

陕西省自然科学奖公示信息

(2024年度)

一、项目基本情况

项目名称	降膜流动与传热传质机理研究
主要完成人	赵创要、冀文涛、靳蒲航、齐迪、陶文铨
主要完成单位	西安建筑科技大学、西安交通大学

二、提名意见（适用于提名单位）

提 名 者		提名等级	<input type="checkbox"/> 一等奖 <input checked="" type="checkbox"/> 二等奖
<p>提名意见：</p> <p>该成果在国家重点研发计划、国家自然科学基金等项目资助下，由西安建筑科技大学、西安交通大学等单位合作，历时近 15 年完成。项目团队围绕相变传热的机理与规律，系统开展了长期深入研究，揭示了若干关键科学问题，提出了新的理论框架和方法，取得了一系列具有原创性和国际影响力的学术成果，部分成果达到国际领先水平。该研究为推动建筑节能及相关交叉学科的发展奠定了坚实的科学基础，在自然科学研究领域具有重要意义。该成果符合陕西省自然科学奖提名要求，同意推荐。</p> <p>说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。项目组与提名单位沟通后，做出提名等级意见；提名项目提交后，提名等级建议不得变更。</p>			

三、项目简介

（限 2 页）

蒸发器是能量转换和传热的核心装置，广泛应用于制冷、空调、海水淡化、余热回收、石油化工及食品加工等重要领域，其传热效率直接影响系统能效、运行稳定性及能源利用水平。现有满液式蒸发器虽技术成熟并广泛应用，但存在制冷剂充灌量大、系统能耗高、蒸发温度受限及回油性能差等突出问题，在节能减排和绿色低碳运行要求下难以满足实际需求。相比之下，降膜蒸发因工质用量少、传热效率高、运行稳定性好，逐渐成为蒸发器节能降耗与绿色低碳发展的核心技术路线。其应用不仅能够降低工业与建筑能耗，还可显著提升低品位能源的高效利用效率，为能源结构优化、产业升级以及绿色能源开发提供重要技术支撑，同时也为新型高性能换热设备的理论研究、机理探索与实验方法发展创造了条件。

然而，降膜蒸发的液膜流动、传热与气液耦合作用机制复杂，液膜厚度、波动、表面张力及管束结构对传热性能的调控规律尚未被系统揭示，这在很大程度上制约了高性能蒸发器的优化设计与大规模工程应用。为此，该项目围绕水平管外降膜蒸发在多种应用场景中的流动特性、传热机理及气液耦合作用，构建了多层次、系统化的理论与实验研究框架，全面整合实验观测、数值模拟与理论分析，形成可量化、可推广的研究方法体系，为高效节能蒸发器设计、低品位能源高效利用及产业绿色升级提供坚实科学基础。该项目重点开展了以下三个方面的研究工作：

研究内容一：跨工质、高普适性降膜蒸发传热预测模型。对低沸点制冷工质在水平管外降膜蒸发过程的传热规律，系统分析完全润湿与部分蒸干两类运行状态及其转化机理，提出蒸干临界点的预测思路，探索适用于多工质、多工况的传热系数表达方法，并将表面张力调控与界面改性机理引入模型构建，为实现不同工况下的蒸发器性能优化与多场协同设计提供理论支撑。

研究内容二：多参数液膜厚度预测理论。针对降膜蒸发液膜特性受多因素耦合影响的复杂性，系统开展液膜流量、热流密度、液体温度、管径、布液高度及表面张力梯度等参数的影响规律研究，建立高精度液膜厚度预测方法，分析表面张力与多物理场作用对液膜稳定性和演化过程的调控机理，为复杂工况下的液膜预测与调控提供方法基础。

研究内容三：气液耦合机理与统一流型识别方法。围绕横向、竖向及斜向气流对水平管束降膜蒸发传热性能的影响规律，分析孤立波、液滴、液桥等典型流动结构在气液耦合过程中的作用机理，结合多物理场条件下流型稳定性变化的实验观测，提出统一化的流型识别思路与判定准则，为复杂气液作用及外场耦合条件下的流型分析与理论体系构建提供技术路径。

基于以上研究，该形目主要科学发现点如下：

科学发现点一：建立跨工质、高普适性的水平管外降膜传热预测模型。针对现有研究在降膜蒸发传热系数预测上分歧较大、缺乏统一关联式的难题，该项目将传热过程划分为完全润湿与部分蒸干两类状态，提出蒸干临界点预测方法，并分别建立两类状态下的传热系数关联式；系统引入工质物性参数影响，显著提升模型在多工质、多工况条件下的预测精度与适用范围，为不同应用条件下的蒸发器性能优化提供统一化理论基础。

