

液氢储罐中耦合蒸气冷却屏的真空多层绝热结构的性能优化及边际效应研究

李科¹ 朱顺¹ 刘科¹ 李晓珍² 田磊³ 文健¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 陕西西安; 2. 西北工业大学柔性电子全国重点实验室, 710072, 陕西西安; 3. 陕西化工研究院有限公司, 710054, 陕西西安)

摘要: 增加液氢储罐真空多层绝热结构中辐射屏的层数必然会提升储罐的绝热性能, 本研究针对液氢储罐高效绝热与结构轻量化的需求, 探讨了层数增加时多层绝热结构绝热性能的边际效应。基于考虑了辐射传热、固体导热和残余气体导热的稳态传热模型, 构建了耦合蒸气冷却屏(VCS)与仲正催化转化(POC)的真空多层绝热结构仿真模型; 还引入了一种连续变密度真空多层绝热(VDMLI)结构优化方法, 获得了不同辐射屏层数下的最佳层排布和对应的最小漏热热流密度。基于模型, 系统分析了VCS设置与否、VCS位置、VCS耦合POC和VCS数量对储罐绝热性能边际效应的影响规律。结果表明, 随着VDMLI中VCS数量的增加, 漏热热流密度的下降速率逐渐放缓, 即系统的绝热性能提升主要由前级VCS主导, 后续增设VCS所带来的增益有限。单VCS耦合POC后可显著提升系统绝热性能, 尤其在辐射屏层数较多时表现更为显著。VDMLI中设置不同VCS数量(0、1、2、3)时, 或采用1VCS耦合POC时, 随着辐射屏层数增加, VDMLI结构的漏热热流密度的边际效应显著下降, 当层数超过50层后, 继续增加层数对绝热性能的提升不足1%。研究结果可为液氢储罐中耦合VCS与POC的VDMLI结构设计与参数优化提供理论依据。

关键词: 液氢储罐; 变密度真空多层绝热; 蒸气冷却屏; 优化; 边际效应

中图分类号: TK91 **文献标志码:** AA

文章编号: 0253-987X(XXXX)XX-0001-18

Study on Performance Optimization and Marginal Effect of Vacuum Multi-Layer Insulation Structure Coupled with Vapor-Cooled Shield for Liquid Hydrogen Tank

LI Ke¹, ZHU Shun¹, LIU Ke¹, LI Xiaozhen², TIAN Lei³, WEN Jian¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

2. Institute of Flexible Electronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;

3. Shaanxi Research Design Institute of Petroleum and Chemical Industry, Xi'an, Shaanxi

收稿日期: 2026-XX-XX。

710054, China)

Abstract: Increasing the number of radiation shield in the vacuum multi-layer insulation of liquid hydrogen tank will inevitably enhance the thermal insulation performance of tank. To address the demands of high insulation efficiency and structural light weighting, the marginal effects of increasing the number of radiation shield on the insulation performance of vacuum multi-layer insulation are investigated. Based on a steady-state heat transfer model that couples radiation heat transfer, solid heat conduction, and residual gas conduction, a simulation model of vacuum multi-layer insulation integrating vapor-cooled shield (VCS) and para-ortho catalytic conversion (POC) was developed. Furthermore, an optimization method for a variable-density multi-layer insulation (VDMLI) was introduced to determine the optimal layer arrangement and the corresponding minimum heat leakage flux for setting different numbers of radiation shields. Based on this model, a systematic analysis was conducted on the effect of VCS configuration (presence/absence), VCS position, the combination of VCS with POC, and the number of VCS on the marginal effects of the insulation performance of tank. The results indicate that, as the number of VCS in VDMLI increases, the rate of reduction in heat leakage flux gradually slows down. In other words, the improvement in system insulation is primarily driven by the first VCS, with subsequent VCS providing diminishing returns. Coupling a single VCS with POC significantly enhances the insulation performance, becoming particularly pronounced with a higher number of radiation shields. The analysis of VDMLI configurations with different numbers of VCS (0, 1, 2, 3), or single VCS coupled with POC reveals a significant decrease in the marginal effect on heat leakage flux as the number of radiation shields increases. When the number of layers exceeds 50, further increasing the number of radiation shield improves insulation performance by less than 1%. The findings of this study will provide a theoretical basis for the design and parameter optimization of VDMLI integrated with VCS and POC in liquid hydrogen tank.

Keywords: liquid hydrogen tank; variable-density vacuum multi-layer insulation; vapor-cooled shield; optimization; marginal effect

氢能鉴于其资源丰富、清洁、可再生、高效等优点被认为是未来最具发展前景的能源载体之一，目前已在航空航天、汽车、工业能源等领域得到了广泛的应用^[1-3]。低温液氢因其能量密度高、安全性好等优点，成为氢能大规模储运的最佳选择^[4-5]。由于液氢的沸点极低，在0.1 MPa下约为20 K，因此液氢储罐需要良好的保温结构，以减少液氢蒸发损失^[6]。

真空多层绝热结构 (Multi-layer Insulation, MLI) 由高真空的多层辐射屏 (镀铝聚酯薄膜) 和屏间填充物 (涤纶网) 组成，能显著降低液氢储存时的冷量损失，具备优异的绝热效果^[7-8]。同时通过引入蒸气冷却屏 (Vapor Cooled Shield, VCS)，可进一步改善液氢储罐的绝热性能^[9]。Scott^[10]首先提出了在MLI中设置VCS的概念，发现设置VCS的液氢储罐的液氢蒸发速率约为

未设置 VCS 的 38%。Jiang 等^[11-12]研究了引入 VCS 的 MLI 传热模型,指出 VCS 置于 MLI 中间位置时绝热效果最佳,储罐的漏热量下降 64.0%。赵拓等^[13]同样指出,常温常压条件下,将 VCS 置于 MLI 中间可获得最优绝热效果。Zheng^[14]研究发现 VCS 数量提升对于减少漏热效果有限。此外,在 MLI-VCS 耦合的液氢储罐中,采用仲正催化转化器,借助仲正催化转化(Para-Ortho Conversion, POC)过程中产生的冷量,可有效延长液氢的存储时间^[15-16]。忻碧平等^[17]建立含 VCS 结构的 MLI 耦合传热模型,同时引入 POC 研究其对漏热的影响,结果表明,通过加入 POC 能够有效提升绝热性能,且在近冷壁面处仲正转化效果更优,最多可减少 11.1% 的净热流密度。Shi 等^[18]发现单蒸气冷却屏可将漏热减少 61.1%,在此基础上填充催化剂后,漏热可进一步降低 11.6%。Meng 等^[19]发现 POC 可使 VCS 温度最高降低 20.6%,储罐漏热下降 10%。

