

引用格式: 吴喆, 毛秋丽, 邓凡. 小通道冷凝器凝结传热性能分析 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(6): 1-8. WU Zhe, MAO Qiuli, DENG Fan. Performance analysis of condensation heat transfer of small channel condense [J]. Southern energy construction, 2025, 12(6): 1-8. DOI: 10.16516/j.cec.2024-107.

小通道冷凝器凝结传热性能分析

吴喆^{1,✉}, 毛秋丽², 邓凡³

(1. 贵阳人文科技学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州永红航空机械有限责任公司, 贵州 贵阳 550025;

3. 长江存储科技有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: [目的]为了评估小通道冷凝器凝结传热特性, 为冷凝器性能实验及设计应用提供相应参考。[方法]通过在焓差实验室中搭建冷凝器性能测试实验平台, 文章使用通道内径为 1.27 mm 的扁管组成的冷凝器进行实验, 采用控制变量法研究了环境温差 (3~21℃)、充液率 (16%~61%)、迎风面积 (0.019~0.041 m²) 和倾角 (0°及±25°) 对凝结换热系数的影响。[结果]研究表明, 冷凝器充液率由 16% 增大至 29% 时, 凝结换热系数增幅较小, 冷凝器充液率由 29% 增大至 61% 时, 凝结换热系数增大 3.5~4.2 倍; 当冷凝器充液率不大于 29% 时, 改变环境温差对凝结换热性能的影响较小, 当冷凝器充液率为 36%~61% 时, 增大冷凝器环境温差, 凝结换热系数先增大 1.4~1.9 倍, 随后减小为最大凝结换热系数的 60% 左右; 冷凝器迎风面积大小对冷凝器凝结换热性能的影响与环境温差大小有关, 当环境温差为 9~21℃ 时, 减小迎风面积, 冷凝器凝结换热系数先减小后增大, 冷凝器迎风面积减小至 0.026 m² 时, 凝结换热系数减小到最小值, 相比迎风面积未改变时减小了 30%~80%; 冷凝器倾角由 0° 改变为 ±25°, 冷凝器凝结传热热阻减小, 有利于强化换热。[结论]本研究有助于小通道冷凝器强化换热的应用, 为冷凝器性能优化提供实验依据。

关键词: 强化换热; 小通道冷凝器; 冷凝; 控制变量法; 凝结传热系数

DOI: 10.16516/j.cec.2024-107

文章编号: 2095-8676(2025)06-0001-08

CSTR: 32391.14.j.cec.2024-107

中图分类号: TK124; TK172



论文二维码

Performance Analysis of Condensation Heat Transfer of Small Channel Condense

WU Zhe^{1,✉}, MAO Qiuli², DENG Fan³

(1. Guiyang Institute of Humanities and Technology, Guiyang 550025, Guizhou, China;

2. Guizhou Yonghong Aviation Machinery Co., Ltd., Guiyang 550025, Guizhou, China;

3. Changjiang Storage Technology Liability Co., Ltd., Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: [Objective] This paper evaluates the condensation heat transfer characteristics of small channel condensers and provides reference for performance experiments and design application of condensers. [Method] The experimental device for testing the performance of condenser was set up in the enthalpy difference laboratory. The condenser was composed of flat tubes of 1.27 mm inner diameter. By using control variable method, the experimental device could be used to study the effects of environmental temperature difference (3~21℃), liquid filling rate (16%~61%), windward area (0.019~0.041 m²) and inclination angle (0° and ±25°) on the condensation heat transfer coefficient. [Result] The results show that: the condensation heat transfer coefficient increases slightly when the condenser liquid filling rate increases from 16% to 21%; the condensation heat transfer coefficient increases about 3.5~4.2 times when the condenser liquid filling rate increases from 29% to 61%; when the condenser liquid filling rate is not more than 29%, the environmental temperature difference has slight effect on the condensation heat exchange performance; when the condenser liquid filling rate is 36%~61%, increase the environmental temperature difference of the condenser, the condensation heat transfer coefficient increases about 1.4~1.9 times at

收稿日期: 2024-04-08 修回日期: 2024-05-11

基金项目: 贵阳人文科技学院校级科研基金项目“小通道换热器冷凝管性能分析及计算模型优化”(2023rwjs034)

first, and then decreases to about 60% of the maximum condensation heat transfer coefficient; the effect of the windward area on condensation heat exchange performance of the condenser is related to the environmental temperature difference; when the environmental temperature difference is $9 \sim 21\text{ }^{\circ}\text{C}$, reduce the windward area of the condenser, the condensation heat transfer coefficient decreases first and then increases; when the windward area of the condenser is reduced to 0.026 m^2 , the condensation heat transfer coefficient decreases to the minimum value, which is about 30% ~ 80% less than the condensation heat transfer coefficient when the upwind area is not changed; when the inclination angle of the condenser is changed from 0° to $\pm 25^{\circ}$, the condenser condensation heat transfer thermal resistance decreases, which is conducive to strengthening heat exchange. [Conclusion] This study is helpful for the application of enhanced heat transfer in small channel condensers and provides experimental basis for the performance optimization of condensers.