科学发现点二：原创性地提出多参数耦合的液膜厚度全参数预测理论。围绕液膜厚度对降膜蒸发传热性能的关键影响，阐明表面张力在液膜稳定性与计算模型中的作用机制，构建同时考虑液膜流量、热流密度、液体温度、管径、布液高度等多因素耦合作用的高精度预测模型，显著提升复杂工况下液膜特性预测与调控能力，为膜流结构优化与界面强化提供可操作的理论依据。

科学发现点三：构建降膜蒸发管束气液作用机理与流型识别方法。提出水平降膜管束内蒸气流动方向模型，揭示气液耦合作用及对传热系数的调控规律；查明列间流型变化及其对管束效应的影响，发现孤立波、液滴和液桥等典型流动结构及其成因，系统分析液体流量、布液高度、管距与管束结构对传热性能的影响；创新提出基于实验测试的新型流型识别方法与专用装置，显著提升流型判定的准确性、可靠性与一致性，为降膜蒸发系统优化设计与气液作用机理研究提供新工具。

科学价值：该项目在系统揭示水平管外降膜蒸发流动、传热与传质规律的基础上，深化了对多物理场耦合、非均相流动及界面现象的科学认识，建立了系统化的理论与方法框架。明确了液膜波动、表面张力及流型结构对局部与整体传热效率的调控机制，揭示了液膜沸腾与池沸腾在热流分布、核心形成及临界热流密度方面的根本差异，推动了降膜沸腾理论与实验方法的规范化与系统化。上述成果在传热学科前沿形成了新的理论突破，深化了对复杂两相流动与气液耦合传热机理的理解，为热科学的系统发展和相关交叉学科提供了坚实理论支撑，并为后续基础研究提供了方法参考。

同行引用及评价：该项目成果已发表科技论文 32 篇（含 28 篇高水平国际期刊论文）。5 篇代表性论文自 2016 年以来累计被国际同行引用 300 余次，篇均被引 60 余次，显示重要国际学术影响力。成果还获授权发明专利 1 项，这些科研成果共同支撑了“教育部低碳建筑环境国际合作联合实验室”的建设，并荣获 2025 年度陕西高等学校科学技术研究优秀成果二等奖。研究成果多次在国际与国内权威学术会议作大会或邀请报告，受到专家高度关注和评价。国内外同行认为，该成果在揭示液膜流动与气液耦合传热机理、拓展多相流传热研究深度与广度方面作出实质性贡献，推动降膜沸腾研究在理论、方法与学科层面发展，为热科学及相关交叉学科提供国际影响力理论基础。同时，项目培养博士 3 名、硕士 7 名，为该领域持续研究和学科建设储备高水平人才。

四、客观评价

【限 2 页。围绕科学发现点的原创性、公认度和科学价值进行客观、真实、准确评价。填写的评价内容要有客观依据，主要包括国内外同行在重要学术刊物（专著）和重要国际学术会议等公开发表的学术性评价意见，国内外重要科技奖励等，可在附件中提供证明材料。非公开资料（如私人信函等）不能作为评价依据。】

专家学者评价：该项目在本领域重要国际期刊发表论文 23 篇，获得发明专利 1 项。项目成果受到国内外同行的广泛认可和高度评价。列出的 5 篇代表性论文被他引 301 次（SCI-Expanded 数据），显示出重要的国际学术影响力。

（1）2014 年 8 月，在日本东京召开的第 15 届国际传热学大会（IHTC15）上，瑞士洛桑联邦理工学院 J.R. Thome 教授（H = 93，成果总引用量 35904）对该项目组“*Vapor flow effect on falling film evaporation of R134a outside horizontal tube bundle*”的研究表现出浓厚兴趣，认为其实验方法能够有效保证结果的精度，并可合理解释不同研究团队实验结果间的差异。

（2）2015 年 10 月，在台北举行的第三届国际传热技术节能与污染控制研讨会（IWHT2015）上，台湾新竹交通大学王启川教授在点评该项目组“*Cross vapor flow effect on falling film evaporation outside horizontal tube bundle using R134a*”报告时指出：降膜蒸发过程受多种因素影响，但对气流作用的研究较少，该项目开辟了新的研究方向。王教授认为，气流会引起液膜重新分配并改变蒸发器腔体压力分布，从而导致传热性能波动；项目组的研究为该难题提供有力支撑。

