

# 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

李科<sup>1</sup>, 谢昊琳<sup>1</sup>, 冯莉<sup>2</sup>, 文键<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 中国石油天然气集团公司长庆油田分公司清洁电力开发项目部, 710200, 西安)

**摘要:** 为实现液氢储罐中真空多层绝热结构更优异的绝热性能,在以往三密度区或四密度区的基础上,提出了一种绝热结构逐层连续变密度优化方法,对其辐射屏层间距布置进行优化。确定了耦合蒸气冷却屏(VCS)和 VCS 内引入仲正转化后的最优层间距布置,分析了连续变密度优化对温度和热流密度分布的影响,并与采用分段变密度方法的结果进行了对比。结果表明:在绝热结构总厚度一定的情况下,优化后冷边界附近的屏间距显著增加,从而降低了冷边界附近的固体导热和热边界附近的辐射换热。对于仅耦合 VCS 的绝热结构,当 VCS 设置在第3层辐射屏时,优化效果最显著,最小热流密度从  $0.2492 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  降至  $0.2088 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,降幅达 16.2%;优化后 VCS 最佳安装位置从第18层调整至第14层,相对位置从 0.51 移至 0.56。当 VCS 内引入仲正转化时,VCS 在第2层辐射屏时优化效果最为显著,热流密度较优化前降低了 22.0%。研究了连续变密度优化方法对绝热性能的影响规律,为多层绝热结构的变密度优化设计提供支撑。

**关键词:** 绝热性能;多层绝热结构;蒸气冷却屏;仲正转化

**中图分类号:** TK91 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202503006 **文章编号:** 0253-987X(2025)03-0057-10

## Continuous Variable Density Optimization and Performance Analysis of Vacuum Multilayer Insulation Structure in Liquid Hydrogen Tanks

LI Ke<sup>1</sup>, XIE Haolin<sup>1</sup>, FENG Li<sup>2</sup>, WEN Jian<sup>1</sup>

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

2. Department of Clean Power Development Project, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710200, China)

**Abstract:** To achieve superior insulation performance of the vacuum multilayer insulation structure in liquid hydrogen tanks, a continuous variable density optimization method is introduced. This method builds upon the existing three-density zones or four-density zones and focuses on refining the spacing arrangement between radiation shield layers. By determining the optimal layer spacing configuration that integrates the vapor-cooled shield (VCS) and incorporates para-ortho conversion within the VCS, this study analyzes the effects of continuous variable density optimization on temperature distribution and heat flux density. A comparative analysis is conducted against the segmented variable density method. The results show that with a constant total thickness of the insulation structure, the spacing between the layers near the cold boundary significantly increases

收稿日期: 2024-08-15。 作者简介: 李科(1992—),男,助理教授;文键(通信作者),女,教授,博士生导师。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(22308273)。

网络出版时间: 2024-12-03

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20241202.1907.004>

after optimization, reducing solid conduction near the cold boundary and radiative heat transfer near the hot boundary. For the insulation structure coupled only with VCS, the optimization effect is most significant when VCS is placed at the 3rd radiation shield layer, reducing the minimum heat flux density from  $0.2492 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  to  $0.2088 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , a decrease of 16.2%. The optimal installation position of VCS shifts from the 18th layer to the 14th layer after optimization, with the relative position changing from 0.51 to 0.56. When para-ortho conversion is introduced within VCS, the optimization effect is most significant when VCS is placed at the 2nd radiation shield layer, reducing the heat flux density by 22.0% compared to before optimization. This study investigates the impact of continuous variable density optimization method on insulation performance, providing support for the design of variable density optimization for multilayer insulation structures.

**Keywords:** insulation performance; multi-layer insulation; vapor cooled shield; para-ortho conversion

氢气作为清洁、可再生、具有高热值的能源载体,是未来能源结构中的重要组成部分<sup>[1-3]</sup>。由于氢的低沸点和低蒸发潜热等特性,其储运方式成为阻碍氢能大规模利用的核心技术瓶颈<sup>[4-5]</sup>。相较于 90 MPa 下的气态氢,液氢的体积密度能够达到其 1.5 倍以上,低温液态储氢技术成为现阶段大规模储氢较为常用的方式<sup>[6-7]</sup>。由于液氢温度与环境温度之间温差极大,在长期储存过程中,液氢储罐必然会因热泄漏而产生蒸发损耗现象,因此高性能绝热结构对于保障液氢的长期稳定储存至关重要<sup>[7-8]</sup>。

高真空多层绝热(MLI)是最有效的被动低温绝热方法之一,它由具备低发射率的辐射屏和低热导率的间隔物组成<sup>[9-10]</sup>。在 MLI 之间放置蒸气冷却屏(VCS),回收液氢储罐自蒸发所产生的低温氢气显热,可进一步提高绝热系统的性能<sup>[11-13]</sup>。Scott<sup>[14]</sup>首先提出 MLI 与 VCS 耦合模型,并对低温氢气的冷能利用进行了理论计算。计算结果表明,采用耦合 VCS 的液氢容器的蒸发速率为未耦合容器的 38%。Li 等<sup>[15]</sup>提出了一种瞬态模型,用于研究液氢储罐中 MLI 和 VCS 的动态热行为,其核心目标在于最大程度地降低蒸气消耗量并尽量延长储罐休眠时间。Zheng 等<sup>[11]</sup>建立的简化热力学模型表明,VCS 在 MLI 中的最佳位置是插入 VCS 后温度变化幅度最显著的位置,该位置下储罐漏热量最小,并且增加 VCS 的数量对于绝热性能提升的效果有限。值得注意的是,液氢罐中排出的低温氢气由于自发转化率慢,其仲氢浓度仍然很高。因此,除了回收显热外,还可以利用仲正转化(PO)过程带走热量。Pedrow 等<sup>[16]</sup>利用仲正转化的潜热耦合 VCS 来提高在轨低温液体推进剂的长期储存能力。Xu 等<sup>[17]</sup>研究了引入不同类型仲正转化方式对绝热性能的影响,发现采用连续转化、单级等温转化和单级绝热转

