

不同重力条件下管内冷凝现象研究进展

赵建福[†] 彭浩

中国科学院力学研究所微重力重点实验室, 北京 100190

摘要 本文对不同重力环境中水平管内冷凝气液两相流动与传热现象的研究现状进行了全面评介, 重点关注于航天应用中的小管径、低流量和以氨为工质的情形, 以及部分重力条件下冷凝现象中的重力效应. 冷凝现象中管壁四周液膜的存在, 导致水平管内冷凝气液两相流与沸腾或绝热气液两相流在构型上存在着明显的不同, 表面张力的作用增大, 向波状和分层流转换所对应的临界 Bond 数也随之增大, 进而使小管径、低流量水平管内冷凝气液两相流动与传热现象中的重力效应减弱, 甚至可以忽略不计. 实验发现该情形中摩擦压降要小于基于常规气液两相流实验数据的经验关联式的预测结果, 而更接近光滑环状流情形; 对冷凝两相传热系数的预测, 只有采用基于空隙率与界面剪切率相互耦合的模型, 才能够给出较好的结果.

关键词 微重力, 管内冷凝, 气液两相流, 压降, 传热系数

1 引言

随着航天事业的快速发展, 包括航天器主动热控系统、动力系统、低温流体的储存和输送系统等的应用, 对气液两相系统研究提出了迫切的需求. 航天应用对气液两相系统的可靠性、安全性等, 有着极高的要求, 特别是由于相应系统在航天器不同飞行阶段将处于不同的(残余)重力环境, 而相关应用系统的研制和性能检测等往往只能在地面常重力环境进行, 因此, 气液两相流动与传热现象中的重力效应问题对航天用气液两相系统有着至关重要的意义.

微重力气液两相流动与传热研究, 包括对微小重力环境中的气液两相流动与传热特征的观测, 以及对不同重力环境中的气液两相流动与传热特征间的差异的对比分析, 进而揭示气液两相流动与传热机理(特别是重力作用机制). 相关研究可以追溯到 20 世纪 50 年代, 目前已有许多详尽的综述或专著来总结其进展情况, 其中, Hewitt^[1], McQuillen 等^[2], Straub^[3], Di Marco^[4], Kim^[5], Ohta^[6-7] 和 Gabriel^[8] 分别总结了国际上相关的实验与理论研究进展; 最近, Zhao(赵建福)^[9] 总结了我国(尤其

是中国科学院力学研究所国家微重力实验室)近十多年来在微重力气液两相流动与传热研究领域的成果.

不过, 因气液两相流动与传热现象中的不同过程有着不同的特征时间, 而长期、连续的空间(或地球轨道上的)微重力实验环境又极为难得, 极为有限的空间微重力实验往往又受制于实验设备尺寸、重量、功耗、数据容量等客观限制, 导致目前对微重力气液两相流动与传热现象各典型过程的研究极不平衡, 相应研究较多地集中于池沸腾现象, 其次是管内气液两相流型、压降与流动沸腾传热现象, 而对管内冷凝现象的研究则极少. 造成后一情况的主要原因有以下两点: (1) 管内冷凝实验需要同时具有主、辅两套循环系统, 主循环系统除具备冷凝观测功能外, 还需要提供满足实验要求的蒸汽流; 辅助循环系统则用于带走冷凝实验段放出的热量, 并提供冷凝测试所需要的稳定的实验条件. 这导致管内冷凝实验系统复杂, 尺寸、重量和功耗都较其他实验更大. (2) 冷凝现象需要更长的时间才能达到热平衡, 因此需要更长的微重力时间. 这基本上排除了利用诸如落塔、抛物线飞机等地基短时微重力实验设施开展冷凝研究

的可能. 尽管如此, 鉴于航天应用领域的强烈需求, 目前依然有一些研究结果陆续得以报道, 对理解管内冷凝现象、指导航天应用有着重大意义.

本文主要评述不同重力环境中水平管内冷凝气液两相流动与传热研究的最新进展, 重点关注在航天应用领域中具有重要应用价值的小管径、低流量和氨为工质的管内冷凝气液两相流动与传热现象及其中的重力效应, 作为进一步深化理解管内冷凝现象内在机制的基础, 并对相关航天应用技术的研发提供帮助.

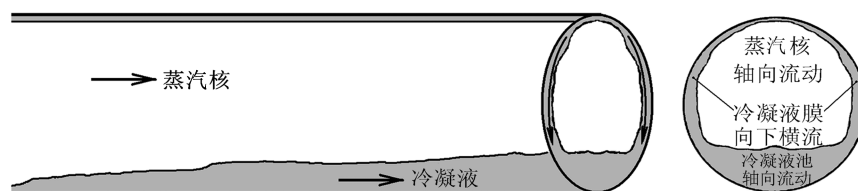


图 1 水平管内冷凝现象中的环状液膜^[10]

随着冷凝液的增加, 最初分布相对均匀的环状液膜在重力影响下向底部汇集, 形成波状或分层流动; 冷凝液的进一步增加会导致蒸汽含量的急剧减少, 流型演变为间歇流 (弹状流或塞状流), 最后经泡状流转化为单相液流. 需要强调的是, 与水平管内气液两相绝热流动或强迫流动沸腾中的波状或分层流不同, 这里所谓的“波状或分层流”, 上部管壁并非直接与气相接触, 而是黏附有在重力作用下向下汇流着的冷凝液膜, 底部液层有时又称为“冷凝液池”, 也许“偏心环状流”才是这种流动构型比较适当的名称. 不过, 在水平管内气液两相绝热流动或强迫流动沸腾中, 偏心环状流上部液膜主要是受到气相剪切力的拖曳, 并克服了重力的作用而形成; 而在冷凝现象中, 上部液膜的形成源于冷凝过程, 重力是驱动液膜向下汇流的主要原因, 二者本质上有着明显差异. 此外, 水平管内冷凝现象中, 环状流、波状或分层流甚至间歇流的气团所占据的流道截面的基本构型本质上是相同的, 区别仅在于底部冷凝液池的相对厚度及其波动程度.

