

美的集团家用空调事业部

研究生联合培养项目需求表

联 培 项 目 编 号： FSNEU-2026-MDKT-24

联 培 项 目 名 称： 内螺纹管内制冷剂流动换热特性研究

联 培 单 位： 美的集团家用空调事业部

项 目 负 责 人： 李日新

联 系 电 话： 13710835527

单 位 负 责 人： 周宏亮

联 系 电 话： 13928582405

—

填表说明

- 1、 本表由联合培养基地填写，务必保证信息全面准确。
- 2、 联合培养基地每年 3 月前将本表交于东北大学佛山研究生创新学院，用于本年度接收联合培养研究生。
- 3、 一份需求表只能填写一个项目，且需求表上交后原则上不允许取消或更改。
- 4、 联培项目编号为：东北大学佛山研究生创新学院简称佛山研究生创新学院，简称代码-FSNEU、年份-202X、基地名称简称代码-XXX(美的集团中央研究院简称美的中研院，简称代码 MDZYY)、本基地本年度项目序号 X X，例如：
FSNEU-2026-MDZYY-1。
- 5、 各栏目内容可续页。

东北大学佛山研究生创新学院联培基地项目需求表

项目编号	FSNEU-2026-MDKT-24	项目名称	内螺纹管内制冷剂流动换热特性研究
联培课题方向	内螺纹管内制冷剂流动换热特性研究		
所需研究生专业方向	动力工程专业-工程热物理或制冷及低温工程方向		
需求人数	1		
岗位要求	1. 专业背景为动力工程，工程热物理或制冷及低温工程方向； 2. 具备传热学、流体力学、工程热力学和数值模拟等相关课程基础； 3. 对多相流或管内凝结/蒸发研究方向感兴趣； 4. 具备实验动手和数据处理能力，能够对比仿真与实验结果；		
项 目 简 介			
<p>一、项目背景：</p> <p>在“双碳”目标和能效标准持续提升的驱动下，暖通空调与制冷（HVACR）行业面临显著的节能与降本压力。蒸汽压缩制冷/热泵系统中，蒸发器与冷凝器的两相换热性能直接决定系统的能效、体积与制冷剂充注量。作为一种成熟、成本可控且易于规模化应用的强化换热技术，内螺纹（微肋）管依靠增加内表面积、扰动边界层、促进气液界面更新与液膜排液，以及降低沸腾起始过热度等机制，可显著提升沸腾与凝结换热能力，已在家用空调、热泵、冷链及汽车热管理等领域广泛应用。然而，内螺纹结构也会带来更高的摩擦阻力与压降，其对系统级性能的综合影响与最优取舍仍有待系统阐明。</p> <p>近年来，行业快速演进带来了新的研究挑战与需求：</p> <p>1、工质更替与新工况：低温室效应值（GWP）的替代制冷剂（如 R32、R1234yf/ze、R290、R744 等）逐步普及，这些工质的物性差异、可燃性限制与高压力特性推动管径小型化与结构创新，导致传统基于 HCFC/HFC 的经验关联式适用性下降。</p> <p>2、设备紧凑与少充注：为降低充注量与材料成本，内螺纹小直径管（≤5 mm）与复杂肋形（如多头螺纹、鱼骨形、复合微结构）应用增多，但其在宽负荷变工况、不同安装姿态下的两相流型、干涸起始与再润湿行为尚缺乏系统数据与机理解释。</p> <p>3、工程矛盾突出：强化换热与增压降的权衡直接影响换热器的传热系数—泵耗优化与系统 COP；润滑油混合、表面粗糙度演化、界面剪切与液膜厚度空间分布等多尺度现象耦合，使得现有设计方法难以准确预测全域性能。</p>			

4、方法学局限：现有内螺纹管传热/压降关联多基于特定几何与工况，跨流体、跨尺度的泛化能力不足；针对小管径、竖直/倾斜安装、变质量流量与变热通量、含油工况、跨临界 CO₂ 冷却等场景的高质量实验数据稀缺；可燃/高压工质条件下的流动可视化与局部传热测量难度大，机理模型所需关键参数（如界面剪切、液膜特性、润湿性）难以获得。

在此背景下，开展内螺纹管内制冷剂流动换热特性的系统研究具有重要的科学意义与工程价值：一方面，有助于揭示肋形几何参数（肋高、螺旋角、肋数、肋顶圆角等）与工况参数（质量通量、热通量、饱和温度、气相品质、管向姿态、含油率）对沸腾/凝结传热与压降的耦合规律，明确流型演化、干涸与临界热通量等关键机制；另一方面，可为低 GWP 与自然工质条件下的换热器设计提供可泛化的预测方法与优化边界，支撑设备紧凑化、少充注与高效目标的实现，推动空调、热泵与冷链产品的节能减排与产业升级。

因此，围绕内螺纹管的两相流动与换热机理、可泛化的传热/压降预测、以及面向系统性能优化权衡展开研究，既可填补当前数据与模型空白，又可为标准制定与工程设计提供科学依据，具有迫切性与现实意义。

二、研究现状：

内螺纹管（又称微肋管、内螺纹铜管）作为制冷与热泵换热器中应用最为广泛的强化传热管之一，凭借其增大内表面积、诱发旋涡与二次流、强化近壁湍动与相界面扰动等多重机理，可显著提升制冷剂在管内的流动与相变换热性能，同时也不可避免地增加摩擦阻力与压降。围绕“内螺纹管内制冷剂流动换热特性”，国内外研究已形成从几何参数—机理认知—实验标定—经验关联—数值模拟—工程优化的较完整体系，但在新工质、超临界态、含油两相、复杂工况与通用模型方面仍存明显空白与挑战。现状概述如下。