（3）2018 年 8 月，在第 16 届国际传热学大会（IHTC16）上，巴西圣保罗大学 G. Ribatski 教授对该项目组“*Comparative study on the pool boiling and falling film evaporation of refrigerant R134a outside the same tubes*”的展报给予了充分肯定，认为在相同工况下对比池沸腾与降膜沸腾的研究非常有意义，其结果对于阐明降膜蒸发强化传热机理具有重要价值。

国内外对比：该项目系统揭示了降膜蒸发中的传热预测、液膜演化和气液作用机理，原创性地提出了跨工质的普适性预测模型、多参数耦合的液膜厚度理论以及管束流型识别方法，并在此基础上建立了降膜蒸发传热分段预测新思路与结构优化理论框架。该项目不仅显著拓展了多相流传热理论体系，且在研究思路、方法与理论建构上均表现出明显的原创性和领先性，目前国内外无同类系统性成果（见科技查新报告）。

论文引用评价：该项目研究成果在国际热科学领域产生了广泛影响，5 篇代表性论文被高水平综述和前沿研究广泛引用，并得到国内外知名学者的积极评价。多篇 Top 文献充分认可该项目在建立降膜蒸发预测关联式中的对精度的特殊处理方法（发现点一，代表性论文 1，引文评价【6】）。另有多篇文献充分认可该项目为提高降膜蒸发传热关联式时的分段考虑（引文评价【6】）（发现点一，代表性论文 1）。台北科技

大学王启川教授（引文评价【6】）、美国工程师研究协会 Shah 研究员分别对该项目提出的降膜蒸发传热预测模型进行了全面报道和横向对比，认为其关联式具有很好的精度和较宽的适用范围（发现点一，代表性论文 1、2，引文评价【6】）。

上海交通大学王如竹教授在其文章（引文评价【7、8】）和香港理工大学吕琳教授在其综述文章（引文评价【7、8】）都大篇幅报道了该项目的研究成果（发现点一，代表性论文 2、3）充分肯定了该项目所建立的降膜流动及传热系数预测关联式。印度马德拉斯理工学院 A. Mani 教授在其文章（引文评价【8】）中高度认可该项目对表面张力在降膜计算中的作用，并通过实验证实了该项目中对液膜波动的计算结果。中国石油大学（华东）毛宁教授课题组参照该项目研究方法（发现点二，代表性论文 3），在其文章（引文评价【8】）中将二维问题扩展至三维，并和该项目的结果进行了全面对比。美国伊利诺伊大学香槟分校的 Anthony M. Jacobi 教授在其文章（引文评价【8】）中全面认可该项目的水平管外降膜液膜厚度的预测模型，并将模型预测值用于建立液膜流型转换临界雷诺数的预测中（发现点二，代表性论文 3）。

大连理工大学沈胜强教授课将降膜蒸发应用于海水淡化并实现产业化，其论文大量引用该项目的代表性论文，并将该成果作为基准校核实验（引文评价【8】）。西安交通大学厉彦忠教授在其两篇文章（引文评价【6-8】）中沿用了该项目降膜传热预测方法，建立水平椭圆管上降膜传热预测关联式（发现点一，代表性论文 2）。韩国大学高丽大学 Yongchan Kim 教授、台北科技大学教授 Yan, Wei-Mon 教授在其研究文章（引文评价【7】）和美国得克萨斯农工大学 Jorge L. Alvarado 教授分别在其综述文章（引文评价【8】）认可该项目关于液膜厚度预测模型强烈依赖于多个因素的论断，并肯定了关于表面张力对液膜流动数值计算结果影响的论述。（发现点二，代表性论文 3）。

中国石油大学（华东）李玉星教授课题组对石化行业降膜流动及传热问题进行了深入的研究，其课题组对该项目的气流作用影响的研究工作给予了充分认可（引文评价【9】）。韩国首尔大学 Chan-Wook PARK 教授对该项目中的数值方法进行了引用（发现点一，代表性论文 4、5，引文评价【9】）。台北科技大学 Yang An-Shik 教授在其文章（引文评价【7】）中对该项目中的多个研究工作给予了全面的报道（发现点一，代表性论文 1、2）。南非比勒陀利亚大学的 Josua Meyer (H = 172, 成果总引用量 102867) 指导的博士学位论文 “*Surface influences on falling film boiling and pool boiling of saturated refrigerants*” 及期刊论文（引文评价【6、9】）引用并正面评述了该项目组的 10 篇研究论文，其中包含代表性论文 1 篇（发现点一、三，代表性论文 1）。