变密度多层绝热结构 (Variable Density Multi-layer Insulation, VDMLI) 是指相邻辐射屏间距沿绝热层厚度方向发生变化,从而使局部层密度呈非均匀分布的多层绝热结构。许张良等^[20]通过简单地增加辐射屏层数模拟了 VDMLI 的漏热量,发现与 MLI 相比,VDMLI 的保温性能可提高 28.24%。Wang 等^[21]基于逐层模型提出 VDMLI 构型优化方法,搭建液氮蒸发量热实验台开展多组

对照试验,探究了多种因素对 VDMLI 性能的影响。Wu 等^[22]综合考虑间隔物、层间压力、挤压效应,建立最优变密度多层绝热 (OVDMLI) 通用计算模型,并采用贪婪算法求解了最优间隔物排布,发现相较常规 MLI, OVDMLI 漏热降低 25.3%。朱浩唯等^[23]搭建高真空多层绝热性能测试装置,以内密外疏构型的 VDMLI 为研究对象,通实验测试稳态温度分布与单位面积漏热,发现冷边界区域承担 75% 的漏热。在此基础上,李科等^[24]构建了液氢储罐 VDMLI 稳态导热模型,引入贪婪算法和逐层连续变密度优化方法,研究了耦合 VCS 及 VCS 内引入 POC 对绝热性能的影响,结果表明,仅耦合 VCS 时,热流密度降低 16.2%,而同时引入 VCS 和 POC 后,热流密度降低 22.0%。

大部分的研究都集中在 VCS 设置位置的优化、加入 POC 后绝热效果的强化、以及真空多层绝热结构层排布的优化,很少研究涉及到随真空多层绝热结构中辐射屏数量增加其绝热能力的变化规律研究。基于此,本文提出了辐射屏层排布的连续变密度优化方法,获得了不同辐射屏数量下的最优层排布及最小漏热热流密度,得到了随辐射屏数量增加的漏热热流密度边际效应曲线。探讨了不同 VCS 位置、VCS 数量和 VCS 耦合 POC 对此曲线的影响。该研究为含 VCS 和 POC 的 VDMLI 耦合结构设计优化提供了理论指导。

1 计算模型

1.1 真空多层绝热结构物理模型

如图1所示, VDMLI包裹于储罐外壁, VCS位于VDMLI内部某一特定夹层位置。VDMLI由交替叠合的辐射屏与间隔材料构成, 采用连续变密度层排布方案时, 其屏间距可实现连续调

节, 从而得到最优绝热分布。耦合POC的VCS是指在冷却屏管道中布置连续式POC转化单元, 所用伸-正转化催化剂为铁基材料^[25]。图1中 Q_e 、 Q_{in} 和 Q_v 分别表示从环境进入VDMLI的总热量、进入流体域的热量和VCS中低温氢气吸收的热量, 三者满足热平衡关系 $Q_e=Q_{in}+Q_v$ 。

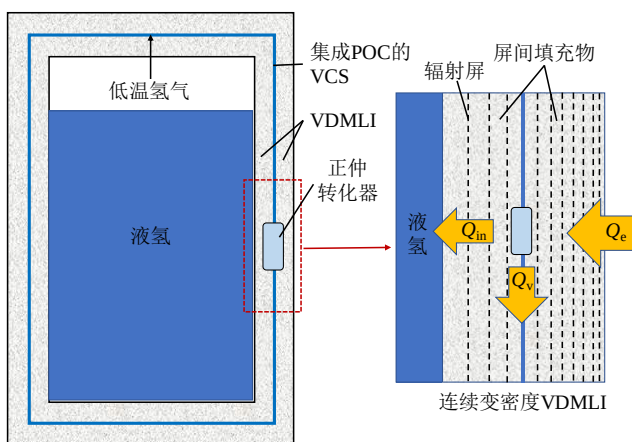


图1 液氢储罐的真空多层绝热结构

Fig.1 Vacuum multi-layer insulation structure for liquid hydrogen tank

1.2 连续变密度真空多层绝热结构传热模型

作如下假设: □ 稳态导热; □ VCS的出口氢气温度与相邻辐射屏温度相等; □ VCS内流阻忽略不计; □ 绝热结构冷端温度为液氢温度 (20 K), 热端为环境温度 (300 K); □ VCS中填充充足的催化剂, 催化效率为100%。

在优化前, 首先构建一个求解器来计算液氢储罐的漏热量。根据温度节点值计算漏热量, 如图2所示。

根据能量方程推导出计算温度节点

值的方程组:

$$a_{i,i} T_i^n = a_{i-1,i-1} T_{i-1}^n + a_{i+1,i+1} T_{i+1}^{n-1} + F_i, \quad 2 \leq i \leq N-1 \quad (1)$$

式中 $T_i=T_c$, $T_N=T_h$, 其中 T_c 和 T_h 分别为冷端和热端的边界温度。 T_i 表示第 i 层辐射屏上设置的温度节点的值。 $a_{i-1,i}$ 和 $a_{i+1,i}$ 为系数, 代表温度节点 T_{i-1} 和 T_{i+1} 对温度节点 T_i 影响的量化表征, 而 $a_{i,i}=a_{i-1,i}+a_{i+1,i}$ 。 n 为迭代轮次标识符。 F_i 表示由VCS或POC引入的等效热源项, 当设置VCS时, F_i 表示低温氢气流经VCS所吸收的热量折算到储罐单位表面积后

的热流密度。耦合 POC 后, F_i 还包含仲氢向正氢催化转化过程所吸收的热量。 a_{i-1} 和 a_{i+1} 的计算方法相似, a_{i-1} 的计算方法为:

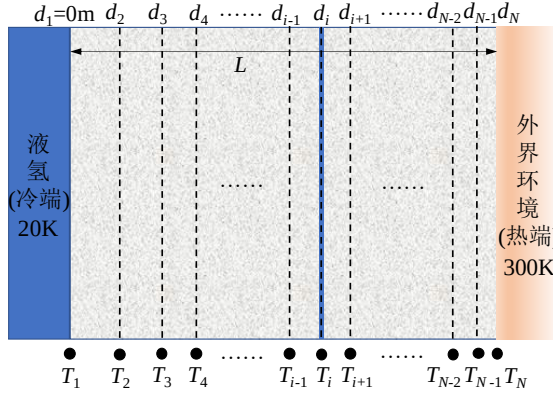


图2 绝热结构中温度节点排布

Fig.2 Setting of temperature nodes in insulation structure

$$a_{i-1} = a_{s,i-1} + a_{g,i-1} + a_{r,i-1} \quad (2)$$

其中 $a_{s,i-1}$ 、 $a_{g,i-1}$ 和 $a_{r,i-1}$ 分别是固体导热、气体导热和辐射传热对温度节点施加影响的量化表征, 计算公式为^[24]:

$$a_{s,i-1} = \frac{n_1 f}{D_{i-1}} \left[0.017 + 7 \times 10^{-6} (800 - \bar{T}_{i-1}) + 0.228 \ln(\bar{T}_{i-1}) \right] \quad (3)$$

$$a_{g,i-1} = \alpha p_{rc} \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{R}{8\pi M \bar{T}_{i-1}}} \quad (4)$$

$$a_{r,i-1} = \frac{\sigma (T_{i-1} + T_i) (T_{i-1}^2 + T_i^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{i-1}} + \frac{1}{\varepsilon_i} - 1} \quad (5)$$