1、几何参数：螺纹（肋）高度、肋数、螺旋角、节距、顶角与根部圆角、等效水力直径与截面形状等是影响传热与压降的关键因子。通常螺旋角与肋高度越大，诱发的旋转强度与二次流越强，近壁剪切与界面扰动增强，但压降显著增大。

2、强化机理：内螺纹在单相工况下主要通过增大换热面积、打破近壁层、诱发旋涡与二次流促进横向混合；在沸腾工况下还可提升成核位点密度、促进液膜再润湿与延缓干涸；在冷凝工况下可打破层状/分层流的稳定性、加速液膜排液与减薄膜厚，尤其在水平管低质量流量时抑制重力致分层效应最为有效。

总体而言，内螺纹管在制冷剂管内两相换热方面的强化作用已被充分证实，并形成较为成熟的工程应用体系；然而随着低 GWP 工质的快速替换及高效热泵对宽工况与可靠性的要求提升，内螺纹几何的机理化设计、通用预测模型与含油长期运行性能，仍是未来研究的重点与难点。建议后续工作围绕标准化数据库构建、机理—数据融合模型、含油与超临界工况下的可视化与 CFD 多尺度耦合，以及面向具体应用的多目标优化与寿命评估展开，以支撑下一代高效、低碳与可靠的制冷/热泵换热器设计。

三、关键性问题或技术：

问题概述：

内螺纹管通过诱导旋流和二次流强化制冷剂的蒸发/冷凝传热，但同时改变两相流型、液膜分布并显著增加压降。不同制冷剂、不同螺纹参数与不同工况下的性能差异大，现有关联式往往局限于特定条件，难以通用预测与快速设计。

研究目标：

建立一个可迁移的统一预测模型，定量描述螺纹几何参数（螺旋角、牙型、槽深、肋数、相对粗糙度）与制冷剂物性（密度、表面张力、黏度、潜热）及工况（质量通量、热流密度、倾角、变频瞬态）共同作用下的流型转化、液膜厚度分布、干涸起始与局部换热/压降关系。

关键技术路线：

1、几何参数化与无量纲化：引入无量纲旋度、液膜管理指数（基于 Bond、Weber、Martinelli、Boiling number 等）表征螺纹诱导二次流与毛细效应。

2、多尺度两相数值模拟：CFD-VOF/Level-Set 相变与 RANS/LES 耦合，捕捉泡核生成、液膜再分配与干涸边界演化；考虑油混入与加工公差的几何不确定性。

3、可视化与局部测量：高速可视化、红外热成像、微型热电偶与微压测点获取流型图谱、局部换热系数、液膜厚度与压降分布，用于模型标定。

4、物理约束数据驱动：融合实验与仿真数据，构建具物理一致性的通用关联式与代理模型，实现从“几何—物性—工况”到“换热—压降”的快速预测。

5、多目标优化：以强化换热、降低压降、延迟干涸和抑制不稳定为目标，形成适用于 R32、R290 等低 GWP 制冷剂的设计图谱与准则。

四、预期目标：

预期产出与意义：

1、通用的换热/压降预测模型与流型图，覆盖单管与多回路、水平及变频瞬态工况。

2、针对不同制冷剂与管径的螺纹几何优化建议与制造公差—性能容差带。

3、显著提升设计可预见性与研发效率，减少试制迭代，并为高压、小直径与低 GWP 制冷剂应用提供可靠设计依据。

项目 负责人 项目 经历		
起止时间	项目名称	主要内容
2022.06-2023.08	R290 欧洲最高能效空调	R290 欧洲最高能效空调产品研发

2023.08-2025.08	面向提质减材的空调内螺纹铜管关键技术研究与应用	低成本高性能空调内螺纹铜管研发	
工 作 计 划 安 排（2026.7-2028.4）			
序号	起止时间	阶段内容	工作量估计（天）
1	2026.09.01-2026.11.01	1、明确目标与指标，完成文献综述，技术路线与初步试验方案。 2、开题报告与风险评估初稿。	60 天
2	2026.11.01-2026.12.01	1、完成台架示意图纸、实验材料 BOM 清单与预算；提交采购与加工。 2、实验方案设计评审通过，关键部件下单。	30 天
3	2026.12.01-2027.01.01	1、台架安装、静压与泄漏测试、传感器校准与不确定度评估。 2、安全联检通过，单相流空载运行稳定。	30 天
4	2027.01.01-2027.03.01	1、单相基准试验 2、跑 Re - Pr 矩阵，验证数据处理流程与能量衡算。 3、单相 Nu - f 基准建立。	60 天
5	2027.03.01-2027.06.01	1、蒸发与冷凝试验 2、执行两相矩阵，完成重复性与敏感性测试；初步拟合关联式。 3、两相初步关联式与 PEC 评估。	90 天
6	2027.06.01-2027.10.01	1、拓展与模拟 2、增加几何与工况扩展；开展 CFD 与机理解释；完善关联式。 3、最终关联式与误差分析报告。	120 天
7	2027.10.01-2028.04.01	1、总结与发布 2、整理数据集与工程指南，撰写论文与结题报告，准备答辩。 3、论文投稿与结题材料提交。	180 天