化,漏热量分别降低了 12.99%、12.99% 和 10.09%。Shi 等<sup>[6]</sup>将仲正转化与 MLI 结合,比单独使用 VCS 时漏热量降低了 11.6%,并建立了统一的相对优化效率准则来评估不同绝热技术的有效性。Meng 等<sup>[18]</sup>和黄奕宁等<sup>[19]</sup>通过建模优化了 VCS 管路中仲正转化器的放置位置,发现将其安置在管路全长的 50% 处可更有效地提高冷却能力。

在诸如太空轨道上的低温推进剂储存等某些特殊领域中,对绝热结构的性能和质量要求极高<sup>[20-21]</sup>。相比于均匀密度分布,变密度多层绝热结构(VDMLI)可有效减少总质量和辐射损失<sup>[22-23]</sup>,这对于低温推进剂在轨长期储存具有吸引力。通过在冷边界增加间隔层并在热边界增加辐射屏的方式,可以进一步提高被动绝热性能<sup>[24]</sup>。VDMLI 由多个不同层密度的区域组成,所以优化其层密度配置成为一个关键问题。Li 等<sup>[8]</sup>在低密度和高密度区域插入辐射屏,经研究发现优化后的热通量相较于均匀层密度降低了 8.6%。余建榕等<sup>[21]</sup>将绝热结构分成 3 个层密度区并列出了不同的密度配置方案,研究表明,当配置为 5、10、15 层/cm 时漏热量最小。冷文莲等<sup>[25]</sup>提出 4 区域层密度分布结构,在总层数一定的情况下尝试了 8 种配置方案,讨论了层密度分布对热流分布的影响。Kang 等<sup>[26]</sup>利用序列二次优化算法对 MLI-VCS 绝热结构的厚度进行优化,发现在 5 Pa 真空压力下,耦合 VCS 后可使 MLI 层数减少 64.2%。Wang 等<sup>[27]</sup>基于逐层模型最大化热阻的方法,找到 VDMLI 分为 3 个密度区时的全局最优配置。Wu 等<sup>[28]</sup>考虑了间隔物、压缩压力、气体压力等因素的影响,并基于贪婪算法建立了广义最优层间距计算模型。

尽管先前的研究在 MLI 和 VCS 的优化上取得了重要进展,但大多局限于将绝热结构分成低、中、

高3到4个密度区的分段层密度优化方法。这种方法需要大量列举和计算分布方案,而且难以保证获得的层间距分布是全局最优的结果。此外,关于耦合蒸气冷却屏和仲正转化的综合优化研究较少。基于此,本文引入一种逐层连续变密度优化算法,在耦合VCS和引入仲正转化的条件下,确定了唯一最优的层间距配置,研究了VCS放置位置和VCS耦合仲正转化对于连续变密度优化结果的影响机制,分析了优化后多层绝热结构中的温度和漏热量分布。

## 1 计算模型

本文在构建液氢储罐绝热结构传热模型时采用了如下假设:①传热过程为稳态;②忽略储罐壁面热阻;③忽略VCS蒸气管道的流动阻力;④VCS蒸气管道出口温度为相邻辐射屏壁面温度;⑤考虑仲正转化时氢气在VCS蒸气管道中与催化剂充分接触,转化效率为100%。

### 1.1 真空多层绝热传热模型

采用逐层热传导模型计算真空多层绝热结构的热量和温度分布,模型考虑了辐射屏之间的辐射换热、残余气体导热及通过间隔材料的固体导热,总的热流密度为

$$q_t = q_s + q_r + q_g \quad (1)$$

$$q_s = \frac{C_1 f k}{\delta} (T_h - T_c) \quad (2)$$

$$\lambda = 0.017 + 7 \times 10^{-6} (800 - T) + 0.228 \ln T \quad (3)$$

$$q_g = C_2 P \alpha (T_h - T_c) \quad (4)$$

$$q_r = \frac{\sigma (T_h^4 - T_c^4)}{1/\epsilon_h + 1/\epsilon_c + 1} \quad (5)$$

式中:  $q_s$  为固体导热热流密度;  $q_g$  为气体导热热流密度;  $q_r$  为辐射换热热流密度;  $T_h$  和  $T_c$  分别为热表面和冷表面的温度;  $C_1$  为经验常数, 设为 0.016;  $C_2$  为与气体种类相关的常数, 残留气体为空气时设为 1.1666;  $f$  为间隔材料与固体材料的相对密度, 设为 0.0085;  $\delta$  为相邻辐射屏之间的实际厚度, 它随层密度的变化而变化;  $\lambda$  为间隔材料的导热系数;  $T$  为辐射屏温度;  $P$  为层间气体压力;  $\alpha$  为热适应系数;  $\sigma$  为玻尔兹曼常数;  $\epsilon_h$  和  $\epsilon_c$  分别为热表面和冷表面的辐射屏发射率, 对于镀铝辐射屏, 发射率取 0.03。

稳态下通过耦合单一蒸气冷却屏和仲正转化的多层绝热结构的热通量分别表示为

$$Q_{t,VCS} = Q_{VCS} + Q_{in} \quad (6)$$

$$Q_{t,VCS-PO} = Q_{VCS-PO} + Q_{in} \quad (7)$$

式中:  $Q_{t,VCS}$ 、 $Q_{t,VCS-PO}$  分别为仅有 VCS 的结构和 VCS 耦合了仲正转化的结构的总漏热量;  $Q_{in}$  为绝热结构进入储罐内的净漏热量;  $Q_{VCS}$ 、 $Q_{VCS-PO}$  分别为 VCS 管道内未填充、填充仲正转化催化剂时低温氢气吸收的热量, 表达式分别为

$$Q_{VCS} = \dot{m} (h_{out} - h_{in}) \quad (8)$$

$$Q_{VCS-PO} = \dot{m} ((h_p^{out} x_p^{out} + h_o^{out} x_o^{out}) - (h_p^{in} x_p^{in} + h_o^{in} x_o^{in})) \quad (9)$$

