 单位 m ; 角速度单位为 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$. 电机转速

$$n = 30\omega/\pi. \quad (3)$$

其中, n 为电机转速, 单位 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$.

实验中合加速度为离心加速度与重力加速度的合成, 管顶部重力加速度为 g , 所以合加速度为

$$a_{h1} = g - a_c. \quad (4)$$

其中, g 为 9.81 , 单位 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; a_c 为离心加速度, 单位 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.

管底部重力加速度为 g , 合加速度为

$$a_{h2} = g + a_c. \quad (5)$$

实验中离心加速度 a_c 为 $0g$, $0.25g$, $0.63g$ 和 $1g$. 因此, 正常重力为 $1g$; 微重力为 $0.75g$, $0.37g$ 和 $0g$; 超重为 $1.25g$, $1.63g$ 和 $2g$.

主要测量参数包括蒸汽流量和温度、测试段进出口压力和壁面温度. 测试段外壁面温度由 4 对热电偶测量, 热电偶采用上下对称布置方式, 其中第 1 组截面测点距离法兰端面 60 mm , 第 2 组截面测点距离法兰端面 120 mm , 第 3 组截面测点距离法兰端面 210 mm , 第 4 组截面测点距离法兰端面 270 mm .

直接测量参数 (温度、压力、流量) 的绝对不确定度 Δx 可用其量程与精度的乘积表示, 相对不确定度用 $\Delta x/x$ 表示. 测试段有效换热长度为 300 mm , 刻度尺的最大绝对不确定度为 1 mm , 相对不确定度为 0.33% . 测试铜管内径最小为 8 mm , 游标卡尺的最大绝对不确定度为 0.01 mm , 相对不确定度为 0.13% . 实验中系统工作压力约为 0.1 MPa , 压力测量的绝对不确定度为 10 kPa , 相对不确定度为 10% , 实验所用热电偶为 K 型热电偶, 测量范围为 $0\sim 400^\circ\text{C}$, 精度误差范围为 $\pm 1.1^\circ\text{C}$ 或 0.4% , 经标定后测量误差为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$. 所测温度最小不低于 40°C , 测得温度的最大相对误差为 0.25% .

2 结果与讨论

2.1 冷凝可视化模块

流动可视化模块由长度为 300 mm , 外径 12 mm (OD12 mm)、壁厚 1 mm 和外径 10 mm (OD10 mm)、壁厚 1 mm 两种规格的圆形通道制成, 采用 PC 塑料

材质. 为实现流动可视化, 配备了视频摄像机. 摄像头位于冷凝模块正上方. 管底重力条件为 $2g$ 时的两相流型如图 2~4 所示. 在凝结过程中观察到两种流动形式, 即波状和螺旋流动. 这些流型表明了常规通道中多相流分布的一般行为. 在水平管道中, 气液混合物最常见的流动形式为环状流、波状流、分层流、雾

流、气泡流和搅拌流.

在通道中, 管内液膜主要受到重力、离心力、剪切力和黏滞力的影响. 采用离心力抵消重力的方法实现所需重力条件. 水平通道的上部液膜主要受到气相剪切力的拖拽, 克服重力的作用形成液膜. 上部液膜的形成源于冷凝过程. 管底液膜的堆积或者上部液膜

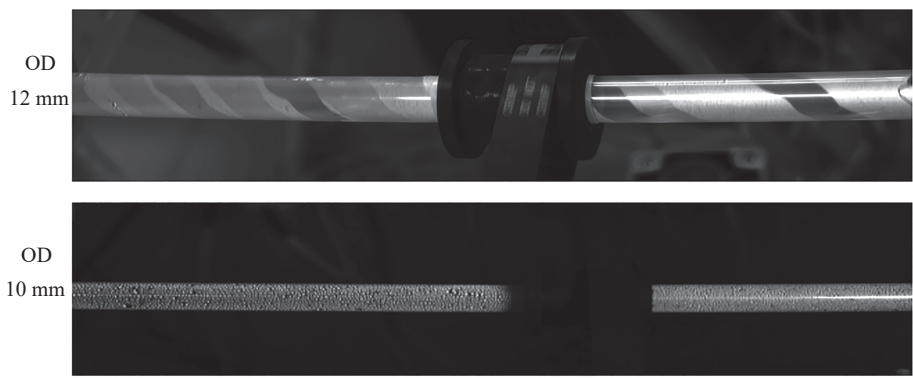


图 2 $30\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时无法观测到流型

Fig. 2 Flow patterns can not be observed at $30\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$

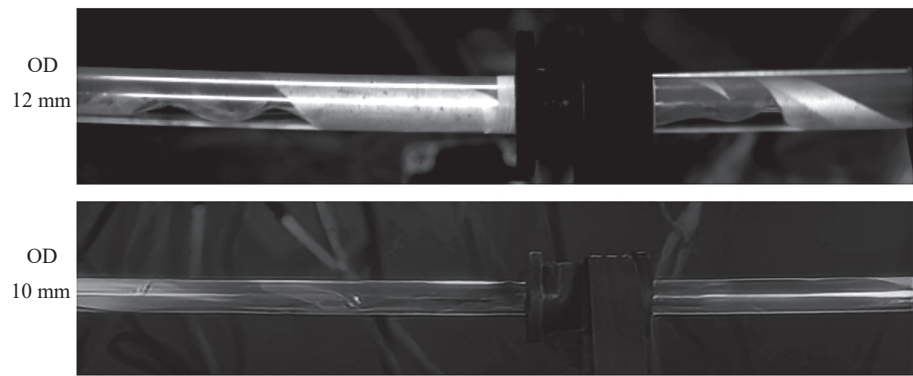


图 3 $40\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时的波状流

Fig. 3 Wavy flow at $40\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$



图 4 $50\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时的螺旋状流

Fig. 4 Spiral flow at $50\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$

向管底流动是由重力驱动的, 中心气核对界面的剪切力则阻碍这种流动. 在剪切力和重力的共同影响下, 冷凝液会形成波状流或者分层流. 但无论是环状流、波状流或者分层流, 其气团所占据的通道截面基本构型本质上是相同的, 区别仅在于底部冷凝液的相对厚度及其波动程度.

