

DOI: 10.11949/0438-1157.

翅片结构对2 K超流氦板翅式换热器流动换热的影响

李翠, 夏程萍, 刘睿奇, 厉彦忠

(西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 为探究2 K超流氦温区流动不均匀性对板翅式换热器性能的影响, 采用数值模拟方法建立全尺寸三维模型, 引入多孔介质方法并考虑氦的变物性, 系统研究了冷热耦合、翅片节距及类型对流量分配与换热的影响。结果表明: 冷热耦合效应使低压侧流动不均匀度较非耦合工况降低67.6%; 锯齿翅片节距为10 mm时均匀性最优, 换热效率随节距减小而增大, 压降亦显著上升; 锯齿翅片换热效率最高但压降最大, 打孔翅片压降最小。综合考虑出口压降低于100 Pa的工程要求, 建议优先选用打孔翅片或大节距锯齿翅片。研究结果为大型超流氦低温系统优化设计提供理论依据。

关键词: 低温; 板翅式换热器; 流动不均匀性; 超流氦; 数值模拟

中图分类号: TQ051.5; TB66

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-12

Effect of fin structure on flow and heat transfer characteristics of a 2 K superfluid helium plate-fin heat exchanger

LI Cui, XIA Chengping, LIU Ruiqi, LI Yanzhong

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

Abstract: As a critical component in large-scale particle colliders' superfluid helium cryogenic systems, the 2 K negative-pressure plate-fin heat exchanger directly determines overall operational efficiency. To elucidate the effects of flow maldistribution on the performance of plate-fin heat exchangers within the superfluid helium temperature regime, this study employs numerical simulation techniques. A full-scale three-dimensional model of a plate-fin heat exchanger is developed integrating the porous media approach, while accounting for the variations in helium's thermophysical properties across the 2 K - 4.5 K range. Systematic investigations are conducted to evaluate the impacts of thermal-hydraulic coupling, fin pitch, and fin type on flow distribution and heat transfer characteristics. Results indicate that the thermal-hydraulic coupling effect substantially enhances flow uniformity through a temperature-density-resistance feedback mechanism, reducing the flow maldistribution index on the low-pressure side by 67.6% relative to the non-coupled condition. Fin pitch exerts a significant influence on flow distribution, with optimal uniformity observed at a pitch of 10 mm. Heat transfer efficiency increases with decreasing fin pitch, albeit accompanied by a marked elevation in pressure drop. Among the fin types examined, the serrated fin achieves the highest heat transfer efficiency but incurs the largest pressure drop, the perforated fin exhibits the minimum pressure drop yet lower heat transfer efficiency, and the wavy fin demonstrates intermediate

收稿日期: 2026-02-18 修回日期: 2026-06-08

通信作者: 李翠(1982—), 女, 博士, 副教授, xjtucli@xjtu.edu.cn

第一作者: 李翠(1982—), 女, 博士, 副教授, xjtucli@xjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(52576021)

引用本文: 李翠, 夏程萍, 刘睿奇, 厉彦忠. 翅片结构对2 K超流氦板翅式换热器流动换热的影响[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1–12

Citation: LI Cui, XIA Chengping, LIU Ruiqi, LI Yanzhong. Effect of fin structure on flow and heat transfer characteristics of a 2 K superfluid helium plate-fin heat exchanger[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1–12

performance. Considering the engineering constraint of an outlet pressure drop below 100 Pa for superfluid helium cryogenic systems, the perforated fin or serrated fin with a larger pitch is recommended to achieve favorable heat transfer performance while meeting the pressure drop requirement. These findings offer a theoretical foundation for the efficient operation and optimal design of large-scale superfluid helium cryogenic systems.

Keywords: cryogenics; plate-fin heat exchanger; flow maldistribution; superfluid helium; numerical simulation

引 言

工作于 1.8 K 至 4.5 K 温区的大型超流氦低温制冷系统,其研制对推动国际战略技术发展、支撑科学工程、航空航天及氦资源开发等领域具有重大战略意义^[1-2]。超流氦负压板翅式换热器是该系统的核心部件之一,其性能优劣直接决定了整体系统的运行效率。该换热器的主要功能在于预冷液氦,使其高效流经节流阀后进一步降温至超流态。相较于其他类型换热器,超流氦温区板翅式换热器的设计更具挑战性,需在极低运行压降(<100 Pa)的约束下^[2],实现极高的换热效率。已有研究对 2 K 至 4 K 温区负压换热器的数值模拟结果表明,板翅式换热器在此工况下性能优于管式换热器^[3]。正是由于其高效紧凑的特性,板翅式换热器被广泛应用于超流氦低温系统中。已有研究围绕超流氦低温换热器的性能优化、设计方法、仿真模拟及新型翅片结构等方面开展了工作^[4-12]。