式中 n_1 和 α 为经验常数, 取 0.016 和 0.8; f 为间隔材料与固体材料的相对密度, 取其值为 0.087; D_{i-1} 为第 i 层和第 $i-1$ 层辐射屏之间的间距, $D_{i-1} = d_i - d_{i-1}$, 其中 d_i 和 d_{i-1} 分别为第 i 层和第 $i-1$ 层辐射屏的位置坐标; γ 为间隔层中气体的定压比热容与定容比热容之比; R 是气体常

数; M 和 p_{rc} 为辐射屏间气体分子量和压力, 分别取 $29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 0.001 Pa ; σ 为 Stefan-Boltzmann 系数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$; 方程中的 $\bar{T}_{i-1}$ 表示间隔材料的平均温度, 计算公式如下:

$$\bar{T}_{i-1} = \frac{T_{i-1}^n + T_i^n}{2} \quad (6)$$

式(1)中 F_i 的计算分为三种情况。

当辐射屏上不设置 VCS 时:

$$F_i = 0 \quad (7)$$

当 VCS 设置在第 i 层辐射屏时:

$$F_i = \frac{\dot{m}_{\text{VCS}}}{A} (h_{\text{p},\text{in}}^n - h_{\text{p},\text{out}}^{n-1}) \quad (8)$$

当 VCS 设置在第 i 层辐射屏且耦合 POC 时:

$$F_i = \frac{\dot{m}_{\text{VCS}}}{A} \left[h_{\text{p}',\text{in}}^n \phi_{\text{p},\text{in}}^n + h_{\text{o}',\text{in}}^n (1 - \phi_{\text{p},\text{in}}^n) \right] - \frac{\dot{m}_{\text{VCS}}}{A} \left[h_{\text{p}',\text{out}}^{n-1} \phi_{\text{p},\text{out}}^{n-1} + h_{\text{o}',\text{out}}^{n-1} (1 - \phi_{\text{p},\text{out}}^{n-1}) \right] \quad (9)$$

式中 A 为储罐的表面积, $\dot{m}_{\text{VCS}}$ 是蒸气冷却屏中质量流量。入口比焓 $h_{\text{p,in}}$ 和出口比焓 $h_{\text{p,out}}$ 通过调用 REFPROP 来计算。 $h_{\text{p},'}$ 和 $h_{\text{o},'}$ 表示在 h_{p} 和 h_{o} 的基础上作基准

点校正, 校正值分别是 $256060 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $444695 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

采用了计算平衡氢中仲氢浓度的拟合关联式^[26]:

$$\phi_{\text{p}} = 0.1 \left[\exp \left(\frac{-5.313}{(T/T_{\text{cr}})} \right) + 0.1 \right]^{-1} - 2.5 \times 10^{-4} \left(\frac{T}{T_{\text{cr}}} \right)^3 + 3.7 \times 10^{-3} \left(\frac{T}{T_{\text{cr}}} \right)^2 - 2.0 \times 10^{-3} \left(\frac{T}{T_{\text{cr}}} \right) - 0.00227 \quad (10)$$

式中 T_{cr} 是仲氢的临界温度, 取 32.938 K 。

1.3 优化算法

为获得多层绝热结构液氢储罐的边界效应曲线, 采用逐层最优连续变密度方法对 VDMLI 的辐射屏排布进行优化, 获得不同辐射屏数量时 VDMLI 的最优层排布和漏热热流密度。求解过程如图3所示, 包括漏热热流密度计算模型和逐层优化模型。在热流密度求解模块, 通过初始化温度场, 对公式(2)-(5)中的影响系数进行更新, 并根据这些更新后的系数重新计算温度场分布, 并判断温度场残差是否满足收敛性要求, 若不满足则重新计算温度场, 若满足则根据温度梯度计算漏热热流密度。在逐层连续变密度优化模块中, 初始化层密度分布, 将初始屏间距均设为最小分配单位 0.1 mm 。之后, 依次在第 i 层插入厚度为 $\Delta d = 0.1 \text{ mm}$ 的间隔材料, 更新层排布 DX_i^k , 计算此时的漏热热流 Q_i^k , 比较得到最小漏热热流 Q_{min}^k 和最优层排布 DX_i^k , 并判断所有间隔物是否已经分配完毕。若间隔物未分配完毕, 则令 k

增加1, 继续优化下一层的层密度分布, 若所有间隔物均已分配, 则优化过程结束, 得到当前辐射屏层数下的最优辐射屏障间距和最小热流密度。之后, 辐射屏层数增加1, 重复上述过程, 得到新的辐射屏层数下的最优层排布和最小漏热热流密度。

1.4 模型验证

采用 NASA 在多用途氢试验台上获得的数据^[27]对本文的数学模型进行验证, 结果如图4所示。实验和模拟计算中采用的 VDMLI 总厚度是 37.5 mm , 从冷端到热端设置三种辐射屏排布密度, 分别是 $8 \text{ 层} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、 $12 \text{ 层} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、 $16 \text{ 层} \cdot \text{cm}^{-1}$, 外部温度维持在 300 K , 罐内液氢维持在 20 K 。温度分布的计算值与实验值之间的平均误差为 9.1% , 产生误差的主要原因是实验中冷端附近难以达到高真空条件, 导致该区域温度高于实验温度。漏热热流密度的实验值为 $0.2300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 计算值为 $0.2264 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 相对误差为 1.6% 。可见, 本文所建立的稳态传热模型能够较好地再现 VDMLI 内部的温度场及漏热特性, 计

