

印刷电路板式氦加热器热力设计与性能

张业雷¹, 赵 剑², 马 挺¹, 王秋旺¹

(1. 西安交通大学 热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘要 印刷电路板换热器作为一种新型的微通道换热器, 具有紧凑高效、耐温耐压、可模块化等优势, 在火箭发动机中具有很好的应用前景, 但目前将印刷电路板换热器应用于火箭发动机的研究很少。对火箭发动机氦加热器提出了印刷电路板换热器的设计思路, 开发了热力设计程序, 并对其进行了数值模拟。结果表明: 印刷电路板式氦加热器芯体具有较小的体积和质量, 冷热侧温降的模拟值与计算值最大相对误差为 1.33%, 冷热侧压降的模拟值与计算值之间的最大相对误差为 18.51%, 证明了所开发的分段热力设计方法用于印刷电路板式氦加热器具有较高的准确性。氦加热器的冷端换热能力最强, 热侧流体流动更加剧烈, 换热能力更强, 但同时也有更大的压降。

关键词 印刷电路板换热器; 氦加热器; 热力设计; 流动换热特性

中图分类号 TK124 **文献标识码** A **文章编号** 1672-9374(2023)01-0036-08

Thermal design method and performance of printed circuit helium heater

ZHANG Yelei¹, ZHAO Jian², MA Ting¹, WANG Qiuwang¹

(1. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University,

Xi'an 710049, China; 2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract As a new type of micro-channel heat exchanger, the printed circuit heat exchanger has the advantages of compactness and efficiency, temperature resistance and pressure resistance, and modularity. It has a good application prospect in rocket engines, but there are few researches on the application of printed circuit heat exchanger in rocket engines. The design idea of printed circuit heat exchanger for helium heater applied to rocket engines was proposed, the thermal design program was developed and the numerical simulation was carried out. The results show that the printed circuit helium heater core has a small volume and mass, the maximum relative error between the calculated value and the simulated value of the temperature drop in the hot side and cold side of the helium heater is 1.33%, and the maximum relative error between the calculated value and the simulated value of the pressure drop in the hot side and cold side of the helium heater is 18.51%. It is demonstrated that the developed segmented thermal design

收稿日期: 2022-03-25; 修回日期: 2022-04-13

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-III-0021-0065)

作者简介: 张业雷(1995—), 男, 硕士, 研究领域为强化换热以及换热器设计。

通信作者: 王秋旺(1969—), 男, 博士, 教授, 研究领域为传热传质与强化。

method has high accuracy for printed circuit helium heater. The cold end of the helium heater has the strongest heat transfer capacity. The fluid flow on the hot side is more intense, and has a greater heat transfer capacity, but at the same time, there is a larger pressure drop.

Key words printed circuit heat exchanger; helium heater; thermal design; flow and heat transfer characteristics

0 引言

印刷电路板换热器 (printed circuit heat exchanger, PCHE) 是一种在金属薄板上通过化学刻蚀方法加工流体通道, 并通过扩散焊技术黏合而成的新型微通道换热器^[1], 具有紧凑度高、换热效率高、耐高温高压、易于模块化等优势^[2-3], 在核电、太阳能发电、氢能和制冷等领域展现出广阔的应用前景^[4-6]。印刷电路板换热器常见的通道结构有直通道、之字型通道、S 型通道和翼型通道^[7-10], 并带有不同形状的通道截面, 如半圆形、矩形、梯形和三角形等^[10-12]。

国内外对印刷电路板换热器进行了实验和数值模拟的相关研究, 其研究背景主要是核反应堆中间换热器^[13], 超临界二氧化碳布雷顿循环冷却器和回热器^[14], 以及浮式液化天然气装置中的换热器^[15]等, 主要探究结构参数对印刷电路板换热器流动传热性能的影响^[16-19] 以及不同操作条件下工质在印刷电路板换热器中的流动传热特性等^[20-22]。此外, 也提出了针对不同结构印刷电路板换热器的传热和阻力关联式, 这对印刷电路板换热器的研究具有一定的指导意义^[23-24]。

印刷电路板换热器在有限空间内可以提供良好的换热能力, 对火箭发动机中的换热器是一种很好的选择, 但目前公开文献中却鲜有报道。综上所述, 本文对印刷电路板换热器用于火箭发动机中的氦加热器进行了研究, 采用分段热力设计方法设计出半圆形直通道印刷电路板式氦加热器, 并采用流体计算软件 FLUENT 进行了数值模拟, 验证了设计结果的可靠性, 对其流动传热特性进行了分析。