换热器内部流体的分布特性对其宏观性能有决定性影响。研究表明,板翅式换热器内流动分布不均将直接导致换热效率下降与流动阻力剧增。为改善这一状况,学者通过优化封头结构、增设导流板或多孔挡板等方式,显著提升了流动均匀性^[13-19]。目前,实验研究与数值模拟(尤其是多孔介质模型)已成为研究板翅式换热器流体分布与换热效率的有效手段。其中,多孔介质法在性能分析、流动均匀性提升及结构优化等方面取得了显著进展^[20-25]。

综上所述,当前针对 2 K 至 4.5 K 温区换热器的研究主要集中于换热特性分析,而流体分布的研究则多集中于常温或普通低温领域。然而,国内外对超流氦温区板翅式换热器内流体分布的研究尚不充分,特别是关于流动分布不均影响换热性能的研究,目前尚未见公开报道。超流氦温区换热器的研究关键在于,氦的热物理性质在低温下会发生剧烈变化,其密度、黏度等参数与常温状态差异显著。这种物性的巨大差异,使得基于常温或普冷流体的

研究成果及设计准则难以直接推广应用于超流氦温区。因此,开展针对性的研究显得尤为迫切。

鉴于此原因,本文采用多孔介质方法,对氦负压板翅式换热器进行数值模拟研究,建立了全尺寸三维模型,旨在探究耦合换热效应及翅片参数、类型对换热效率及流动分布不均匀性的影响。研究旨在明晰不同工况下流动不均匀性与换热效率的关联规律,并确定在所研究范围内达到最佳换热效率的最优工况。本研究结果可为大型超流氦低温系统的高效运行与优化设计提供理论依据。

1 数值计算

1.1 物理模型

本文研究的逆流式板翅式换热器应用于千瓦级 2 K 超流氦低温系统,其核心功能是实现饱和液氦与负压气氦之间的高效换热,以提升超流氦的产率^[26]。该换热器核心段尺寸为 800 mm×260 mm×135 mm,采用高导热铝材制造,由高压侧 4 层热流体通道和低压侧 8 层冷流体通道以复合叠层方式布置(如图 1 所示)。高压侧通道全部采用锯齿翅片,低压侧通道则包含锯齿翅片、打孔翅片及波纹翅片等多种翅片类型。所有这些翅片的结构参数,包括翅高(h)、翅间距(s)、翅厚(t)、锯齿节距(P)、波纹节距(w_0)和波幅($2A$)、打孔率(α),均列于表 1 中。

1.2 数学模型

与标准控制方程相比,多孔介质模型在动量方程中引入了一个附加源项^[25]。对于均匀多孔介质,该源项的表达式如下:

$$S_i = -(C_1 \mu v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i) \quad (1)$$

式中, ρ 为流体密度; μ 为流体的动力黏度; C_1 与 C_2 分别是黏性与惯性阻力系数。

多孔介质模型的设置主要在于黏性阻力系数 C_1 与惯性阻力系数 C_2 的确定,对于这两个系数的求取,可以利用模拟方法,对一定尺寸的翅片通道模型进行流动换热计算,将得到的压降与速度数据,与式 1 进行拟合得到,具体计算方法见前序研究^[27]。

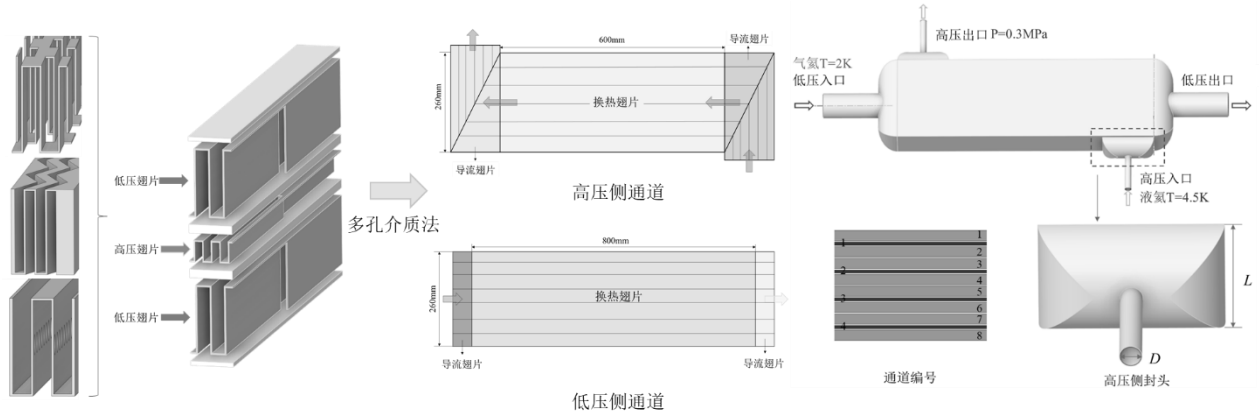
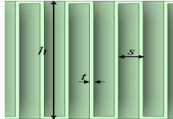


图1 超流氦板翅式换热器流动换热物理模型

Fig.1 Physical model of flow and heat transfer characteristics of a 2 K superfluid helium plate-fin heat exchanger