式中:  $m$  为 VCS 管道内低温氢气的质量;  $\dot{m}$  为质量流量;  $h_{in}$ 、 $h_{out}$  分别为 VCS 管道入口和出口氢的比焓;  $x_o$  和  $x_p$  为正氢和仲氢的质量分数;  $h_o$  和  $h_p$  分别是正氢和仲氢的比焓。

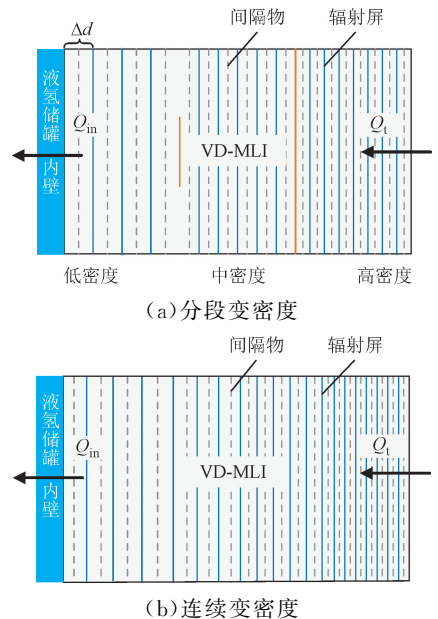
这里假设进入储罐的热量  $Q_{in}$  全部用于使罐内液氢蒸发, 且蒸发的氢气全部进入 VCS 内。其中正氢和仲氢的物性参数参考 REFPROP 数据库计算得到, 并调整 0 K 下的理想仲氢气体作为 0 参考点, 得到焓值为

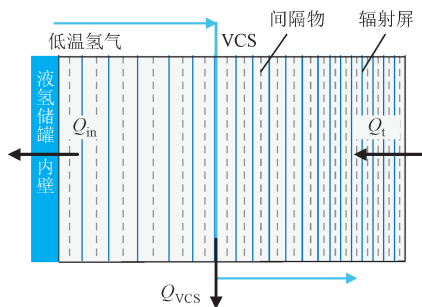
$$h_o = h_o^{RP} + 1\,000 \Delta h_o \quad (10)$$

$$h_p = h_p^{RP} + 1\,000 \Delta h_p \quad (11)$$

式中:  $h_o^{RP}$  和  $h_p^{RP}$  分别为由 REFPROP 默认的参考点得到的正氢和仲氢的焓值, 修正参考点所引入的修正焓  $\Delta h_o$  和  $\Delta h_p$  分别为 444.695、-256.06 kJ · kg<sup>-1</sup>。

图 1 展示了在不同配置下液氢储罐变密度多层绝热结构。图 1(a) 所示为传统分段变密度分布, 采用低、中、高 3 段密度配置, 本文分段层密度设置参考 Shi 等<sup>[6]</sup>的方案, 分别为 16、12、8 层/cm。图 1(b) 所示为本文提出的层密度连续变化分布方案。图 1(c) 基于图 1(b), 引入了低温氢气, 增设了蒸气冷却屏。耦合仲正转化的绝热结构则是在蒸气管中设置了转化器。





(c) 耦合 VCS 连续变密度

图 1 不同配置下液氢储罐变密度多层绝热结构

Fig.1 Schematic diagram of variable density multilayer insulation structures for liquid hydrogen storage tanks under different configurations

## 1.2 逐层最优连续变密度优化模型

真空多层结构的分段变密度设计虽然简化了模型计算,但也限制了优化多样性<sup>[27]</sup>,因此本文使用连续变密度的层密度排布方法,并基于贪婪算法进一步优化真空多层结构的绝热效果。逐层最优连续变密度的优化方法包括多层绝热热流计算模型和逐层最优优化模型。为简要描述方法,首先对关键变量进行定义:多层绝热结构总厚度为  $D$ ;辐射屏层数为  $N$ ;间隔物最小分配单位为  $\Delta d$ ;VCS 耦合辐射屏对应的层编号为  $S_{VCS}$ ;绝热结构层密度分布为  $X_i^k$ ;最优层密度分布为  $X_{opt}^k$ ;漏热热流密度为  $q_i^k$ ;最小漏热热流密度为  $q_{min}$ 。

在求解过程中,假设辐射屏的厚度忽略不计,将初始辐射屏间距均设为最小分配单位。绝热结构的总厚度为  $D$ ,则剩余的间隔物总厚度为  $D - (N - 1)\Delta d$ 。在计算过程中,逐步将剩余的间隔物按最小单位  $\Delta d$  逐层加到多层绝热结构中。在第  $k$  次分配间隔物的过程中,逐层将间隔物插入到辐射屏间隔中。当遍历到第  $i$  个层间间隔时,获得此时层密度分布为

$$\mathbf{X}_i^k = [d_1^{k-1}, d_2^{k-1}, \dots, d_i^{k-1} + \Delta d, d_{i+1}^{k-1}, \dots, d_N^{k-1}] \quad (12)$$

将  $\mathbf{X}_i^k$  代入耦合 VCS 的绝热结构传热模型中,计算得到漏热热流密度为

$$q_i^k = f(T_c, T_h, \mathbf{X}_i^k, D, N, P, S_{VCS}) \quad (13)$$

比较第  $k$  次迭代过程中各个位置处的漏热热流密度  $q_i^k$ ,得到最小漏热热流密度

$$q_{min} = \min\{q_i^k, 1 \leq i \leq N - 1\} \quad (14)$$

由  $q_{min}$  可得到对应的最优层密度分布  $\mathbf{X}_{opt}^k$ 。

以第  $k$  次的最优层密度  $\mathbf{X}_{opt}^k$  为初始层密度,继续第  $k+1$  次层密度的最优布置计算,如此将所有间隔物分配完,最终得到连续变密度情况下唯一且最