算结果与实验数据基本一致,验证了该模型的可靠性。

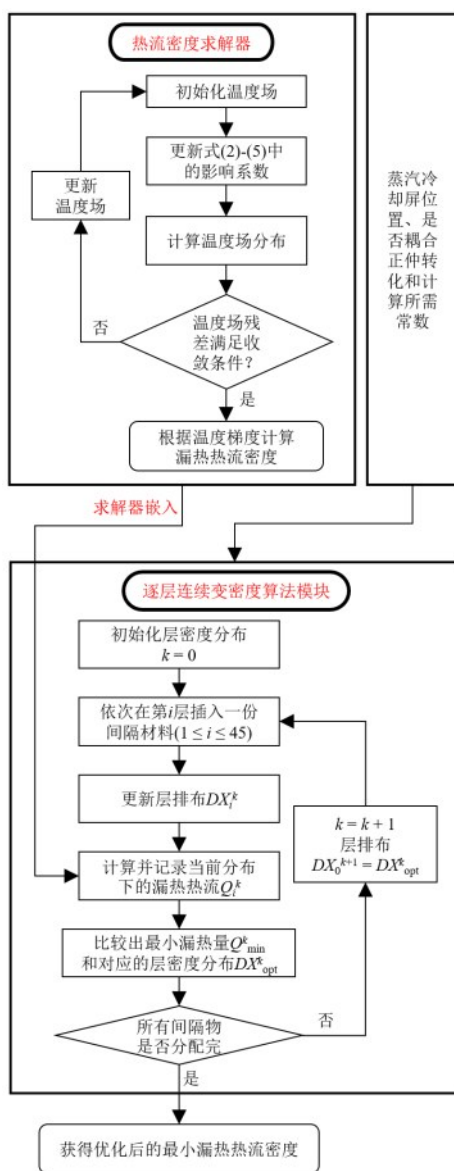


图3 连续变密度优化流程

Fig.3 Process of continuous variable-density optimization

2 结果分析

2.1 耦合 VCS 对绝热效果影响分析

2.1.1 VCS 对辐射屏位置的影响

模拟计算中, VDMLI 的总厚度统一取 37.5 mm, 即在改变辐射屏层数的过程中始终保持绝热结构总厚度不变。当 VDMLI 层数为 40 层时, 为分析是否设置 VCS 对辐射屏间距分布及其相对位置的影响, 优化得到了辐射屏排布, 均对应漏热热流密度最小的最优配置方案, 如图 5 所示。辐射屏的相对位置定义为辐射屏至绝热结构内壁面的距离与绝热结构总厚度之比。“0VCS”表示 VDMLI 中未设置 VCS, “1VCS-[4]”表示在 VDMLI 的第 4 层辐射屏处设置一个 VCS。由图可见, 随着辐射屏编号的增加, 相邻辐射屏间距整体呈减小趋势; 无论是否耦合 VCS, 靠近冷端的辐射屏间距均明显大于靠近热端的间距。当在第 4 层辐射屏设置 VCS 后, 各层辐射屏的相对位置整体上均大于未引入 VCS 的情况, 且在 VCS 附近差异最为显著, 最大相对位置差值达到 0.192。进一步对辐射屏间距分布进行对比发现, 耦合 VCS 后, 前 3 层辐射屏间距显著增大, 而在第 4 层辐射屏之后, 各层辐射屏间距则略小于未耦合 VCS 的情况, 且变化趋于平缓, 表明 VCS 的引入对辐射屏间距分布产生了明显的重新分配效应。

图 6 分析了不同辐射屏位置下漏热

热流密度及辐射屏层间温度的分布特征。可知,未耦合VCS时,漏热热流密度为 $0.302 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;而耦合VCS后,前3层辐射屏的漏热热流密度显著降低,仅为 $0.211 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,而在第4层辐射屏之后,漏热热流密度显著升高为 $0.329 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。原因在于,在第4层设置VCS后,会对前3层辐射屏形成冷遮

挡,相比于未耦合VCS,冷端的漏热降低了 $0.091 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。此外,VCS的加入,使得第4层之后的辐射屏层间温度有所降低,导致其与热端的传热温差增大,同时由图5可知辐射屏间距也有所减小,导致第4层辐射屏之后的漏热高于未耦合VCS时的情况。

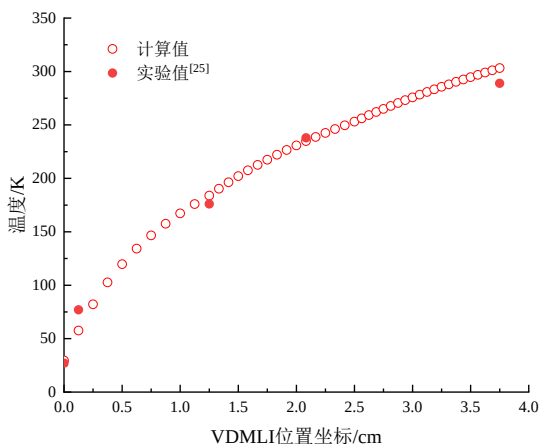


图4 真空多层绝热结构稳态导热模型验证

Fig.4 Validation of steady-state heat transfer model for vacuum multi-layer insulation structure

图7展示了有无VCS时,采用不同辐射屏层数时优化得到的辐射屏相对位置。由图可知,当辐射屏编号相同时,20层辐射屏的相对位置明显高于60层辐射屏。辐射屏层数由20层增加至60层时,0VCS和1VCS辐射屏相对位置的差距逐渐增大,且越靠近VCS所在位置,辐射屏相对位置的变化幅度更大,说明VCS的引入对辐射屏空间重分配具有更强的局部影响作用。相比而言,加入VCS后,靠近冷端的辐射屏

的分布更为稀疏,而越靠近热端,辐射屏的分布更为紧凑。在后续的研究中,当采用不同辐射屏数量时,通过变密度优化得到最优漏热热流密度;为简化,后面所提到的“漏热热流密度”均表示“最优漏热热流密度”,即经过连续变密度优化得到的最优辐射屏层排布对应的“漏热热流密度”。

2.1.2 有无VCS时的边际效应

图8对比了采用不同辐射屏层数时,固体导热热流密度 q_s 与辐射传热热

流密度 q_r 的变化。可见,随着辐射屏编号的增加, q_r 逐渐增大,而 q_s 整体呈降低趋势,但在VCS所在位置处出现明显突增,随后再次缓慢降低。以辐射屏层数为60层为例,当辐射屏编号由1增加至60时, q_r 由 $0.011 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 增加至 $0.152 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; q_s 由第1层的 $0.118 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 降低至第3层 $0.098 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,而后在第4层骤增至 $0.199 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,而后逐渐回落

至 $0.115 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。可见,VCS引入可大幅降低 q_s ,进而降低储罐整体漏热率。另外,20层辐射屏时的 q_r 和 q_s 均要高于60层的,表明在总厚度一定的条件下,增加辐射屏层数对减小储罐漏热有积极作用,因此有必要进一步系统研究辐射屏层数变化对储罐漏热及其边界效应的影响规律。

