

# 2026 年度陕西高等学校科学技术研究

## 优秀成果公示信息

### 一、成果名称：

面向海洋天然气液化的绕管式换热器非稳态相变流动与强化传热关键技术

### 二、主要完成单位：

西北工业大学；哈尔滨工业大学；东北电力大学；上海理工大学

### 三、主要完成人：

李书磊；秦侃；蔡伟华；姜益强；任燕；谢公南；罗凯；李代金；黄闯；孙丰

### 四、成果简介：

随着“双碳”目标与海洋强国战略的持续推进，我国对清洁低碳天然气的需求不断攀升。仅依靠

大中型常规天然气资源已难以满足经济社会长期发展的需要，亟需加快深海、深层及非常规油气资源的开发利用，推动油气增储上产。这一迫切需求直接推动了浮式液化天然气（FLNG）技术的快速发展。绕管式换热器作为 FLNG 工艺的核心装备，其设计与制造长期被国外寡头垄断，严重制约了我国天然气工业的自主发展。具体而言，面临两大技术瓶颈：1) 复杂热物理机制认知不足。管侧非共沸冷凝过程中，组分扩散导致显著的界面传质热阻；壳侧工质经历由降膜蒸发向剪切沸腾的转变，涉及极其复杂的界面拓扑演化与流型转变。当前，对强耦合条件下气液多相动力学及相变机制尚缺乏深刻的理论认知。2) 海洋晃荡诱发流动失稳。当 FLNG 平台受海上风浪影响产生横摇、纵摇与垂荡等运动时，强扰动不仅会诱发管侧流动失稳与液膜撕裂，更会导致壳侧降膜结构破坏并提前发生流型畸变，进而引起传热恶化、效率急剧降低。若无法精准探明动边界条件下的非稳态响应规律，由相变畸变引发的热-流剧烈振荡将直接威胁 FLNG 平台的安全稳定运行。本成果立足上述技术瓶颈，系统开展了绕管式换热器管/壳双侧相变流动与强化换热机理及智能预测方法研究，形成了完整理论体系，已成功应用于我国大型 FLNG 绕管式换热器的自主研制中。

本项目面向 FLNG 绕管式换热器高效稳定运行的重大需求，对烃类工质在管壳双侧的复杂相变

传热机理及动态响应特性、流动与换热关联式开发及智能预测等方面开展了系统性研究，取得的创新性成果如下：

(1) 建立了受限螺旋空间内碳氢非共沸冷凝计算框架，提出了适用于海洋工况的强化管型。

针对管侧多组分非共沸冷凝热质传递准确描述及晃荡诱发的流动失稳问题，构建了“工程半经验+精细机理”的协同计算架构。前者基于欧拉-欧拉双流体模型，耦合热相变模型求解相间传热传质，核心创新在于引入冷凝热比推导气液相界面交互距离，提高了纯工质冷凝的数值模拟精度，并结合修正 Silver 法实现了非共沸工质冷凝换热的快速求解。后者采用 VOF 方法耦合雷诺应力模型，考虑表面各向异性及气液界面阻尼修正，并基于气液相平衡以浓度差、温度差为驱动力，构建了多组分工质冷凝热质传递数学模型。在此基础上，引入晃荡附加力模拟海洋条件，系统揭示了静止及晃荡条件下碳氢混合物的流型演化规律和冷凝换热机理。进一步，基于综合性能评价因子与熵产分析，优化了螺旋波浪管、螺旋槽管、正弦波纹管等多种强化管结构，攻克了晃荡导致的管侧液膜破裂与传热恶化的工程难题。

(2) 突破了壳侧工质动态润湿捕捉瓶颈，阐明了多流型降膜/剪切相变的转换机制与非稳态晃荡

响应规律。

针对壳侧在海洋晃荡条件下降膜流动极易破裂及高干度剪切流模拟失真等问题，提出了一套全流型的蒸发与沸腾数值计算体系。对于降膜蒸发过程，通过耦合 CLSVOF 与动态接触角模型精确追踪了复杂管束间的三相移动接触线，采用 Lee 模型描述相变过程；对于高干度剪切沸腾过程，采用欧拉-欧拉双流体模型，基于热相变模型求解相间传热传质，并引入沸腾热比计算液相粒径，动态修正相间传热传质，显著提升了模拟精度。以此为基础，界定了壳侧由重力主导降膜向气相主导剪切流转变的临界热力学边界，并阐明了不同流动条件下的流型演化规律。通过引入晃荡附加力，系统量化了晃荡惯性力对壳侧流场的破坏效应，并提出了波纹型表面调控策略，重塑重力-表面张力-惯性力动态平衡，有效抑制了晃荡引起的液膜撕裂，大幅拓宽了换热装备在极端海况下的安全运行边界。