优的层密度分布和最小漏热量。图 2 是连续变密度优化过程流程图。

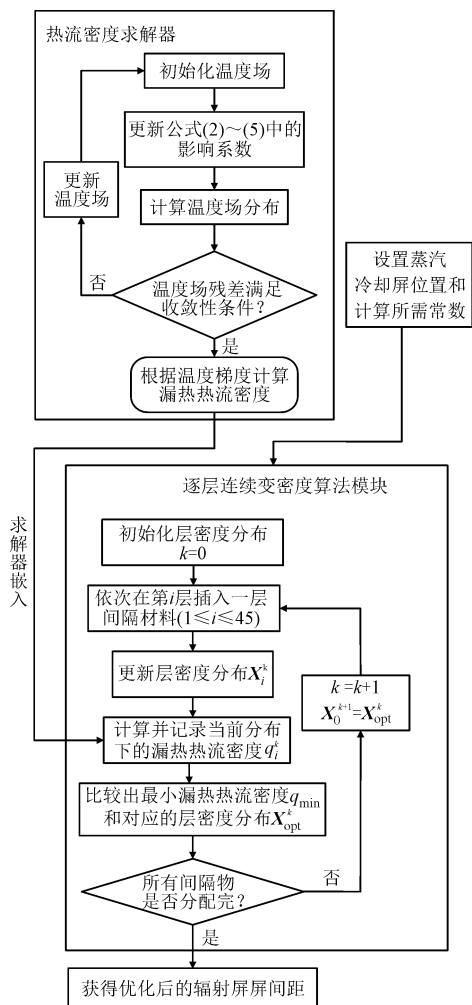


图 2 逐层变密度连续优化计算流程

Fig.2 Continuous layer-by-layer variable density optimization calculation process

## 1.3 模型验证

多层绝热传热计算模型的验证通过将模型计算值与 NASA 在多用途氢试验台上获得的试验数据<sup>[29]</sup>,以及 Wang 等<sup>[27]</sup>获得的温度和热量分布数据进行比较来实现,结果如图 3 所示。在温度分布计算中,NASA 试验工况下多层绝热中的温度分布的模拟值与试验值之间的平均误差为 9.1%,Wang 等在实验工况下的模拟值与实验值之间的平均误差为 11.3%;在热流密度计算方面,NASA 实验工况下的热流密度模拟值与试验值分别为  $0.2264 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $0.2300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,误差为 1.57%。可见,由式(2)~(5)构建的多层绝热传热模型计算得到的多层绝热材料内部的温度分布和热流密度与实验值吻合良好,证明了该模型的准确性。



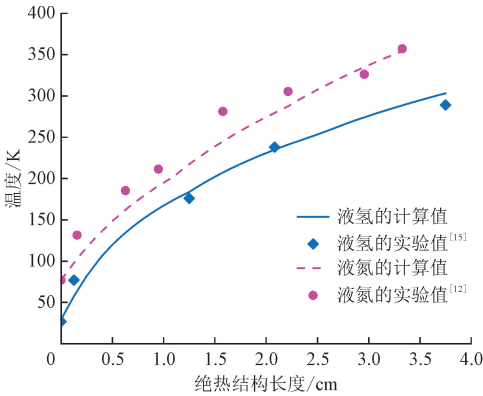


图 3 多层绝热传热模型验证

Fig. 3 Verification of multi-layer insulation heat transfer model

2 结果分析

2.1 耦合 VCS 绝热结构的优化效果

在绝热结构总厚度一定的条件下,本文采用逐层变密度连续优化方法,确定了最小化漏热热流密度的最优辐射屏间距配置。图 4 展示了优化前后 VCS 耦合位置对最小漏热热流密度  $q_{\min}$  及出口温度分布的影响。结果显示,优化前后  $q_{\min}$  随着 VCS 安装位置外移均呈现先减小后增大的趋势,其原因在于:当 VCS 安装在冷边界附近时,管道中氢气的入口和出口温差较小,无法充分利用低温氢气的冷能;而当安装在热边界附近时,VCS 对管壁附近温度梯度影响太小。因此,存在一个最佳屏位,可最大限度地发挥 VCS 的冷却、隔热性能。

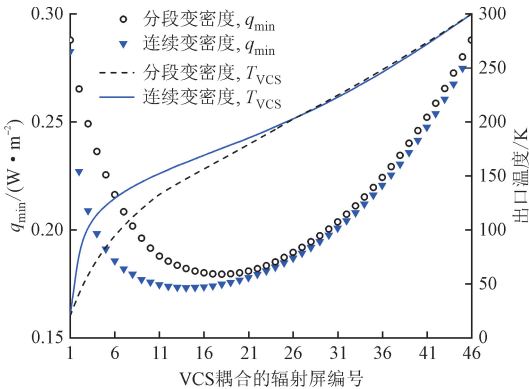


图 4 优化前后 VCS 耦合位置对最小漏热热流密度及出口温度分布的影响

Fig. 4 Influence of VCS position on minimum heat flux and temperature distribution

在所有 VCS 耦合位置,优化后  $q_{\min}$  均低于优化前,且靠近冷边界处的差异更为显著。在第 3 层辐射屏

处, $q_{\min}$  下降幅度最大,达到 16.2%,从  $0.249\ 2\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  降至  $0.208\ 8\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。优化前的最佳 VCS 安装位置在第 18 层辐射屏处,此时 VCS 出口温度为 165.4 K,  $q_{\min}$  为  $0.179\ 4\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ;优化后的最佳位置移至第 14 层,VCS 的温度降为 162.3 K,  $q_{\min}$  为  $0.173\ 1\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,相较优化前降低了 3.5%。此外,在相同辐射屏编号下,优化后 VCS 出口温度普遍高于优化前,尤其在靠近冷壁面附近,这意味着优化后 VCS 可吸收更多热量,低温氢气的冷能利用更为充分。