Key words: enhanced heat transfer; small channel condenser; condensation; control variable method; condensation heat transfer coefficient

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

全球变暖问题凸显了碳减排的紧迫性^[1], 中国作为以化石能源为主的一次能源消费大国, 面临着较大的碳减排压力^[2], 根据中国建筑节能协会发布的《中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023年)》统计, 2021年全国建筑全过程能耗总量为1910 Mtce, 占全国能源消费总量比重为36.3%, 提高现有建筑能耗设备的运行效率是降低能源消耗的关键方法之一, 其中空调系统能耗约占建筑能耗60%, 并还在逐年增长^[3]。冷凝器作为空调的关键组成部分, 其性能特性是空调能耗的关键影响因素, 因此, 在保持舒适度前提下, 优化冷凝管性能, 提高能源利用率, 对建筑节能有着重要意义。

近年来, 国内外学者对凝结传热特性进行了研究, 凝结传热特性的影响因素主要包括制冷剂属性及工况^[4-5]、冷凝器结构^[6]、冷凝器环境工况^[7]等。李艳霞等^[8]研究了沸腾—凝结共存相变腔内热流密度和充液率对冷凝传热的影响, 结果表明在充液率21.2%时, 冷凝表面热阻和占总热阻的比重最低, 使得相变腔有最佳换热效果。郑博仁^[9]对平行流微通道扁平管内制冷剂两相流动特性进行了实验研究, 结果表明向上流动的冷凝过程中, 改变倾角, 换热性能和阻力特性的变化较小, 向下流动冷凝过程中, 换热系数和单位摩擦压降随着倾斜角度的增大而逐渐减小。纪国剑等^[10]通过试验研究了湿空气在不同结构的换热板上冷凝换热过程的影响因素, 结果表明, 风速会影响雷诺数的变化, 同时湿空气含湿量越高, 雷诺数对冷凝传热系数影响越大, 随着风速增加, 气

液剪切力增大, 对气液相较界面扰动增大, 冷凝液膜层稳定性减弱, 湿空气凝结量减小。Manova等^[11]研究了充液率为40%、50%及60%时, 改变热虹吸管角度对冷凝换热系数的影响, 结果表明增大热管倾角可使蒸汽的流动变得更加平稳, 从而更快地从蒸发器流向冷凝器, 当充液率为50%、倾角为 90° 时, 冷凝传热系数最大。Mutalikdesai等^[12]对内径为17.05 mm的铝制热管进行了冷凝传热性能实验研究, 研究了热管倾角为 $10^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 范围内, 改变充液率及功率, 热管冷凝热阻及冷凝传热系数变化情况, 结果表明倾角为 30° 时, 冷凝段换热性能最佳, 冷凝换热系数可达 $5652\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

通过当前的研究可以看出, 太多的研究集中于对单个冷凝通道的传热特性进行研究, 但由于相邻通道间仍可能相互影响, 对单个冷凝通道的相关研究结论并不能够完全应用多个扁管组成的小通道冷凝器中^[9], 因此本文基于通道直径为1.27 mm的扁管组成的小通道冷凝器进行凝结性能研究, 对冷凝器管外环境温度、迎风面积、管内充液率及管道倾角等对冷凝换热的影响进行分析, 得到冷凝器凝结传热系数变化规律, 并分析了小通道冷凝器管内换热特性, 实现冷凝器强化换热, 这为冷凝器的实验、设计和应用提供了理论依据。

1 实验系统及数据处理

1.1 实验系统

小通道冷凝器性能实验装置示意图如图1所示。它主要由测试段的制冷剂循环回路和用于冷却或加热测试段的空气回路组成。制冷剂循环回路由冷凝

器、蒸发器、R32 储液罐、电子秤及热成像仪等组成。当开展冷凝器性能实验时, 来自 R32 储液罐的液相制冷剂被蒸发器加热为汽相, 通过集流管进入冷凝器, 在冷凝器中汽相制冷剂被冷凝为液相, 在重力的作用下流回蒸发器, 完成制冷剂循环。空气回路由室内/室外空气处理机组、风洞、铂电阻温湿度计组成。

