

同行专家业内评价意见书编号：20250858279

附件1

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院） 同行专家业内评价意见书

姓名：陆新宇

学号：22260141

申报工程师职称专业类别（领域）：能源动力

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）制

2025年05月30日

填表说明

一、本报告中相关的技术或数据如涉及知识产权保护、军工项目保密等内容，请作脱密处理。

二、请用宋体小四字号撰写本报告，可另行附页或增加页数，A4纸双面打印。

三、表中所涉及的签名都必须用蓝、黑色墨水笔，亲笔签名或签字章，不可以打印代替。

四、同行专家业内评价意见书编号由工程师学院填写，编号规则为：年份4位+申报工程师职称专业类别(领域)4位+流水号3位，共11位。

一、个人申报

(一) 基本情况【围绕《浙江工程师学院(浙江大学工程师学院)工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】

1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况(不少于200字)

本人系统接受了能源与动力工程专业的本科和硕士阶段教育，专业方向为低温工程，具备扎实的本专业基础理论知识和丰富的专业技术能力。在本科阶段，我系统学习了工程热力学、流体力学、传热学、工程力学、动力工程基础等课程，奠定了坚实的理论基础。硕士阶段进一步深入低温流体力学、低温热物性、预冷技术等前沿研究，具备将理论知识运用于复杂工程问题分析与解决的能力。

在科研与工程实践方面，本人参与国家重点研发计划《液氢转注、输运和长期高密度存储技术》项目，主导并完成了液氢转注过程中热力学模型的建立与数值模拟，熟练运用有限元方法及偏微分方程求解技术，构建了气液两相流的动态传热传质模型。本人承担液氢两相流可视实验台与低温热物性测量系统的设计，包括真空冷箱、换热器、低温流道与传感器布设等关键部分，展现出对低温系统结构及运行机制的深刻理解。在另一重点项目《液氢接收站储运特性试验与节能方案研究》中，完成了管道传热传质与应力应变的耦合分析，并进行了管道共振风险评估和绝热结构优化，体现出扎实的工程热力学、结构力学与数值仿真综合能力。本人熟练掌握多种工程软件和计算工具，如Ansys、Fluent、Star-CCM、AMESim等用于流体和固体模拟，HYSYS进行流程模拟，Matlab用于数值分析与建模，同时具备C与Python编程能力，能够开展多物理场耦合模拟与系统优化设计。综上，我具备坚实的能源动力及低温工程理论基础，熟练掌握热工设备与系统的设计、分析与仿真技术，能胜任复杂低温能源系统的建模分析、设备优化与工程实践工作。

2. 工程实践的经历(不少于200字)

(1) 国家重点研发计划液氢转注、输运和长期高密度存储技术(课题经费400万元)

承担低温液氢转注过程热力学模型搭建开发：基于有限元数值模拟方法与偏微分方程解法，建立离散化气液两相流传热传质管道输运模型并完成调试与动态模拟工作，揭示了液氢沸腾两相流流场变化规律与传热特性；设计低温液体管道加热两相流可视实验台与低温热物性测量，具体包括真空冷箱、低温流道、换热器、可视化功能设计与各型传感器、流量计布置以及实验流程与方案设计；负责《液氢转注系统技术要求》国家推荐性标准的草案撰写，前期完成液氢国内外标准文件调研搜集与系统翻译工作，后主导完成国标草案撰写，目前已提交至氢能标准委员会筹备立项；承担项目执行报告、科技报告撰写任务；负责项目联络事务，维护项目期间单位间技术交流、进度对接工作；负责项目会务工作，组织主持项目审查会、研讨会，起草会议纪要等。

(2) 中海石油气电集团液氢接收站储运特性试验与节能方案研究(项目经费114.48万元)

□ 承担液氢输送管道输送特性试验研究，针对液氢管道绝热结构形式及边界条件，模拟液氢极端进液过程，研究了液氢输送管流固区域的动态变化特性如流固传热特性、气液界面分布以及流型转变规律；通过TFSI热流固耦合求解得到管道预冷工况瞬态进液过程的热致、流致应力应变，应用干湿模态分析对比管道固有振动频率与流体激振下的振型差异，量化共振受损风险，并对管道绝热结构、预冷方案进行性能设计优化；承担项目科技报告、研究报告、论文专利、施行报告等成果文本撰写，负责项目管理事务，组织专家审查会、技术研讨会与日常例会。

3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例(不少于1000字)

