

# 液氢气化系统空温式换热器结构设计及性能仿真

江智元<sup>1</sup>, 杨成龙<sup>2</sup>, 屈治国<sup>2</sup>, 唐 颀<sup>3</sup>

(1. 西安交通大学 化学工程与技术学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049;  
3. 中石化湖南石油化工有限公司, 湖南 岳阳 414100)

**摘要:** 本文从传热传质和流体压降的角度开展液氢供给系统中的空温式换热器设计计算和流动换热性能数值仿真, 提出空温式换热器的温度区间离散设计新方法, 构建了跨临界换热过程换热及压降关联式, 在设计工况及相关约束条件下完成空温式换热器整体结构参数设计。同时, 建立了换热器三维流动传热数值仿真模型, 对模型进行合理简化, 开展不同工况下空温式换热器模拟仿真研究, 获得空温式换热器换热过程中流体温度、压降及换热管路温度等参数的变化规律。结果表明: 在空温式换热器实际运行工况下, 所设计的空温式换热器能够完成液氢工质的自增压及气化需求, 通过对比设计计算工况与实际运行工况发现, 换热器中自增压器和气化器的翅片之间存在温度干涉现象, 为空温式换热器的实际工程设计提供指导。

**关键词:** 液氢气化; 换热器设计; 数值仿真

中图分类号: TK02 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2025.04.017

[引用本文格式] 江智元, 杨成龙, 屈治国, 等. 液氢气化系统空温式换热器结构设计及性能仿真[J]. 热能动力工程, 2025, 40(4): 153-161. JIANG Zhiyuan, YANG Chenglong, QU Zhiguo, et al. Structural design and performance simulation of air-temperature heat exchanger for liquid hydrogen gasification system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(4): 153-161.

## Structural Design and Performance Simulation of Air-temperature Heat Exchanger for Liquid Hydrogen Gasification System

JIANG Zhiyuan<sup>1</sup>, YANG Chenglong<sup>2</sup>, QU Zhiguo<sup>2</sup>, TANG Qi<sup>3</sup>

(1. College of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049;  
2. College of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049;  
3. Sinopec Hunan Petrochemical Co., Ltd., Yueyang, China, Post Code: 414100)

**Abstract:** The design and calculation of air temperature heat exchanger in liquid hydrogen supply system and the numerical simulation of flow heat transfer performance were carried out from the view of heat and mass transfer and fluid pressure drop in this paper. A new method for discrete design of temperature interval for air-temperature heat exchangers was proposed, and a correlation between heat transfer phenomena and pressure drop behaviors pertinent to transcritical heat transfer processes was established. The overall structural parameter design of the air-temperature heat exchanger was completed under designated conditions and related constraints. Meanwhile, a three-dimensional numerical simulation model elucidating flow and heat transfer in heat exchangers was established, a judicious simplification of the model was conducted, simulation research on air-temperature heat exchangers under different operating conditions was conducted to obtain the change law of key parameters such as fluid temperature, fluid pressure drop, and heat exchanger tube temperature during heat transfer processes of air-temperature heat exchanger. The re-

收稿日期: 2024-06-07; 修订日期: 2024-12-20

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB4001605)

Fund-supported Project: National Key R&D Program of China (2021YFB4001605)

作者简介: 江智元(1989-), 男, 西安交通大学副教授。

通信作者: 屈治国(1978-), 男, 西安交通大学教授。

sults show that the designed air-temperature heat exchanger effectively fulfills requirements pertaining to self-pressurization and gasification of liquid hydrogen medium under the actual operating conditions of air-temperature heat exchanger. Furthermore, comparative analyses between design calculation scenarios and actual operational conditions unveil instances of temperature interference between the self-pressurizer of heat exchanger and the fins of the gasifier, thereby offering guidance for the practical engineering refinement of air-temperature heat exchanger designs.

**Key words:** liquid hydrogen gasification, heat exchanger design, numerical simulation

引 言

氢能发展不仅能促进经济增长,创造就业,还能显著降低污染排放,有助于应对气候变化,对于推动我国能源结构向清洁、低碳方向转型具有重大意义。同时,氢能的发展还将激励技术创新与产业升级,形成更高效的能源生产与消费体系,增强国家的能源安全与国际竞争力。

液氢作为一种高能量密度、超低温的氢能能源形式,在航空航天<sup>[1-2]</sup>、氢燃料电池汽车<sup>[3-4]</sup>、大规模储能<sup>[5]</sup>和低温冷冻保存<sup>[6]</sup>等多个领域均展现出重要应用价值,其应用前景随着技术进步和成本降低而日益广阔。液氢气化器是液氢应用中的重要装备,其核心功能是将液态氢加热至其气化点以上,使其转化为气态氢气,而液氢气化涉及到导热、对流和相变等多个流动传热过程。液氢气化装置在航空航天、能源、化工工业及交通运输等领域发挥关键作用<sup>[7-8]</sup>,通过将液氢高效转化为气态氢,为火箭发动机、化工生产及氢燃料电池汽车等提供稳定清洁的氢气源。