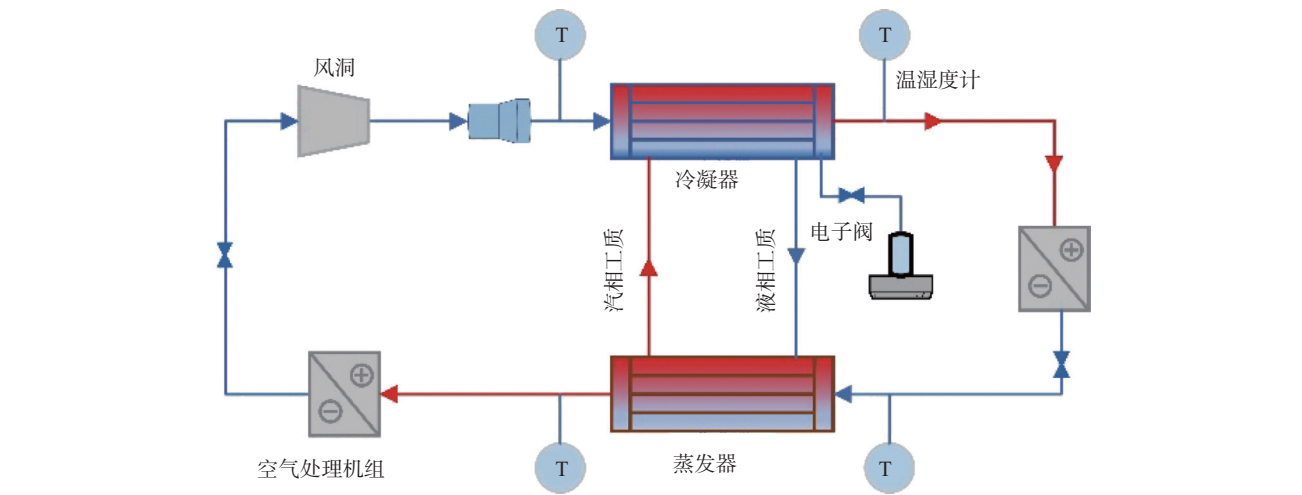


图 1 小通道冷凝器性能实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device for the performance of a small channel condenser

冷凝器结构示意图如图 2 所示。它主要由集流管、扁管及翅片组成, 汽相制冷剂经集流管流入扁管实现冷凝换热, 扁管结构示意图及尺寸如图 3 所示, 扁管长 25.4 mm, 宽 2 mm, 每根扁管中有 16 个当量直径为 1.27 mm 的小通道。冷凝器测试工况为: 充液率 R (16% ~ 61%)、倾角 θ (与重力方向的夹角为 0° 及 $\pm 25^\circ$)、环境温差 ΔT (3 ~ 21 $^\circ\text{C}$)、迎风面积 A (0.019 ~ 0.041 m^2)。

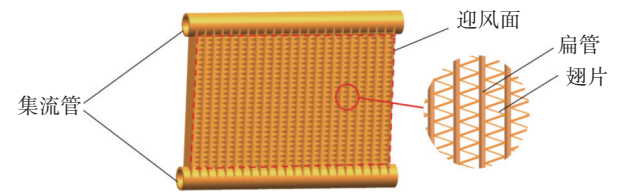


图 2 冷凝器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of condenser structure

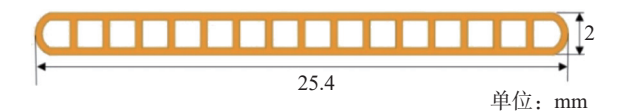


图 3 扁管结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of flat tube structure

1.2 实验设备

制冷剂循环回路中, 电子秤用于计量充入冷凝器及蒸发器的制冷剂质量, 热成像仪用于测量冷凝

器表面温度分布。空气回路中, 空气处理机组用于调节冷凝器及蒸发器环境空气温度, 风洞用于控制流经冷凝器及蒸发器表面的空气流量, 铂电阻温度计布置于冷凝器及蒸发器进出口处, 用于测量环境空气温度。实验设备测量范围及精度如表 1 所示。

表 1 实验设备测量范围及精度		
Tab. 1 Measurement range and accuracy of experimental equipment		
实验设备	测试范围	精度
电子秤	0 ~ 10 kg	1 g
热成像仪	-20 ~ 250 $^\circ\text{C}$	2%
风洞	208 ~ 2 000 m^3/h	1%
铂电阻温度计	0 ~ 350 $^\circ\text{C}$	0.1 $^\circ\text{C}$

1.3 数据处理

通过温度计测量冷凝器进、出口空气温度 T_{C1} 、 T_{C2} , 单位 $^\circ\text{C}$; 风洞计量流经冷凝器的空气质量流量 m_c , 单位 kg/s , 由此计算可得冷凝器换热量 Q_C 如下:

$$Q_C = C m_c (T_{C2} - T_{C1}) \tag{1}$$

根据热量守恒定律可得冷凝管内工质质量流量 q_i , 单位 kW/m^2 , 计算如下:

$$q_i = \frac{Q_i}{A_s} = \frac{Q_C}{A_s} \tag{2}$$

式中:

Q_i ——冷凝器管内换热量(kW);