1 氦加热器的热力设计

氦加热器的设计工况如表 1 所示, 氦加热器的热侧工质为燃气, 流量为 15 kg/s, 入口温度 670 K, 入口压力为 23.6 MPa, 流阻要求不大于 4 MPa。冷

侧工质为氦气, 流量为 0.5 kg/s, 入口温度为 110 K, 入口压力为 3.2 MPa, 冷侧出口温度要求为 542.6 K, 流阻要求不大于 2.55 MPa。

表 1 氦加热器热力设计工况
Tab. 1 Thermal design conditions of helium heater

名称	参数	值
燃气侧	质量流量/(kg·s ⁻¹)	15
	入口温度/K	670
	出口温度/K	—
	入口压力/MPa	23.6
	流阻要求/MPa	≤4.0
氦气侧	质量流量/(kg·s ⁻¹)	0.5
	入口温度/K	110
	出口温度/K	542.6
	入口压力/MPa	3.2
	流阻要求/MPa	≤2.55

1.1 分段热力设计方法

相较于传统的换热器设计方法, 分段热力设计方法可以减小工质物性变化对温度和传热系数沿程分布的影响, 从而减小物性变化在换热器计算过程中引入的误差。根据氦加热器的设计工况, 采用分段热力设计方法对印刷电路板式氦加热器进行设计, 选用半圆形直通道结构, 采用逆流布置的方式, 分段热力设计方法的示意图如图 1 所示。在规定冷侧出口温度的前提下, 根据热平衡关系可以求得热侧燃气的出口温度, 按照冷侧进出口温度, 将氦加热器均分为 N 段, 则得到 $N+1$ 个节点, 求得每一个冷侧节点的温度 $T_{c,i}$, 每一小段存在热平衡关系, 可以求得热侧每一个节点的温度 $T_{h,i}$ 。其中下标 h 代表热侧, 下标 c 代表冷侧, 下标 i 代表分段序号。

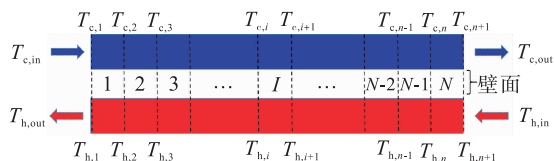


图 1 分段热力设计方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of segmented thermal design method

对于每一小段来说,其每一段的换热量 Q_i 满足热平衡关系为

$$Q_i = m_h (H_{h,i+1} - H_{h,i}) = K_i A_i \Delta T_{m,i} \quad (1)$$

式中: Q 为换热量; m 为质量流量; H 为比焓值; K 为传热系数; A 为换热面积; ΔT_m 为对数平均温差。

要选择合适的关联式求每一段的传热系数 K_i 以及每一段的压降,在计算过程中,以冷热流体进出口平均温度作为定性温度进行物性的计算,物性来源于 NIST 数据库,通过 MATLAB 程序进行调用。冷热流体的雷诺数 Re 计算式为

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} = \frac{m D_h}{\mu A_c} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; u 为流体流速; D_h 为通道的水力直径; μ 为动力黏度; m 为质量流量; A_c 为通道的横截面积。

当流体的雷诺数 $Re < 2300$ 时,流动状态为层流,采用文献[25]提出的关联式计算努塞尔数 Nu 和达西摩擦系数 f_d ,即

$$Nu = 4.089 \quad (3)$$

$$f_d = 4 \times 15.767 / Re \quad (4)$$

当流体的雷诺数 $Re \geq 2300$ 时,流动状态为湍流,采用 Gnielinski^[26] 和 Filonenko^[27] 提出的关联式计算努塞尔数 Nu 和达西摩擦系数 f_d ,即

$$Nu = \frac{(f_d/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f_d/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (5)$$