在管顶液体处于零重力时, 底部液体处于超重状态, 因此冷凝液更容易在底部形成较厚的液膜, 而顶部的液膜较薄. 当蒸汽流量最小为 $30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 由于冷凝液较少, 随着通道内的进一步凝结, 高温蒸汽会带走形成的小水珠, 无法观察到明显的流动形态. 流量为 $40 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 在离心力作用下, 顶部冷凝液受到的重力减小且底部重力增加, 使冷凝液沿管子内壁形成一个向外的斜面. 在这个斜面上, 液体会受到惯性力的作用而产生一些涡旋和涡流, 这些涡流在周向上运动, 从而引起波状流的形成. 在高速旋转时, 管内的冷凝液会受到管壁周向黏滞力的影响, 会对两相流的流型产生影响. 在 $40 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的流量下, 由于黏滞力较小, 当冷凝液和蒸汽与管壁接触时, 由于周向黏滞力的作用, 会产生一定的摩擦力, 但这种摩擦力并不足以显著改变流体的运动方向和速度. 因此, 冷凝液在管内形成波状流动. 当蒸汽流量为 $50 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 液体的运动特性和流动形态发生变化. 旋转带动液体形成一个螺旋状的流动, 这是离心力和表面张力相互作用的结果. 液体内部的离心力使液体向外移动, 而液体表面的张力则抵抗液体的变形, 试图保持液体表面平整. 因此, 液体形成了沿管子轴线旋转的螺旋形状. 当流量增加到 $50 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,

冷凝液和蒸汽与管壁之间的摩擦力增加, 周向黏滞力的作用更为显著, 这会导致流体在管内发生更强烈的扰动和剪切, 使得冷凝液沿管壁周向方向形成螺旋运动.

为保证测试段的旋转, 在测试段的中间采用了皮带传动. 然而在管内通入高温蒸汽的情况下, 塑料圆管受到皮带拉力的影响而产生形变, 导致两端稍微上翘, 进而对当地流速产生一定影响. 不过, 这种影响并不显著, 不会对整体流动形态产生明显的影响.

2.2 常重力下管内冷凝

图 5 和图 6 给出了在正常重力和水平配置时, 不同蒸汽体积流量下, 管径为 12 mm 和 10 mm 的圆管外壁轴向温度分布结果. 沿着流动方向, 通道内的轴向温度逐渐降低是一个共同的特征. 这种现象主要是由于饱和蒸汽进入通道后通过对流向管壁传递热量而形成的. 在相同的管径下, 随着蒸汽体积流量的增加, 无论是管道的上部还是下部, 整体温度会略微上升. 12 mm 管道的上部温降为 3°C , 下部温降为 5°C 以内; 10 mm 管道的上部温降为 2°C , 下部温降为 4°C 以内. 上部液体受到重力的作用掉落, 这极大减少了液滴的堆积, 降低了上半部分表面整体的液体覆盖率, 提高了表面的更新速率, 减小了热阻. 此外, 蒸汽体积流量的增加也会增大蒸汽速度, 更迅速地带走形成的液体, 因此上部温降较小. 下部温降明显高于上部, 这是由于管内液体受到重力的作用在下部聚集而造成的.

在相同的体积流量下, 较小直径的管道中冷凝会导致较高的管壁温度. 水蒸汽冷凝成液体时, 会释放

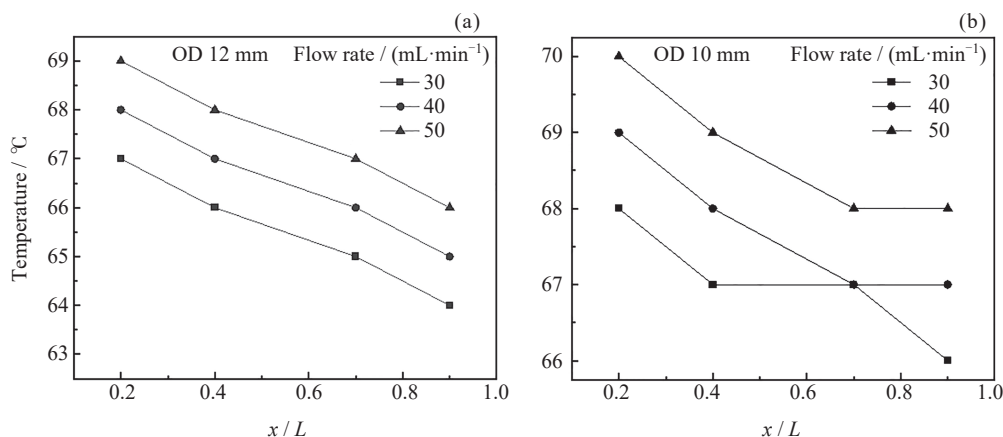


图 5 常重力下不同流量不同管径的上部温度分布

Fig. 5 Upper temperature distribution of different flow rates and different pipe diameters under normal gravity

热量传递到管壁上. 由于较小直径通道的换热面积较小, 相同体积的蒸汽释放的热量会导致较小直径管道内温度升高.

2.3 变重力下管内冷凝

图 7~9 和图 10~12 分别给出了 12 mm 和 10 mm 管道内, 在蒸汽体积流量为 30, 40, 50 mL·min⁻¹ 时, 常重力、重力减小和重力增加条件下测得的铜管管壁温度. 管壁轴向温度随蒸汽流量的增加而增加, 但随着管径的增加而减小. 在高蒸汽质量和体积流量下, 管径减小引起的传热增强更为明显. 对于具有相同流量的工况, 较小直径的管内速度增大会导致剪切力的增加, 使得冷凝液膜变薄从而增强传热. 显然在较小直径的管中可以观察到更薄的冷凝液膜.