综上，该项目在降膜蒸发预测模型、液膜厚度理论及气液作用机理等方面的原创成果已被国际同行广泛引用和认可，体现显著的国际学术影响力。

五、代表性论文专著目录
(不超过 8 条, 其中代表性论文不超过 5 篇, 代表性专著不超过 3 部)

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表时间 (年月日)	通讯作者 (含共同)	第一作者 (含共同)	国内作者	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
1	Heat transfer correlation of the falling film evaporation on a single horizontal smooth tube	Applied Thermal Engineering	Chuang-Yao Zhao; Wen-Tao Ji; Pu-Hang Jin; Wen-Quan Tao	2016 年 103 卷 177-186 页	2016 年 4 月 19 日	Wen-Quan Tao	Chuang-Yao Zhao	赵创要; 靳蒲航; 冀文涛; 陶文铨	62	SCI-Expanded (网络版)	是
2	A comprehensive numerical study on the subcooled falling film heat transfer on a horizontal smooth tube	International Journal of Heat and Mass Transfer	Chuang-Yao Zhao; Wen-Tao Ji; Ya-Ling He; Ying-Jie Zhong; Wen-Quan Tao	2018 年 119 卷 259-270 页	2017 年 11 月 26 日	Ying-Jie Zhong; Wen-Quan Tao	Chuang-Yao Zhao	赵创要; 冀文涛; 何雅玲	75	SCI-Expanded (网络版)	是
3	Hydrodynamic behaviors of the falling film flow on a horizontal tube and construction of new film thickness correlations	International Journal of Heat and Mass Transfer	Chuang-Yao Zhao; Wen-Tao Ji; Pu-Hang Jin; Ying-Jie Zhong; Wen-Quan Tao	2018 年 119 卷 564-576 页	2017 年 12 月 22 日	Wen-Quan Tao	Chuang-Yao Zhao	赵创要; 冀文涛; 靳蒲航; 钟英杰; 陶文铨	75	SCI-Expanded (网络版)	是

4	Effect of vapor flow on the falling film evaporation of R134a outside a horizontal tube bundle	International Journal of Heat and Mass Transfer	Wen-Tao Ji; Chuang-Yao Zhao; Ding-Cai Zhang; Shun Yoshioka; Ya-Ling He; Wen-Quan Tao	2016 年 92 卷 1171-1181 页	2015 年 10 月 22 日	Wen-Quan Tao	Wen-Tao Ji	冀文涛; 赵创要; 张定才; 何雅玲; 陶文铨	43	SCI-Expanded (网络版)	是
5	A comprehensive review on computational studies of falling film hydrodynamics and heat transfer on the horizontal tube and tube bundle	Applied Thermal Engineering	Chuang-Yao Zhao; Di Qi; Wen-Tao Ji; Wen-Tao Ji; Pu-Hang Jin; Wen-Quan Tao	2022 年 202 卷 117869 页	2021 年 12 月 1 日	Chuang-Yao Zhao; Wen-Quan Tao	Chuang-Yao Zhao	赵创要; 齐迪; 冀文涛; 靳蒲航; 陶文铨	46	SCI-Expanded (网络版)	是
6											
7											
8											
合 计									301		
补充说明 (视情填写):											

六、主要完成人情况表

姓 名	赵创要	排 名	1
行政职务	西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院 储能系 党支部书记/副主任		
技术职称	副教授		
工作单位	西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目主要学术贡献：			
作为项目负责人，全面负责课题的总体组织与研究方案设计，并亲自参与研究的各个环节。在项目推进过程中，不仅承担了研究路线的规划与实施，还主导完成了多项核心研究任务。作为代表性论文 1、2、3、5 的第一作者，提出并验证了降膜流动与传热传质的关键科学问题，对发现点 1 - 3 均做出了具有原创性的贡献。在研究中，建立了系统的流动与传热预测模型，提出了新的理论框架；自主设计并搭建了气流影响实验装置，有效揭示了气 - 液相互作用机理；构建了降膜蒸发管束结构优化方法，并实现了该方法在工程实践中的推广应用，为该领域的理论发展与工程技术进步提供了重要支撑。			