A_s ——冷凝器扁管管内表面积(m^2)。

通过热成像仪可测量冷凝器扁管管外壁温度 T_{wo} , 由导热公式可得扁管管内壁温度 T_{wi} :

$$T_{wi} = T_{wo} + \frac{q_i \ln \frac{d_o}{d_i}}{2\pi\lambda} \quad (3)$$

式中:

d_o 、 d_i ——扁管管外直径及管内直径(m);

λ ——扁管壁面热导率, 取值 $237 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

冷凝器凝结换热系数:

$$h_c = \frac{q_i}{T_i - T_{wi}} \quad (4)$$

式中:

T_i ——冷凝器扁管管内制冷剂平均温度($^{\circ}\text{C}$)。

1.4 误差分析

根据误差传递原理可得间接测量物理量误差, 如下式:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots) \pm \delta_y \quad (5)$$

式中:

δ_y/y ——相对误差, δ_y 表示为:

$$\delta_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2} \quad (6)$$

根据式(5)、式(6)计算可得实验参数测量误差如表 2 所示。

表 2 测量误差
Tab. 2 Measurement error

测量数据	最大误差/%
实验进出口风温	0.9
扁管表面温度	2.0
换热量	2.2
凝结换热系数	2.4

2 实验结果与讨论

2.1 充液率对换热性能的影响

学者们对换热器的最佳充液率范围进行了研究, 不同工况、尺寸、工质等对冷凝管的最佳充液率均有影响^[8,13-16], 李思卓^[17]在文献综述中指出充液率对换热能力的影响与其他运行参数也有关系, 其具体影响机理尚不明确, 对于不同工质的最佳充液率设

计方法暂未统一。本文研究环境温差为 $3 \sim 21^{\circ}\text{C}$ 时, 改变充液率 R 大小为 $16\% \sim 61\%$ 对凝结换热系数 h_c 的影响。由图 4 可知, 随着充液率的增大, 凝结换热系数增大, 这是由于充液率增大, 进入冷凝器扁管的汽态制冷剂增多, 汽态制冷剂凝结为液态制冷剂所释放的热量增大, 凝结换热能力增强。充液率由 29% 增大至 36% 时, 凝结换热系数增幅较大, 这是由于冷凝器与蒸发器组成的制冷剂循环达到最佳工况, 对于制冷系统而言应综合考虑各部件的能效影响, 即本文实验工况范围内, 制冷剂循环系统最佳充液率为 36% 。

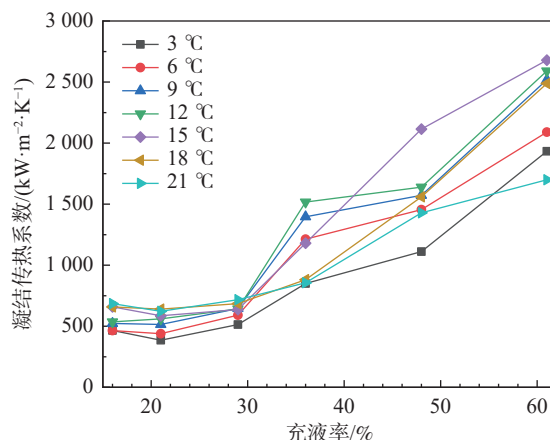


图 4 充液率对凝结换热系数的影响

Fig. 4 The effect of liquid filling rate on condensation heat transfer coefficient

2.2 环境温差对换热性能的影响

《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》^[18] 规定舒适性空调室内热舒适等级为 II 级时, 供热及供冷工况的设计参数范围分别为 $18 \sim 22^{\circ}\text{C}$ 、 $26 \sim 28^{\circ}\text{C}$, 结合室外空气设计参数, 设定本文实验过程中改变冷凝器管外环境温差范围为 $3 \sim 21^{\circ}\text{C}$, 研究不同充液率下冷凝器凝结换热系数随环境温差的变化情况。如图 5 所示, 当充液率范围为 $16\% \sim 29\%$ 时, 随着冷凝器环境温差增大, 凝结换热系数变化较小。当充液率范围为 $36\% \sim 61\%$ 时, 增大冷凝器环境温差, 凝结换热系数先增大后减小, 出现了最佳工况点, 原因在于, 汽态制冷剂工质进入冷凝器扁管流动时, 制冷剂放热后进入两相区, 即管壁出现液膜, 两相区中的传热系数升高, 当制冷剂全部进入液相状态后, 即形成冷凝液。如图 6 所示为热成像仪中冷凝器表面温度出现明显分层的情况, 由此可知在温度分层