在所有考虑的体积流量下, 重力条件改变情况下

测得的温度均低于在常重力条件下测得的温度. 随着重力条件的降低相同位置的温度也会降低. 常重力和重力条件改变情况下的传热恶化取决于工作条件. 图 13 表达了在重力条件相等的情况下, 蒸汽体积流量为 30, 40, 50 mL·min⁻¹ 时的温度分布. 重力降低条件下, 在体积流量为 30 mL·min⁻¹ 和 40 mL·min⁻¹ 时, 温降为 4℃, 在体积流量为 50 mL·min⁻¹ 时, 温降为 3℃. 重力增加条件下, 体积流量为 30 mL·min⁻¹ 时, 温降为 4~5℃, 体积流量为 40 mL·min⁻¹ 和 50 mL·min⁻¹ 时, 温降为 5~6℃, 在所考虑的蒸汽体积流量范围内, 重力减小时温度下降为 3~4℃, 重力增加时温度下降为 5~6℃.

图 13 和图 14 给出的是相同重力条件下不同蒸汽流量在 $D=12$ mm 和 10 mm 圆管内冷凝时的轴向

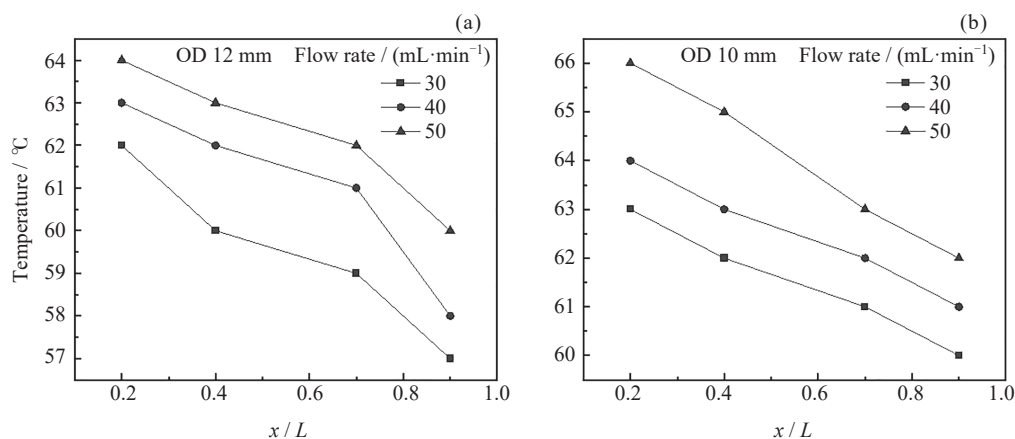


图 6 常重力下不同流量不同管径的下部温度分布

Fig. 6 Lower temperature distribution of different flow rates and different pipe diameters under normal gravity