液氢在空温式气化器中的气化过程涉及液态-跨临界态换热问题。针对跨临界态的换热,Pioro 等人<sup>[9]</sup>对超临界压力下水及二氧化碳的流动阻力进行研究,结果表明,超临界及亚临界状态下强迫对流换热压降的差异与临界点附近工质物性参数的显著变化有关。Lakeh 等人<sup>[10]</sup>对水平管下超临界流体的流动换热现象开展研究,结果表明,超临界压力下流体的换热主要以层流和湍流自然对流换热为主。Gibreel 等人<sup>[11]</sup>基于计算流体力学方法进行了超临界氢燃料在火箭发动机内流动的研究,结果表明,超临界氢在换热过程中物性变化较为明显,且超临界氢在换热器内的换热性能与液态换热有着较大的区

别。黄文等人<sup>[12]</sup>研究了超临界状态下航空煤油在 U 型管内的流动阻力特性,结果表明,计算获得的超临界态和跨临界态压降相较实际测量值偏小,因此对压降关联式进行了修正。薛立鹏等人<sup>[13]</sup>基于集总参数方法对超临界氢增压系统进行建模、分析与优化设计,给出了储罐内温度、密度等物性参数随时间的变化规律以及整体增压系统的优化设计方案,对超临界增压过程的系统级研究做出贡献。Xie 等人<sup>[14]</sup>对超临界氢在小型冷却通道内的流动换热特性开展研究,利用三维数值仿真模型分析流动过程中超临界氢局部努塞尔数等参数,改进超临界氢流动过程中压降关联式,较好地解释了超临界氢在流动过程中的流动换热特性。Wang 等人<sup>[15]</sup>基于计算流体力学方法对以超临界氢为制冷剂的空气-制冷剂翅片管换热器的换热性能进行研究,分析流动状态、重力及抑制热传导对超临界氢制冷剂换热器的影响,结果表明,在超临界氢气换热器中,努塞尔数达到一定数值时,超临界氢气换热器换热管中出现局部传热恶化现象,对超临界氢气换热器的换热性能有较大影响。为增强超临界氢气换热器性能,采取超临界氢气由高向低流动的方式,这种布置方式能够更好地利用空气热源,避免出现超临界氢气换热器中局部传热恶化的现象。目前,已有针对简单换热结构内的跨临界流动开展研究,获得流动换热规律,但尚未将相关规律应用于液氢气化过程真实换热结构设计中。

本文以典型液氢供氢系统空温式换热器结构设计及传热特性为研究对象,开展换热器设计计算和换热过程三维数值仿真。针对传统空间离散策略计算误差大的缺陷,提出了空温式换热器的温度区间离散设计新方法,构建了跨临界换热过程换热及压降关联式,实现液氢管内流动传热的高精度与高效计算,完成空温式换热器的整体结构参数设计。同

时,建立三维数值仿真模型,开展不同工况下空温式换热器的模拟仿真,完成不同工况下空温式换热器的换热特性分析。

1 螺旋翅片管型空温式换热器一维设计

1.1 换热器设计方法

图 1(a) 为典型液氢供氢系统示意图,该系统由液氢储罐、空温式换热器和水浴式气化器等部件组成。供氢系统工作过程中,液氢从液氢储罐中流出,先进入气化器进行自增压,然后进入水浴式气化器完成气化流程。空温式换热器分为自增压器和气化器如图 1(b) 所示,空温式换热器换热流程如图 1(c) 所示。

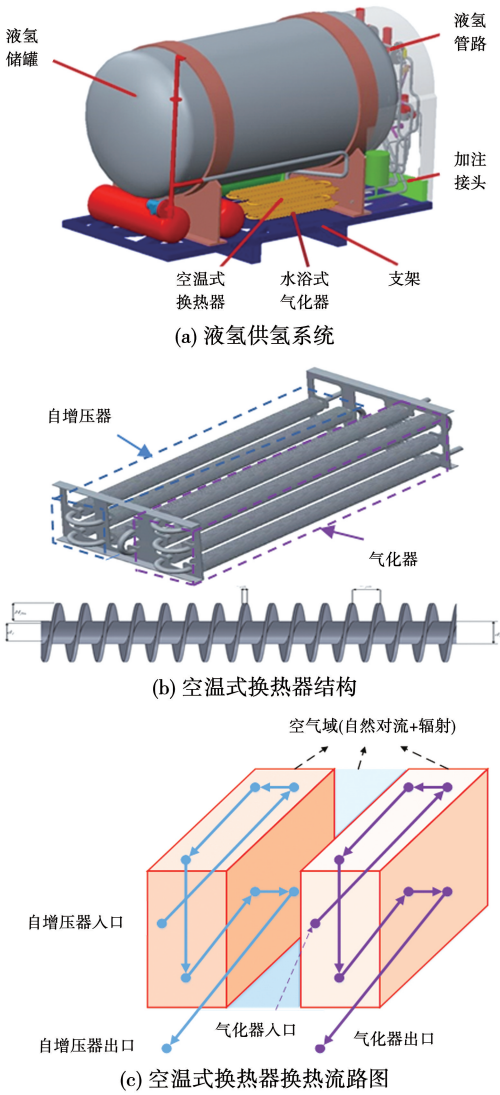


图 1 液氢供氢系统及空温式换热器示意图  
Fig.1 Schematic diagrams of liquid hydrogen supply system and air-temperature heat exchanger