$$f_d = (1.82 \lg Re - 1.64)^{-2} \quad (6)$$

式中 Pr 为普朗特数。

通道的阻力损失 Δp 计算式为

$$\Delta p = f_d \frac{l}{D_h} \frac{u^2 \rho}{2} \quad (7)$$

式中 l 为通道长度。

1.2 分段无关性验证

在氮加热器设计过程中,分段数 N 的不同会导致每一段冷热侧流体的进出口温度不同,其采用定性温度计算的物性也会不同,从而导致采用关联式计算得到的传热系数存在差异,直接对换热器的传热面积以及换热器长度产生显著影响。分段数 N 越大,每一段冷热流体进出口温差越小,其采用进出口平均温度作为定性温度计算的物性对设计过程引入的误差越小,但分段数的增加同时会带来计算资源的增加。为了确定分段数 N ,需要进行分段无关性验证,在保证计算准确性的前提下,选择合适的分段数 N ,减少计算资源的浪费。本文以氮加热器长度 l 作为判断标准进行分段无关性验证,氮加热器长度 l 与分段数 N 的关系如图 2 所示,可以看出,当分段数 N 取 50 以后,换热器长度随分段数增加保持不变,因此分段数 N 确定为 50 段。

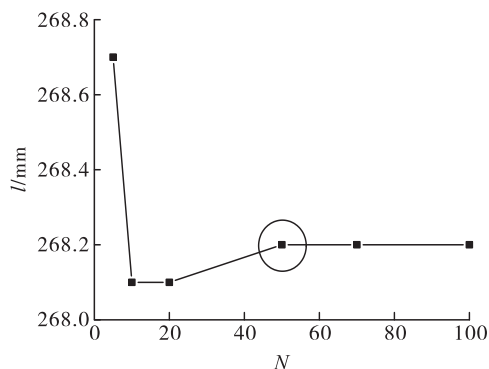


图 2 设计分段数对换热器设计长度的影响

Fig. 2 Influence of segment number on length of heat exchanger

1.3 设计结果

氮加热器的设计结果如表 2 所示。氮加热器选用半圆形直通道结构,固体材料选择 316L 不锈钢,采用逆流布置的方式,冷热流体通道单排排列且一一对应。采用分段热力设计方法计算得到的氮加热器芯体总长 268.2 mm,体积为 0.002 7 m³,质量为 12.62 kg。热侧的出口温度为 602.3 K,压力损失为 1.46 MPa,冷侧的出口温度为 546.2 K,压力损失为 0.099 MPa,均符合设计要求。

表 2 氮加热器设计参数
Tab. 2 Design parameters of helium heater

名称	参数	值
冷侧	通道直径/mm	2
	通道间距/mm	2.8
	通道数目	850
	板厚/mm	1.8
	流量/(kg·s ⁻¹)	0.5
	入口温度/K	110
	出口温度/K	542.6
热侧	压力损失/MPa	0.099
	通道直径/mm	2
	通道间距/mm	2.8
	通道数目	850
	板厚/mm	1.8
	流量/(kg·s ⁻¹)	15
	入口温度/K	670
芯体	出口温度/K	602.3
	压力损失/MPa	1.46
	宽×高×长/mm	10×10×268.2
	体积/m ³	0.002 7
	质量/kg	12.62
	换热量/MW	1.12

2 氮加热器的数值模拟

2.1 物理模型及边界条件

采用 FLUENT 软件对氮加热器进行数值模拟,由于印刷电路板换热器流道具有周期性分布特点,因此对模型进行简化,选择一组冷热通道作为一个计算单元进行模拟。计算单元的几何模型如图 3 所示,主体部分长度为 268.2 mm,在冷热通道进出口分别设置 30 mm 的延长段来保证入口的均匀以及防止出口的回流,冷热流体的进出口均设为质量流量入口和压力出口。计算单元的横截面如图 4 所示,计算单元的宽度为 2.8 mm,高度为 3.6 mm,上下左右壁面分别为两对周期性边界,前后壁面均为绝热壁面。

采用 ICEM 对计算单元进行网格划分,整体网格采用结构性网格,对冷热通道近壁面区域的网格

进行加密处理,为保证近壁面处的计算精度,将 y^+ 值控制在小于 1 的范围内。

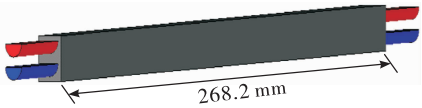


图 3 计算单元几何模型

Fig. 3 Geometric model of computational unit

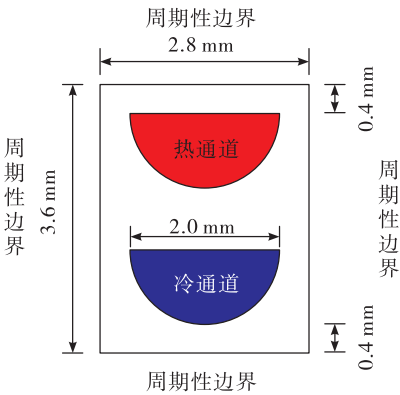


图 4 计算单元横截面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the cross-section of the computational unit