水平管内冷凝现象中, 管底液膜的堆积或上部液膜向管底的汇流受重力驱动, 而表面张力和中心气核对界面的剪切力则阻碍着这种流动. 因此, 在地面重力场中, 只有气相惯性力足够大或者表面张力足够强时, 才能消除重力的作用, 进而维持管壁四周液膜厚度的均匀性 (图 2); 这分别对应高流量或小管径情形. 如果重力被完全抑制, 自然

2 水平管内冷凝现象基本特征

单相的蒸汽进入冷凝管, 接触过冷管壁发生气-液相变, 凝结为液体并释放出热量. 若壁面与冷凝液不浸润或冷凝液量极小, 则冷凝会表现为珠状冷凝; 但一般情形中, 管内冷凝现象往往以气液两相环状流动为主要特征——冷凝液在管壁四周铺展形成环状液膜, 将蒸汽和过冷固壁分离开 (图 1). 因此, 液膜也就成为了冷凝换热的主要热阻.

没有液、气分层现象, 即波状或分层流不复存在. 不过, 对于航天应用中的诸多情形, 重力往往有所减弱, 但并未被完全抑制 (如月球或火星表面重力分别约为地面重力的 1/6 或 1/3), 由此引发了如下与航天应用密切相关的基本问题: 部分重力条件下液、气分层效应对水平管内冷凝气液两相流动与传热特征影响如何? 能否通过地面重力场检测试验来预测部分重力场应用中的实际性能? 这些问题同样关系到对冷凝现象内在机制的揭示, 因此, 同样具有重要的学术价值, 也得到了广泛重视.

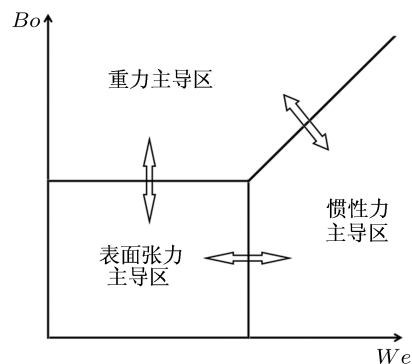


图 2 气液两相流动中的主导因素及其对应区域^[11]

赵建福^[12]基于不同重力条件下不同管径等参数状况下的管内双组分绝热气液两相流型特征, 并结合地面常重力环境微细尺度管内双组分绝热气液两相流型特征及气液两相环状构型稳定性分析结果等, 综合提出了如下的气液两相流动重力无关性准则

$$Bo = (\rho_L - \rho_G) g D^2 / \sigma \leq Bo_{cr} = 1.5 \sim 6$$

$$Fr_* = U_{SG} / \sqrt{(\rho_L - \rho_G) g D / \rho_G} \geq Fr_{*cr} = 0.54 \sim 2.2 \quad (1)$$

其中, Bond 数准则描述的是重力和表面张力之间的相对强弱关系, 适用于低流量情形; 而 Froude 数准则对应于重力和惯性力之间的相对强弱, 适用于高流量情形。

最近, Nema^[13] 基于 Barnea 等^[14] 对分层流或环状流向间歇流过渡时所形成的最小液团的受力分析, 考虑了气相重力的作用, 提出了一个临界 Bond 数计算的简便公式

$$Bo_{cr} = \left(\frac{\rho_L}{\rho_L - \rho_G} - \frac{\pi}{4} \right)^{-1} \quad (2)$$

其预测数值与赵建福的结果^[12] 相近. 对常规介质而言, Bond 数准则所确定的重力无关的气液两相流动现象发生在不大于 5 mm 管道内。

此外, 航天应用中, 氨往往因其较高的汽化潜热而成为两相系统的首选工质. 事实上, 氨作为工业用制冷工质 (代号 R717) 的历史可以追溯到 19 世纪 50 年代, Shah^[15] 气液两相传热模型就是基于氨工质的实验结果归纳得到的. 近年来在臭氧层破坏, 全球变暖等一系列重大环境问题的刺激下, 由于氨是 ODP(臭氧消耗值) 和 GWP(全球变暖值) 均为 0 的环境友好的制冷剂, 因此, 尽管氨有毒并会发出刺激性气味, 仍然得到了极大的重视. 然而, 目前公开文献中关于氨的冷凝换热的研究报道并不多, 也缺乏系统、完整的实验数据库, 这阻碍了对相关机理的研究和实用模型的发展. 另外, 航天应用中涉及的质量流率往往在 $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级之下, 但目前常用的经验关联模型多基于较大流率 (即是所谓的“小流率”实验往往也远高于 $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级) 的其他工质的地面实验数据, 对小管径、低流率、氨工质的冷凝传热的适用性难以令人满意, 迫切需要直接以氨为工质的进一步实验, 以获取可资验证的基础实验数据. 这对于航天应用领域尤显重要^[16-18].