1.1.1 物理模型构建

螺旋翅片管型空温式换热器是一种通过外接螺旋翅片来有效增加空气侧换热面积以期实现内外换热匹配及熵流优化的换热器。本研究中,自增压器和气化器液氢入口温度均为 26 K,空温式自增压器换热温度约为 26 ~ 90 K,空温式气化器换热温度约为 26 ~ 50 K,出口温度均高于氢气临界温度点 (33.145 K)。

在空温式换热器管内液氢转变为超临界氢气状态,空温式换热器管外温度为 298.15 K,为自然对流换热。空温式换热器换热过程包括螺旋翅片管外为自然对流换热,管内换热为氢由液态到超临界的跨临界对流换热问题。

空温式换热器管内液氢转变到超临界氢气的跨临界换热过程十分复杂,为空温式换热器设计计算带来较大困难,而传统换热器分相分区模型不适用于空温式换热器设计计算。为此,本文提出一种用于跨临界氢气空温式换热器的温度区间离散方法,并建立一维稳态分布的数学模型,如图 2 所示。

在温度区间离散设计方法中,将空温式换热器温度设计区间分成若干个计算单元,假设每个温度区间内换热量相等,根据焓值换热关系式计算得到每个温度区间对应的温差,在足够小的计算单元内,可视氢的物性为常物性。由于跨临界氢物性受温度影响显著,传统的空间离散策略中存在小体积内较大温度梯度导致的物性参数估计误差,而物性参与换热过程计算,从而影响温度计算,进一步加大误差。本文将温度离散策略进行等温差区间处理,对跨临界区域的空间网格进行加密,从而避免离散空间温度与物性耦合剧烈变化引起计算困难。此外,计算单元离散段内采用平均物性参数计算热平衡关系,所产生的计算误差较小,无需进行传统换热器多区设计模型计算中反复迭代获取平均物性的过程,提高计算效率。本文提出的跨临界温度区间离散设计一维模型,对于物性随温度变化显著的流体,可确保具有较好的计算精度与效率,能够有效减小换热器设计中的误差。

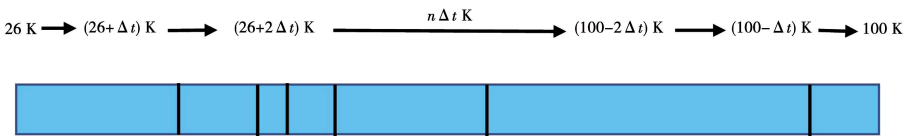


图 2 温度区间离散设计方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of discrete design method for temperature intervals

1.1.2 基本假设

基于上述物理换热问题及分析,对螺旋翅片空温式换热器的设计计算做出以下基本假设:(1) 假设换热过程为稳态,不考虑氢及空气各点参数和流量的时间变化;(2) 假设氢流动仅为为一维过程,即假设在任一截面上温度压力均匀分布,同时保持同一物性;(3) 假设空气在管外为单相自然对流换热过程,不考虑结冰和结霜现象引起的传热恶化;(4) 假设管内不存在液相与超临界段共存段,且不考虑实际存在共存段的换热现象;(5) 假设单管外侧空气自然对流换热性能不随管长变化,将三维回返管路视为一维管长且除管内氢温度及物性变化外没有区别的换热过程;(6) 每个换热区段换热量相等。

1.1.3 计算方法

按照氢气流动方向对计算单元进行划分,将空温式换热器的温度设计区间划分为  $n$  个计算单元,每个计算单元的参数传递如图 3 所示。其中,  $T_{i-1}$  和  $p_{i-1}$  为  $i-1$  节点的温度和压力,  $T_{i+1}$  和  $p_{i+1}$  为  $i+1$  节点的温度和压力。每个计算单元温度跨度足够小,从而避免因物性剧烈变化产生的换热器设计误差。确定空温式换热器的设计方法及基本假设后,空温式换热器的设计思路如图 4 所示。首先根据体积要求设计翅片结构,然后根据氢流量以及空温式自增压器及空温式气化器的进出口温度,对该温度区间进行离散,求解各离散区域的热平衡方程,最后累加获得总管长并计算管内压降。

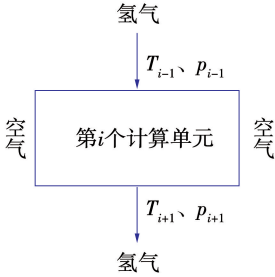


图 3 计算单元示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a computational unit