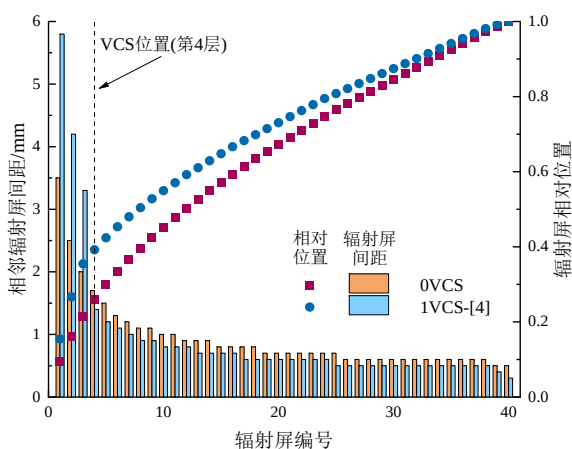


图5 有无VCS时优化后的辐射屏间距和相对位置

Fig. 5 Optimization results of radiation shield spacing and relative position with and without VCS

不同辐射屏层数下的漏热热流密度变化规律如图9所示。可见,无论是否设置VCS,漏热热流密度均随辐射屏层数的增加而单调降低,但其降低幅度随层数增加逐渐减小,呈现出明显的边际效应特征。具体而言,随着VDMLI中辐射屏层数由20层增加至40层并进一步增加至60层,0VCS工况下的漏热热流密度由 $0.4798 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 降至 $0.3019 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,并最终降至 $0.2445 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,对应

降幅分别为37.07%和19.01%;1VCS工况下的漏热热流密度由 $0.3468 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 降至 $0.2112 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,并最终降至 $0.1721 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,对应降幅分别为39.09%和18.54%。可见,在较低层数区间内,增加辐射屏层数对降低漏热具有显著效果,而在高层数区间内,其绝热性能提升逐渐趋于饱和。此外,对比有无VCS的结果可进一步发现,引入VCS可在全层数范围内有效降低漏热热流

密度。

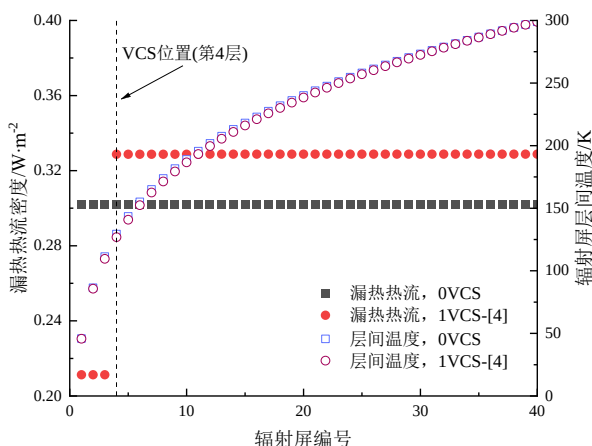


图6 不同辐射屏位置的局部漏热热流密度与温度

Fig. 6 Local heat leakage flux and temperature at different radiation shield positions

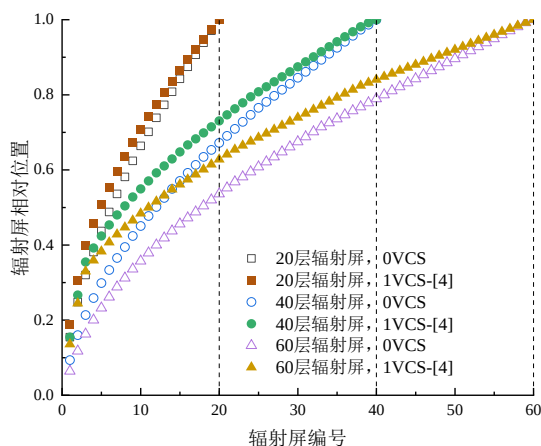


图7 不同辐射屏层数时辐射屏的相对位置

Fig. 7 Relative positions of radiation shields at different numbers of radiation shields

为定量评估设置不同辐射屏层数对漏热热流密度的影响,以同一工况下最大与最小漏热热流密度之差为基准,得到不同辐射屏层数对应的漏热热流密度变化幅度曲线,如图10所示。结果表明,0VCS和1VCS在不同辐射屏层数时的漏热热流密度变化幅度基本一致,

说明VCS的引入并未改变漏热热流密度随辐射屏层数变化的趋势。此外,随着辐射屏层数的增加,漏热热流密度变化幅度逐渐降低,呈现出明显的边际效应特征;当辐射屏层数超过50层后,其变化幅度已小于1%,表明继续增加辐射屏层数对提升储罐绝热性能的贡献

极为有限。因此综合考虑绝热结构厚度和辐射屏层数取 50 层具有较优的工程合理性。

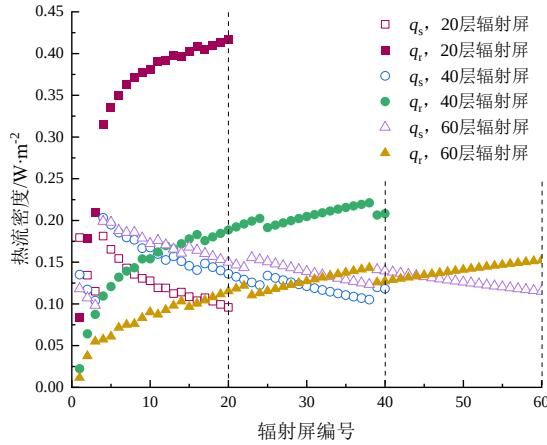


图 8 不同辐射屏层数时漏热热流密度分布

Fig. 8 Distribution of heat leakage flux at different numbers of radiation shield

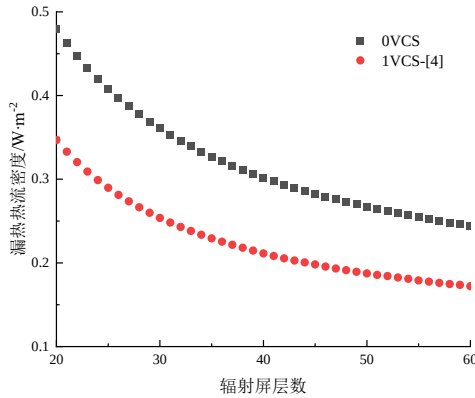


图 9 有无 VCS 时辐射屏层数对漏热热流密度的影响

Fig. 9 Effect of number of radiation shield on heat leakage flux for cases with and without VCS

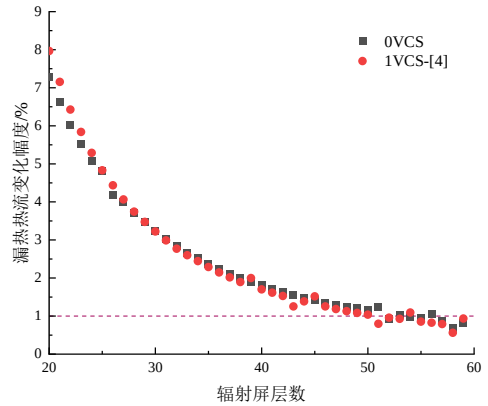


图 10 不同辐射屏层数下漏热热流密度变化幅度

Fig. 10 Variation range of heat leak flux for different numbers of radiation shields