姓 名	冀文涛	排 名	2
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学 能源与动力工程学院		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献：			
作为代表性论文 4 的第一作者，同时在代表性论文 1、2、3 中担任第二作者、在论文 5 中担任第三作者，在项目研究中发挥了承上启下的重要作用。自主设计并搭建了降膜蒸发实验台，为项目的系统实验研究提供了可靠条件与坚实基础。围绕发现点 1－3，开展了深入的理论分析与实验研究，提出了多项改进与补充思路，为流动与传热预测模型的建立与完善提供了重要支撑。通过对实验数据与模型的对比研究，推动了降膜流动与传热机理的定量化描述。在成果总结与高水平论文发表中也发挥了积极作用，对项目整体目标的实现起到了关键推动作用。			

姓 名	靳蒲航	排 名	3
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西北工业大学 海洋研究院		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献：			
作为代表性论文 1、3 的第三作者以及论文 5 的第四作者，在项目中承担了重要的辅助研究与理论拓展工作。围绕发现点 1 - 3 开展研究，并在发现点 1 的深入挖掘方面做出了显著贡献。通过对已有传热预测模型进行进一步拓展与修正，提高了模型的精度与适用范围，使其在更复杂的工况条件下依然保持良好的预测能力，从而增强了研究成果的普适性与工程价值。			

姓 名	齐迪	排 名	4
行政职务	西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院 建环系副主任		
技术职称	副教授		
工作单位	西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目主要学术贡献：			
作为代表性论文 5 的第二作者，在项目中对发现点 3 的形成与完善作出了重要贡献。针对无相变条件下的降膜传热问题，进行了大量系统的数值计算与分析工作，积累了丰富的计算数据。在此基础上，为局部传热预测关联式的建立提供了理论依据，并在降膜蒸发管束的气 - 液相互作用机理模型构建中发挥了关键作用。相关研究不仅深化了对无相变降膜流动与传热机理的认识，也为后续的模式推广与工程优化提供了支撑。			

姓 名	陶文铨	排 名	5
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学 能源与动力工程学院		

完成单位	西安交通大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为代表性论文 1 – 5 的通讯作者，在研究工作中发挥了核心的组织与指导作用。在“降膜流动与传热传质机理研究”项目中，负责技术路线的总体设计与优化，并在研究方案的实施过程中提出关键科学问题，明确研究目标与突破方向。通过统筹实验研究与数值模拟，建立了系统的研究框架，有效推动了降膜流动特性、界面传热传质机理及相关影响因素的深入揭示。同时，积极协调团队成员分工，确保研究进度与质量，为项目取得系统性成果和形成高水平学术论文奠定了坚实基础。</p>	

七、主要完成单位情况表

单位名称	西安建筑科技大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>西安建筑大学作为该项目的第一完成单位，围绕“降膜流动与传热传质机理研究”这一科学问题，开展了气-液作用机理、管束内气液流型识别等方面的研究，攻克了“流动特性、传热性能难以预测”、“降膜蒸发气液作用复杂”的科学难题，在发现点 2、3 做出了重要贡献。主要研究贡献包括：（1）建立高精度液膜厚度预测方法，分析表面张力与多物理场作用对液膜稳定性和演化过程的调控机理，为复杂工况下的液膜预测与调控提供方法基础；（2）围绕横向、竖向及斜向气流对水平管束降膜蒸发传热性能的影响规律，分析孤立波、液滴、液桥等典型流动结构在气液耦合过程中的作用机理，结合多物理场条件下流型稳定性变化的实验观测，提出统一化的流型识别思路与判定准则，为复杂气液作用及外场耦合条件下的流型分析与理论体系构建提供技术路径。</p>	

单位名称	西安交通大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>西安交通大学作为该项目的第二完成单位，围绕“降膜流动与传热传质机理研究”这一科学问题，开展了流动传热预测模型、气液作用机理的研究，攻克了“流动特性、传热性能难以预测”、“气液作用机理复杂”两个难题，在发现点 1、2 做出了重要贡献。主要研究贡献包括：（1）建立了高普适性的水平管外降膜传热系数预测模型。本项目把降膜蒸发传热特性划分为完全润湿和部分蒸干两种状态，并分别建立了两种状态下的传热系数预测关联式；（2）构建了降膜蒸发管束中气-液作用机制模型。首次提出水平降膜管束内蒸气流动方向模型，将复杂的蒸气流动方向简化为横向、竖向（向上及向下）和斜向三种，定义了管束气流影响程度的影响系数及管束效应系数。查明了不同蒸气流向作用下，降膜蒸发传热系数变化及气-液相互作用规律。</p>	