图 5 呈现了优化前后耦合 VCS 的辐射屏在绝热结构的无量纲位置,其中无量纲位置定义为安装 VCS 的辐射屏到绝热结构内壁面的距离与绝热结构总厚度的比值,归一化便于评估不同绝热结构厚度下的优化效果。当 VCS 所在辐射屏编号小于 28 时,优化后相同编号的辐射屏对应的无量纲位置均大于优化前。在无量纲位置为 51% 处,优化后对应第 10 层辐射屏,而优化前对应第 18 层辐射屏。对比发现,优化后辐射屏在冷边界附近分布更为分散,在靠近热边界处分布则更为紧凑。优化前最佳屏位的无量纲位置为 51%,优化后转移至 56%。尽管最佳屏位对应的辐射屏编号从第 18 层转移到第 14 层,但在绝热结构中的相对位置变化不大。

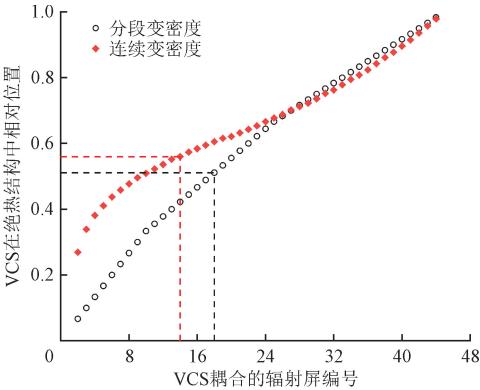
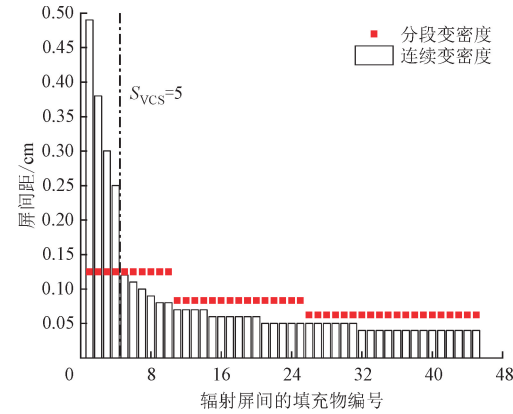


图 5 优化前后耦合 VCS 的辐射屏在绝热结构中的无量纲位置

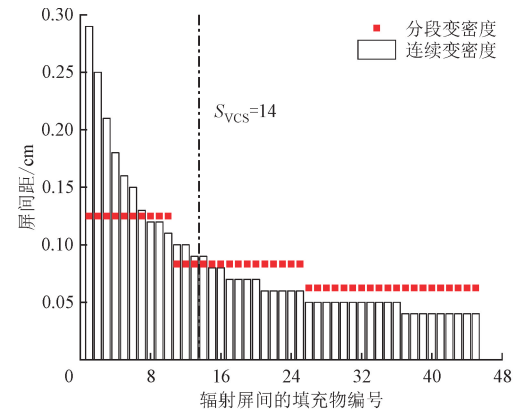
Fig. 5 The dimensionless position of the coupled VCS radiation shield in the insulation structure before and after optimization

图 6 展示了优化前后不同 VCS 耦合位置下的屏间距分布。在优化计算过程中,层间间隔的最小分配单位设为 0.01 cm(考虑到结构物理尺寸和计算精度)。虽然部分区域的层间距仍存在阶梯变化,但突变幅度相较于优化前更小。当 VCS 设置在靠近冷边界的第 5 层辐射屏时,VCS 左边的屏间距显著增大,VCS 耦合位置层间距骤减。当 VCS 设置

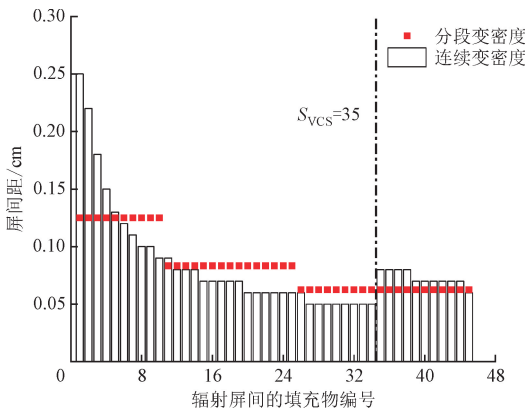
在靠近热边界的第 35 层辐射屏时,VCS 耦合位置层间距突然增加。当 VCS 设置在第 14 层辐射屏处,层间距变化随编号递增而减小,相邻辐射屏层间距变化平滑,没有出现跳跃式变化。



(a)  $S_{VCS}=5$



(b)  $S_{VCS}=14$



(c)  $S_{VCS}=35$

图 6 优化前后不同 VCS 耦合位置下的屏间距分布

Fig. 6 Shield spacing distribution at different VCS coupling positions before and after optimization

图 7 对比了优化前后  $S_{VCS}=14$  时变密度绝热结构热流密度分布。结果表明,VCS 插入位置两侧的固体导热热流和辐射换热热流均出现突变,优化在靠近冷边界处主要体现为固体导热热流的减小,

在靠近热边界处则表现为辐射换热热流的减小。这种差异源于优化后屏间距的变化对固体导热与辐射换热的影响。如图 6(b)所示,优化后绝热结构冷边界处的屏间距增加,而靠近热边界的屏间距减小。