表1 翅片类型及具体参数

Table 1 Fin types and specific parameters

		基本参数			专有参数			
翅片类型	应用类型				锯齿翅片	波纹翅片	打孔翅片	
		h/mm	s/mm	t/mm	P/mm	w_0/mm	$2A/\text{mm}$	α
低压侧	95JC1402/3	9.5	1.4	0.2	3	—	—	—
	95JC1402/5	9.5	1.4	0.2	5	—	—	—
	95JC1402/10	9.5	1.4	0.2	10	—	—	—
	95JC1402/15	9.5	1.4	0.2	15	—	—	—
	95JC1402/20	9.5	1.4	0.2	20	—	—	—
	95JC1402/25	9.5	1.4	0.2	25	—	—	—
	95JC1402/30	9.5	1.4	0.2	30	—	—	—
	95DK2003/5.75	9.5	2.0	0.3	—	—	—	5.75
	95BW1202/12	9.5	1.2	0.2	3.0	12	1.9	—
高压侧	95DK4205/5	9.5	4.2	0.5	—	—	—	5
	30JC1202/30	3.0	1.2	0.2	30	—	—	—
	30DK4205/5.75	3.0	4.2	0.5	—	—	—	5.75

该换热器核心段不同翅片转换为多孔介质参数如下表2所示。

表2 低压侧翅片的多孔介质系数

Table 2 Porous media parameters for low-pressure side fins

翅片类型	锯齿翅片								打孔翅片	波纹翅片
翅片型号	95JC1402/3	95JC1402/5	95JC1402/10	95JC1402/15	95JC1402/20	95JC1402/25	95JC1402/30	95DK2003/5.75	95BW1202/12	
C_1	3.92×10^7	9.20×10^6	1.02×10^7	9.53×10^6	8.93×10^6	8.77×10^6	8.87×10^6	7.18×10^6	4.21×10^7	
C_2	127.0774	84.0001	51.0658	51.3100	34.9257	31.6850	29.2366	12.4590	48.6237	

1.3 边界条件设置

数值模拟基于ANSYS Fluent 2021软件平台开展,采用有限体积法对计算域内的偏微分方程组进行离散求解。压力-速度耦合采用SIMPLE算法处

理,压力项离散采用PRESTO格式,动量方程、能量方程及湍动能方程均采用二阶迎风格式以提高计算精度。

边界条件设置如下:换热器入口采用质量流量

入口边界,流量范围为 20 g/s~40 g/s;出口采用压力出口边界,进出口条件见图 1。为考察高压侧流动不均匀性的影响,设置对照工况如下:在不考虑冷热流体耦合换热的情況下(即假定高压侧流动均匀),将高压侧通道封堵,仅在低压侧通道两侧壁面施加线性温度边界条件,温度范围为 2.105 K~3.5 K;低压侧入口及出口边界条件与耦合换热工况保持一致。前期研究表明^[27-28],水平安装方式相较于垂直安装具有更优的流动均匀性、更低的压降及更高的换热效率。因此,后续研究中的所有工况均采用水平安装方式。

考虑极低温条件下氦的热物理性质随温度与压力的剧烈变化,数值模拟中调用 HEPAK 数据库获得氦的物性参数变化曲线,并将其导入 Fluent 材料库,以实现变物性条件下的准确模拟。

1.4 参数定义

为量化不同工况下换热器的整体分布均匀性,本文采用不均匀度标准差(STD)作为评估指标。其表达式如下所示,标准差数值越大表明流体分布均匀性越差。

$$STD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i - \bar{q}}{\bar{q}} \right)^2} \quad (2)$$

式中, n 为通道数量, i 为通道编号, $\bar{q}$ 是每个通道平均流量。

为更准确评估各通道内的流体分布情况,定义

通道流量分配比(D_i),其表达式如下:

$$D_i = \frac{q_i}{q} \quad (3)$$

式中, q_i 为*i*通道的流量。

换热器的换热性能采用换热效率(ε)进行评估,其定义为实际换热量与理想条件下最大换热量的比值。该计算基于流体焓值,并假设换热器进出口质量流量恒定,具体表达式如下:

$$\varepsilon = \frac{(h_{in} - h_{out})}{(h_{hot,in} - h_{hot,out})} \times 100\% \quad (4)$$

式中, h_{in} 与 h_{out} 分别表示高压侧的入口和出口焓值。 $h_{hot,in}$ 对应高压侧在 0.3 MPa、4.5 K 状态下的焓值, $h_{hot,out}$ 则为 0.3 MPa、2 K 状态下的焓值。相关焓值通过 HEPAK 数据库获取。

2 网格与模型验证

2.1 网格无关性验证

采用多孔介质模型替代翅片区域后,为进一步提高计算精度,对封头与流道交界区域进行了局部网格加密,并开展了网格无关性验证。图 2 给出了换热器低压侧压降与高压侧换热效率随网格数量的变化趋势。结果表明,当网格数量达到 545 万时,各关键指标的变化已趋于稳定,表明当前网格划分方案能够在计算精度与计算成本之间取得合理平衡。