3 小管径、低流量水平管内冷凝现象中的重力效应

Duschatko^[16] 报道了 LTV 航天防务公司开展了以氨为工质的冷凝管实验结果. 实验中, 测试用冷凝管内径分别为 1.1 mm, 1.8 mm 和 2.4 mm, 进口处为饱和氨蒸汽, 而出口处则为过冷液态氨。

液态的三氯乙烯高速流过一侧的冷却管, 从而提供恒定的冷源. 冷凝管和冷却管采用金属支架连接, 在氨和冷源之间提供了一个远高于氨冷凝热阻的固定高热阻元件. 这样, 实验中沿程热流是恒定的, 以模拟在 300 K 条件下的辐射边界条件. 实验中, 流量范围为 $(0.05 \sim 0.15) \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, 冷凝段长度为 1.8 m 和 3.0 m, 实测全管压降范围为 $(0.03 \sim 7) \times 10^4 \text{ Pa}$, 并通过调整三氯乙烯的过冷度维持冷凝段长度的恒定. 图 3 为实验结果及其与 Crowley 等^[19] 模型计算间的比较. 模型计算中采用了 Duschatko^[16] 基于该实验结果提出的 (环状流动中) 气液界面摩擦关系

$$f_i / f_{wg} = 1 + 2.5 (1 - \alpha)^{0.39} \quad (3)$$

其中, f_i , f_{wg} 和 α 分别代表气液界面摩擦系数、全气相流动时的壁面摩擦系数和空隙率. 与传统的 Wallis^[20] 和 Chen 等^[21] 关联式相比, Duschatko^[16] 关联式表明, 在低流量情形中, 摩擦阻力要小于基于常规流动实验结果所获得的经验关联式的预测结果的, 流动构型更接近于光滑环状流. 这里, 需要说明的是, Crowley 等^[19] 模型中关于环状流摩擦压降的计算公式中并不包含重力项, 因此是重力无关的。

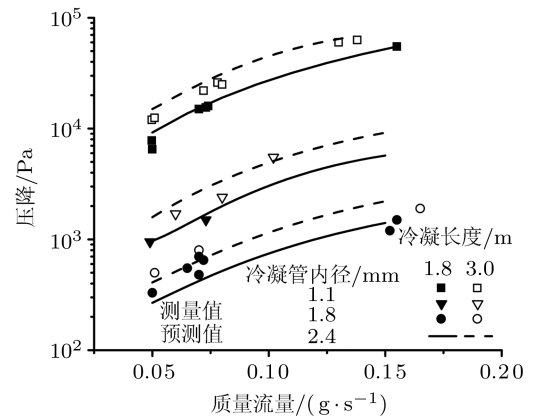


图 3 LTV 氨冷凝压降实验结果^[19]

首个在长期、稳定的地球轨道微重力环境中完成的气液两相流实验是 TEMP2A-3 绝热两相压降实验, 于 1992 年 8 月在航天飞机 STS-46 任务中完成^[17]. 此前还利用相同装置进行了地面常重力对比实验. 实验中同样采用氨为工质, 实验段为内径 3.34 mm 的不锈钢管, 压差测量段长 0.756 m ($L/d = 226$), 实验段前、后分别另有长 0.25 m ($L/d = 75$) 和 0.05 m ($L/d = 15$) 的进口段

和出口段. 工作温度范围为 294 ~ 306 K, 流量范围为 (1.1 ~ 2.5) g·s⁻¹, 气相干度范围为 0.17 ~ 0.7, 相应流型 (推测) 全为环状流. 空间实验数据和地面常重力对比实验数据相比没有明显差别, 表明在所研究条件下气液两相压降与重力无关.

图 4 显示了气液两相压降的空间实验和地面常重力对比实验数据与不同模型预测结果的比值随气相 Weber 数 $We_g = \rho_g U_{sg}^2 d / \sigma$ 的变化情况, 其中包括了 Ungar 和 Cornwell^[22] 地面实验的结果 (氨工质, 标称工作温度 297 K, 不锈钢水平实验段内径 3.15 mm, 流量 (0.15 ~ 0.30) g·s⁻¹——比 TEMP2A-3 实验低一个量级). 在 $We_g < 10$ 时, 光滑环状流模型很好地预测了实测的两相压降, 而经典的 Chen 模型^[21] 则明显高估了两相压降; 而当 $We_g > 10$ (作者注: 原文误作 100) 时, 光滑环状流模型明显低估了两相压降, 而 Chen 模型^[21] 则较好预测了实测的两相压降. Reinarts 等^[17] 认为这实际上反映了大、小管径的差异——在较小的气相 Weber 数情形中, 表面张力使得环状流中的液气界面趋向光滑, 因此将界面摩擦因子之比减小至接近于 1; 而在较大的气相 Weber 数情形中, 气相惯性主导着流动特征, 液气界面波动剧烈, 明显偏离光滑环状流构型——这正是常规大直径气液两相环状流的特征, 因此基于常重力大管径气液两相压降实验数据的经典模型可以用于微重力时的气液两相压降预测^[8-9,21,23].