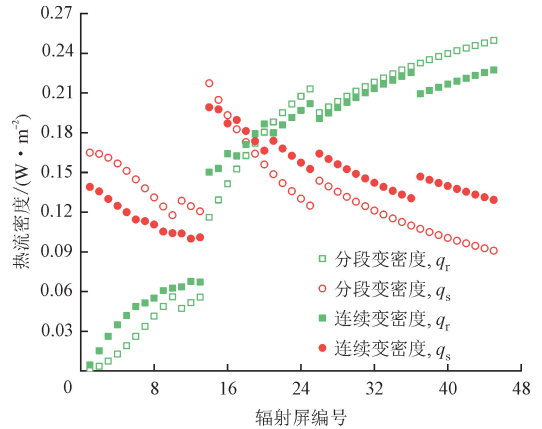


图 7 优化前后  $S_{VCS}=14$  时变密度绝热结构热流密度分布

Fig. 7 Effect of continuous variable density optimization on heat flux distribution of VCS-MLI at  $S_{VCS}=14$  before and after optimization

## 2.2 耦合修正转化的优化效果

图 8 展示了优化前后 VCS-PO 位置对最小漏热热流密度及温度分布的影响。结果显示,在优化前有 PO、优化后无 PO 及优化后有 PO 这 3 种情况下,热流密度随 VCS 耦合位置变化都呈现先减小后增大的趋势。引入修正转化下,优化后的最佳 VCS 安装位置从第 15 层移至第 11 层,  $q_{\min}$  降至  $0.1607 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,较优化前降低了 4.1%,较优化后无修正转化时降低了 7.2%。VCS 设置在第 2 层辐射屏处时优化效果最为显著,  $q_{\min}$  从  $0.2578 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  降至  $0.2010 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,较优化前降低了 22.0%。

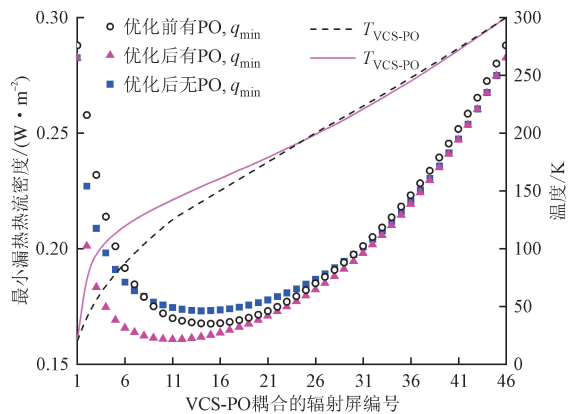


图 8 优化前后 VCS-PO 位置对最小漏热热流密度及温度分布的影响

Fig. 8 Impact of VCS-PO position on minimum heat flux and temperature distribution before and after optimization

VCS 设置第 3 层辐射屏处,引入仲正转化的  $q_{\min}$  下降幅度最大,达到 12.2%,从  $0.2088\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  下降到  $0.1833\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。由此可见,当 VCS 设置在编号较小的辐射屏处时,连续变密度优化和引入仲正转化的效果比高温区更好。这是由于优化后编号较小的辐射屏的屏间距增大,使其在绝热结构中的相对位置向热边界移动,导致 VCS 管道内氢气的入口和出口温差增大,从而有利于增加 VCS 的吸热量。

图 9 比较了优化前后 VCS-PO 辐射屏在绝热结构中的无量纲位置。结果显示,考虑仲正转化时,编号小于 25 的辐射屏在优化后,相同编号的辐射屏在绝热结构中的无量纲位置普遍大于优化前,在靠近冷边界处差异更明显。优化后,无论是否引入仲正转化,绝热结构中辐射屏的位置排布基本一致。但对于编号小于 32 的辐射屏,引入仲正转化后,同一编号的辐射屏在绝热结构中对应的无量纲位置增大,即辐射屏向热边界移动。优化后未引入 PO、优化前引入 PO 及优化后引入 PO 对应最小热流密度的辐射屏位置分别为 14、15、11 层,其对应的无量纲位置为 56%、44%、50%。这表明,变密度优化和引入仲正转化对最佳屏位的位置移动方向影响相反,但整体趋势仍然是优化后冷边界附近的辐射屏间距显著增大,而热边界附近层间距略微减小。

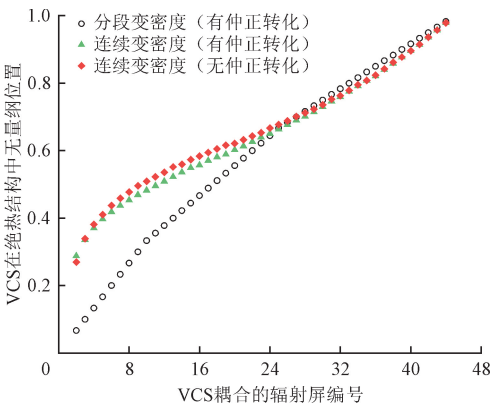


图 9 优化前后 VCS-PO 辐射屏在绝热结构中的无量纲位置  
Fig. 9 Dimensionless position distribution of VCS-PO in the insulation structure before and after optimization

图 10 展示了 VCS 设置在第 3 层辐射屏处,引入仲正转化对最优屏间距分布的影响。结果表明,引入仲正转化后,最优屏间距分布的总体趋势保持不变,主要差异在靠近冷边界的辐射屏的间距减小,热边界附近辐射屏间距保持一致,而 VCS 的安装位置及其后方区域的屏间距略有增大。