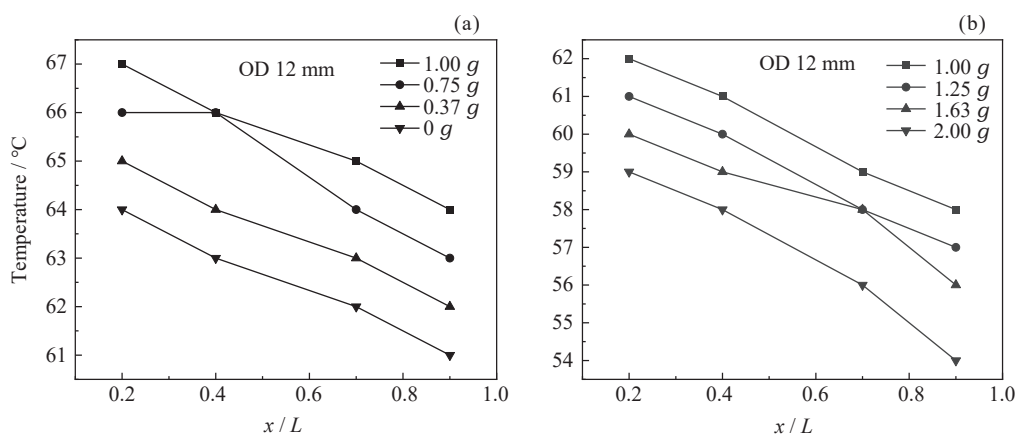
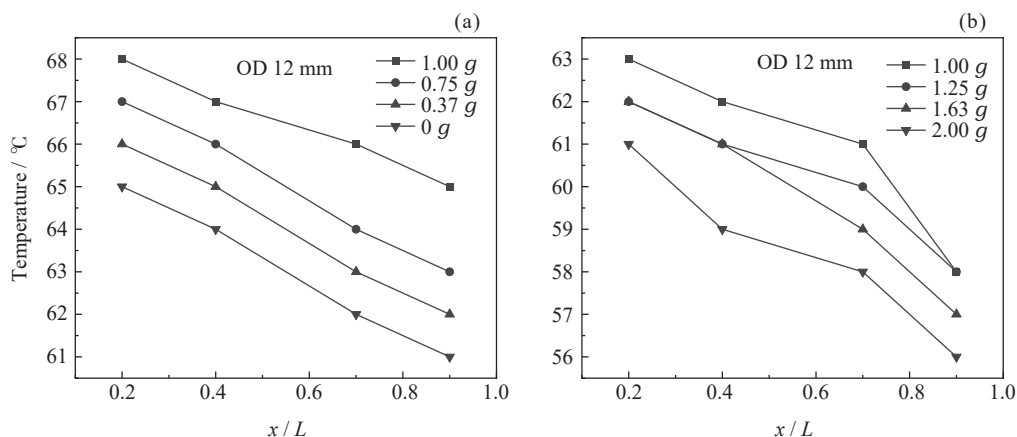
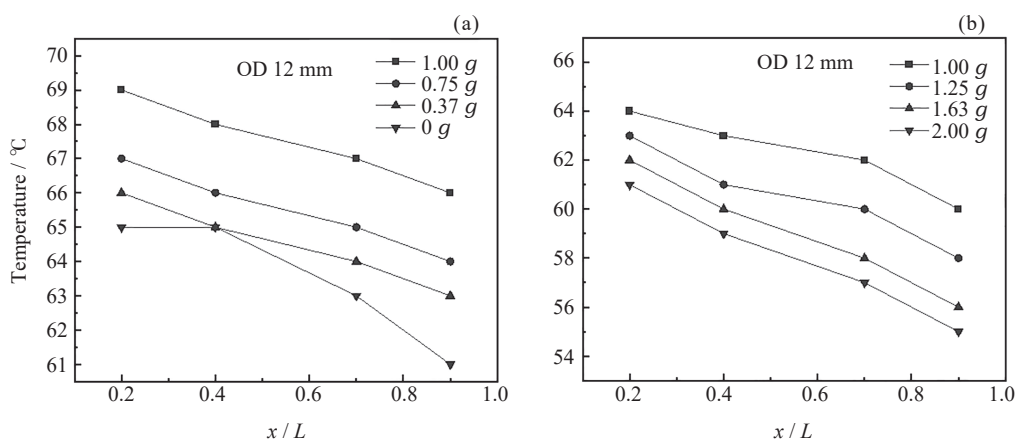
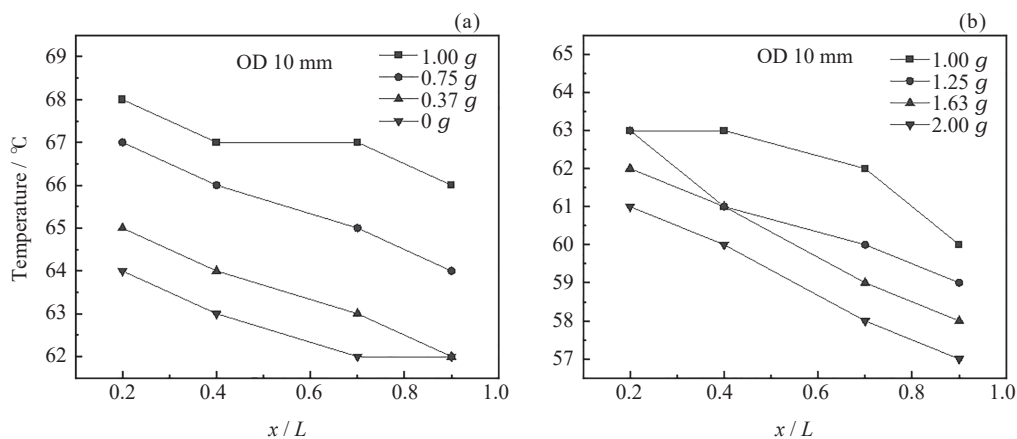
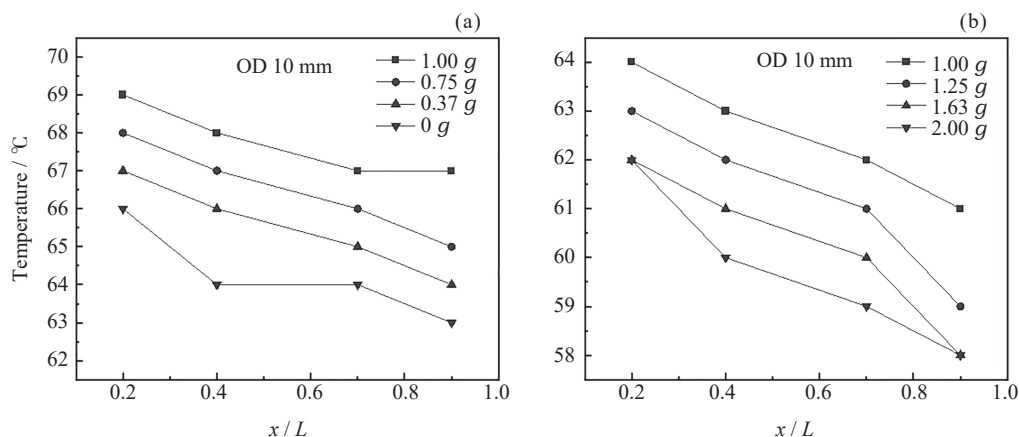
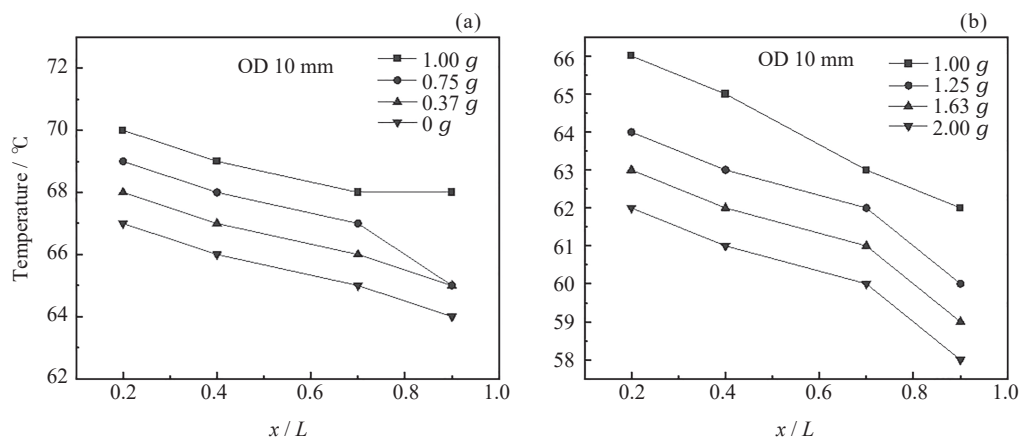