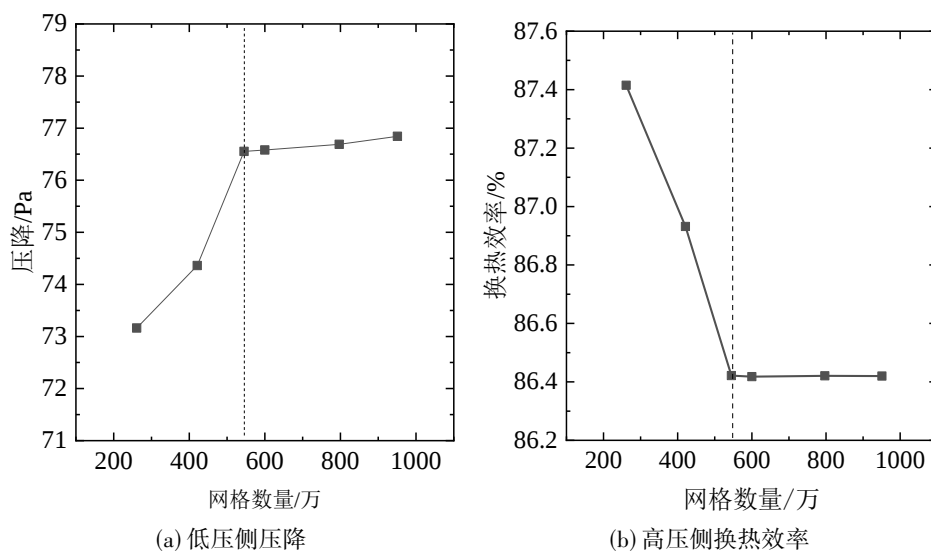


图2 压降和换热效率随网格数量的变化

Fig.2 Pressure drop and heat transfer efficiency as a function of the number of grids

2.2 模型验证

为验证数值模型的准确性,选取文献^[25]中的实验结果进行对比验证。验证所采用的物理模型如图3(a)所示,包含1个入口管与封头、16个气体流道及8个出口(相邻两流道出口合并为1个气体出口)。

图3(a)给出了 Reynolds 数 $Re=12000$ 时各通道流

量的模拟值与实验值对比,图3(b)展示了不同入口 Reynolds 数下各通道流量模拟值与实验值的比值。结果表明,模拟值与实验值的相对偏差均在1%以内。进一步对比不同 Reynolds 数下流量分布标准差(STD)及压降的模拟与实验结果,误差范围分别为6.85%~9.39%和0.797%~2.265%,均处于工程可接受范围内。

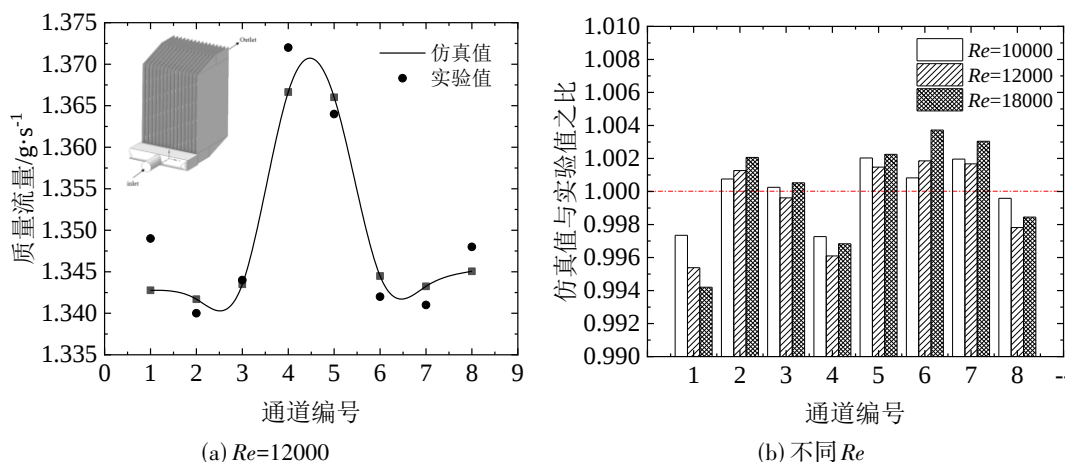


图3 模型验证

Fig.3 Model validation

以上验证结果表明,本文所建立的数值模型能够较为准确地反映板翅式换热器内的实际流体分布特性,可用于后续流动不均匀性及换热性能的研究。然而,受实验条件与公开文献数据限制,目前尚未获得与本文全尺寸2 K超流氦板翅式换热器在结构、流道数量、工质及耦合换热工况上完全一致的实验数据。为此,本文采用已有板翅式换热器流量分配实验结果对数值模型进行验证,重点考察多孔介质模型对封头至流道体系中流量再分配规律的预测能力。尽管验证对象与本文模型在具体结构参数及工况条件上存在差异,但二者均遵循封头压力分布与流道阻力竞争这一共同主导机制,因此该验证能够为后续流动不均匀性分析提供方法依据。