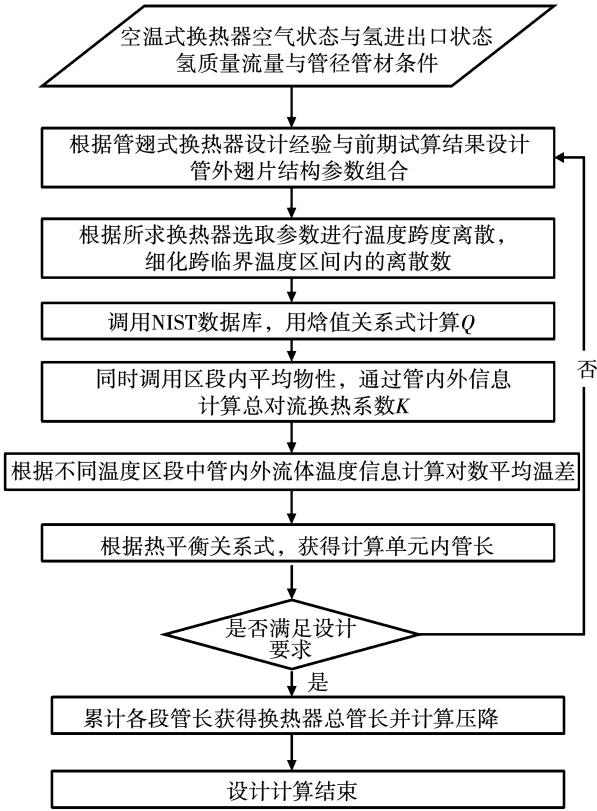


图 4 空温式换热器设计流程图

Fig. 4 Air-temperature heat exchanger design flowchart

1.2 螺旋翅片型空温式换热器设计计算关联式

1.2.1 计算单元换热关联式

第  $i$  个计算单元热平衡关系式为:

$$Q_i = K_i A_i (\Delta T_m)_i \quad (1)$$

式中:  $Q_i$ —空温式换热器第  $i$  段换热量, W;  $K_i$ —空温式换热器第  $i$  段总传热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $A_i$ —第  $i$  段空温式换热器换热面积,  $m^2$ ;  $(\Delta T_m)_i$ —第  $i$  段空温式换热器对数平均温差, K。

热力学定义中,换热器换热量可由控制体进出口焓差乘以质量流量进行计算,温度离散区间内第  $i$  个计算单元换热量为:

$$Q_i = q_m [H_{i+1}(T_{i+1}, p_{des}) - H_i(T_i, p_{des})] \quad (2)$$

式中:  $q_m$ —液氢质量流量, kg/s;  $H_{i+1}$ —空温式第  $i+1$

段氢出口焓值, J/kg;  $H_i$ —空温式第  $i$  段氢进口焓值, J/kg;  $T_{i+1}$ —空温式换热器第  $i+1$  段氢气出口温度, K;  $T_i$ —空温式换热器第  $i$  段氢气出口温度, K;  $p_{des}$ —空温式换热器设计压力, Pa。

空温式换热器管外为自然对流换热, 对于每个计算单元对数平均温差, 计算过程中可假定管外每个温度区间内空气侧进出口温度不变, 如下所示:

$$(\Delta T_m)_i = \frac{(T_a - T_{i+1}) - (T_a - T_i)}{\ln[(T_a - T_{i+1})/(T_a - T_i)]} \quad (3)$$

式中:  $T_a$ —空温式换热器换热管外空气温度, K。

对于  $A_i$  给出以下定义式:

$$A_i = (\pi d_1) l_i \quad (4)$$

式中:  $d_1$ —空温式换热器换热管内径, m;  $l_i$ —空温式换热器第  $i$  个计算单元换热管路长度, m。

### 1.2.2 计算单元总换热系数

空温式换热器存在翅片强化传热结构, 因此本文采用肋效率与扩展面积的方式建模计算空温式换热器计算单元总传热系数  $K$ , 总传热系数  $K$  定义式为:

$$K = \left( R_f + \frac{1}{h_{in}} + \frac{d_1}{\lambda_{wa}} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{\eta \beta_0 h_{out}} \right)^{-1} \quad (5)$$

式中:  $R_f$ —污垢热阻,  $R_f = 0.002 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ;  $h_{in}$ —管内对流传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $d_2$ —空温式换热器换热管外径, m;  $\eta$ —肋效率;  $\beta_0$ —扩展面积比;  $h_{out}$ —管外对流传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $\lambda_{wa}$ —壁面导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

扩展面积比  $\beta_0$  做出以下定义为:

$$\beta_0 = \frac{d_2 + H_{fin} \left( 2 \frac{d_{fin}}{D_{fin}} + \frac{d_2 + H_{fin}}{D_{fin}} \right)}{d_1} \quad (6)$$

式中:  $H_{fin}$ —螺旋翅片高度, m;  $D_{fin}$ —螺距, m;  $d_{fin}$ —螺旋翅片宽度, m。

肋效率  $\eta$  定义为:

$$\eta = Y \left[ 0.45 (T - 1) \ln \left( \frac{2H_{fin}}{d_2} + 1 \right) + 1 \right] \quad (7)$$

肋效率定义式中的  $Y$  定义为:

$$Y = \eta_0 (0.7 + 0.3 \eta_0) \quad (8)$$

$Y$  定义中的  $\eta_0$  定义为:

$$\eta_0 = \frac{\text{th}(mH'_{fin})}{mH'_{fin}} \quad (9)$$

$m$  及  $H'_{fin}$  定义为:

$$m = \sqrt{\frac{2h_{out}}{\lambda_{wa} d_{wa}}} \quad (10)$$

$$H'_{fin} = H_{fin} + d_2/2 \quad (11)$$

式中:  $d_{wa}$ —换热器管路厚度, m。

### 1.2.3 计算单元换热管内传热系数 $h_{in}$

空温式换热器管内侧对流换热过程包括液相与超临界态两个主相, 液相向超临界相转换过程中不存在跨临界潜热, 因此管内不存在明显的跨临界相区, 管内换热问题是液相区和超临界区两相的对流换热过程, 可视为物性急剧变化的单相流动换热过程, 因此跨临界换热过程可采用修正后的 Dittus-Boelter 公式描述:

$$Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \left( \frac{T_f}{T_w} \right)^{0.5} \quad (12)$$