(3) 构建了海洋条件下绕管式换热器管壳侧换热与压降高精度预测体系。

针对现有管侧及壳侧换热与压降预测关联式在海洋晃荡条件下预测精度不足等问题，搭建了绕管式换热器流动与换热测试平台，基于大量实验与仿真数据，系统评价了现有管侧及壳侧换热与压降关联式，并引入 Bo 数、Web 数等主控无量纲参数及晃荡修正因子，剥离了极端物性与海况扰动耦合的

影响，开发了覆盖全物理参数的管侧冷凝与壳侧沸腾通用预测关联式。同时，采用 **GA-BP** 神经网络、支持向量回归、随机森林及 **LightGBM** 等多种机器学习方法构建了代理模型，显著提升了预测精度，为核心换热装备的国产化设计提供了高效预测工具。

团队在多项国家自然科学基金项目、工信部高技术船舶科研项目等支持下，产生了一系列研究成果。在国内外重要学术期刊发表高水平学术论文 50 余篇，受理/授权发明专利 20 余项。其中在传热传质顶级期刊 **International Journal of Heat and Mass Transfer** 等发表代表性 **SCI** 论文 8 篇（含 **ESI** 高被引论文 2 篇、**ESI** 热点论文 1 篇），在 **Web of Science** 核心合集被引 237 次，他引 200 次。相关成果受到国内外学者的积极评价，丰富了复杂条件下非共沸混合工质相变传热理论体系；构建了绕管式换热器管侧和壳侧换热及摩擦压降通用预测关联式及智能代理模型。研究成果已成功应用于中海油气电集团及开封空分集团有限公司联合研制的我国首套 30 万方/天大型 **FLNG** 绕管式换热器中，并支撑完成沪东中华造船（集团）有限公司 **LNG** 多组分物性数据与传质传热软件接口的自主开发，赋能海洋装备的国产化设计与产业化进程。

## 五、主要知识产权（标准、规范）目录

序号	知识产权类别	知识产权名称	国家（地区）	授权号（批准号）	授权日期	证书编号	权利人	发明人

**承诺：**上述知识产权未曾在已获或正在申报国家级、省（部）级和厅局（地市）级奖励项目中作为支撑材料出现。用于推荐陕西高校科学技术研究优秀成果的情况，已征得未列入成果主要完成人和主要完成单位的权利人（专利指发明人）的同意。

## 六、代表性论文专著目录

序号	论文专著名称	刊名	发表时间	年卷页 码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	作者	通讯作者 (含 共同作者)	第一作 者 (含 共同作 者)	国内 作者 (中文 名)	他引 总次 数	检索 数据库	参与人 (成果完 成人)	知识产权 是否归 国内所有
1	Numerical study on condensation heat transfer and pressure drop characteristics of ethane/propane mixture upward flow in a spiral pipe	International Journal of Heat and Mass Transfer	2018-06-01	2018 年 121 卷 170~186 页	Shulei Li; Weihua Cai; Jie Chen; Haochun Zhang; Yiqiang Jiang	Weihua Cai; Yiqiang Jiang	Shulei Li	李书磊; 蔡伟华; 陈杰; 张昊春; 姜益强	39	SCI; ESI 热点论文; ESI 高被引论文	李书磊; 蔡伟华; 姜益强	是
2	Numerical study on the flow and heat transfer characteristics of forced convective condensation with propane in a spiral pipe	International Journal of Heat and Mass Transfer	2018-02-01	2018 年 117 卷 1169~1187 页	Shulei Li; Weihua Cai; Jie Chen; Haochun Zhang; Yiqiang Jiang	Weihua Cai; Yiqiang Jiang	Shulei Li	李书磊; 蔡伟华; 陈杰; 张昊春; 姜益强	38	SCI; ESI 高被引论文	李书磊; 蔡伟华; 姜益强	是
3	Numerical study on condensation heat transfer and pressure drop characteristics of methane upward flow in a spiral pipe under sloshing condition	International Journal of Heat and Mass Transfer	2019-02-01	2019 年 129 卷 310~325 页	Shulei Li; Yiqiang Jiang; Weihua Cai; Haochun Zhang; Fengzhi Li	Yiqiang Jiang; Weihua Cai	Shulei Li	李书磊; 姜益强; 蔡伟华; 张昊春; 李丰志	28	SCI	李书磊; 蔡伟华; 姜益强	是
4	Numerical study on the flow characteristic of shell-side film flow of floating LNG spiral wound heat exchanger	International Journal of Heat and Mass Transfer	2022-01-01	2022 年 187 卷 122198 页	Yan Ren; Wei-hua Cai; Yi-qiang Jiang; Wei-dong Wu; Qi-guo Yang; Jie Chen	Wei-hua Cai	Yan Ren	任燕; 蔡伟华; 姜益强; 武卫东; 杨其国; 陈杰	15	SCI	蔡伟华; 姜益强; 任燕	是