3 翅片结构对换热器性能的影响

3.1 冷热耦合的影响

本节旨在探究冷热耦合换热对板翅式换热器内流量分配的影响。图4对比了水平安装、入口质量流量为 25 g/s 时,耦合换热与非耦合换热条件下低压侧各通道的质量流量分布情况。由图可知,与

未耦合工况相比,耦合换热条件下中间四个通道的流量显著降低,两侧通道流量相对升高。这一流量重新分布使得流动不均匀度指标 STD 从非耦合工况下的0.052显著降低至耦合工况下的0.017,降幅达67.6%。结果表明,冷热耦合效应显著提升了低压侧流体的流动均匀性。

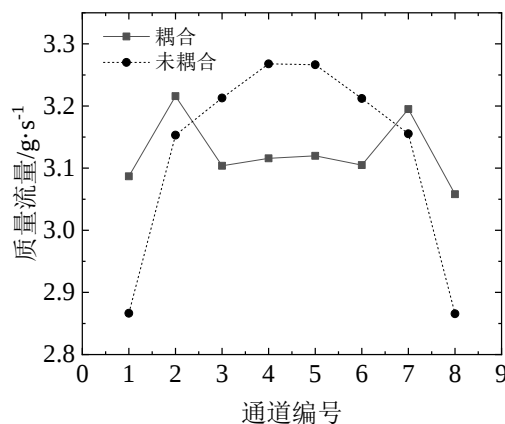


图4 冷热耦合对流量分布的影响

Fig.4 Impact of thermal coupling on flow distribution

这一重新分布现象源于封头涡流结构与气氦密度变化的耦合作用。图5展示了低压侧流动方向各通道截面的速度与温度分布云图。在耦合换热

条件下(图5a),由于高压侧中间通道流量显著高于两侧,对应位置的低压侧通道被加热至较高温度。根据氦的物性变化规律,温度升高导致气氦密度显著下降。在驱动压差基本相当的条件下,密度降低

直接导致通道质量流量减小。相反,在非耦合换热条件下(图5b),各通道温度分布均匀,流体密度基本一致,流动分布主要由入口速度场主导,因此中间通道流速更高、流量更大。

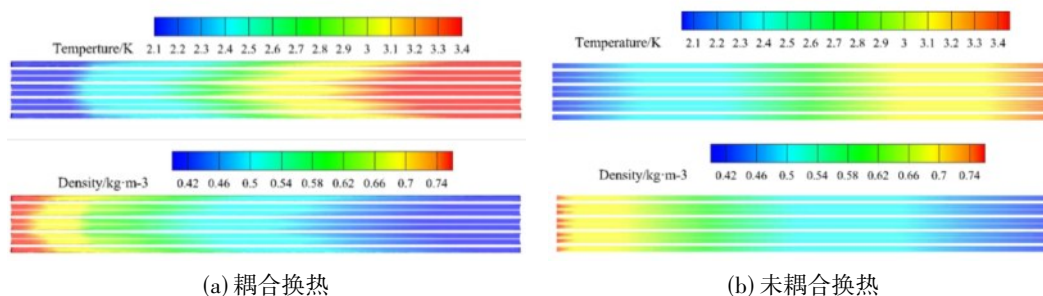


图5 低压侧各通道温度和密度云图

Fig.5 Temperature and density contours of low-pressure side channels

由此可见,冷热耦合效应通过温度-密度-阻力反馈机制重塑了各通道的流量分配:高压侧的流量不均诱导了低压侧的温度不均,进而通过密度变化调节各通道流动阻力,最终促使流量向更均匀的方向重新分布。

3.2 锯齿翅片节距的影响

在流道高度固定的条件下,锯齿翅片的结构参数对流动特性具有显著影响,其中翅片节距(即锯齿截断长度)对流动与换热的影响最为关键^[29]。本节通过改变低压侧锯齿翅片的节距,探究其对换热器整体流动分配及换热性能的影响规律。

图6(a)展示了入口质量流量为35 g/s时,不同节距下低压侧各通道的流量分布情况。由图可知,当节距从30 mm减小至5 mm时,翅片截断长度缩短,流体流经翅片时受到的扰动增强,流动阻力随之增大。在此条件下,由温度分布不均引起的密度差异对流动的影响更为显著,导致中间通道流量进一步降低。

进一步分析流动均匀性指标 STD 随节距的变化规律。如图6(b)所示,随着节距减小, STD 呈现先降低后升高的趋势。这一变化规律可归因于中间通道与两侧通道流量差的演变过程:节距较大时(如30 mm):中间通道流量显著低于两侧通道,通道间流量差异较大,流动均匀性较差;节距适中时(如10 mm):中间通道流量回升,与两侧通道的流量差减小,流动均匀性达到最优;节距过小时(如5 mm):中间通道流量进一步回升,逐渐高于两侧通道,流量差再度扩大,流动均匀性变差。