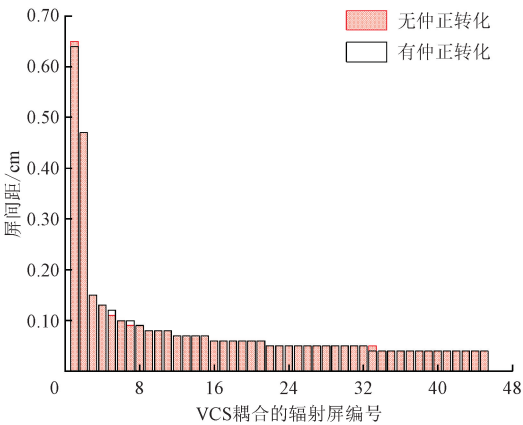
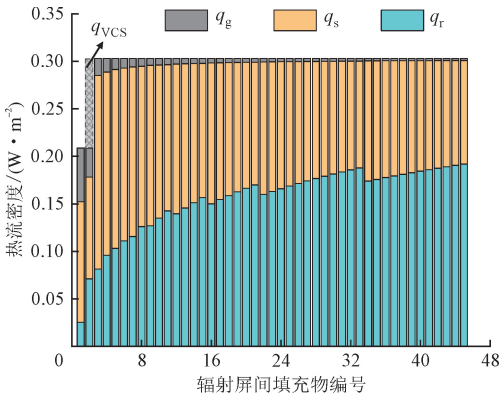
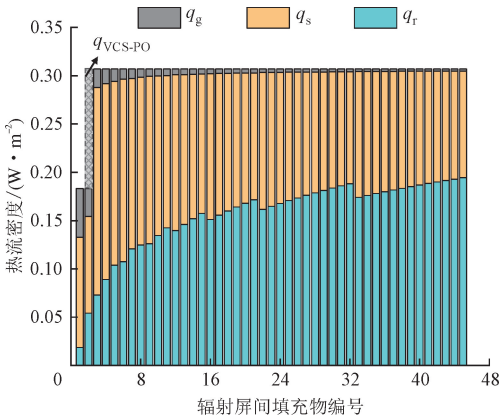


图 10  $S_{\text{VCS}}=3$  时仲正转化对最佳屏间距分布的影响  
Fig. 10 Influence of para-to-ortho conversion on optimal shield spacing distribution at  $S_{\text{VCS}}=3$

2 图 11 展示了仲正转化对连续变密度优化后的绝热结构热流密度分布的影响。从图 11(a)和图 11(b)中可以看出,无论是否引入仲正转化,优化后的绝热结构热流密度分布随蒸气冷却屏插入位置分为



(a) 连续变密度优化后 VCS 未引入仲正转化



(b) 连续变密度优化后 VCS 耦合仲正转化

图 11 仲正转化对连续变密度优化后绝热结构热流密度分布的影响

Fig. 11 Impact of ortho-para conversion on the heat flux distribution of the insulation structure after continuous variable-density optimization

两个变化区域,热流密度变化趋势基本一致。由图 11(b)可以看出:VCS 耦合在第 3 层辐射屏处,引入 PO 后,进入绝热结构的总漏热热流密度从  $0.3032 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  增大到  $0.3071 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,但冷边界附近的固体导热热流密度从  $0.1268 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  降低到  $0.1140 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;在优化和仲正转化的共同作用下,漏入液氢储罐的热流密度从  $0.2088 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  进一步降低至  $0.1833 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

### 3 结 论

本文构建了液氢储罐内多层绝热结构稳态导热模型,以最小化漏热热流密度为优化目标,引入了一种贪婪算法,优化得到了连续变密度的多层绝热结构。讨论了耦合蒸气冷却屏位置和 VCS 内引入仲正转化对连续变密度屏间距以及绝热性能的影响。主要结论如下。

(1)仅耦合 VCS 的绝热结构,优化前后随着 VCS 安装位置向热边界移动,漏热热流密度均呈现先减小后增大的趋势。在所有 VCS 安装位置,优化后的最小漏热热流密度均小于优化前,靠近冷边界处差异更为显著。优化后,VCS 位于第 3 层辐射屏时热流密度下降幅度最大,达到 16.2%,从  $0.2492 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  降至  $0.2088 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

(2)仅耦合 VCS 的绝热结构,优化前的最小热流密度为  $0.1794 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,VCS 位于第 18 层辐射屏;优化后的最小热流密度为  $0.1731 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,VCS 移至第 14 层辐射屏。最佳屏位在绝热结构中的相对位置从 0.51 移动到 0.56。优化后 VCS 出口温度升高,特别在靠近冷边界时效果显著。

(3)引入仲正转化后,变密度优化使 VCS 最佳屏位从第 15 层移至第 11 层,相对位置从 0.44 调整到 0.50;最小热流密度降低至  $0.1607 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,较优化前降低 4.1%,较优化后无仲正转化降低了 7.2%。连续变密度优化和仲正转化的共同作用有效提升了多层绝热结构的性能。

(4)引入仲正转化后,VCS 位于第 2 层辐射屏时,变密度优化效果最为显著,最小热流密度从  $0.2578 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  下降到  $0.2010 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,降幅达 22.0%。当 VCS 耦合在第 3 层辐射屏处,引入仲正转化的效果最好,最小热流密度从  $0.2088 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  下降到  $0.1833 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,降幅为 12.2%。当 VCS 设置在低温区辐射屏时,连续变密度优化和引入仲正转化的效果比在高温区更好。

### 参考文献:

[1] KRASAE-IN S, STANG J H, NEKSA P. Develop-

ment of large-scale hydrogen liquefaction processes from 1898 to 2009 [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(10): 4524-4533.

[2] 丁镠,唐涛,王耀萱,等. 氢储运技术研究进展与发展趋势 [J]. 低碳化学与化工, 2022, 47(2): 35-40.

DING Liu, TANG Tao, WANG Yaoyuan, et al. Research progress and development trend of hydrogen storage and transportation technology [J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2022, 47(2): 35-40.

[3] 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.

[4] 陈晓露,刘小敏,王娟,等. 液氢储运技术及标准化 [J]. 化工进展, 2021, 40(9): 4806-4814.

CHEN Xiaolu, LIU Xiaomin, WANG Juan, et al. Technology and standardization of liquid hydrogen storage and transportation [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(9): 4806-4814.