2.1.3 不同 VCS 位置时的绝热效果分析

为分析 VCS 位置对液氢储罐绝热性能的影响,研究当 VCS 位置不同时,

漏热热流密度随 VDMLI 中辐射屏数量变化的趋势,如图 11 所示。可见, VCS 位置与辐射屏层数之间存在显著的耦合效应,其对漏热热流密度的影响

随辐射屏层数变化而呈现出不同规律。当辐射屏层数较少（如20层）时，随着VCS位置由冷端向热端移动，漏热热流密度呈现先降低后升高的变化趋势；而在辐射屏层数较多（如60层）时，随着VCS位置向热端移动，漏热热流密度则整体呈下降趋势。以1VCS-[16]为例，当辐射屏层数为20，VDMLI的漏热热流密度达到最大值

$0.4013 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ；随着辐射屏层数增加，该工况下的漏热热流密度逐渐降低，并分别在辐射屏层数为28层、37层和45层时，低于1VCS-[4]、1VCS-[8]和1VCS-[12]对应的漏热热流密度。此外，当辐射屏层数超过50层后，漏热热流变化幅度小于1%，表现出明显的边际效应衰减特征。

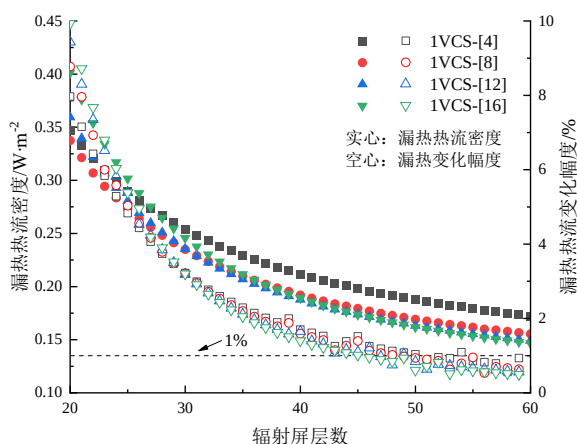


图11 不同VCS位置时漏热热流密度随辐射屏层数的变化

Fig. 11 Heat leak flux versus number of radiation shield for different VCS positions

为分析上述规律的产生原因，定义VCS的相对位置，其取值范围为0到1，定义为VCS距离VDMLI冷端距离与VDMLI总厚度的比值。数值越小表示VCS越靠近冷端，越大表示其越靠近热端。不同VCS位置（表示VCS设置在不同辐射屏上）在不同辐射屏数量下对应的VCS相对位置如图12所示。随着辐射屏层数增加，各工况下VCS的相对位置均逐渐减小，表明其相对位置不断向冷端迁移。对于1VCS-[16]，当

辐射屏层数由20层增加至60层时，其相对位置由0.80降至0.27，VCS由热端向冷端显著迁移；相比之下，1VCS-[4]和1VCS-[8]的相对位置始终位于冷端附近，变化幅度较小。VCS的最优设置位置对应于漏热量最小的位置，1VCS-[16]在随辐射屏层数增加而向冷端迁移的过程中，其相对位置逐渐趋近于最优位置，其变化速率越来越慢。总之，VCS位置的最优选择应结合辐射屏层数进行综合考虑。

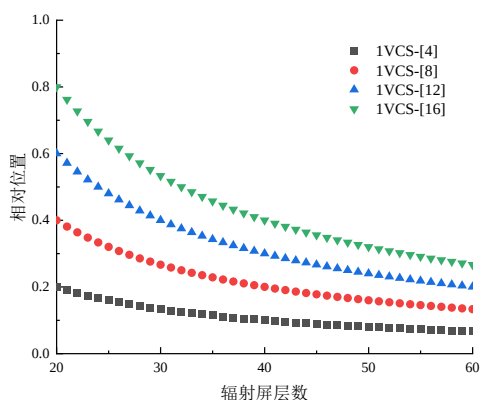


图 12 不同辐射屏层数时 VCS 相对位置的变化

Fig. 12 Variation of relative position of VCS at different numbers of radiation shield

2.2 耦合 POC 的 VCS 对绝热效果影响分析

2.2.1 有无 POC 时的绝热效果分析

1VCS 耦合 POC 时的漏热热流密度随辐射屏层数的变化曲线如图 13 所示。

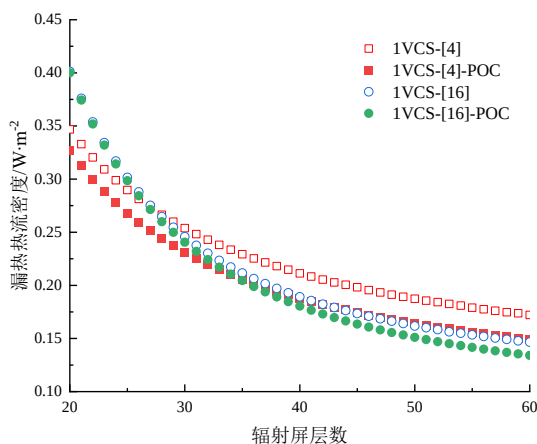


图 13 耦合 POC 时辐射屏层数对漏热热流密度的影响

Fig. 13 Effect of number of radiation shield on heat leakage flux for VCS coupled with POC

可见,在相同辐射屏层数条件下,耦合 POC 的 1VCS 具有更低的漏热热流密度,表明仲正转化过程对储罐绝热性能具有明显的增强作用。进一步比较发现,当 1VCS 布置在第 16 层时,耦合 POC 与不耦合 POC 两种工况之间的漏热热流密度差异相对较小,尤其在辐射屏层数低于 30 层的情况下,两条曲线几乎重合。这表明在辐射屏层数较少时,系统整体漏热仍主要受边界传热主导,仲正转化所引入的附加冷量对储罐的绝热性能提升效果尚未充分显现。随着辐射屏层数的增加,耦合 POC 所带来的优势逐渐增强,其漏热热流密度相较于不耦合 POC 的工况呈现出更加明显的下降趋势。说明在多层绝热条件下,仲正转化释放的冷量能够更有效地参与热量分配,从而削弱边界传热的不利影响,进一步强化系统的整体绝热性能。