式中:  $T_f$ —换热器管内流体温度, K;  $T_w$ —换热器管路内壁面温度, K。

无量纲数  $Nu_f$ ,  $Re_f$  和  $Pr_f$  定义为:

$$Nu_f = h_{in} \cdot (\lambda_f / l_{in})^{-1} \quad (13)$$

$$Re_f = \rho_f u_f D_e / \mu_f \quad (14)$$

$$Pr_f = \nu_f / \alpha_f \quad (15)$$

式中:  $h_{in}$ —管内传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $\lambda_f$ —氢气导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $l_{in}$ —换热管内特征长度, m;  $\rho_f$ —氢气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $u_f$ —氢气平均速度, m/s;  $D_e$ —当量直径, m;  $\mu_f$ —氢气动力粘度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\nu_f$ —氢气运动粘度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\alpha_f$ —氢气热扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

### 1.2.4 计算单元换热管外对流传热系数 $h_{out}$

管外自然对流换热关联式为:

$$Nu_a = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr_a)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (16)$$

瑞利数  $Ra$  定义为:

$$Ra = \frac{g \beta_a L_a^3}{\nu_a^2} \cdot \Delta T \cdot \frac{\nu_a}{\alpha_a} \quad (17)$$

式中:  $g$ —重力加速度, m/s;  $\beta_a$ —空气热膨胀系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $L_a$ —换热管外特征长度, m;  $\nu_a$ —空气运动粘度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\alpha_a$ —空气热扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

流体上下边界温差  $\Delta T$  给出以下定义为:

$$\Delta T = |T_o - T_a| \quad (18)$$

式中:  $T_o$ —换热管路外壁面温度, K。

辐射传热过程的等效传热系数计算则基于将管材视为灰体, 套用灰体辐射的 Stefan-Boltzmann 定理计算, 管外辐射传热系数表达式为:

$$h_{\text{R}} = \varepsilon_{\text{f}} \sigma_{\text{b}} \frac{T_{\text{a}}^4 - T_0^4}{T_{\text{a}} - T_0}$$

(19)

式中: $h_{\text{R}}$ —辐射传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $\sigma_{\text{b}}$ —Stefan-Boltzmann 常数,  $\sigma_{\text{b}} = 5.670\,373 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $\varepsilon_{\text{f}}$ —发射率,  $\varepsilon_{\text{f}} = 0.98$ 。

1.2.5 压降关联式

对于换热器管内液氢及超临界氢气压降的计算,采用压降与摩擦因子的关系式:

$$\Delta p = f \frac{l_i}{d_i} \rho_{\text{f}} \frac{u_{\text{f}}^2}{2}$$

(20)

式中: $\Delta p$ —管内压降, Pa。

对于摩擦因子 $f$ ,给出以下计算式:

$$f = \begin{cases} \frac{64}{Re_{\text{f}}}, & Re_{\text{f}} < 2\,320 \\ \frac{32}{Re_{\text{f}}} + \frac{0.158\,2}{Re_{\text{f}}^{0.25}}, & 2\,320 \leq Re_{\text{f}} < 4\,000 \\ \frac{0.316\,4}{Re_{\text{f}}^{0.25}}, & 4\,000 \leq Re_{\text{f}} < 10^5 \\ 0.003\,2 + 0.221 Re_{\text{f}}^{-0.237}, & 10^5 \leq Re_{\text{f}} < 3 \times 10^6 \end{cases}$$

(21)

换热管路总管长计算式:

$$L = l_1 + l_2 + \cdots + l_i$$

(22)

式中: $L$ —空温式换热器换热管路总管长, m。

2 空温式换热器数值仿真

为了研究不同液氢及循环水流量对空温式换热器换热性能的影响,结合设计计算中获得的结构参数以及实际换热器结构,对模型进行合理简化,得到如图 5 所示的三维全尺寸换热器模型,作为计算域进行研究。

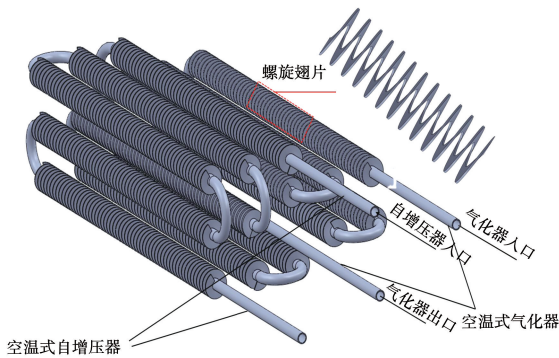


图 5 换热器三维模型

2.1 输入参数

螺旋翅片管型空温式换热器的设计计算需要已知参数及待求参数,空温式换热器的已知参数包括氢入口状态及出口状态、空气状态、液氢流量等参数,待求参数包括螺旋翅片结构及空温式自增压器和气化器的管排数和管长,已知参数如表 1 所示,待求参数包括螺旋翅片结构、换热器管长和管排数。