显然, 这里所谓的“大”或“小”管径效应指的是环状流型对理想的光滑环状流构型的偏离或逼近特征. 因此, 这里的“大”管径对应高流量, 流动中惯性力将主导流动特征, 因此是重力无关的. 小管径、低流量气液两相流在不同重力条件下均能

满足这里所谓的“小”管径条件, 因此能较好地保证流动与传热特征的重力无关性. 明显的重力依赖性将只出现在大管径且流量偏低的气液两相流动现象中.

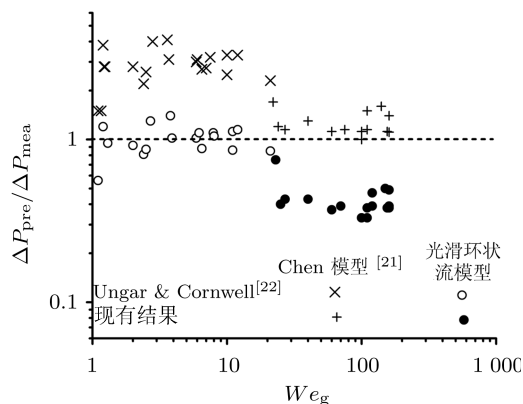


图 4 气液两相压降的“大”、“小”管径效应^[17]

Lebaigne 等^[18] 则报道了目前唯一一组空间管内冷凝实验结果. 该实验采用泵驱两相回路, 氨为工质, 全程采用内径 4.8 mm 铝制管道, 最大热负荷 150 W, 最大流量 0.432 g·s⁻¹. 6 组有效的冷凝传热实验数据 (表 1) 来自 MASER9 探空火箭约 6 min 的微重力飞行实验. 事实上, 所观测到的冷凝过程依然是非稳定的——在 MASER9 实验中, 为了获得尽可能多的实验结果, 实验流程中设定了 6 组实验参数, 约 60 s 调整一次, 这样, 对于每组参数实验持续时间实际上约 60 s. 飞行实验后的数据分析表明, 若持续时间加倍, 冷凝过程才有可能达到热平衡状态. 因此, 相关数据只能采用准稳态分析方法从原始数据中提取出来. 这些数据尽管存在着极大的不确定度, 但依然弥足珍贵.

表 1 Cyrene 实验测得的冷凝传热系数及进、出口干度等^[18]

质量流量/(g·s ⁻¹)	进口干度	出口干度	饱和温度/°C	平均传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
0.157	0.51	0.31	27.97	6 164
0.160	0.73	0.54	27.80	4 378
0.177	0.26	0.11	27.28	2 591
0.432	0.24	0.17	27.27	3 383
0.142	0.60	0.42	26.98	3 600
0.204	0.67	0.56	27.21	2 919

利用得到的微重力冷凝换热系数, Lebaigne 等^[18] 对若干常用的冷凝传热模型^[15,20-21,24-25] 进行了检验 (图 5), 结果表明经典模型不能正确预测微重力条件下的冷凝传热系数, 甚至出现量级上的差异. 只有考虑了空隙率对界面摩擦因子的显著依赖性, 即先利用界面摩擦因子的 Wallis^[20] 或

Chen 关联式^[21] 及局部动量平衡关系确定空隙率, 再采用 Butterworth^[26] 关联式计算冷凝传热系数, 才能给出较好的预测结果. 文章中并没有给出地面实验结果, 也没有测量冷凝管压降, 因此无法确定实测结果是否是重力无关的. 不过, 上述计算程序中并不包含重力, 其预测自然是与重力无关的.

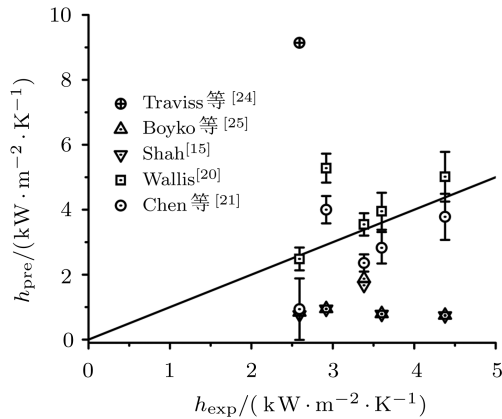


图 5 Cyrene 实验测得的冷凝传热系数与常用经验模型预测结果的比较^[18](图中数据点对应依据进口、入口参数的预测结果的平均值. 对基于界面摩擦因子的 Wallis^[20] 和 Chen 关联式^[21] 的计算, 还同时用依据进口、入口参数计算的结果表示出其预测区间)

Kawasaki 等^[27] 报道了日本 KIKU-8 试验卫星上储液器植入式环路热管 (reservoir embedded LHP) 系统中冷凝器运行测试结果, 该冷凝器为铝制蛇形管道, 内径 4.5 mm, 总长度 5.5 m, 植入在展开式辐射器内, 最大热负荷可达 400 W, 工质为氨, 工作温度范围为 $-40 \sim 60^\circ\text{C}$. 测试数据表明, 地面常重力条件下两相区长度基本不随热负荷变化, 且接近完全冷凝; 空间微重力条件下两相区长度则随热负荷的增加而增长, 高热流时等于冷凝管长度. 这样, 低热负荷时, 空间微重力条件下两相区要比地面时短, 反映出传热是增强的; 而在高热负荷条件下, 空间环境中蒸汽不能完全冷凝, 冷凝器出口依然处于两相状态, 传热恶化. 不过, 由于该项目属于技术验证性试验, 天、地测试中未能保证相关条件 (如展开式辐射器散热性能等) 的一致性, 上述比较显然不能给出确凿无疑的结论.