锯齿翅片节距对流动均匀性的影响并非单一的水力阻力效应,而是阻力与热力耦合作用的结果。一方面,节距减小意味着流体在单位长度内经历更频繁的折流、收缩与扩张过程,流道等效阻力显著增大。随着通道压降占总压降的比例提高,各通道对封头内部压力差异的敏感性下降,从而削弱入口封头对流量分配的主导作用,使流量分配趋于均匀。另一方面,节距变化会改变换热强度。较小节距对应更强的流体扰动和更高的对流换热能力,从而加剧低压侧氦气沿程温升及密度变化。由于各通道局部流量与换热强度本身存在差异,密度变化又会反过来影响各通道的流速与质量流率,形成流动-换热-物性相互耦合的二次调节机制。在2 K附近氦热物性剧烈变化的条件下,这种密度效应对流量再分配的影响尤为显著。

因此,节距减小虽然能够增大阻力抑制封头引起的不均匀分配,但同时也可能因强化换热和密度变化而改变通道间的再分配特征;节距增大虽可降低压降,却会削弱流道阻力对流量均化的约束作用,使流量更易受封头压力场控制。在上述两种机制的共同作用下,锯齿翅片节距对流动均匀性的调控呈现非单调特征,在本文研究范围内表现为节距为10 mm时均匀性最佳。

在工程应用中,锯齿翅片节距通常选取2.5 mm~3 mm范围内。图7给出了节距 $P=3$ mm时,不同入口流量下低压侧各通道的流量分布情况。由图可知,随着入口流量增大,整体流速升高,流动惯性效应增强。此时,流速主导作用逐渐克服温度差

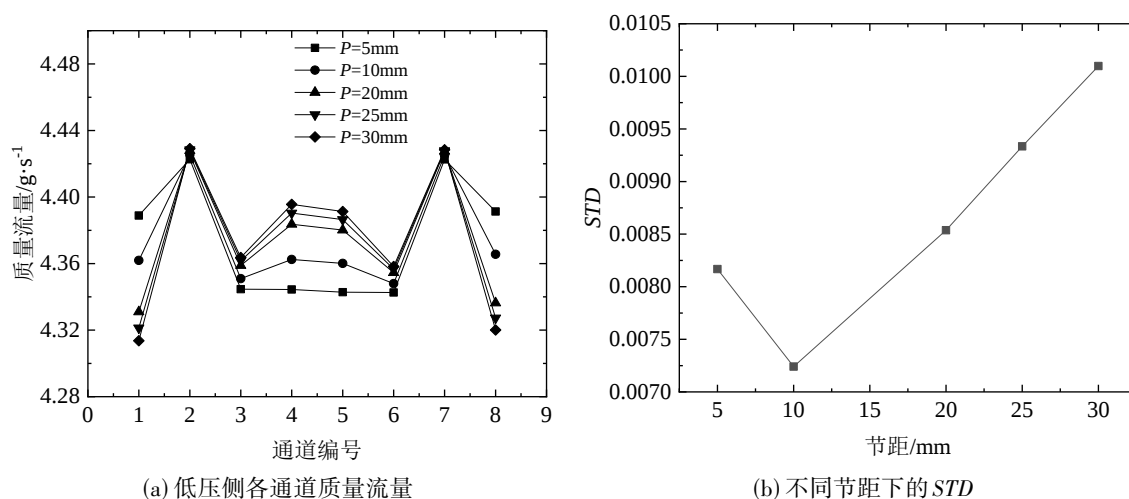
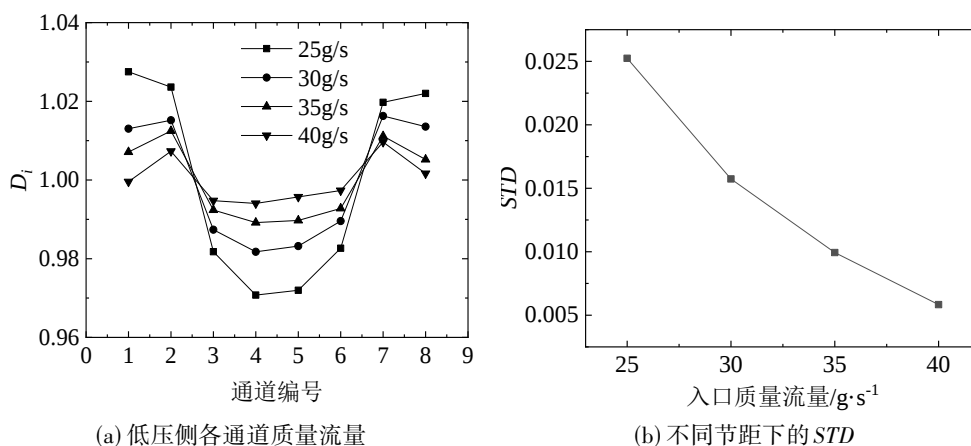


图6 35 g/s时不同节距对低压侧流体分布的影响

Fig.6 Effect of different pitches on flow distribution in the low-pressure side at 35 g/s

引起的密度变化对流量分配的影响,使得中间通道的质量流量随入口流量增大而上升,中间通道与

两侧通道的流量差逐渐减小,流动均匀性得到改善,表现为STD值随流量增大而减小。

图7 $P=3\text{ mm}$ 时不同入口流量对低压侧流体分布的影响Fig.7 Effect of different inlet mass flow rates on flow distribution in the low-pressure side at $P=3\text{ mm}$