表 1 空温式换热器设计计算参数

Tab.1 Air-temperature heat exchanger design calculation parameters

| 参 数                                  | 空温式自增压器         | 空温式气化器          |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|
| 氢入口压力/MPa                            | 1.65            | 1.65            |
| 氢入口温度/K                              | 26              | 26              |
| 氢出口压力/MPa                            | 1.65            | 1.65            |
| 氢出口温度/K                              | 90              | 50              |
| 管外空气温度/K                             | 298.15          | 298.15          |
| 液氢流量/ $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ | 1.5             | 5.0             |
| 空温式换热器尺寸/mm                          | 990 × 450 × 250 | 990 × 450 × 250 |

2.2 边界条件

空温式气化器入口均设为质量入口边界条件,入口温度均为 26 K。空温式换热器出口均设为压力出口边界条件,空温式气化器氢气出口回流温度设为 50 K,空温式自增压器氢气出口回流温度设为 90 K,空气域四周墙壁温度设为 288.15 K。

2.3 数值求解方法

基于 ANSYS Fluent 软件对数值模型进行求解。结合空温式换热器实际工作环境及上述边界条件选择合适模型,湍流模型选用 Realizable  $k - \varepsilon$  模型,压力 - 速度耦合算法选择 Coupled 算法,压力、动量方程的空间离散方法选择二阶迎风,湍流耗散方程的空间离散选择一阶迎风。计算过程中,设置迭代步数,并对空温式换热器氢气出口温度进行监测,设置监测曲线,查看空温式换热器氢气出口温度在计算过程中是否达到稳定,以观察计算是否收敛。

3 结果分析

3.1 换热器一维设计计算结果

利用空温式换热器设计计算程序,共计算得到 15 种螺旋翅片高度及螺旋翅片螺距组合下的结构

Fig.5 Three-dimensional model of a heat exchanger

参数,如表 2 所示。考虑到空温式换热器的尺寸设计体积要求以及空温式自增压器与空温式气化器间的换热干涉现象,选取螺旋翅片高度 17.5 mm、螺旋

翅片螺距 15 mm 为最终空温式换热器结构参数,将设计得到的空温式换热器结构参数汇总如表 3 所示。

表 2 不同螺旋翅片高度与螺距结构下程序计算结果

Tab. 2 Calculation results of the program with different helical fin heights and pitches

| 翅高/mm | 螺距/mm | 增压器管长/m | 气化器管长/m | 增压器管数 | 气化器管数  | 翅片管总直径/mm | 总管数 |
|-------|-------|---------|---------|-------|--------|-----------|-----|
| 25    | 20    | 4.108   | 7.801   | 4.235 | 8.043  | 72        | 14  |
| 22.5  | 20    | 4.346   | 8.310   | 4.480 | 8.567  | 67        | 14  |
| 20    | 20    | 4.628   | 8.913   | 4.771 | 9.188  | 62        | 15  |
| 17.5  | 20    | 4.962   | 9.627   | 5.115 | 9.925  | 57        | 16  |
| 15    | 20    | 5.358   | 10.476  | 5.524 | 10.800 | 52        | 17  |
| 25    | 17.5  | 3.808   | 7.157   | 3.925 | 7.378  | 72        | 12  |
| 22.5  | 17.5  | 4.035   | 7.643   | 4.159 | 7.879  | 67        | 13  |
| 20    | 17.5  | 4.306   | 8.223   | 4.439 | 8.478  | 62        | 14  |
| 17.5  | 17.5  | 4.631   | 8.919   | 4.774 | 9.195  | 57        | 15  |
| 15    | 17.5  | 5.021   | 9.754   | 5.177 | 10.056 | 52        | 17  |
| 25    | 15    | 3.486   | 6.469   | 3.594 | 6.669  | 72        | 11  |
| 22.5  | 15    | 3.699   | 6.924   | 3.814 | 7.138  | 67        | 12  |
| 20    | 15    | 3.956   | 7.473   | 4.078 | 7.705  | 62        | 13  |
| 17.5  | 15    | 4.267   | 8.139   | 4.399 | 8.390  | 57        | 14  |
| 15    | 15    | 4.645   | 8.949   | 4.789 | 9.226  | 52        | 15  |

表 3 空温式换热器结构参数表

Tab. 3 Air-temperature heat exchanger structure parameter table

| 参 数                  | 空温式自增压器 | 空温式气化器 |
|----------------------|---------|--------|
| 换热管路内径 $d_1$ /mm     | 22      | 22     |
| 换热管路外径 $d_2$ /mm     | 24      | 24     |
| 螺旋翅片高度 $H_{fin}$ /mm | 17.5    | 17.5   |
| 螺旋翅片厚度 $d_{fin}$ /mm | 2       | 2      |
| 螺旋翅片螺距 $D_{fin}$ /mm | 15      | 15     |
| 总长度 $L$ /m           | 4.267   | 8.139  |
| 直管数目                 | 5       | 9      |

3.2 数值计算结果

基于空温式换热器的设计计算工况开展三维数值仿真。图 6 为空温式换热器设计计算工况温度云图。由图 6(a)可以看出,氢气进入空温式换热器后温度快速升高,在空温式增压器及空温式气化器后半段温度上升较慢。这是因为空温式换热器换热管路中前半段液氢与外界温度的温差大于后半段氢气与外界温度的温差,换热驱动力更大,且超临界温度