针对氨工质的两相传热系统的空间应用, Delil 发展了一套冷凝过程的热-重力模化理论^[28], 随后并将其扩展应用到其他工质及完整的两相传热系统^[29]. 该理论的基础是 Soliman 等^[30] 环状流动冷凝传热模型. 图 6 显示了其中一个算例结果, 计算条件为: 冷凝管内径 16.1 mm, 流动方向垂直向下 (作者认为该构型可以很好地研究或模拟微重力两相流动特征), 总的传热功率 1 000 W, 氨工质温度 (即饱和温度) 及其和热沉间的温差分别为 300 K 和 10 K. 图 6 中还显示了 Da Riva 和 Sanz^[31] 对 0 g 和常重力 (1 g) 水平冷凝管的计算结果以便比较. 结果表明重力减弱会导致冷凝传热恶化, 冷凝

长度因此随重力下降而增长, 0 g 时的冷凝长度约为常重力条件下的 11 倍. 作者认为, 与 Da Riva 和 Sanz^[31] 在数值上的较大差异主要源于后者计算的是水平管内冷凝——常重力水平管内冷凝现象因重力驱动的液膜向下汇流导致上部液膜厚度减小, 强化了传热效果, 因此冷凝长度减小到约为垂直向下流动时的 50%; 0 g 时 Da Riva 和 Sanz^[31] 预测了更大的冷凝长度, 原因在于二者所采用的具体模型不同.

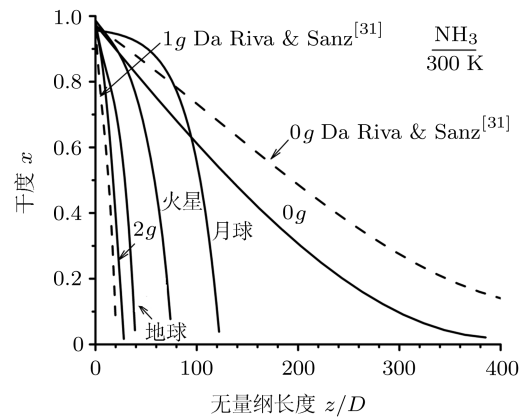


图 6 不同重力条件下氨蒸汽干度沿程变化情况^[29]

Delil^[28] 还计算了工质饱和温度、管径、功率水平等对冷凝特性的影响, 其中管径的影响很大, 特别是随着管径的减小, 重力的影响显著减弱, 0 g 时的冷凝长度与常重力时的比值会由 24.15 mm 时的 31 倍减小到 16.1 mm 时的 11 倍, 而在 8.05 mm 时更是减小到 1.5 倍. 空间实验验证了这种变化趋势^[32].

Hurlbert 等^[33-34] 基于对一系列不同重力尤其是月球重力和火星重力条件下内径 11.1 mm 水平直管内 R-12 绝热气液两相压降实验结果的归纳, 基于量纲分析的方法, 并引入一系列简化假设 (需要指出的是, 其中某些假设明显存在问题), 提出了一个气液两相压降的重力标度关系

$$Eu_G = f(Fr_L) \quad (4)$$

其中气相 Euler 数和液相表观 Froude 数分别定义为

$$Eu_G = \frac{\Delta p}{\rho_G U_G^2}, \quad Fr_L = \frac{j_L^2}{gd} \quad (5)$$

上述两式中速度的含义是不同, 气相为相平均速度 U_G , 液相则为表观速度 j_L . 不同重力条件下气液两相压降的实测数据 (包括 Ungar 等^[35] 的月球重力条件下的测量结果), 表明具体的标度关

系依赖于流型。总体而言,摩擦压降约反比于重力加速度的 0.4 次方,由此可推断出在相同流动和传热条件下,月球重力场中的气液两相压降将会比地面重力场中略有增加,二者的比值约为 2(火星上则约为 1.5 倍)。不过,这些关系尽管有一定(但不严格)的理论基础和实验数据的支持,在推广到其他情形,依然只能给出某种粗略的预估。

Narain 等^[36-37]数值模拟了垂直向下布置的准稳态液汽流环状凝结分离流动构型下的稳定与非稳定初、边值问题,并利用地面实验对相关模拟结果进行了验证,结果表明,环状凝结流动及其传热特征依赖于进、出口及壁面条件,特别是出口压力条件的变化会改变内部蒸汽流场,对冷凝流动特征具有更显著的影响。在重力驱动的冷凝流动中,未限定(即自由的)出口压力条件时存在可能的某种稳定“吸引子”,即流动能自动寻找到一个稳定的流动构型;但类似“吸引子”在非重力驱动的冷凝流动中并不存在,因此流动显示出强烈的不稳定性。非重力驱动凝结两相流动在未限定出口条件时存在的这种内在不稳定性,将影响整个系统的运控安全性,需要予以特别的关注。

Narain 等^[38]对微米到毫米尺度凝结流动进行了系统研究,数值模拟采用了完全的 CFD 稳态数值模拟和基于非线性常微分方程的一维稳态数值模拟两种方法,而实验研究则包括重力和剪切驱动的 FC-72 蒸汽部分凝结和完全凝结两种情形。研究表明,数值模拟与实验研究能很好的相互符合。在剪切主导的凝结流动中,在某个临界管径(其数值依赖于其他流动参数)之下,流动与传热特征对重力将不再敏感。此外,适当的小型化可以减小系统暂态时间,使得短时低重力实验能提供空间冷凝传热过程的一些关键科学信息(不过,作者所谓的“短时”在文中是指“4 min”,远非地基短时微重力实验设施所能提供,如落塔和失重飞机只能提供数秒到 20 余秒的微重力时间,充分表明了微重力凝结两相流动与传热实验的难度)。