这一现象表明,在小节距条件下,流量增大有助于削弱温度-密度耦合效应对流动不均的负面影响,使流动分布更趋均匀。结合前述节距变化规律可知,锯齿翅片节距对流动均匀性的影响存在与流量工况相关的最优区间,在实际工程设计中需综合考虑节距与运行工况的匹配关系。

图8展示了不同节距下,换热器整体换热效率及压降随入口质量流量的变化规律。由图可知,当节距从30 mm减小至5 mm时,翅片截断长度缩短,流体流经翅片时扰流增强,边界层破坏加剧,从而导致换热系数显著提高,换热效率随之增大。随着入口质量流量增大,流速升高,一方面对流换热系

数增大,另一方面流动均匀性得到改善(如图7所示),二者共同作用使得换热效率进一步提升。压降变化规律与换热效率类似但机理不同。当节距减小时,翅片对流体的扰动增强,流动阻力显著增大。同时,入口质量流量增大导致流速升高,摩擦阻力与局部阻力均随之增加,因此压降呈现持续上升趋势。在相同流量条件下,节距越小,压降越大;对于同一节距,压降随流量增大而近似呈二次方关系增长。

综合分析可知,锯齿翅片节距的选择需要在流动均匀性、换热效率与压降三者之间进行权衡:小节距虽有利于换热效率提升,但会导致流动均匀性

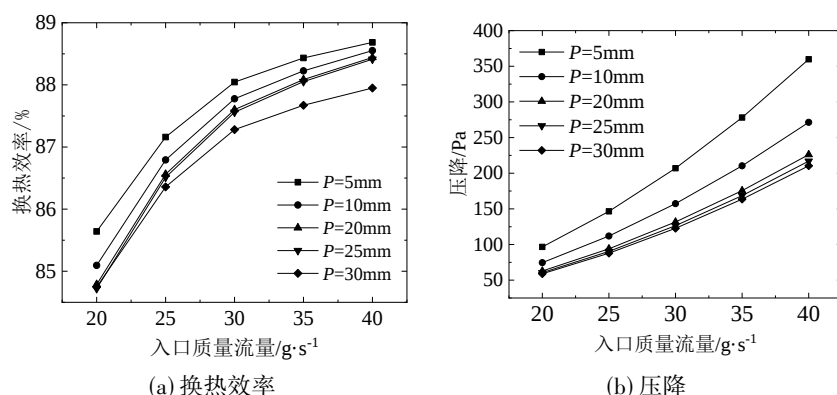


图8 不同节距下换热器性能随入口质量流量的变化

Fig.8 Effect of inlet mass flow rate on heat exchanger performance at different pitches

先改善后恶化,且压降显著增大;大节距压降较小,但换热效率偏低。在本研究范围内,节距为10 mm时流动均匀性最佳,而换热效率与压降的平衡点则需根据具体工程需求确定。

3.3 翅片类型的影响

本节通过改变低压侧通道内的翅片类型,系统探究其对流动不均匀性、压降及换热效率的影响规律。低压侧所采用的翅片类型及其结构参数列于表1。本文选取锯齿翅片、波纹翅片和打孔翅片作为低压侧候选结构,其主要依据为实际工程项目中的备选方案。这三类翅片均为板翅式换热器的常见结构,分别具有高换热高阻力、低阻力和中等综

合性能等特点。在确保所选参数满足加工制造要求的基础上,本文重点考察三者作为工程候选结构时在流动均匀性、换热效率及压降之间的综合权衡,进一步的参数优化研究将在后续工作中展开。

图9展示了不同翅片类型下,低压侧各通道流量随入口质量流量的变化情况。总体而言,对于所有翅片类型,随着入口质量流量增大,中间通道的流量均呈现上升趋势。这是入口流量提升导致整体流速增大,流动惯性效应增强,部分抵消了由温度差异引起的密度降低对中间通道流量的抑制作用,从而使中间通道质量流量升高。