前液氢的比定压热容小于超临界温度后的比定压热容,因此换热管路内前半段氢气上升同样的温度所吸收的热量大于后半段所吸收的热量。由图 6(b)可以看出,空温式换热器中间截面处同一位置空温式增压器换热管路内氢气温度高于空温式气化器温度。这是因为空温式气化器内换热管路中液氢流量大于空温式增压器内换热管路中液氢流量,因此空温式气化器内氢气上升同一温度差所吸收的热量大于空温式自增压器中氢气吸收的热量。但从图 6(c)可以看出,同一水平面上空气的温度范围大致相同,竖直面上空气呈现温度分层现象,这是因为随着空气与空温式换热器内的氢气发生换热,空温式换热器附近的空气温度下降密度变大发生下沉现象。由图 6(d)可以看出,空温式换热器螺旋翅片最高温度为 102.2 K,温度较低,因此空温式换热器在使用过程中翅片表面会出现结霜现象,冬季在我国北方地区现象更加明显,结霜现象会影响空温式换热器的换热效率,导致空温式气化器的氢气出口温度以及空温式自增压器的氢气出口温度

低于气化要求和增压要求,从而影响供氢系统的正常工作。

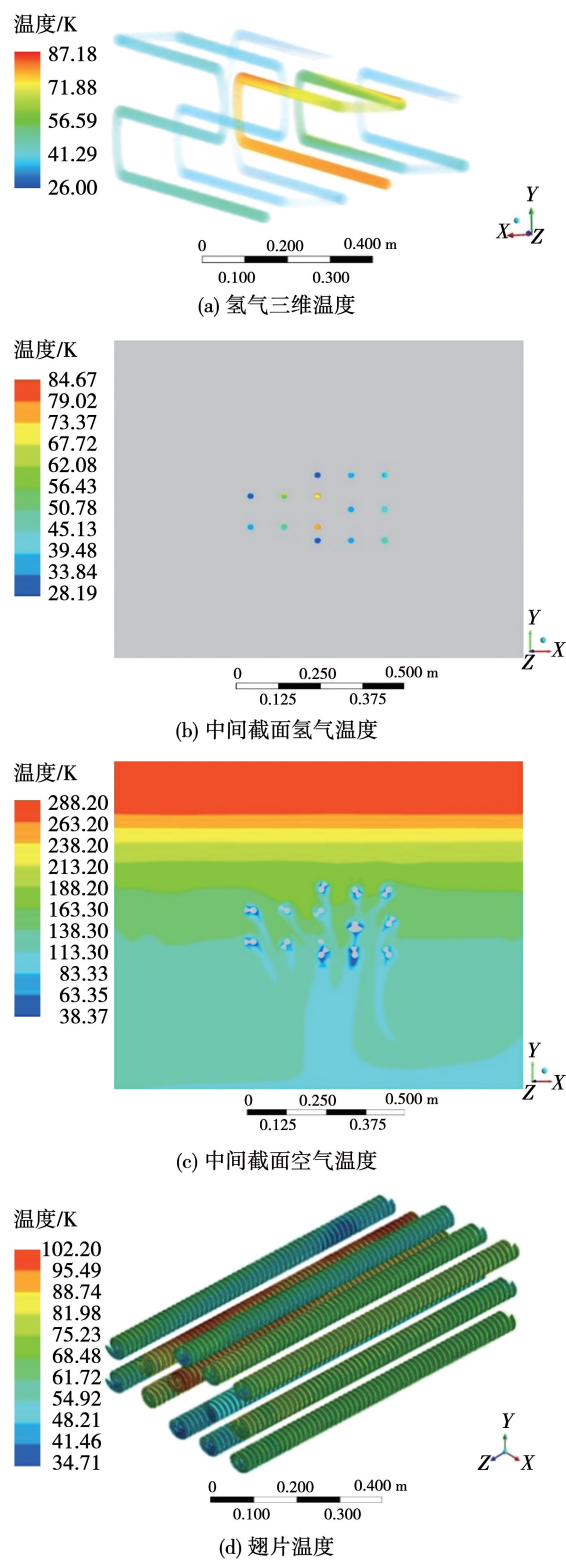


图6 空温式换热器设计计算工况温度云图

Fig.6 Cloud diagrams of air-temperature heat exchanger design calculation working condition temperature

在空温式设计计算工况条件下,空温式增压器氢气出口温度为81.2 K,空温式气化器的氢气出口温度为49.6 K,相较空温式换热器设计计算温度而言,空温式增压器出口温度误差较大。原因主要为以下两点:一是空温式换热器设计计算时,假设空温式换热器管路为单一直管,未充分考虑空温式换热器螺旋翅片间的温度干涉现象;二是空温式换热器设计计算时将自然对流工质定为288 K,从空温式换热器模拟仿真结果看,空温式换热器附近温度低于288 K,因此仿真模拟计算中空温式换热器换热管路内外温差小于设计计算中空温式换热器换热管路内外温差,出现模拟仿真计算出口温度低于空温式换热器设计计算温度的现象。针对换热器中的温度干涉现象,应合理设计自增压器和气化器的管排排布形式,合理布置空气入口方向。此外,可通过增加空气导流和阻隔装置,降低两段换热器出口温差引起的管外热干涉,提升换热器换热效果。