(1) 水平液氢管道预冷过程动态流型演变机制与主动流量控制

针对目前水平液氢管道骤冷过程内部的流型形成与转变机制不明晰，流型对壁面传热影响未量化的科学问题，本章使用Eulerian多相流模型对分离但存在转化的液氢气液两相流进行独立建模，应用RPI壁面沸腾传热模型描述低温流体在壁面附近沸腾热交换，计算结果表明：中等质量流量工况下，管道局部完整经历单相气体对流，膜态沸腾反环状分层流、弥散雾状流，核态沸腾泡状流及单相液体对流的流型转变过程；与液氮预冷不同，液氢热流密度先跃升至6.6

kW/m²，经历一段高热流密度的平台期后快速下降。总预冷过程以膜态沸腾为主，过渡、核态沸腾占比较低，LFP点、ONB点等温度特征点在热流密度曲线上并不清晰，这一发现区别于液氮预冷流动与传热特性；对恒流量、变流量、脉冲流3种不同主动流量控制预冷方法进行模拟，恒流量模拟结果证实了高质量流量对于缩短预冷时间的绝对影响，变流量模拟结果说明了质量流量由小增大的预冷策略更有利于缩短预冷时间、降低液氢消耗，脉冲流预冷作用机制为管内间断的分层间歇流，模拟结果证实低载荷占比、高脉冲频率对于降低预冷过程液氢消耗的显著效果，较优工况较恒流量最高降低了22%的液氢消耗。

（2）大管径液氢管道热流固耦合特性与分阶段预冷应力调控

针对液氢管道沸腾过程受动态热载荷冲击产生额外热应力，当前研究未量化冷缩热应力风险这一应用问题，基于低温热物性测量实验台得到管材SS304、SS316液氢温区热导率、比热容物性用于应力计算，引入了热弹性本构方程封闭热流固耦合求解方程组，提取CFD计算结果中的流固交界面压力、热流数据用于管道固体域应力计算，计算结果显示：流致应力小于热应力2个数量级，可忽略不计；平均等效热应力从7.2 MPa增至360.5

MPa，最大等效热应力从152.4 MPa增至460.0

MPa；径向上管顶部热应力显著小于管道底部热应力，轴向上管道两端受端面位移限制，承受较大热应力，管道中部靠近入口处，所承受热应力较小；轴向管顶、底中心线区域附近因顶部气相死区与底部氢蒸气上浮涡流，所承受热应力较小；设计了分阶段预冷以减小管道所受热应力，在使用低温氢气预冷管道至80 K工况下显著降低最大等效热应力84.6%。

（3）液氢卸液管线系统级动态建模与多参数协同优化

针对大型液氢卸液系统缺乏组件耦合效应考量，系统动态特性、预冷性能不明的工程问题，基于公称直径DN314，长度300米卸液管线建立了包括阀门、管道、贮罐在内的一维模型。首先分析了液氢卸液系统中阀门、管道、贮罐主要部件的热力学传热传质原理，对部件进行了合理简化与集成建模。然后依据氢气、液氢的热物性特点设计了卸液管线分阶段预冷流程，依据LNG接收站卸液管线预冷工况测试数据完成了两个预冷阶段的模型验证。计算结果说明了气冷阶段占比预冷工况99%以上的时间，过程中降温速率较低；液冷阶段降温迅速，具有最高25 kW/m²的热流密度与46

W/(m²·K)传热系数峰值，显著高于气冷阶段，但管道压降同时增加；热流密度增减变化趋势均与气液沸腾两相流变化保持一致；对影响系统预冷性能的主要边界参数开展了变工况分析，结果证实了入口流速与预冷时间呈负相关，优化入口压力、入口过冷度、贮罐压力对降低预冷时间、消耗工质具有双向增益；基于变工况分析对实际预冷作业提出了预冷性能优化方法，在两个优化方向上，最经济工况可减少液氢消耗38.61%，提高冷能利用率28.17%；最快速预冷工况可降低预冷时间34.27%，提高冷能利用率9.55%。

(二)取得的业绩(代表作)【限填3项,须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实,并提供复印件一份】

1. 公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利（含发明专利申请）、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等]	发表时间/ 授权或申请时间等	刊物名称/ 专利授权或申请号等	本人排名/ 总人数	备注
工程热物理学会2024年会口头汇报论文	会议论文	2024年10月08日	2024年中国工程热物理学会工程热力学与能源利用学术会议	1/7	EI会议收录
发明专利	发明专利申请	2024年08月07日	申请号：202411077372.4	2/5	公开实际审查
CEC/ICEC国际会议海报展示	会议论文	2025年02月27日	Presentati on at CEC/ICMC 2025	1/6	会议收录