2.2 数值方法

将氮加热器计算单元内冷热流体的流动视为三维不可压缩的稳态流动,其连续性方程、动量方程、能量方程如下。

连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{8}$$

动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \mu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \tag{9}$$

能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_T}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \tag{10}$$

选择 SIMPLE 算法进行求解,选择 SST $k-\omega$ 湍流模型进行模拟。冷热流体的物性来源于 NIST 数据库,通过多项式拟合的方式在 FLUENT 中实现。固体的密度和比热容设置为常数,热导率设置为随温度变化的函数,所有方程均采用二阶迎风格式进行

离散,以每个变量的残差小于 10^{-8} 作为判断收敛的标准。

2.3 网格独立性验证

在数值模拟中,网格的数量和质量对模拟结果的准确性影响巨大,因此在展开数值计算之前需进行网格独立性验证。在计算之前,首先采用了 5 套不同网格数量的网格进行独立性验证,网格数量分别为 79 万、155 万、233 万、269 万、317 万。模拟工况均采用设计工况,假设冷热流体在所有流道均匀分布,并以热侧温降和压降作为判断标准。网格无关性验证的结果如图 5 所示,当采用 233 万网格时,其热侧温降与压降随着网格数的增加,变化不超过 0.5%,因此选择网格数量 233 万的网格作为计算网格。

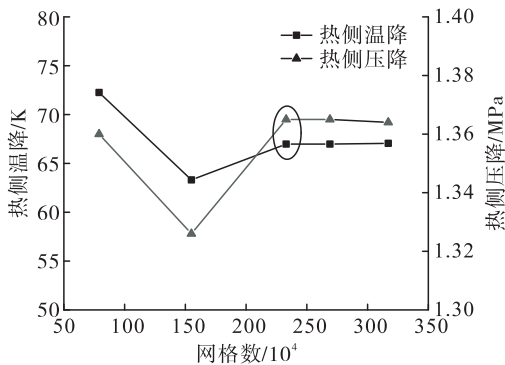


图 5 网格独立性验证
Fig.5 Results of grid independence test

2.4 模型有效性验证

为了保证模拟结果的准确性,需验证数值模型的有效性。本文以文献[28]研究的直通道 PCHE 作为验证模型,采用与文献中相同的物理模型和边界条件进行验证。模拟值与文献值的对比如表 3 所示。

表 3 模拟值与文献值对比
Tab.3 Comparison of simulated values and literature values

项目	温降			压降		
	文献值/K	模拟值/K	相对误差/%	文献值/Pa	模拟值/Pa	相对误差/%
冷通道	98.45	98.96	0.52	1 022.7	1 042	1.89
热通道	135.63	137.07	1.06	2 755.6	2 905	5.42

从表 3 中可以看出,冷热通道温降的模拟值与

文献值之间的相对误差为 0.52%和 1.06%,压降的模拟值与文献值之间的相对误差为 1.89%和 5.42%,这说明本文采用的数值模型和模拟方法是准确的,可用于氦加热器的数值模拟。

3 结果与分析

3.1 结果对比

将氦加热器的模拟结果与热力设计结果进行对比,验证本文采用分段热力设计方法的可靠性,氦加热器模拟值与计算值对比如表 4 所示。从表中可以看出,冷热侧温降的模拟值与计算值之间的相对误差分别为 1.33%和 1.08%,冷热侧压降的模拟值与计算值之间的相对误差分别为 18.51%和 7.11%,模拟值与计算值整体误差较小,这说明本文采用分段热力设计方法计算得到的印刷电路板式氦加热器是准确可靠的。

表 4 氦加热器模拟值与计算值对比
Tab.4 Comparison of simulated and calculated values of helium heater

项目	热侧温降/K	冷侧温降/K	热侧压降/MPa	冷侧压降/MPa
计算值	67.70	432.60	1.46	0.099
模拟值	66.98	426.91	1.37	0.121
相对误差	1.08%	1.33%	7.11%	18.51%