Nebuloni 等^[39-40]报道了对水平管内冷凝传热的数值模拟结果,显示出即使在 Bond 数远小于 1 的条件下,重力效应仍具相当明显。仔细分析 Nebuloni 等^[39-40]所采用的数值模型,其中隐含了截面液气分布的先验假设,即首先基于最小能量原理预先确定出截面液气界面形状与位置,随后计算液、气两相流动与传热特性。这很可能就是数值模拟中气液两相分层现象即使在极小的 Bond 数条件下依然非常显著的原因。

最近, Da Riva 和 Del Col 等^[41]采用 VOF 方法计算了饱和温度 40 °C 的 R134a 在壁温 30 °C、内径 1 mm 管内环状凝结流动与传热问题,从而避免了 Nebuloni 等^[39-40]关于液气界面的先验假定。为了考察重力的影响,采用了 3 种不同的流动构型——常重力条件下的水平流动、垂直向下流动以及零重力流动。核心气流区采用低雷诺数湍流模型描述,液膜流动则分别采用低质量流率(100 kg·m⁻²·s⁻¹)时的层流模型或高质量流率(800 kg·m⁻²·s⁻¹)时的低雷诺数湍流模型描述。计算表明,高质量流率时界面剪切力为主导因素,3 种构型模拟结果相同;而低质量流率时重力为主导因素,水平流动体传热效果远大于其他构型,垂直向下流动传热也比零重力时略高(5%),这主要源于重力分层效应导致管顶液膜变薄(水平流动)或重力引起的冷凝液膜的减薄。不过,考察该情形中的 Bond 数大小,在常重力条件下约为 1.75,基于前述理论结果,重力效应将不会如此显著。因此,尽管常重力时水平流动模拟结果与 Matkovic 等^[42]的实验结果符合很好,但由于其他流动构型没有相应实验测试结果,进一步的实验验证将是必需的。此外,模拟结果还表明表面张力的影响甚微,也与以往研究结果^[43-44]相悖。

目前,普遍认为微细管内冷凝气液两相流型将是喷射流(injection)/弹状流(slug)/泡状流(bubble),相同流量和干度条件下不再是常规的分层流或环状流^[45]。例如,在针对毛细泵环(CPL)应用的毛细管(水力直径 0.56 mm)低流率(3 ~ 15 kg·m⁻²·s⁻¹)冷凝实验中, Miescevic 等^[46]观察到了两种主要流型——低流率时静态长气泡(冷凝发生在扩展的弯月形液面)和高流率时气泡串(传热系数相比前者减小 4 倍)。为揭示相关流型转换机制, Miescevic 等^[47]发展了一种不考虑重力影响、基于分离流方法的对流冷凝数值模型,可以得到液气界面形状的静态解。计算结果表明压降主要发生在薄液层和弯月面相交处,而流量的增加会减小平均传热系数,这与实验观测趋势相同。

其实,早在 1991 年 Faghri 等^[48]就开展了微重力冷凝现象的数值模拟研究。针对气液同向流动的环状冷凝构型,作者采用膜状层流冷凝的 Nusselt 理论分析冷凝过程特征。由于液膜内外界面均为圆形,微重力条件下冷凝液驱除机制只能是气相剪切力。计算表明气相剪切力确实可以有效抑制冷凝液层的增厚,从而保证冷凝过程连续进行。不过,微重力冷凝实验的缺乏,导致相关研究进展

并不令人满意. 因此, 精心设计的、长期微重力环境中的管内冷凝流动实验, 目前更为必要和紧迫.

有关微重力冷凝研究其他方面 (如平板表面、沟槽表面以及相应的数值模拟等) 的进展, 可以参考 Chen 等^[49], 这里不再赘述.

4 结束语

针对航天应用中的小管径、低流量和以氨为工质的水平管内冷凝气液两相流动与传热现象, 本文总结和评介了不同重力环境中水平管内冷凝气液两相流动与传热现象的研究现状, 重点关注在部分重力条件下冷凝现象中的重力效应. 冷凝现象中管壁四周液膜的存在, 导致水平管内冷凝气液两相流与沸腾或绝热气液两相流在构型上存在着明显的不同, 表面张力的作用增大, 进而导致波状和分层流出现所对应的临界 Bond 数会有所增大. 这样, 小管径、低流量水平管内冷凝气液两相流动与传热现象中的重力效应可以忽略不计. 实验发现该情形中摩擦阻力要小于基于常规气液两相流实验数据的经验关联式的预测结果, 而更接近光滑环状流情形; 传热系数的预测需考虑摩擦阻力特征的变化, 即需要将截面空隙率的预测建立在适用于小管径、低流量环状流现象的界面摩擦因子基础上, 并依据相应计算结果估算传热特性.