2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】

(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况	
课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩： 88 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间： 1 年 (要求1年及以上) 考核成绩： 83 分
本人承诺	
个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！	
申报人签名： 陆新宇	

单位考核评价：
周永红
(章)：2025年1月29日

日常表现 考核评价	非定向生由德育导师考核评价、定向生由所在工作单位考核评价： ☒ 优秀 ☐ 良好 ☐ 合格 ☐ 不合格 德育导师/定向生所在工作单位分管领导签字（公章）：周永智 2025年5月29日
申报材料 审核公示	根据评审条件，工程师学院已对申报人员进行材料审核（学位课程成绩、专业实践训练时间及考核、学位论文、代表作等情况），并将符合要求的申报材料在学院网站公示不少于5个工作日，具体公示结果如下： ☐ 通过 ☐ 不通过（具体原因： ） 工程师学院教学管理办公室审核签字（公章）： 年 月 日

攻读硕士学位研究生成绩表

说明: 1. 研究生课程按三种方法计分: 百分制, 两级制(通过、不通过), 五级制(优、良、中、及格、不及格)。

2. 备注中“*”表示重修课程。

浙江大學研究
(60)
成績校核章

大管径液氢输送管线分阶段预冷传热特性研究

陆新宇¹ 朱少龙² 甘浩然³ 王凯^{4,*} 邱利民⁵ 包士然⁶

(1. 浙江大学制冷与低温研究所, 杭州 310027)

摘要 液氢作为未来低碳能源重要载体备受关注, 液氢管道预冷是其液氢高效运输的关键一环。本文建立了系统完善度较高的一维液氢流动模型, 增加了径向高真空多层绝热材料传热方案, 应用了合适压降、传热经验关联式, 并设计了适用大管径液氢输送管线的分阶段预冷方案。在公称直径 DN314, 长度 300 m 的水平管模拟中, 气冷阶段降温平缓, 内金属管壁面热流密度约 60 W/m², 预冷耗时 37 小时。液冷阶段降温速率先快后慢, 两相流壁面热流密度最大约 9.4 kW/m², 耗时约 0.45 小时。对比常规预冷方案减小液氢质量消耗 55 %。管内最大压降 60 kPa, 呈现脉动动态变化, 随管内流动趋于稳定脉动幅度减小稳定至 40 kPa。本研究可为长距离运输液氢的高效预冷提供理论支撑。

关键词 液氢; 管道预冷; 流动沸腾; 气液两相流; 传热特性

中图分类号: TK91 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X

Study on Staged Precooling Heat Transfer Characteristics of Large-Diameter Liquid Hydrogen Pipelines

LU Xinyu¹ ZHU Shaolong² GAN Haoran³ WANG Kai^{4,*} QIU Limin⁵ BAO Shiran⁶

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University 310027, China)

Abstract Liquid hydrogen, a key carrier of future low-carbon energy, has drawn significant attention. Efficient precooling of liquid hydrogen pipelines is crucial for its transport. This study presents a one-dimensional flow model for liquid hydrogen, incorporating a high-vacuum multi-layer insulation heat transfer scheme. A staged precooling approach for large-diameter unloading pipelines is designed. In simulations of a DN314, 300 m horizontal pipe, the gas-cooling stage takes 37 hours with a heat flux of 60 W/m², while the liquid-cooling stage, lasting 0.45 hours, reaches a maximum heat flux of 9.4 kW/m². Compared to conventional methods, this approach reduces hydrogen mass consumption by 55%. The maximum pressure drop is 60 kPa, stabilizing at 40 kPa as the flow stabilizes. This study provides a theoretical foundation for long-distance liquid hydrogen transport and efficient precooling designs.