完成人合作关系说明

本人作为项目第一完成人，现对完成人合作关系进行说明：

(1) 本人在西安交通大学读博期间，陶文铨教授为本人导师，期间与陶文铨教授、冀文涛教授、靳蒲航副教授共同完成了论文“**Heat transfer correlation of the falling film evaporation on a single horizontal smooth tube**”(代表性论文 1)，其中本人排名第 1，冀文涛教授排名第 2，靳蒲航副教授排名第 3，陶文铨教授排名第 4 且为通讯作者；还与冀文涛教授、导师陶文铨教授共同完成了论文“**Effect of vapor flow on the falling film evaporation of R134a outside a horizontal tube bundle**”(代表性论文 4)，其中冀文涛教授排名第 1，本人排名第 2，陶文铨教授排名第 6 且为通讯作者。合作时间为 2010 年至 2017 年。

(2) 本人在浙江工业大学工作期间，与冀文涛教授和陶文铨教授共同完成了论文“**A comprehensive numerical study on the subcooled falling film heat transfer on a horizontal smooth tube**”(代表性论文 2)，其中本人排名第 1，冀文涛教授排名第 2，陶文铨教授排名第 5 且为通讯作者；还与冀文涛教授、靳蒲航副教授和陶文铨教授共同完成了论文“**Hydrodynamic behaviors of the falling film flow on a horizontal tube and construction of new film thickness correlations**”(代表性论文 3)，其中本人排名第 1，冀文涛教授排名第 2，靳蒲航副教授排名第 3，陶文铨教授排名第 5 且为通讯作者。合作时间为 2018 年至 2019 年。

(3) 本人在西安建筑科技大学工作期间，与齐迪副教授、冀文涛教授、靳蒲航副教授和陶文铨教授共同完成了论文“**A comprehensive review on computational studies of falling film hydrodynamics and heat transfer on the horizontal tube and tube bundle**”(代表性论文 5)，其中本人排名第 1 且为通讯作者，齐迪副教授排名第 2，冀文涛教授排名第 3，靳蒲航副教授排名第 4，陶文铨教授排名第 5 且为通讯作者。合作时间为 2016 年至 2022 年。

(4) 本人在西安建筑科技大学工作期间，与齐迪副教授共同完成了发明专利“一种两相流型的测定方法及降膜蒸发实验装置”，其中本人排名第 1，齐迪副教授排名第 4。还与齐迪副教授共同完成了论文“**Intercolumn two-phase flow patterns across falling film tube bundles**”(补充论文)，其中本人排名第 1，齐迪副教授排名第 3。合作时间为 2019 年至 2023 年。

本人作为第一作者与本项目其他 4 位完成人共同完成了 5 篇代表性论文及 1 个发明专利，证明了本项目完成人之间的合作关系。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	论文合著	赵创要/1；冀文涛/2；靳蒲航/3；陶文铨/5	2010-2017	Heat transfer correlation of the falling film evaporation on a single horizontal smooth tube	附件 1
2	论文合著	赵创要/1；冀文涛/2；陶文铨/5	2016-2019	A comprehensive numerical study on the subcooled falling film heat transfer on a horizontal smooth tube	附件 2
3	论文合著	赵创要/1；冀文涛/2；靳蒲航/3；陶文铨/5	2016-2019	Hydrodynamic behaviors of the falling film flow on a horizontal tube and construction of new film thickness correlation	附件 3
4	论文合著	冀文涛/1；赵创要/2；陶文铨/5	2010-2017	Effect of vapor flow on the falling film evaporation of R134a outside a horizontal tube bundle	附件 4
5	论文合著	赵创要/1；齐迪/4；冀文涛/2；靳蒲航/3；陶文铨/5	2019-2023	A comprehensive review on computational studies of falling film hydrodynamics and heat transfer on the horizontal tube and tube bundle	附件 5
6	论文合著	赵创要/1；齐迪/4	2019-2023	Intercolumn two-phase flow patterns across falling film tube bundles	附件 14
7	共同知识产权	赵创要/1；齐迪/4	2020-2022	一种两相流型的测定方法及降膜蒸发实验装置	附件 15