参 考 文 献

- Hewitt G F. Multiphase flow: the gravity of the situation. In: 3rd Microgravity Fluid Physics Conf., Cleveland, Ohio, USA, July 13-15, 1996
- McQuillen J, Colin C, Fabre J. Ground-based gas-liquid flow research in microgravity conditions: state of knowledge. *Space Forum*, 1998, 3: 165-457
- Straub J. Boiling heat transfer and bubble dynamics in microgravity. *Adv. Heat Transfer*, 2001, 35: 57-172
- Di Marco P. Review of reduced gravity boiling heat transfer: European research. *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.*, 2003, 20(4): 252-263
- Kim J. Review of reduced gravity boiling heat transfer: US research. *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.*, 2003, 20(4): 264-271
- Ohta H. Review of reduced gravity boiling heat transfer: Japanese research. *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.*, 2003, 20(4): 272-285
- Ohta H. Microgravity heat transfer in flow boiling. *Adv. Heat Transfer*, 2003, 37: 1-76
- Gabriel K S. Microgravity Two-phase Flow and Heat Transfer. El Segundo: Springer, 2007
- Zhao J F. Two-phase flow and pool boiling heat transfer in microgravity. *Int. J. Multiphase Flow*, 2010, 36(2): 135-143
- Thome J. Condensation inside tubes (Chapter 8). In: Engineering Data Book III, Wolverine Tube, Inc., 2004-2009
- 赵建福. 气液两相流动与相变传热 (第 4 章). 见: 微重力科学导论. 胡文瑞. 主编. 北京: 科学出版社, 2010
- 赵建福. 微重力条件下气/液两相流动研究: [博士后研究报告]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2000
- Nema G. Flow regime transitions during condensation in microchannels: [PhD Dissertation]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2008
- Barnea D, Luninski Y, Taitel Y. Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter pipes. *Can. J. Chem. Eng.*, 1983, 61(5): 617-620
- Shah M. A new correlation for heat transfer during boiling flow through pipes. *ASHRAE Trans.*, 1976, 82(2): 66-86
- Duschatko J. Condensate Tube ΔP Test Summary. LTV Aerospace & Defense Co., 1991
- Reinarts T R, Ungar E K, Butler C D. Adiabatic two-phase pressure drop in microgravity: TEMP2A-3 flight experiment measurements and comparison with predictions. In: 33rd Aerospace Sci. Meeting & Exhibit, Reno, NV, Jan. 9-12, 1995
- Lebaigue O, Colin C, Larue de Tournemine A. Forced convection boiling and condensation of ammonia in microgravity. In: 13rd Int. Heat Transfer Conf., Sydney, Australia, 13-18 August 2006. MPH-25
- Crowley C J, Izenson M G, Barry J, et al. Design Manual for Two-phase Components of Spacecraft Thermal Management Systems. Creare Inc., September, 1992
- Wallis G B. One-dimensional Two-phase Flow. New York: McGraw Hill Company, 1969
- Chen I Y, Downings R S, Keshock E, et al. Measurements and correlation of two-phase pressure drop under microgravity conditions. *J. Thermophys.*, 1991, 5(4): 514-523
- Ungar E K, Cornwell J D. Two-phase pressure drop of ammonia in small diameter horizontal tubes. In: 17th AIAA Ground Testing Conf., Nashville, TN, July 6-8, 1992
- 赵建福, 林海, 解京昌, 等. 低重力条件下气/液两相流摩擦压降实验研究. *应用基础与工程科学学报*, 2001, 9(4): 373-380
- Traviss D P, Rohsenow W M, Baron A B. Forced convection condensation inside tubes: a heat transfer equation for condenser design. *ASHRAE Trans.*, 1972
- Boyko L D, Kruzhilin G N. Heat transfer and hydraulic resistance during condensation of steam in a horizontal tube and in a bundle of tubes. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1967, 10: 361-373
- Butterworth D. Simplified prediction methods for condensation on a vertical surface with vapour shear. In: HTFS Res. Symp., Paper RS400, Oxford, UK, September 14-15, 1981
- Kawasaki H, Okamoto A, Hatakenaka R, et al. Condenser of reservoir embedded loop heat pipe under orbital environment. In: 5th Int. Topical Team Workshop on Two-phase Systems for Ground & Space Applications, Kyoto, Japan, September 26-29, 2010
- Delil A A M. Gravity dependant condensation pressure drop and heat transfer in ammonia two-phase heat transfer systems. In: Nat. Heat Transfer Conf., San Diego, CA, August 9-12, 1992
- Delil A A M. On thermal-gravitational modelling, scaling and flow pattern mapping issues of two-phase heat transport systems. National Aerospace Laboratory NLR, June, 1998
- Soliman M, Schuster J R, Berenson P J. A general heat transfer correlation for annular flow condensation. *J. Heat Transfer Trans. ASME*, 1968, 90: 267-276
- Da Riva I, Sanz A. Condensation in ducts. *Microgravity Sci. Technol.*, 1991, 4: 179-187