处, 制冷剂进入过冷区, 换热过程变为液相显热换热, 传热系数突变降低; 当增大冷凝器环境温差时, 增大了汽态制冷剂工质与管壁的温差, 汽态制冷剂更加快速冷凝为液膜, 增加了两相区的长度, 通过相变释放的热量增大, 过冷段长度减小, 从而凝结换热系数增大; 当冷凝器环境温差过大时, 过冷度增大, 过冷的液态制冷剂工质进入蒸发器后需吸收更多的热量才能预热至蒸发温度, 即总传热效率降低, 凝结换热系数减小。

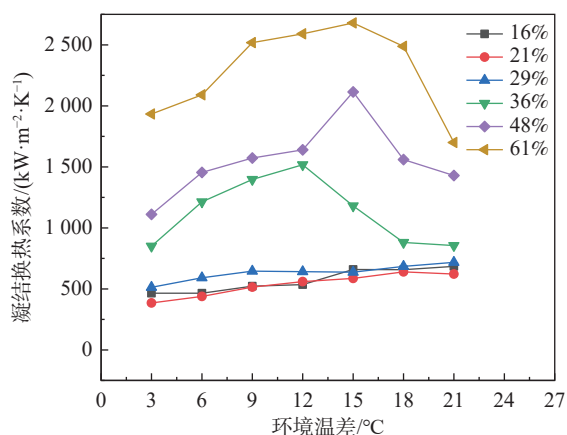


图5 环境温差对凝结换热系数的影响

Fig. 5 The effect of environmental temperature difference on condensation heat transfer coefficient

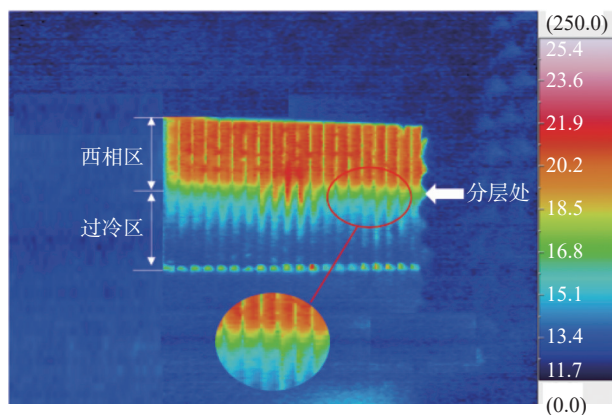


图6 热成像仪中冷凝器表面温度分布

Fig. 6 Temperature distribution on the condenser surface captured by a thermal imager

2.3 迎风面积对换热性能的影响

本文试验中冷凝器初始迎风面积为 0.041 m^2 , 保持冷凝器进风量不变, 通过采用保温隔层遮挡冷凝器迎风区域, 使得迎风面积大小由 0.041 m^2 减小至 0.019 m^2 , 对应迎面风速由 3.37 m/s 增大至 11.12 m/s 。

如图7所示, 当环境温差大于 9°C 时, 随着冷凝器迎风面积的减小, 迎面风速逐渐增大, 其凝结换热系数先减小后增大, 原因如下, 通过遮挡冷凝器扁管, 减小冷凝器扁管与空气的接触面积使得冷凝器迎风面积减小, 遮挡造成了进入冷凝器扁管的制冷剂流量分配不均, 同时遮挡也将扁管与环境空气进行换热的区域分为两部分, 第一部分为冷凝器未被遮挡部分, 空气流经扁管与管内制冷剂工质进行对流换热, 第二部份为冷凝器被遮挡部分, 扁管管壁与管内制冷剂进行导热换热, 总换热量减小, 凝结换热系数减小, 当冷凝器迎风面积减小到 0.026 m^2 时, 迎面风速由初始状态的 3.37 m/s 增大至 6.97 m/s 时, 此时继续减小迎风面积, 迎面风速增大, 加强了对管内工质扰动, 蒸汽流速的增大, 管内凝结液受到气流的冲刷作用增强, 汽液两相界面之间的剪切力增加, 致使液膜厚度减小, 蒸汽与管壁之间的热阻减小, 凝结换热系数增大。当环境温差小于 9°C 时, 环境温度与冷凝器扁管内工质温度差值较小, 当迎风面积减小至 0.019 m^2 时, 迎面风速由初始状态的 3.37 m/s 增大至 11.12 m/s , 冷凝器出现传热极限, 凝结传热系数减小。