图 7 30 mL·min⁻¹ 蒸汽流量不同重力条件下的管壁温度分布 (管径 12 mm)

Fig. 7 Tube wall temperature distribution under different gravity conditions at 30 mL·min⁻¹ flow rate (Tube diameter: 12 mm)

图 8 $40 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 蒸汽流量不同重力条件下的管壁温度分布 (管径 12 mm)Fig. 8 Tube wall temperature distribution under different gravity conditions at $40 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ (Tube diameter: 12 mm)图 9 $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 蒸汽流量不同重力条件下的管壁温度分布 (管径 12 mm)Fig. 9 Tube wall temperature distribution under different gravity conditions at $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ (Tube diameter: 12 mm)图 10 $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 蒸汽流量不同重力条件下的管壁温度分布 (管径 10 mm)Fig. 10 Tube wall temperature distribution under different gravity conditions at $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ (Tube diameter: 10 mm)

图 11 40 mL·min⁻¹ 蒸汽流量不同重力条件下的管壁温度分布 (管径 10 mm)Fig. 11 Tube wall temperature distribution under different gravity conditions at 40 mL·min⁻¹ (Tube diameter: 10 mm)图 12 50 mL·min⁻¹ 蒸汽流量不同重力条件下的管壁温度分布 (管径 10 mm)Fig. 12 Tube wall temperature distribution under different gravity conditions at 50 mL·min⁻¹ (Tube diameter: 10 mm)

温度. 在相同重力条件下传热性能主要受蒸汽流量的影响, 温度随蒸汽流量的变化而急剧变化.

在 10 mm 管内 0.75 g 下, 蒸汽流量 30 mL·min⁻¹ 对应的温降为 3°C, 40 mL·min⁻¹ 温降为 3°C, 50 mL·min⁻¹ 温降为 4°C; 0 g 下, 30 mL·min⁻¹ 温降为 2°C, 40 mL·min⁻¹ 温降为 3°C, 50 mL·min⁻¹ 温降为 3°C. 在 12 mm 管内 0.75 g 下, 30 mL·min⁻¹ 温降为 4°C, 40 mL·min⁻¹ 温降为 4°C, 50 mL·min⁻¹ 温降为 3°C; 0 g 下, 30 mL·min⁻¹ 温降为 2°C, 40 mL·min⁻¹ 温降为 4°C, 50 mL·min⁻¹ 温降为 4°C. 在 10 mm 管内 2 g 下, 30 mL·min⁻¹ 温降为 4°C, 40 mL·min⁻¹ 温降为 4°C, 50 mL·min⁻¹ 温降为 3°C; 在 12 mm 管内 2 g 下, 30 mL·min⁻¹ 温降为 5°C, 40 mL·min⁻¹ 温降为 5°C,

50 mL·min⁻¹ 温降为 6°C. 在低流量 30 mL·min⁻¹ 下, 随着重力的降低, 温降变小, 因为在零重力时管内上部分液体更加均匀, 所以温降较小, 在 40 mL·min⁻¹ 和 50 mL·min⁻¹ 时温降几乎不变, 对重力不敏感. 在此情况下产生的冷凝液会增加, 导致液体更容易在下部聚集, 所以下部分温降较高.

在所有考虑的重力条件下, 管径为 12 mm 和 10 mm 时蒸汽速度随蒸汽流量的增加而增加, 相同流量下管径的减小会导致液体速度的增强, 对流换热的效果也会增强. 在通道中, 蒸汽流速的增加会快速带走更多的冷凝液体, 降低管道内的液体积聚, 进一步减小了温降. 结果表明, 对于所有考虑的重力情况, 通道中温度的变化都是相似的, 特别是重力增加时对管