- 32 Delil A A M. TPX for in-orbit demonstration of two-phase heat transport technology – evaluation of flight and post-flight experiment results. In: 25th Int. Conf. Environmental Systems, San Diego, USA, 1995
- 33 Hurlbert K M. Flow Dynamics for two-phase flows in partial gravities: [PhD Dissertation]. University of Houston, 2000
- 34 Hurlbert K M, Witte L C, Best F R, et al. Scaling two-phase flows to Mars and Moon gravity conditions. *Int. J. Multiphase Flow*, 2004, 30: 351-368
- 35 Ungar E K, Miller K M, Chen I Y. Two-phase pressure drop in lunar and martian gravity: experimental data and predictions. In: 1994 ASME Symp. On Gas-liquid Flows in Fluid Machinery & Devices, ASME Fluids Eng. Conf., Lake Tahoe, Nevada, June 19-23, 1994
- 36 Narain A, Kulkarni S, Mitra S, et al. Computational and ground based experimental investigations of the effects of specified and unspecified (free) pressure conditions at condenser exit for condensing flows in terrestrial and micro-gravity environments. *Ann. New York Acad. Sci.*, 2009, 1161(1): 321-360
- 37 Narain A, Kurita J H, Kivisalu M, et al. Internal condensing flows inside a vertical pipe: experimental/computational investigations of the effects of specified and unspecified (free) conditions at exit. *J. Heat Transfer Trans. ASME*, 2007, 129: 1352-1372
- 38 Narain A, Mitra S, Kulkarni S, et al. Annular/stratified low-gravity internal condensing flows in millimeter to micrometer scale ducts. In: Next-Generation Suborbital Researchers Conf., Boulder, Colorado, USA, Feb. 18-20, 2010
- 39 Nebuloni S, Thome J R. Film condensation under normal and micro-gravity: effect of channel shape. *Microgravity Sci. Technol.*, 2007, 19(3-4): 125-127
- 40 Nebuloni S. Numerical modeling of annular laminar film condensation in circular and non-circular micro-channels under normal and micro-gravity: [PhD Dissertation]. Ecol Polytechnique Federale de Lausanne, 2010
- 41 Da Riva E, Del Col D. Effect of gravity during condensation of R134a in a circular minichannel: VOF simulation of annular condensation. *Microgravity Sci. Technol.*, 2011, 23(S1): S87-S97
- 42 Matkovic M, Cavallini A, Del Col D, et al. Experimental study on condensation heat transfer inside a single circular minichannel. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2009, 52: 2311-2323
- 43 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): 723-728
- 44 王补宣, 杜小泽. 细圆管内流动凝结换热的流型研究. *自然科学进展*, 2010, 10(12): 1119-1124
- 45 Chen Y, Shi M, Cheng P, et al. Condensation in microchannels. *Nanoscale Microscale Thermophys. Eng.*, 2008, 12: 117-143
- 46 Miscevic M, Mederic B, Lavieille P, et al. Condensation in capillary-driven two-phase loops. *Microgravity Sci. Technol.*, 2007, 19: 116-120
- 47 Miscevic M, Lavieille P, Piau B. Numerical study of convective flow with condensation of a pure fluid in capillary regime. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2009, 52: 5130-5140
- 48 Faghri A, Chow L C. Annular condensation heat transfer in a microgravity environment. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 1991, 18: 715-729
- 49 Chen Y, Sobhan C B, Peterson G P. Review of condensation heat transfer in microgravity environments. *J. Thermophys. Heat Transfer*, 2006, 20: 353-360

REVIEW ON IN-TUBE CONDENSATION IN DIFFERENT GRAVITY CONDITIONS

ZHAO Jianfu[†] PENG Hao

Key Laboratory of Microgravity/CAS; Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Studies on horizontal in-tube condensation flow and heat transfer in different gravity conditions are reviewed, with focus concentrated on the case of small scale tube, for low flow rate of ammonia, which is a routine practice in space applications. Gravity influence on in-tube condensation in partial gravity conditions are discussed in detail. Condensate film on the inner perimeter in horizontal in-tube condensation leads to the differences of its flow configuration from forced boiling and adiabatic two-phase gas-liquid flow, which enhances the effects of surface tension and increases the value of the critical Bond number with regards to the transition to wavy and stratified flow regimes. Thus, the influence of gravity on flow and heat transfer in horizontal in-tube condensation with small scale tube and low flow rate will be weakened, even be come negligible. It was found that the measured frictional pressure drops in these cases are close to the predictions given by smooth annular flow model, which are smaller than the predictions by empirical correlations based on the experimental data of two-phase gas-liquid flow at conventional conditions. Better predictions are obtained only by using a method based on a coupling of the void fraction with the interfacial shear rate.

Keywords microgravity, in-tube condensation, two-phase gas-liquid flow, pressure drop, heat transfer coefficient



赵建福, 男, 博士, 中国科学院力学研究所研究员, 博士生导师, 所学位委员会委员, 中山大学兼职教授. 先后毕业于清华大学 (1990, 学士)、浙江大学 (1993, 硕士)、武汉水利电力大学 (1998, 博士). 长期从事微重力两相流与传热研究, 先后成功完成了“和平号”空间站两相流动空间实验、两次返回式卫星搭载池沸腾空间实验及一系列地基短时微重力落塔和失重飞机两相流动与传热实验、地面对比实验与理论研究, 取得了一批重要成果. 现任中国空间科学学会理事、中国能源学会理事、中国力学学会流体力学专业委员会委员及多相流与非牛顿流专业组组长、中国工程热物理学会多相流专委会委员、中国空间科学学会微重力科学专委会委员、国际天地应用两相系统研讨会 (Int. Conf. on Two-phase Systems for Ground & Space Appl.) 科学委员会委员等, 是 *Microgravity Science & Technology (MGST)*、《空间科学学报》、《应用基础与工程科学学报》

等国内外学术期刊编委, 并连续多次担任 MGST 客座主编, 参与编辑多期 *Two-Phase Systems* 专辑.

[†] E-mail: jfzhao@imech.ac.cn