Key words liquid hydrogen; pipeline precooling; flow boiling; two-phase flow; heat transfer characteristics

0 引言

氢作为清洁能源, 因其燃烧的高热值与无污染物特性, 备受人们关注。在实现低碳、无碳消费的必然趋势下, 氢将成为未来能源使用的主选项之一。液氢是氢的液态形式, 无色无味, 在常压下沸点为 20.27 K (99.79%仲氢)。氢以液态氢形式储存运输, 在常压下质量能量密度为 120 MJ/kg, 为汽油的 2.73 倍,

体积能量密度 8.71 MJ/L, 为 3 MPa 高压氢气的 1.27 倍, 具有显著的储能优势, 适合大规模、远距离储存运输。

液氢储存与运输过程中, 输送管道是使用最为广泛的重要装备。液氢转注经由输送管道, 以转注泵送或自增压形式建立压力梯度, 从储存容器转移至目标储存容器。因液氢具有低温危险性、燃爆危险性, 液氢管道对装备制造与转注流程设计具有严格

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2022YFB4002900) 和国家自然科学基金项目 (No. 52206026)

作者简介: 陆新宇 (1999--) 男, 硕士研究生, 主要从事液氢转注研究。

通讯作者: 王凯 (1983--) 男, 博士, 研究员, 主要从事液氢储运研究, E-mailkaiwang19@zju.edu.cn。



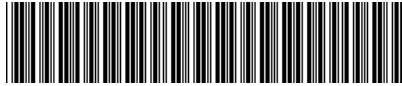
国家知识产权局

310013

浙江省杭州市西湖区竞舟路1号筑品金座501室 杭州天勤知识产权代理有限公司
彭剑(0571-87755912)

发文日:

2024年08月07日



申请号: 202411077372.4

发文序号: 2024080701005890

专利申请受理通知书

根据专利法第28条及其实施细则第43条、第44条的规定,申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日等信息通知如下:

申请号: 2024110773724

申请日: 2024年08月07日

申请人: 浙江大学

发明人: 邱利民,陆新宇,包士然,王凯,植晓琴

发明创造名称: 一种低温液体输送管干式预冷系统

经核实,国家知识产权局确认收到文件如下:

权利要求书 1份2页,权利要求项数: 8项

说明书 1份7页

说明书附图 1份2页

说明书摘要 1份1页

专利代理委托书 1份2页

发明专利请求书 1份5页

实质审查请求书 文件份数: 1份

申请方案卷号: 24137F1489

提示:

1.申请人收到专利申请受理通知书之后,认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时,可以向国家知识产权局请求更正。

2.申请人收到专利申请受理通知书之后,再向国家知识产权局办理各种手续时,均应当准确、清晰地写明申请号。

审查员: 自动受理

联系电话: 010-62356655

审查部门: 初审及流程管理部



200101
2023.03

纸件申请,回函请寄: 100088 北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 国家知识产权局专利局受理处收
电子申请,应当通过专利业务办理系统以电子文件形式提交相关文件。除另有规定外,以纸件等其他形式提交的文件视为未提交。

Dynamic Characteristics of Transfer Processes in Port-Based Liquid Hydrogen Receiving Terminals

Xinyu Lu, Shaolong Zhu, Haoran Gan, Shiran Bao, Limin Qiu*, Kai Wang**

Institute of Refrigeration and Cryogenics, Key Laboratory of Refrigeration and Cryogenic Technology of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China



Poster ID: C3Po1D-06

Background

- Liquid hydrogen's high mass energy density makes it ideal for heavy-duty, long-distance transport. Horizontal pipelines are widely used, especially in port receiving terminals. Pre-cooling is a common yet extreme condition, involving chilldown process which contains full boiling stages.
- Current system models overlook the impact of valves and storage tank, leaving the precooling dynamics unclear and hindering performance optimization.

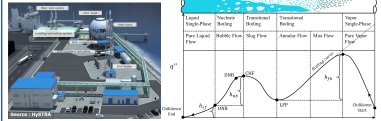


Fig.1 Functional zoning diagram of a port liquid hydrogen receiving terminal

Modeling

- This work models a large-scale liquid hydrogen receiving terminal, designs a staged pipeline precooling process, evaluates stage-wise precooling performance, and analyzes key boundary parameters to optimize system efficiency.

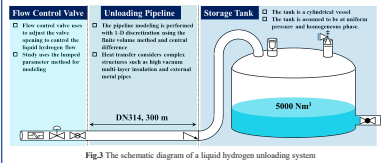
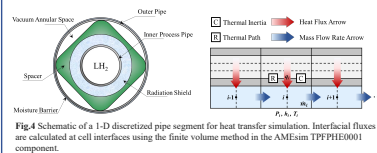


Fig.3 The schematic diagram of a liquid hydrogen unloading system

Modeling

- Based on the finite volume method, the fluid and solid domains of the pipeline are divided into multiple control volumes. The conservation equations of mass, momentum, and energy are solved numerically within each control volume. A staggered grid technique is used to enhance numerical stability and ensure accuracy across different physical quantities.