3.2 氦加热器流动传热特性分析

3.2.1 氦加热器传热特性分析

以热侧入口作为起点,对氦加热器的传热特性进行分析,冷热流体的沿程温度分布以及沿程温差分布如图 6 所示。从图中可以看出,冷热流体的温度变化趋势一致,但冷流体的温度变化更为剧烈,这就导致温差随沿程的增大而增大,最大温差出现在氦加热器的冷端,这与逆流换热器的特性是一致的。

图 7 为氦加热器冷热侧热流密度 q 的沿程分布。热流密度从氦加热器的热端到冷端呈现增大趋势,这与氦加热器的温差分布相对应。由于换热能力与温差分布紧密相关,温差是进行热交换的驱动力,一般来说,温差越大,热流密度越大,换热能力越强。

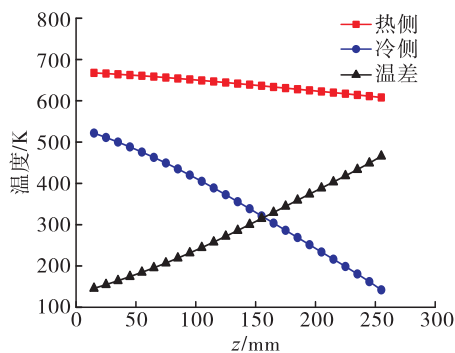


图6 温度及温差的沿程分布

Fig. 6 Distribution of temperature and temperature difference

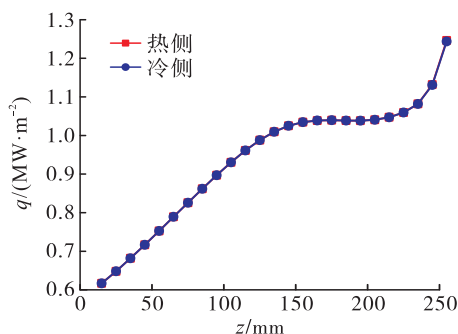


图7 热流密度沿程分布

Fig. 7 Distribution of heat flux

图8和图9分别为氮加热器冷热流体努塞尔数 Nu 和换热系数 h 的沿程分布。从图中可以看出,冷热侧努塞尔数和换热系数沿程变化不大,但热侧的努塞尔数和换热系数要远大于冷侧。这说明热侧的换热能力要远大于冷侧,与每个通道内热侧的流量远大于冷侧有关,热流体的流速远大于冷流体,其流动更加剧烈导致换热能力更强。

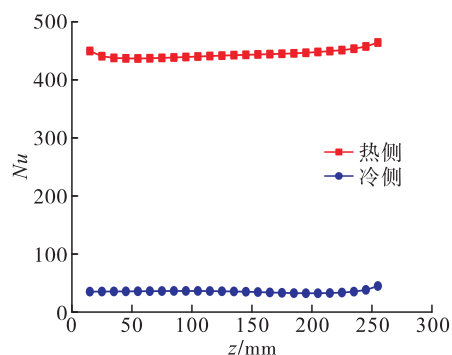


图8 努塞尔数沿程分布

Fig. 8 Distribution of Nusselt number

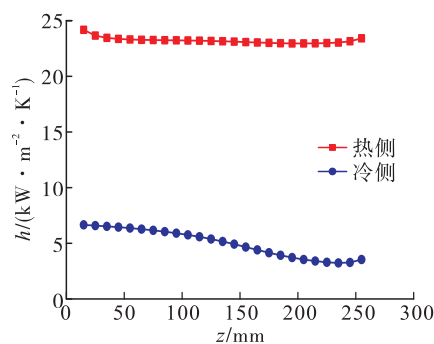


图9 换热系数沿程分布

Fig. 9 Distribution of heat transfer coefficient

3.2.2 氮加热器流动特性分析

同样以热侧入口作为起点,对氮加热器的流动特性进行分析。图10为氮加热器冷热流体的雷诺数沿程分布,可以看出,冷热流体的雷诺数变化趋势一致,但冷侧雷诺数变化更为剧烈。这主要是由冷侧氮气物性变化剧烈引起的,热侧的雷诺数远大于冷侧,也是由于每个通道内热侧的流量远大于冷侧引起。