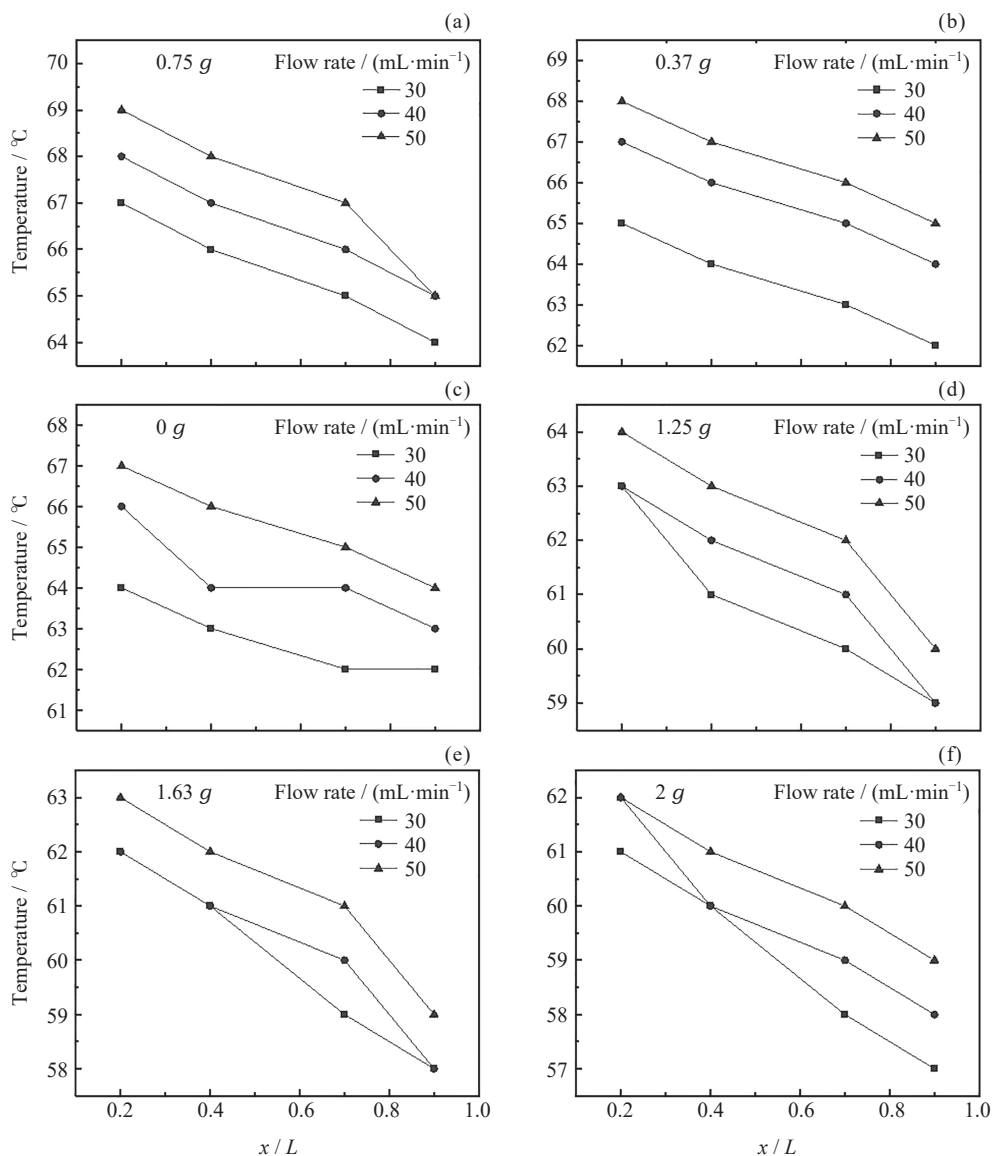


图 13 不同重力条件下 10 mm 管内的温度分布

Fig. 13 Temperature distribution under different gravity conditions in 10 mm diameter tube

径更加敏感.

结合可视化可以看到, 液体主要堆积到下部, 在此主要讨论不同流型对下部温度的影响. 从图 2~4 和图 7~9 及图 14 可以发现, 当流量为 30 mL·min⁻¹ 时无法观测到明显的流型, 管壁下部温降为 5 °C. 当流量为 40 mL·min⁻¹ 时, 会产生波状流, 温降为 5 °C. 而在流量为 50 mL·min⁻¹ 时, 出现了螺旋状流, 温降为 6 °C.

从图 2~4 和图 10~13 可以发现, 当流量为 30 mL·min⁻¹ 时无法观测到明显的流型, 管壁下部温降为 4 °C. 当流量为 40 mL·min⁻¹ 时会产生波状流, 温

降为 4 °C; 而在流量为 50 mL·min⁻¹ 时出现了螺旋状流, 温降为 3 °C.

螺旋状流和波状流在温降上的差异源于其流动特性的不同. 螺旋状流通常会导致流体呈螺旋形态运动, 这种旋转运动会使流体内部的不同部分之间发生剪切, 复杂的旋转运动导致内部的能量耗散更大. 相比之下, 波状流虽然也会引起流体的波动, 但其波动的形式相对较为规则, 能量耗散较少. 螺旋流的温降比波状流低, 这主要是由于其流体速度分布的特殊性质导致的. 管径的减小意味着相同流量下蒸汽速度增加, 从而影响温降, 并最终导致小管径下温降减小.