2.2.2 耦合POC后VCS设置不同位置时的边际效应

耦合POC后VCS设置不同位置时的漏热热流密度如图14所示。由图14(a)可知,当辐射屏层数较少(如20层)时,VCS向热端移动会导致漏热增加,由 $0.3271 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 升至 $0.4001 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;而当层数较多(如60层)时,漏热热流密度随VCS向热端移动反而略有降低,由 $0.1493 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 降至 $0.1341 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。此外,当辐射屏层数超过40层后,VCS位置变化对漏热影响有限,例如当VCS位置编号由第8层增大至第16层时,漏热热流密度几乎没有变化,表明此时再增大VCS所在辐射屏的编号对储罐绝热性能提升的意义不大,并且当辐射屏层数超过50层后,漏热热流变化幅度小于1%,再增加辐射屏层数对储罐绝热性能的提升有限。由图14(b)所示的漏热量降低幅度可以看出,VCS相对位置越靠近冷端,耦合POC后所带来的漏热削减越显著。结合图13的结果:当辐射屏层数为60层时,1VCS-[16]与1VCS-[4]-POC的漏热量已基本一致。表明当VCS初始位置较靠近冷端时,其漏热抑制潜力更大,耦合POC后所表现出的绝对降低幅度也更为明显。

2.3 多VCS对绝热效果影响分析

多VCS绝热效果对比如图15所示,可见,漏热热流密度随VCS数量增加而逐渐降低,但降低幅度减缓;在设置

不同VCS数量时,漏热热流变化幅度高度重合且均在50层辐射屏后低于1%。当辐射屏层数为60层时,0VCS、1VCS、2VCS和3VCS的漏热热流密度分别为 $0.2445 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $0.1493 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $0.1152 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $0.0979 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。可见,引入VCS可大幅提升储罐的绝热性能,相比0VCS,耦合POC的1VCS绝热性能约提升38.93%;之后再加入多VCS后,提升幅度显著降低,例如由1VCS分别增加为2VCS和3VCS后,绝热性能分别提升22.87%和14.97%,表明再继续增加VCS数量对储罐绝热性能的提升幅度不大,多VCS之间的性能差异减小。分析表明,VCS数量的选取须结合VDMLI总层数进行权衡,以实现绝热性能与结构和成本的最优平衡。

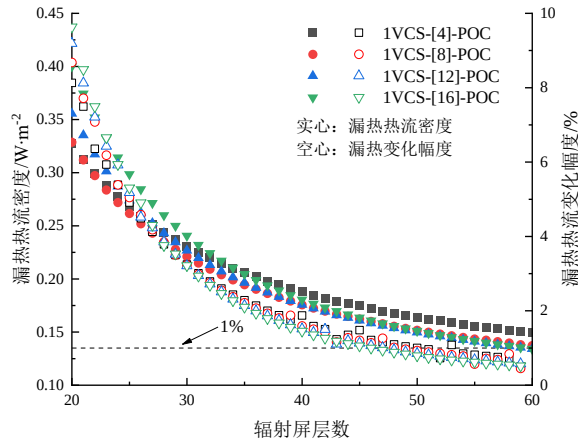
3 结论

本文针对液氢储罐变密度真空多层绝热(VDMLI)结构,建立了耦合蒸气冷却屏(VCS)与仲正催化转化(POC)的稳态传热与连续变密度优化模型,获得的主要结论如下:

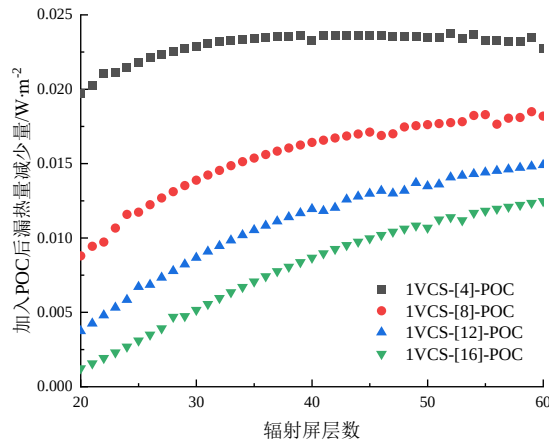
1) VDMLI的绝热性能随辐射屏层数的增加呈现显著的边际效应递减趋势。随着辐射屏层数增加,漏热热流密度持续降低,但当层数超过50层后,漏热降低幅度已小于1%。

2) 引入VCS可显著改善液氢储罐的绝热性能。在相同辐射屏层数下,单VCS可使漏热热流密度降低约30%,且VCS的最优设置位置与辐射屏层数

密切相关,其相对位置向冷端移动有利于降低储罐漏热。



(a) 耦合POC后不同VCS位置时的漏热热流密度



(b) 耦合POC后减少的漏热热流密度

图14 不同VCS位置时的漏热热流密度

Fig. 14 Heat leak flux for different VCS positions

3) 在VCS中耦合POC后,可进一步利用仲正转化释放的冷量,有效降低漏热热流密度,且随着辐射屏层数的增加,POC对绝热性能的提升效果更加明显。

4) 采用不同VCS数量(0, 1, 2, 3)时,随辐射屏层数增加的边际效应递减

趋势几乎相同,漏热热流变化幅度均在50层后低于1%。增加VCS数量能够进一步降低漏热,但其绝热性能提升幅度不断降低。由0VCS增加至1VCS可显著提升绝热性能38.93%,而继续增加至2VCS和3VCS后,性能提升幅度明显减小。