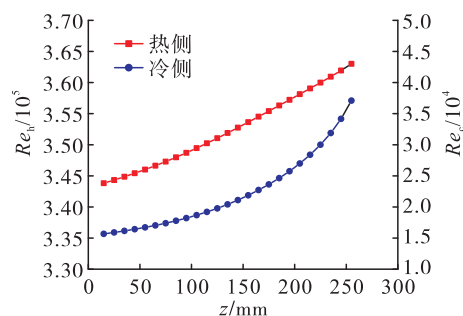


图10 雷诺数沿程分布

Fig. 10 Distribution of Reynolds number

图11为氮加热器冷热侧范宁摩擦因数 f 的沿程分布。可以看出,冷侧的沿程范宁摩擦系数大于热侧,且变化更为明显。这与冷热侧雷诺数变化趋势相对应,且主要与冷热侧的物性变化有关。

氮加热器冷热侧压降沿程分布如图12所示。从氮加热器的热端到冷端,冷热侧压降呈现变小趋势。这主要是由于工质物性变化以及流体速度改变引起,热侧压降远大于冷侧压降,是因为每个通道内热侧的流量远大于冷侧,从而导致了更大压降。

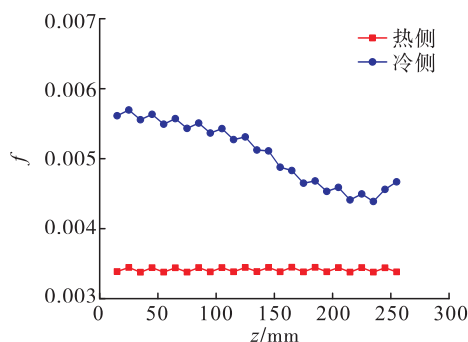


图 11 范宁摩擦因数沿程分布

Fig. 11 Distribution of Fanning friction coefficient

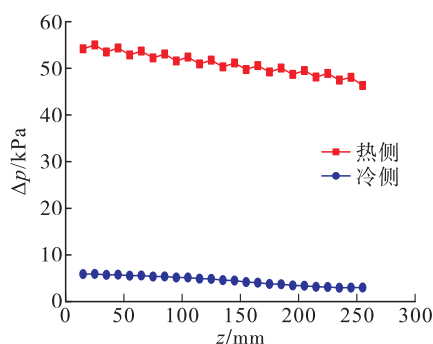


图 12 压降沿程分布

Fig. 12 Distribution of pressure drop

4 结论

本文针对火箭发动机氦加热器,采用分段热力设计的方法设计了半圆形直通道印刷电路换热器,并采用 FLUENT 软件对印刷电路板式氦加热器进行了数值模拟,研究了氦加热器的流动换热特性,获得如下结论:

1)通过分段热力设计方法得到的印刷电路板式氦加热器芯体的质量仅为 12.26 kg,体积仅为 0.0027 m^3 。冷热侧温降的模拟值与计算值之间的相对误差分别为 1.33% 和 1.08%,冷热侧压降的模拟值与计算值之间的相对误差分别为 18.51% 和 7.11%,模拟值与计算值整体误差较小,说明本文所开发的分段热力设计方法是准确可靠的。

2)对印刷电路板式氦加热器来说,冷端温差最大,换热能力也最强,对冷热流体来说,热侧的换热能力远大于冷侧。

3)氦加热器冷热流体的流动特性与其物性变化紧密相关,冷侧的物性变化更剧烈,所以雷诺数

和范宁摩擦系数变化更为明显,但热侧具有更大的流量,也具有更大的雷诺数和压降。

参考文献

- [1] LI X Q, PIERRES R L, DEWSON S J. Heat exchangers for the next generation of nuclear reactors [EB/OL]. https://www.researchgate.net/publication/255259531_Heat_Exchangers_for_the_Next_Generation_of_Nuclear_Reactors, 2006.
- [2] REAY D A. Compact heat exchangers: A review of current equipment and R&D in the field [J]. Heat Recovery Systems and CHP, 1994, 14(5): 459-474.
- [3] BAEK S, HWANG G, KIM J, et al. Development of compact heat exchanger for LNG FPSO [C]//International Offshore and Polar Engineering Conference. [S. l. : s. n.], 2011.
- [4] KIM D E. Numerical investigation on thermal-hydraulic performance of new printed circuit heat exchanger model [J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238(12): 3269-3276.
- [5] UTAMURA M, TAMAURA Y. A solar gas turbine cycle with super-critical carbon dioxide as a working fluid [C]//ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air. Barcelona: ASME, 2006.
- [6] LI S L, ZHAO Z, ZHANG Y R, et al. Experimental and numerical analysis of condensation heat transfer and pressure drop of refrigerant R22 in minichannels of a printed circuit heat exchanger [EB/OL]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Experimental-and-Numerical-Analysis-of-Condensation-Li-Zhao/9d2859184222acf8723426bda8b3c462c2a14c0a>, 2020.
- [7] YOON S H. Assessment of straight, zigzag, S-shape, and air-foil PCHEs for intermediate heat exchangers of HTGRs and SFRs [J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 270: 334-343.
- [8] CHU W X. Study on hydraulic and thermal performance of printed circuit heat transfer surface with distributed airfoil fins [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114: 1309-1318.
- [9] LEE S M, KIM K Y. Optimization of zigzag flow channel of a printed circuit heat exchanger for nuclear power plant application [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2012, 49(3): 343-351.
- [10] LEE S M, KIM K Y. Comparative study on performance of