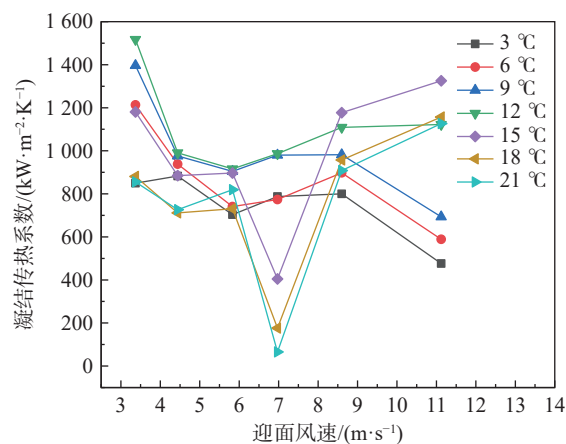


图7 迎面风速对凝结换热系数的影响

Fig. 7 The effect of face velocity on condensation heat transfer coefficient

2.4 倾角对换热性能的影响

冷凝器倾角大小对扁管内工质所受合力的大小及方向有一定的影响, 从而影响换热能力, 但由于操作工况不同, 目前最佳倾角仍未统一, 根据学者们研究结果^[19-21], 类似换热器中最佳倾角可参考范围为 $0^\circ \sim 30^\circ$, 结合本文实验条件, 本文实验将冷凝器倾斜 $\pm 25^\circ$ (与重力方向的夹角), 为避免百叶窗翅片方

向改变对空气流动产生影响,本文实验中,冷凝器空气流动方向始终与冷凝器垂直。图 8 给出了当冷凝器充液率为 36%,环境温差为 3~21℃ 范围内,冷凝器倾斜前后凝结换热系数的变化,由图 8 可知,当冷凝器倾角为+25°, -25°时,其凝结换热系数始终大于倾斜 0°时,这与扁管管内液膜所受重力、气液相间剪切力及惯性力的综合作用有关,图 9 为倾角为 0°, +25°时,冷凝器扁管内液膜分布的示意图,此处选取扁管内工质开始凝结但未进入过冷段时的通道作为分析单元。如图 9 所示,在实验过程中,冷凝器扁管内各处液膜的分布存在不均匀性,液膜沿流动方向逐渐增厚,因此液态制冷剂工质导热热阻一般以平均值进行计算;当冷凝器未倾斜时,流动方向与重力、气液相间剪切力及惯性力的作用方向相同,液膜的平均厚度较厚,同时相界面间湍流度较低;当冷凝器倾角为+25°, -25°时,流动方向与重力方向形成夹角,在重力作用下,冷凝器扁管末端的液膜厚度增厚,大于冷凝器未倾斜时该处的液膜厚度,同时扁管起始端的液膜厚度相对较薄,倾斜后扁管液膜的平均厚度相较于未倾斜时有所降低,即倾斜后液态制冷剂工质导热热阻平均值减小,凝结换热系数增大。

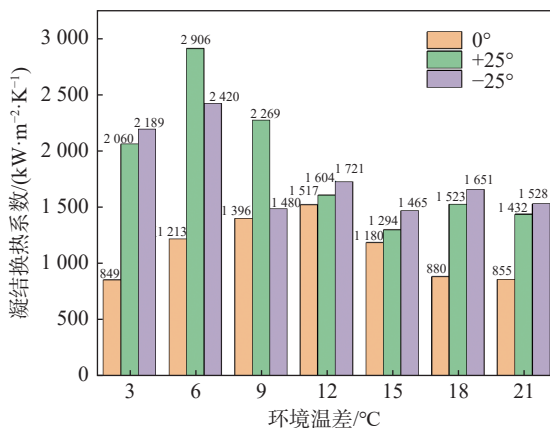


图 8 充液率对凝结换热系数的影响

Fig. 8 The effect of liquid filling rate on condensation heat transfer coefficient

3 结论

实验研究了充液率 16%~61%、环境温差 3~21℃、迎风面积 0.019~0.041 m²、倾角 0°及±25°对小通道冷凝管凝结换热系数的影响,结论如下:

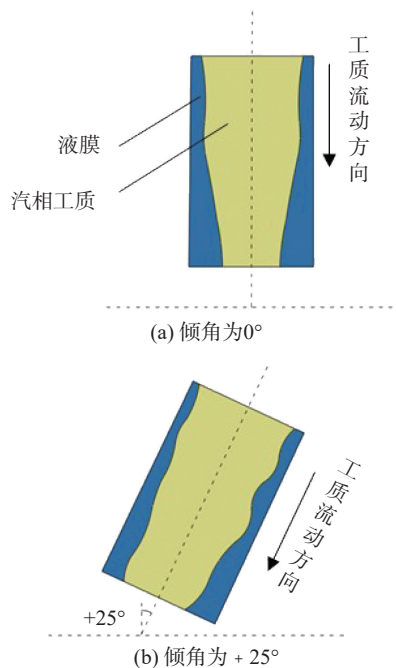


图 9 扁管内液膜分布及示意图

Fig. 9 Distribution diagram of liquid film in flat tube

1)小通道冷凝器相变过程中出现了温度分层现象,扁管底部存在过冷液,过冷液高度与充液率、环境温差等有关。

2)冷凝器充液率由 16% 增大至 29% 时,凝结换热系数增幅较小,冷凝器充液率由 29% 增大至 61% 时,凝结换热系数增大 3.5~4.2 倍。

3)环境温差对凝结换热性能的影响与充液率大小有关,环境温差对充液率不大于 29% 的冷凝器凝结换热系数影响较小,当充液率为 36%~61% 时,随着环境温差的增大,凝结换热系数先增大 1.4~1.9 倍,随后减小为最大凝结换热系数的 60% 左右。