5	The influence of swing movement on transient condensation thermofluidic performance for hydrocarbon mixture in a helical tube	International Communications in Heat and Mass Transfer	2024-03-01	2024年 152卷 107281 页	Shulei Li; Shibo Zhang; Yiqiang Jiang; Jie Chen; Weihua Cai	Shulei Li; Weihua Cai	Shulei Li	李书磊; 张世伯; 姜益强; 陈杰; 蔡伟华	4	SCI	李书磊; 蔡伟华; 姜益强	是
6	Entropy generation analysis on condensation upward flow for hydrocarbon mixture in two types of helical wavy pipes	Case Studies in Thermal Engineering	2024-02-01	2024年 54卷 104085 页	Shulei Li; Shibo Zhang; Boyu Qian; Kan Qin; Kai Luo	Shulei Li; Kai Luo	Shulei Li	李书磊; 张世伯; 钱泊宇; 秦侃; 罗凯	1	SCI	李书磊; 秦侃; 罗凯	是
7	An artificial-neural-network based prediction of heat transfer behaviors for in-tube supercritical CO2 flow	Applied Soft Computing	2021-01-01	2021年 102卷 107110 页	Feng Sun; Gongnan Xie; Shulei Li	Gongnan Xie	Feng Sun	孙丰; 谢公南; 李书磊	50	SCI	李书磊, 谢公南, 孙丰	是
8	Numerical investigation on heat transfer characteristics of Taylor Couette flows operating with CO2	Applied Thermal Engineering	2020-01-25	2020年 165卷 114570 页	Kan Qin; Daijin Li; Chuang Huang; Yubiao Sun; Jianyong Wang; Kai Luo	Kan Qin	Kan Qin	秦侃; 李代金; 黄闯; 孙玉标; 王建勇; 罗凯	25	SCI	秦侃; 罗凯; 李代金; 黄闯	是

**承诺:** 该表所列论文专著的知识产权归国内所有且无争议, 未曾在已获或正在申报国家级、省(部)级和厅局(地市)级奖励项目中作为支撑材料出现。用于推荐陕西高校科学技术研究优秀成果的情况, 已征得未列入成果主要完成人和主要完成单位的作者的同意, 其中, 未列入成果主要完成人的第一作者、通讯作者(含共同第一作者、共同通讯作者)已出具知情同意书面签字意见。因未如实告知上述情况而引起争议, 且不能提供相应存档备查的证件, 本人愿意承担相应责任, 并接受处理。

## 七、完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作关系人及排名	合作时间	合作成果
1	论文合著	李书磊 (1)、秦侃 (2)、罗凯 (6)	2024-02-01	Entropy generation analysis on condensation upward flow for hydrocarbon mixture in two types of helical wavy pipes
2	论文合著	李书磊 (1)、蔡伟华 (3)、姜益强 (4)	2018-06-01	Numerical study on condensation heat transfer and pressure drop characteristics of ethane/propane mixture upward flow in a spiral pipe
3	论文合著	李书磊 (1)、谢公南 (7)、孙丰 (10)	2021-01-01	An artificial-neural-network based prediction of heat transfer behaviors for in-tube supercritical CO <sub>2</sub> flow
4	论文合著	蔡伟华 (3)、姜益强 (4)、任燕 (5)	2022-01-01	Numerical study on the flow characteristic of shell-side film flow of floating LNG spiral wound heat exchanger
5	论文合著	秦侃 (2)、罗凯 (6)、李代金 (8)、黄闯 (9)	2020-01-25	Numerical investigation on heat transfer characteristics of Taylor Couette flows operating with CO <sub>2</sub>

**承诺：**本人作为第一完成人，对本成果完成人合作关系及上述内容的真实性负责，特此声明。