- a zigzag printed circuit heat exchanger with various channel shapes and configurations[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2013, 49(7):1021-1028.
- [11] GUPTA R. Thermohydraulic performance of a periodic trapezoidal channel with a triangular cross-section[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(11/12):2925-2929.
- [12] YOON S J. Development and validation of Nusselt number and friction factor correlations for laminar flow in semi-circular zigzag channel of printed circuit heat exchanger[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 123:1327-1344.
- [13] SUROTO B J, INDARTA K A, NURMAWATI A. Analysis of printed circuit heat exchanger (PCHE) for small modular molten salt reactor (MSR)[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 753(1):012046.
- [14] SAEED M, ALAWADI K, KIM S C. Performance of supercritical CO₂ power cycle and its turbomachinery with the printed circuit heat exchanger with straight and zigzag channels[J]. *Energies*, 2020, 14(1):62.
- [15] MA T. Thermal-hydraulic characteristics of printed circuit heat exchanger used for floating natural gas liquefaction[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 137:110606.
- [16] 肖欣悦, 曹蕾, 杨欢, 等. 非连续肋印刷电路板换热器流动换热特性研究[J]. *技术与市场*, 2021, 28(3):5-8.
- [17] 吕义高, 李庆, 文哲希. 正弦波纹流道印刷电路板换热器热工水力性能[J]. *化工学报*, 2020, 71(S2):142-151.
- [18] 张洪飞, 王轩, 石凌峰, 等. 不同流道结构的印刷电路板烟气换热器性能对比研究[J]. *热力发电*, 2020, 49(10):157-163.
- [19] YANG S, ZHAO Z C, ZHANG Y, et al. Effects of fin arrangements on thermal hydraulic performance of supercritical nitrogen in printed circuit heat exchanger[J]. *Processes*, 2021, 9(5):861.
- [20] MA T, ZHANG P, LIAN J, et al. Numerical study on flow and heat transfer performance of natural gas in a printed circuit heat exchanger during transcritical liquefaction[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2021, 143(4):040901.
- [21] LAO J W, FU Q M, WANG W L, et al. Heat transfer characteristics of printed circuit heat exchanger with supercritical carbon dioxide and molten salt[J]. *Journal of Thermal Science*, 2021, 30(3):880-891.
- [22] 刘凯, 明杨, 胡朝营, 等. 印刷电路板换热器中 S-CO₂ 换热特性数值分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2021, 42(12):1777-1785.
- [23] 杨光, 邵卫卫. 印刷电路板换热器结构及传热关联式研究进展[J]. *化工进展*, 2021, 40(S1):13-26.
- [24] HUANG C Y. Review on the characteristics of flow and heat transfer in printed circuit heat exchangers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 153:190-205.
- [25] KIM I H. Thermal hydraulic performance analysis of the printed circuit heat exchanger using a helium test facility and CFD simulations[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2009, 239(11):2399-2408.
- [26] GNIELINSKI V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow[EB/OL]. <https://www.semanticscholar.org/paper/New-equations-for-heat-and-mass-transfer-in-pipe-Gnielinski/47764632bbcc7f797d3bc65c2ed997a31a723a26>, 1976.
- [27] FILONENKO G K. Hydraulic resistance in pipes[J]. *Teploenergetika*, 1954, 4(4):15-21.
- [28] MESHRAM A. Modeling and analysis of a printed circuit heat exchanger for supercritical CO₂ power cycle applications[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 109:861-870.