4 结 论

- (1) 对于液氢供氢系统空温式换热器的设计计算问题,可采取跨临界温度区间离散方法进行设计计算,该方法可有效避免因跨临界换热过程中物性变化剧烈带来设计计算误差较大的问题,从而实现跨临界空温式换热器高精度、高效率的设计计算工作。
- (2) 通过对空温式换热器的数值模拟计算,得到空温式换热器换热过程中流体温度、流体压降及换热管路温度等参数的变化规律。在空温式换热器设计计算工况下,空温式自增压器及空温式气化器的氢气出口温度低于空温式换热器的设计计算温度,为空温式换热器的设计计算提供指导。
- (3) 在空温式换热器实际运行工况下,空温式换热器能够完成自增压及气化需求,通过将设计计算工况与实际运行工况进行对比,发现空温式自增压器及空温式气化器翅片之间存在温度干涉现象,为空温式换热器的实际工程设计计算提供一定指导。

参考文献:

[1] 陈潇萍,王剑锋,张虹,等.液氧液氢发动机领域知识图谱构建与应用[J].北京航空航天大学学报,2022,50(3):821-830.

CHEN Xiaoping, WANG Jianfeng, ZHANG Hong, et al. Construction and application of knowledge graph in LOX/LH<sub>2</sub> engine domain[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(3): 821 – 830.

[2] 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.

[3] 万 钢. 以新能源汽车创新引领加快向汽车强国迈进的步伐[J]. 高科技与产业化, 2024, 30(3): 24 – 27.

WAN Gang. To lead the innovation of new energy vehicles to accelerate the pace of automobile power[J]. High-Technology and Commercialization, 2024, 30(3): 24 – 27.

[4] 朱 刚. “双碳”目标下燃料电池汽车产业发展思考[J]. 上海节能, 2024(2): 182 – 186.

ZHU Gang. Thoughts on development of fuel cell vehicle industry under "double carbon" goal[J]. Shanghai Energy Saving, 2024(2): 182 – 186.

[5] 张 震, 解 辉, 苏嘉南, 等. "碳中和"背景下的液氢发展之路探讨[J]. 天然气工业, 2022, 42(4): 187 – 193.

ZHANG Zhen, XIE Hui, SU Jianan, et al. Development of liquid hydrogen under the background of carbon neutrality [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(4): 187 – 193.

[6] 王国聪, 徐则林, 多志丽, 等. 混合制冷剂氢气液化工艺优化[J]. 东北电力大学学报, 2021, 41(6): 61 – 70.

WANG Guocong, XU Zelin, DUO Zhili, et al. Optimization of mixed refrigerant hydrogen liquefaction process [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2021, 41(6): 61 – 70.

[7] 张林海, 丁学强, 张 新, 等. 储氢技术研究现状及进展[J]. 中外能源, 2024, 29(4): 17 – 27.

ZHANG Linhai, DING Xueqiang, ZHANG Xin, et al. Research status and progress of hydrogen storage technologies [J]. Sino-Global Energy, 2024, 29(4): 17 – 27.

[8] 李昆鹏, 徐 鹏, 沈兵权, 等. 液氢储运技术及标准化[J]. 化学工程与装备, 2023(1): 177 – 179.

LI Kunpeng, XU Peng, SHEN Bingquan, et al. Liquid hydrogen storage and transportation technology and standardization [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2023(1): 177 – 179.

[9] PIORO I L, DUFFEY R B, DUMOUCHEL T J. Hydraulic resistance of fluids flowing in channels at supercritical pressures (survey) [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 231(2): 187 – 197.

[10] LAKEH R B, LAVINE A S, KAVEHPOUR H P, et al. Effect of laminar and turbulent natural convection in thermal storage using supercritical fluids [J]. Numerical Heat Transfer-Part A, 2013, 64(12): 955 – 973.

[11] GIBREEL M, ZHANG X, ELMOUAZEN H. Numerical study on enhanced heat transfer and flow characteristics of supercritical hydrogen rocket engine's chamber wall using cylindrical ribs structure [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(39): 17423 – 17441.

[12] 黄 文, 邓宏武, 徐国强, 等. U 型管内超临界压力航空煤油压降特性[J]. 航空动力学报, 2011, 26(3): 582 – 587.

HUANG Wen, DENG Hongwu, XU Guoqiang, et al. Pressure drop characteristics of supercritical aviation kerosene in U-turn tube [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(3): 582 – 587.

[13] 薛立鹏, 陈二锋, 王道连, 等. 超临界氮增压系统仿真与优化设计[J]. 低温工程, 2014(2): 54 – 59.

XUE Lipeng, CHEN Erfeng, WANG Daolian, et al. Simulation and optimization design of supercritical helium pressurization system [J]. Cryogenics, 2014(2): 54 – 59.

[14] XIE P, ZHANG X. Enhancement heat transfer analysis of supercritical hydrogen fuel in small-scale channels with spherical concave [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 152: 106287.

[15] WANG Y, LEI R, WANG H, et al. Thermal performance analysis of fin-and-tube heat exchanger circuit in supercritical hydrogen refrigeration cycle system [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(56): 29765 – 29775.

(王治红 编辑)