- Continuity Equation: $\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u A)}{\partial x} = 0$
- Momentum Equation: $\frac{\partial(\rho u A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 A)}{\partial x} = -A \frac{\partial p}{\partial x} - \tau_w P - \rho g A \sin \theta + \Delta p_{\text{singularity}}$
- Energy Equation: $\frac{\partial(\rho h A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho h u A)}{\partial x} = q'' P + \Phi$

- At the inlet of the unloading pipeline, valve flow regulation is simulated using an asymmetric variable orifice model.
- At the outlet, a vapor-liquid separator tank with vertical elevation difference is used. The lumped model assumes uniform internal pressure and uniform phase densities within the liquid and gas volumes, with density determined by the liquid volume fraction.

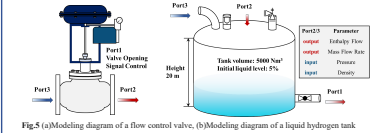
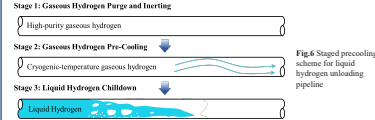


Fig.5 (a) Modeling diagram of a flow control valve, (b) Modeling diagram of a liquid hydrogen tank

Results and Discussion

- The results show that staged precooling with gaseous hydrogen followed by liquid hydrogen effectively reduces thermal stress on the pipeline, thereby lowering the risk of contraction-induced fracture. It also significantly decreases working fluid consumption, improving the economic efficiency of the precooling process.



- The model accurately captures the pre-cooling behavior in different stages and resembles the dynamic characteristics of the process.

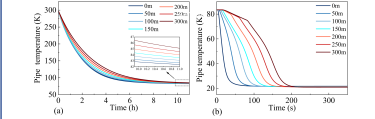


Fig.7 Pipelining pre-cooling process (a) gaseous pre-cooling stage, (b) liquid chilldown stage

- The heat transfer correlation used in the model yields a smooth boiling characteristic curve.

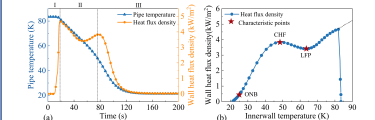


Fig.8 (a) Variation of wall temperature and heat flux density with time in the 150m pipe section, (b) The relationship between heat flux density and wall temperature in the 150m pipe section

- A variable-condition analysis was conducted on key boundary parameters affecting the precooling performance of the unloading system.

- The results confirm a negative correlation between inlet flow velocity and precooling time, while optimizing inlet pressure, inlet subcooling, and tank pressure yields dual benefits in reducing both precooling time and liquid hydrogen consumption.

$$\text{Cryogenic Energy Utilization Efficiency: } \eta_{H_2/S} = \frac{Q_{\text{cool}}}{Q_{\text{flow}}} = \frac{Q_{\text{cool}}}{\dot{m}_{H_2} h_{\text{sub, cold}}}$$

$$\text{Relative Precooling Efficiency: } \varepsilon_{\text{Precool}} = \frac{t_{\text{precool}}}{t_{\text{ref}}}$$

$$\text{Relative Consumption of Liquid Hydrogen: } \varepsilon_{\text{Rel, LH}_2} = \frac{\dot{m}_{\text{LH}_2}}{\dot{m}_{\text{ref}}} = \frac{m_{\text{LH}_2}}{m_{\text{ref}}}$$

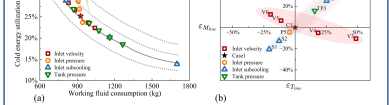


Fig.9 (a) Comprehensive evaluation of liquid hydrogen consumption and cold energy utilization efficiency, (b) Comprehensive evaluation of precooling time and liquid hydrogen consumption

- The 1D model of the large-scale liquid hydrogen unloading system was developed to predict dynamic performance, and the proposed optimization significantly enhanced precooling efficiency.

Future Outlook

- Conduct visualization experiments on the thermal shock of horizontal liquid hydrogen pipelines and develop new generalized correlations.
- Develop CFD numerical simulation techniques for liquid hydrogen flow boiling based on experimental data.
- Develop an intelligent liquid hydrogen transfer system with a system feedback mechanism and universal standards, adaptable to a wide range of hydrogen-related infrastructure.

This work was financially supported by the National Key Research and Development Program of China(2022YFB4002901)

*: limin.qiu@zju.edu.cn

** :kaiwang19@zju.edu.cn