4)环境温差小于 9℃ 时,减小迎风面积不利于凝结传热;当环境温差大于 9℃ 时,随着冷凝器迎风面积减小,其凝结换热系数先减小后增大,当迎风面积减小至 0.026 m² 时,凝结换热系数减小至最小值,相比迎风面积未改变时减小了 30%~80%。

5)环境温差为 3~21℃ 范围内时,改变冷凝器倾角为±25°,制冷剂通道内液膜平均凝结传热热阻减小,凝结换热系数增大。

参考文献:

- [1] 郑明辉,刘蕊菁,王雪,等. 燃煤发电机组耦合余热利用技术研究进展 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(3): 80-87. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.009.

- ZHENG M H, LIU R J, WANG X, et al. Research progress of coupled waste heat utilization technology for coal-fired power generating units [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(3): 80-87. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.009](#).
- [2] 李汪繁, 吴何来. 双碳目标下我国碳市场发展分析及建议 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(4): 118-126. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.015](#).
- LI W F, WU H L. Analysis and suggestions for the development of carbon emissions trading markets in China under carbon peak and neutrality goals [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 118-126. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.015](#).
- [3] 中国建筑节能协会, 重庆大学城乡建设与发展研究院. 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023年) [J]. *建筑*, 2024(2): 46-59. China Association for Building Energy Efficiency, Chongqing University Urban and Rural Construction and Development Research Institute. Research report on building energy consumption and carbon emission in China (2023) [J]. *Construction and architecture*, 2024(2): 46-59.
- [4] ZHAO Y L, DIAO H M, WANG Y K, et al. Condensation characteristics of water vapor-CO₂ mixture outside horizontal circular tube [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2024, 223: 125250. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125250](#).
- [5] ZENG M Q, ZOU L G, PENG Z R, et al. Numerical study of condensation heat transfer characteristics of R134a/R290 and R134a/R1270 refrigerant blends as alternatives to replace R404A [J]. *Applied thermal engineering*, 2024, 243: 122644. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2024.122644](#).
- [6] 翟辉. 微型空气取水装置热力学及微结构冷凝特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019. DOI: [10.27061/d.cnki.ghgdu.2019.004400](#).
- ZHAI H. Study on thermodynamics and microstructure condensation characteristics of micro atmospheric water harvesting device [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. DOI: [10.27061/d.cnki.ghgdu.2019.004400](#).
- [7] 宋张扬. 某型顺流蒸发式冷凝器换热特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021. DOI: [10.27239/d.cnki.gnhhu.2021.000644](#).
- SONG Z Y. Study on heat transfer characteristics of an evaporative condenser with parallel flow [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021. DOI: [10.27239/d.cnki.gnhhu.2021.000644](#).
- [8] 李艳霞, 史壮壮, 刘中良. 相变腔冷凝现象对沸腾-凝结共存相变传热的影响 [J]. *北京工业大学学报*, 2024, 50(1): 113-122. DOI: [10.11936/bjtxb2022050012](#).
- LI Y X, SHI Z Z, LIU Z L. Visual experimental study on condensation process in closed space with boiling and condensation coexistence [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2024, 50(1): 113-122. DOI: [10.11936/bjtxb2022050012](#).
- [9] 郑博仁. 平行流微通道扁平管内制冷剂冷凝与流动沸腾热力特性实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022. DOI: [10.27461/d.cnki.gzjdx.2022.002735](#).
- ZHENG B R. Experimental study of thermal-hydraulic characteristics during refrigerant condensing and flow boiling in parallel flow microchannel flat tubes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. DOI: [10.27461/d.cnki.gzjdx.2022.002735](#).
- [10] 纪国剑, 尹琦瑞, 陆蓓蓓, 等. 波纹板对湿空气冷凝传热特性影响的实验研究 [J]. *化工进展*, 2023, 42(10): 5076-5082. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2022-2018](#).
- JI G J, YIN Q R, LU B B, et al. Experimental research on the effect of corrugated plates on the condensation heat transfer characteristics of humid air [J]. *Chemical industry and engineering progress*, 2023, 42(10): 5076-5082. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2022-2018](#).
- [11] MANOVA S, ASIRVATHAM L G, NIMMAGADDA R, et al. Cooling of high heat flux electronic devices using ultra-thin multiport minichannel thermosyphon [J]. *Applied thermal engineering*, 2020, 169: 114669. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2019.114669](#).
- [12] MUTALIKDESAI S V, KATE A M, SHINDE T R, et al. Experimental investigation of heat transfer characteristics of inclined aluminium two phase closed thermosyphon [J]. *Kern-technik*, 2023, 88(6): 632-641. DOI: [10.1515/kern-2023-0045](#).
- [13] MARKAL B, AKSOY K. The combined effects of filling ratio and inclination angle on thermal performance of a closed loop pulsating heat pipe [J]. *Heat and mass transfer*, 2021, 57(5): 751-763. DOI: [10.1007/s00231-020-02988-6](#).
- [14] 陈晔, 王宏燕, 赵耀华, 等. 基于微热管阵列芯片散热器的传热特性 [J]. *低温与超导*, 2024, 52(1): 27-35. DOI: [10.16711/j.1001-7100.2024.01.005](#).
- CHEN Y, WANG H Y, ZHAO Y H, et al. Heat transfer characteristics of chip heat sink based on micro heat pipe array [J]. *Cryogenics & superconductivity*, 2024, 52(1): 27-35. DOI: [10.16711/j.1001-7100.2024.01.005](#).
- [15] 甘云华, 廖月鹏, 袁辉, 等. 通讯基站分离式热管换热器的传热性能实验研究 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(6): 109-118. DOI: [10.12141/j.issn.1000-565X.220499](#).
- GAN Y H, LIAO Y P, YUAN H, et al. Experimental study on heat transfer performance of separated heat pipe heat exchanger in communication base station [J]. *Journal of South China University of Technology (natural science edition)*, 2023, 51(6): 109-118. DOI: [10.12141/j.issn.1000-565X.220499](#).
- [16] 张宇航, 吴思远, 孙瑜, 等. 常温闭环脉动热管性能影响因素研究综述 [J]. *制冷学报*, 2024, 45(5): 47-62. DOI: [10.12465/j.issn.0253-4339.2024.05.047](#).
- ZHANG Y H, WU S Y, SUN Y, et al. Review on key factors in closed-loop pulsating heat pipes within atmospheric temperature