[5] 徐夏凡,陈六彪,郑建朋,等. 航天器变密度多层绝热变工况漏热特性研究 [J]. 真空与低温, 2020, 26(4): 295-300.

XU Xiafan, CHEN Liubiao, ZHENG Jianpeng, et al. Study on the heat leakage characteristics of spacecraft variable density multilayer under variable operating conditions [J]. Vacuum and Cryogenics, 2020, 26(4): 295-300.

[6] SHI Chaoyue, ZHU Shaolong, WAN Chuancong, 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.

[7] 谢福寿,夏斯琦,朱宇豪,等. 液氢/固氢混合物(氢浆)制备可视化试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(6): 26-33.

XIE Fushou, XIA Siqi, ZHU Yuhao, et al. Visual experimental study on preparation of mixture of liquid hydrogen and solid hydrogen (slush hydrogen) [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(6): 26-33.

[8] LI Kecan, CHEN Jie, TIAN Xueqin, et al. Study on the performance of variable density multilayer insulation in liquid hydrogen temperature region [J]. Energies, 2022, 15(24): 9267.

[9] 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 Ke, WEN Jian, XIN Bipeng. 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.
- [10] 刘展, 厉彦忠, 王磊, 等. 在轨运行低温液氢箱体蒸发量计算与增压过程研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(2): 135-140.
- LIU Zhan, LI Yanzhong, WANG Lei, et al. Evaporation calculation and pressurization process of on-orbit cryogenic liquid hydrogen storage tank [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(2): 135-140.
- [11] ZHENG Jianpeng, CHEN Liubiao, WANG Jue, 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.
- [12] MURTO P J. A gas-shielded storage and transport vessel for liquid helium [C]//Advances in Cryogenic Engineering. Boston, MA: Springer US, 1962: 291-295.
- [13] ZHANG Caigong, LI Changjun, JIA Wenlong, et al. Thermodynamic study on thermal insulation schemes for liquid helium storage tank [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 195: 117185.
- [14] SCOTT R B. 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.
- [15] LI Ke, WEN Jian, XIN Bipeng, et al. Transient-state modeling and thermodynamic analysis of self-pressurization liquid hydrogen tank considering effect of vacuum multi-layer insulation coupled with vapor-cooled shield [J]. Energy, 2024, 286: 129450.
- [16] PEDROW B P, MUNIYAL KRISHNA S K, SHOE-MAKE E D, et al. Parahydrogen-orthohydrogen conversion on catalyst-loaded scrim for vapor-cooled shielding of cryogenic storage vessels [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2021, 35(1): 142-151.
- [17] XU Zhangliang, TAN Hongbo, WU Hao. Performance comparison of multilayer insulation coupled with vapor cooled shield and different para-ortho hydrogen conversion types [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 234: 121250.
- [18] MENG Chuiju, QIN Xujin, JIANG Wenbing, et al. Cooling effect analysis on para-ortho hydrogen conversion coupled in vapor-cooled shield [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(41): 15600-15611.
- [19] 黄奕宁, 梁佳佳, 周振君, 等. 液氢箱蒸气冷却屏/仲-正转化复合结构绝热性能预测 [J]. 真空与低温, 2023, 29(5): 459-468.
- HUANG Yining, LIANG Jiajia, ZHOU Zhenjun, et al. Thermal insulation performance prediction of integrated composite insulation combining VCS with para-orthohydrogen conversion for liquid hydrogen tank [J]. Vacuum and Cryogenics, 2023, 29(5): 459-468.
- [20] 朱浩唯, 黄永华, 许奕辉, 等. 变密度多层绝热的理论分析 [J]. 低温工程, 2011(6): 42-46.
- ZHU Haowei, HUANG Yonghua, XU Yihui, et al. Performance optimization and analysis of variable density multilayer insulation [J]. Cryogenics, 2011(6): 42-46.
- [21] 余建榕, 张强, 康慧芳, 等. 低温推进剂贮箱气冷屏复合绝热结构综合优化设计 [J]. 真空与低温, 2021, 27(2): 165-170.
- YU Jianrong, ZHANG Qiang, KANG Huifang, et al. Comprehensive optimization design of VCS composite thermal insulation structure for cryogenic propellant tank [J]. Vacuum and Cryogenics, 2021, 27(2): 165-170.
- [22] HASTINGS L J, HEDAYAT A, BROWN T M. Analytical modeling and test correlation of variable density multilayer insulation for cryogenic storage [EB/OL]. (2004-05-01) [2024-07-27]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20040121015>.
- [23] 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 Zhangliang, TAN Hongbo, WU Hao. 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.
- [24] 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.
- XIN Bipeng, WEN Jian, LI Ke, et al. Performance analysis of multi-layer insulation for vapor-cooled shield of liquid hydrogen storage tanks [J]. Chemical Engineering(China), 2023, 51(10): 42-47.
- [25] 冷文莲, 王田刚, 王小军, 等. 应用于低温贮箱的变密度多层绝热传热分析 [J]. 低温与超导, 2012, 40(12): 5-8.
- YE Wenlian, WANG Tiangang, WANG Xiaojun, et al. Heat transfer analysis of variable density multi-layer insulation for cryogenic storage tank [J]. Cryogenics

&. Superconductivity, 2012, 40(12): 5-8.

[26] KANG D H, AN Jihong, LEE C J. Numerical modeling and optimization of thermal insulation for liquid hydrogen storage tanks [J]. Energy, 2024, 291: 130143.

[27] 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 (Part 1): 154-163.

[28] WU Shixian, LI Junjie, DING Peizhi, 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.

[29] MARTIN J J, HASTINGS L. Large-scale liquid hydrogen testing of variable density multilayer insulation with a foam substrate [EB/OL]. (2001-06-01) [2024-07-13]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20010063699>.

(编辑 武红江)