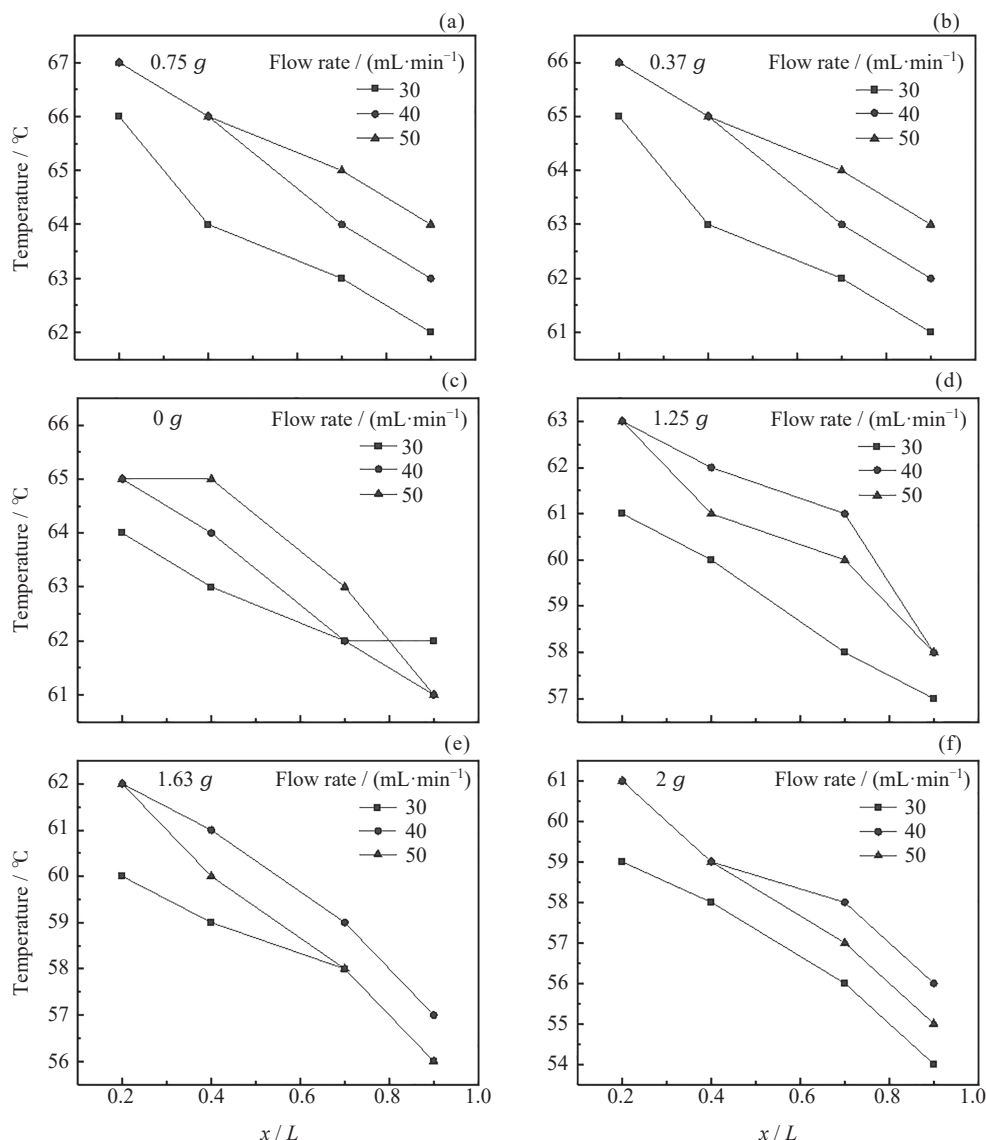


图 14 不同重力条件下 12 mm 管内的温度分布

Fig. 14 Temperature distribution under different gravity conditions in 12 mm diameter tube

值得注意的是,在相同流量下,管径减小对波状流的影响比较小,而对螺旋流的影响比较大.这主要是由于冷凝液在大管径内形成波状流时,导致蒸汽与管道壁接触的面积减小,从而使得传热效果恶化,温降较大.小管径内形成螺旋流时,蒸汽与管壁的接触面积相比波状流有所增大,因此温降较小.

2.4 进口蒸汽流量对水平管压降的影响

图 15 给出了正常重力条件下的压降.蒸汽体积流量为 30 mL·min⁻¹ 时压降较小.压降随蒸汽体流量的增加而增大.本研究中最大压降为 450 Pa.当蒸汽体流量增加时,管道内的流体速度也会增加,从

而产生更大的惯性力.根据牛顿第二定律,惯性力与物体的质量和加速度成正比.因此,增加的流速会导致更大的惯性压降,即流体在通过管道时产生的阻力增加.蒸汽在管道内流动时,与管道壁面之间存在摩擦力.摩擦力与流体速度成正比.因此,随着流速的增加,摩擦力也会增大,从而导致摩擦压降的增加.图 16 和图 17 给出了管径为 12 mm 和 10 mm 时不同转速下的压降.由于 12 mm 和 10 mm 管道内的冷凝量较少,因此在不同转速下压降的变化不明显,压降保持相对稳定.但是蒸汽速度的增加或减少会导致压降发生变化.

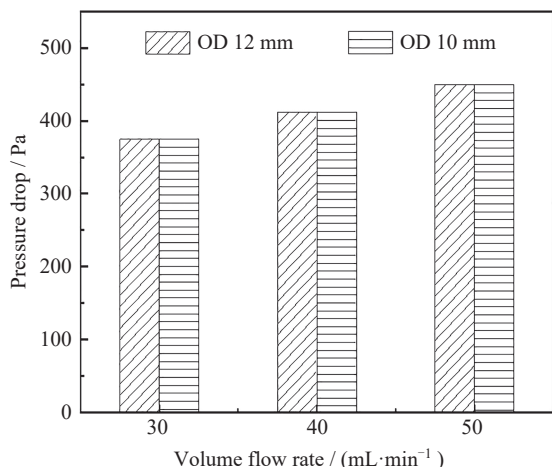


图 15 测试段不同流量下的压降

Fig. 15 Test section pressure drop at different flow rates

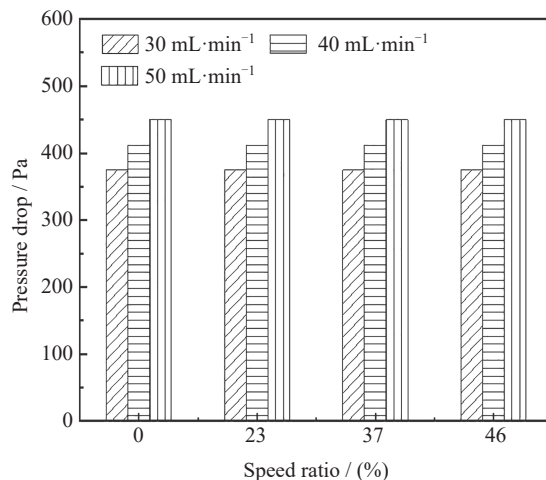


图 17 测试段不同转速下的压降 (管径 10 mm)

Fig. 17 Test section pressure drop at different rotary speeds (Tube diameter: 10 mm)

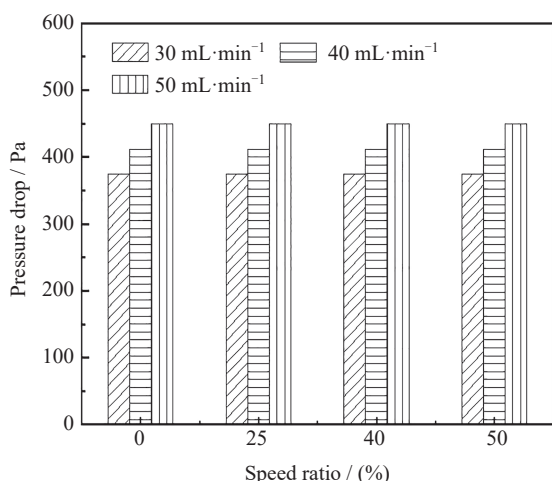


图 16 测试段不同转速下的压降 (管径 12 mm)

Fig. 16 Test section pressure drop at different rotary speeds (Tube diameter: 12 mm)

3 结论

通过研究重力对冷凝传热的影响, 分析管径、蒸汽流量对两相流动模式和热行为的影响, 可以得出如下结论.