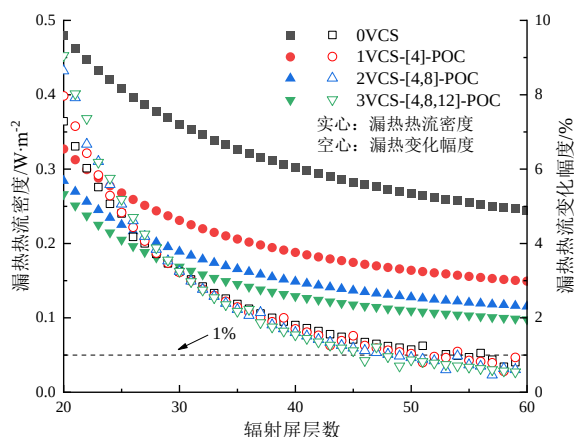


图15 多VCS绝热效果对比

Fig. 15 Comparison of insulation performance for multiple VCS

参考文献

- [1] RATNAKAR R R, DINDORUK B, HARVEY A. Thermodynamic modeling of hydrogen-water system for high-pressure storage and mobility applications [J/OL]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 81: 103463.
- [2] 蒲亮, 余海帅, 代明昊, 等. 氢的高压与液化储运研究及应用进展[J]. 科学通报, 2022, 67(19): 2172-2191.
PU L, YU H, DAI M, et al. Research progress and application of high-pressure hydrogen and liquid hydrogen in storage and transportation [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(19): 2172-2191.
- [3] 扬帆, 张超, 张博超, 等. 大型液氢储罐内罐材料研究与应用进展[J]. 太阳能学报, 2023, 44(10): 557-563.
YANG F, ZHANG C, ZHANG B, et al. Research and application progress of inner tank materials for large liquid hydrogen storage tanks [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2023, 44(10): 557-563.
- [4] MICHLER T, WACKERMANN K, SCHWEIZER F. Review and Assessment of the Effect of Hydrogen Gas Pressure on the Embrittlement of Steels in Gaseous Hydrogen Environment [J]. Metals, 2021, 11(4): 637.
- [5] 王鑫, 陈叔平, 朱鸣. 液氢储运技术发展现状与展望[J/OL]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 500-514.
WANG X, CHEN S, ZHU M. DEVELOPMENT STATUS AND PROSPECT OF LIQUID HYDROGEN STORAGE AND TRANSPORTATION TECHNOLOGY [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2024, 45(1): 500-514.
- [6] 沈铤, 滕俊华, 周伟明. 小型液氢储罐无损储存影响规律研究[J]. 低温工程, 2022(4): 76-82.
SHEN X, TENG J, ZHOU W. Study on performance of lossless storage for small size liquid hydrogen tanks [J]. Cryogenic, 2022(4): 76-82.
- [7] 李科, 文键, 忻碧平. 耦合蒸气冷却屏的真空多层绝热结构对液氢储罐自增压过程的影响机制研究[J]. 化工学报, 2023, 74(9): 3786-3796.

- LI K, WEN J, XIN B. Study on influence mechanism of vacuum multi-layer insulation coupled with vapor-cooled shield on self-pressurization process of liquid hydrogen storage tank [J]. CIESC Journal, 2023, 74(9):3786-3796.
- [8] 高云飞, 王博, 王浩任, 等. 液氢温区真空多层绝热材料研究进展[J]. 低温工程, 2021(6): 12-21.
- GAO Y, WANG B, WANG H, et al. Progress of vacuum multilayer insulation materials at liquid hydrogen temperatures [J]. Cryogenic, 2021(6):12-21.
- [9] ZHANG C, LI C, JIA W, et al. Thermodynamic study on thermal insulation schemes for liquid helium storage tank [J/OL]. Applied Thermal Engineering, 2021, 195: 117185.
- [10] SCOTT R. Thermal Design of Large Storage Vessels for Liquid Hydrogen and Helium [J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1957, 58(6): 317-325.
- [11] JIANG W, ZUO Z, SUN P, et al. Thermal analysis of coupled vapor-cooling-shield insulation for liquid hydrogen-oxygen pair storage [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(12): 8000-8014.
- [12] JIANG W B, ZUO Z Q, HUANG Y H, et al. Coupling optimization of composite insulation and vapor-cooled shield for on-orbit cryogenic storage tank [J]. Cryogenics, 2018, 96: 90-98.
- [13] 赵拓, 陈叔平, 李延娜, 等. 气冷屏复合绝热结构传热分析及屏位优化[J/OL]. 低温与超导, 2016, 44(5): 17-22.
- ZHAO T, CHEN S, LI Y, et al. Heat transfer analysis of vapor cooled shield compounded insulation and optimization of shield's position [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2016,44(5):17-22.
- [14] ZHENG J, CHEN L, WANG J, et al. Thermodynamic modelling and optimization of self-evaporation vapor cooled shield for liquid hydrogen storage tank [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 184: 74-82.
- [15] 梁佳佳, 李翠, 马原, 等. 在轨环境液氢贮箱高效复合绝热方案性能研究[J]. 化工学报, 2024: 1-18.
- LIANG J, LI C, MA Y, et al. Research on the performance of high-efficiency composite insulation scheme for liquid hydrogen tank in orbit environment [J]. CIESC Journal, 2024:1-18.
- [16] 孟垂举, 张亮, 黄永华. 蒸气冷却屏内仲-正氢转化释冷效应分析[J]. 真空与低温, 2022, 28(3): 279-284.
- MENG C, ZHANG L, HUANG Y. Analysis of Cooling Effect of Para-ortho Hydrogen Conversion in Vapor Cooling Shield [J]. Vacuum and Cryogenics, 2022, 28(3): 279-284.
- [17] 忻碧平, 文键, 李科, 等. 液氢储罐蒸气冷却屏多层绝热性能分析[J]. 化学工程, 2023, 51(10): 42-47, 52.
- XIN B, WEN J, LI K, et al. Performance analysis of multi-layer insulation for vapor-cooled shield of liquid hydrogen storage tanks [J]. Chemical Engineering, 2023,51(10):42-47,52.
- [18] SHI C, ZHU S, WAN C, et al. Performance analysis of vapor-cooled shield insulation integrated with para-ortho hydrogen conversion for liquid hydrogen tanks [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(8): 3078-3090.
- [19] MENG C, QIN X, JIANG W, et al. Cool-

- ing effect analysis on para-ortho hydrogen conversion coupled in vapor-cooled shield [J/OL]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(41): 15600-15611.
- [20] 许张良, 谭宏博, 吴昊. 变密度多层低温绝热结构的性能比较与分析[J]. *工程热物理学报*, 2023, 44(5): 1357-1365.
- XU Z, TAN H, WU H. Comparative Study on the Thermal Insulation Performance of Different Variable Density Multi-layer Insulation Structures [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(5): 1357-1365.
- [21] WANG B, HUANG Y H, LI P, et al. Optimization of variable density multilayer insulation for cryogenic application and experimental validation [J]. *Cryogenics*, 2016, 80: 154-163.
- [22] WU S, LI J, DING P, et al. Calculation and analysis of optimal layer density for variable density multilayer insulation based on layer by layer model and Lockheed equation [J]. *Cryogenics*, 2023, 132: 103699.
- [23] 朱浩唯, 黄永华, 李骏, 等. 真空多层绝热性能测试装置及初步实验验证[J]. *低温工程*, 2012(3): 47-51.
- ZHU H, HUANG Y, LI J, et al. An experimental setup for performance testing of multilayer insulation and preliminary inspection [J]. *Cryogenic*, 2012(3): 47-51.
- [24] 李科, 谢昊琳, 冯莉, 等. 液氢储罐真空多层绝热结构的连续变密度优化及性能分析[J]. *西安交通大学学报*, 2025, 59(3): 57-66.
- LI K, XIE H, FENG L, et al. Continuous Variable Density Optimization and Performance Analysis of Vacuum Multilayer Insulation Structure in Liquid Hydrogen Tanks [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2025, 59(3): 57-66.
- [25] WEN J, ZHU S, XU P, et al. Experimental study on the flow and heat transfer performance of a catalyst-filled plate-fin heat exchanger for hydrogen liquefaction [J/OL]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 280: 128270.
- [26] LI K, LI C, WEN J, et al. Study on multi-stream plate fin heat exchanger coupled with ortho-para hydrogen conversion based on distributed parameter model [J/OL]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(85)[2024-09-25].
- [27] MARTIN J J, HASTINGS L. Large-Scale Liquid Hydrogen Testing of Variable Density Multilayer Insulation with a Foam Substrate: M-1020 [R]. 2001.