- [J]. *Journal of refrigeration*, 2024, 45(5): 47-62. DOI: [10.12465/j.issn.0253-4339.2024.05.047](https://doi.org/10.12465/j.issn.0253-4339.2024.05.047).
- [17] 李思卓. 液氮温区脉动热管流动特性及传热机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2023. DOI: [10.27461/d.cnki.gzjdx.2023.000787](https://doi.org/10.27461/d.cnki.gzjdx.2023.000787).
LI S Z. Study on flow characteristics and heat transfer mechanism of pulsating heat pipe at liquid nitrogen temperature range [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023. DOI: [10.27461/d.cnki.gzjdx.2023.000787](https://doi.org/10.27461/d.cnki.gzjdx.2023.000787).
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50736—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB 50736—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [19] CHAROENSAWAN P, KHANDEKAR S, GROLL M, et al. Closed loop pulsating heat pipes: part a: parametric experimental investigations [J]. *Applied thermal engineering*, 2003, 23(16): 2009-2020. DOI: [10.1016/S1359-4311\(03\)00159-5](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00159-5).
- [20] 梁玉辉, 李惟毅, 史维秀. 倾角及充液率对并联式脉动热管传热性能的影响 [J]. *化工学报*, 2011, 62(增刊 2): 46-51.
LIANG Y H, LI W Y, SHI W X. Effect of inclination angle and liquid filling ratio inclination on heat transfer characteristics of parallel type pulsating heat pipe [J]. *CIESC journal*, 2011, 62(Suppl.2): 46-51.
- [21] 马永锡, 张红. 低于临界通道弯数振荡热管的传热特性 [J]. *北京化工大学学报 (自然科学版)*, 2005, 32(4): 87-90.
MA Y X, ZHANG H. Heat transfer characteristics of oscillating

heat pipes with under-critical turns [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (natural science edition)*, 2005, 32(4): 87-90.

作者简介:



吴喆

吴喆 (第一作者, 通信作者)

1996-, 女, 南京师范大学硕士, 主要研究方向为换热器设计与技术研究 (e-mail) 459590755@qq.com。

项目简介:

项目名称 小通道换热器冷凝管性能分析及计算模型优化 (2023rwjs034)

承担单位 贵阳人文科技学院

项目概述 本项目拟收集国内外换热器冷凝管研究现状, 从冷凝管传热分析、性能优化方式及计算模型分析建立等方面进行梳理, 通过实验, 测定不同工况下冷凝管传热性能, 并对传热性能的影响因素进行分析, 提出最优工况, 同时, 选取多种经典的凝结换热计算关联式对小通道冷凝管凝结系数进行计算, 并与实验结果对比, 分析现有关联式对小通道冷凝管凝结换热系数计算的适用性, 结合试验优化现有计算关联式, 进而提出新的计算模型, 为小通道换热器冷凝管节能技术提供参考。

(编辑 徐嘉铖)