(1) 不同蒸汽流量在零重力条件下的两相变化, 目前发现有波状和螺旋状两种变化.

(2) 研究发现, 流动行为受到重力和其他参数的很大影响. 可以观察到, 在重力条件改变情况下测得的温度均低于常重力条件下测得的温度. 常重力和重力条件改变情况下的传热恶化取决于工作条件.

(3) 无论重力条件如何, 沿着流动方向, 通道内的轴向温度逐渐降低是一个共同的特征. 在相同的管径下, 随着蒸汽体积流量的增加, 无论是上部还是下部, 整体温度会略微上升. 在低流量下温度变化对重力条件比较敏感, 在高流量下温度变化对重力不敏感. 流量增加导致液体增多, 在重力的作用下液体更容易在下部聚集, 所以下部温降较高.

(4) 由于 10 mm 和 12 mm 管道内的冷凝量较少, 在不同转速下压降的变化不明显. 但是蒸汽速度的增加或减少会导致压降发生变化.

参考文献

- [1] WANG L L, JIAO P F, DANG C B, *et al.* Condensation heat transfer characteristics of R1234yf and other Refrigerants inside small-scale tube: an experimental study and heat transfer correlation development[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2022, **58**(6): 1059-1074
- [2] ŁUKASZUK M, SKIEPKO T. Condensation heat transfer coefficient during steam intermittent flows in a horizontal minichannel[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2023, **145**: 110875
- [3] BERTO A, AZZOLIN M, BORTOLIN S, *et al.* Condensation heat transfer in microgravity conditions[J]. *npj Microgravity*, 2023, **9**(1): 32
- [4] KANG Qi, HOU Rui. The applications of microgravity fluid management in the aerospace engineering[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2007, **29**(6): 328-334 (康琦, 侯瑞. 微重力流体管理在航天工程中的应用 [J]. *自然杂志*, 2007, **29**(6): 328-334)
- [5] ZHAO Jianfu, LIN Hai, XIE Jingchang, *et al.* Experiment-

- al investigation of gas-liquid two-phase flow utilizing reduced gravity airplane[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2000, **20**(4): 340-347 (赵建福, 林海, 解京昌, 等. 失重飞机搭载气/液两相流实验研究 [J]. 空间科学学报, 2000, **20**(4): 340-347)
- [6] ZHAO Jianfu, LIN Hai, XIE Jingchang, *et al.* Experimental study on pressure drop of two-phase gas-liquid flow at microgravity conditions[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2001, **9**(4): 373-380 (赵建福, 林海, 解京昌, 等. 微重力条件下气/液两相流压降实验研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2001, **9**(4): 373-380)
- [7] FANG X D, ZHANG H G, XU Y, *et al.* Evaluation of using two-phase frictional pressure drop correlations for normal gravity to microgravity and reduced gravity[J]. *Advances in Space Research*, 2012, **49**(2): 351-364
- [8] BAI W D, CHEN W, LI M F, *et al.* An improved mass transfer model for film condensation numerical simulation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, **202**: 123686
- [9] HE F L, DU W F, MIAO J Y, *et al.* Numerical investigation of the gravity effect on two-phase flow and heat transfer of neon condensation inside horizontal tubes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, **233**: 121162
- [10] LIU N, ZHAO Q, LAN Z X. Flow regimes and transitions for two-phase flow of R152a during condensation in a circular minichannel[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2021, **9**: 792586
- [11] NEBULONI S, THOME J R. Film condensation under normal and microgravity: effect of channel shape[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2007, **19**(3/4): 125-127
- [12] COLEMAN J W, GARIMELLA S. Two-phase flow regimes in round, square and rectangular tubes during condensation of refrigerant R134a[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2003, **26**(1): 117-128
- [13] BAI C, QIU Y, WEI M, *et al.* Converging-shaped small channel for condensation heat transfer enhancement under varying-gravity conditions[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, **123**: 105171
- [14] LIPS S, MEYER J P. Effect of gravity forces on heat transfer and pressure drop during condensation of R134a[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2012, **24**(3): 157-164
- [15] WANG W C, MA X H, WEI Z D, *et al.* Two-phase flow patterns and transition characteristics for in-tube condensation with different surface inclinations[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, **41**(24): 4341-4349
- [16] AZZOLIN M, BORTOLIN S, LE NGUYEN L P, *et al.* Experimental investigation of in-tube condensation in microgravity[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2018, **96**: 69-79
- [17] SPARROW E M, GREGG J L. A theory of rotating condensation[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1959, **81**(2): 113-119
- [18] SPARROW E M, GREGG J L. The effect of vapor drag on rotating condensation[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1960, **82**(1): 71-72
- [19] SPARROW E M, HARTNETT J P. Condensation on a rotating cone[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1961, **83**(1): 101-102
- [20] BERTO A, AZZOLIN M, LAVIEILLE P, *et al.* Experimental investigation of liquid film thickness and heat transfer during condensation in microgravity[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, **199**: 123467
- [21] LEE H, MUDAWAR I, HASAN M M. Experimental and theoretical investigation of annular flow condensation in microgravity[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, **61**: 293-309
- [22] DEY P, RAJ D, SAHA S K. A numerical study on condensation heat transfer characteristics of R134a in microchannel under varying gravity conditions[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2021, **33**(3): 34

作者简介



张雷刚 男, 1992年3月出生于河南省洛阳市, 现为郑州轻工业大学能源与动力工程学院讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为微重力条件下冷凝传热及强化排液研究。
E-mail: leigzhang@zzuli.edu.cn