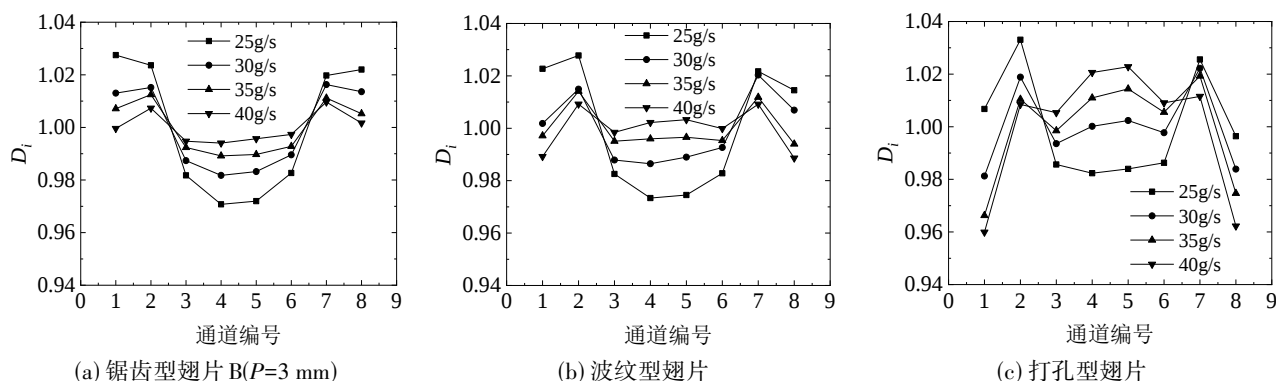


图9 不同翅片的流量分布

Fig.9 Flow distribution with different fins

对比不同翅片类型可以发现,锯齿翅片中间通道流量降低的程度最为显著。这一现象可归因于其独特的结构特征:锯齿翅片截断带来的流动扰动最强,流动阻力最大,导致各通道流速相对较低。在低流速条件下,温度差异引起的密度变化对流量分配的影响更为突出,因此中间通道流量受密度降

低的影响更为明显,表现为流量显著低于两侧通道。相比之下,打孔翅片由于无截断结构,流动阻力最小,流速最高。在高流速条件下,惯性效应占据主导,流量分布主要受入口速度场影响,因此中间通道流量与两侧通道的差异相对较小,流动均匀性受密度变化的影响较弱。波纹翅片的流动阻力

及流量分布特性介于锯齿翅片与打孔翅片之间。

图10进一步给出了不同翅片类型下,流动均匀性指标 STD 、换热效率及低压侧压降随入口质量流量的变化规律。三种翅片类型表现出显著差异的性能特征。

(1) 流量分布均匀性(STD)

对于锯齿翅片和波纹翅片,由于其流动阻力较大,入口流量增大时流速显著上升,中间通道流量回升,中间通道与两侧通道的流量差逐渐减小,因此 STD 随流量增大而单调减小,流动均匀性持续改善。对于打孔翅片,由于其流动阻力最小,流速较高时惯性效应占据主导,中间通道流量随流量增大而逐渐超过两侧通道,流量差先减小后增大,因此 STD 呈现先减小后增大的趋势,存在一个最优流量使得流动均匀性最佳。

(2) 换热效率

所有翅片类型的换热效率均随入口质量流量增大而单调增加。在不同翅片之间,换热效率由高到低依次为:锯齿翅片、波纹翅片、打孔翅片。锯齿翅片通过翅片截断不断破坏和重建边界层,显著强化了流体扰动与换热;波纹翅片利用通道起伏引导流体产生二次流和旋涡,增强了流体掺混与换热效果;打孔翅片则依靠孔洞切断边界层的连续发展,产生局部扰动实现换热强化。三种翅片的强化换热机理不同,导致其换热性能存在显著差异。

(3) 低压侧压降

压降随入口质量流量增大而单调增加。在不同翅片之间,压降由高到低依次为:锯齿翅片、波纹翅片、打孔翅片。锯齿翅片由于其截断结构带来的强烈流动扰动,流动阻力最大;波纹翅片由于通道起伏引起的流向变化,阻力次之;打孔翅片结构连续、扰动最小,因此压降最低。

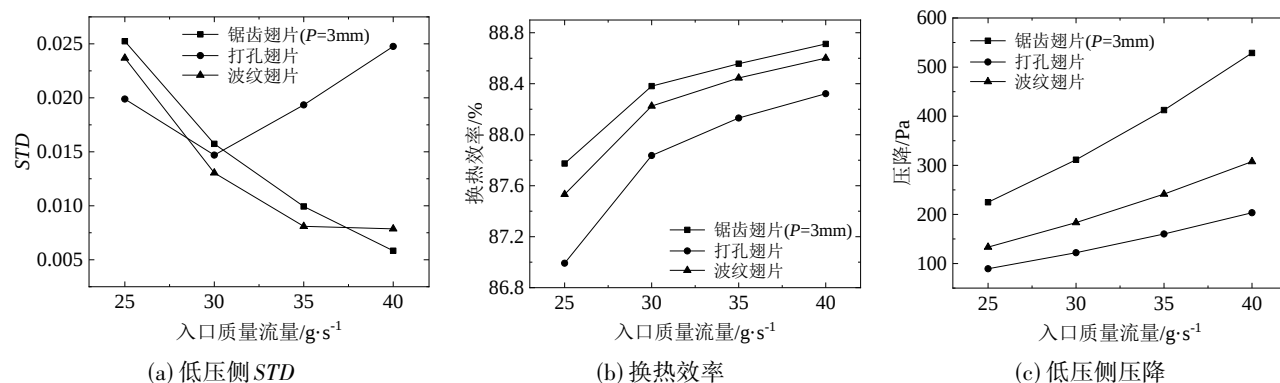


图10 翅片类型对换热性能的影响

Fig.10 Impact of fin type on STD on heat exchanger performance

综合图9、10的分析可知,翅片类型的选择需在流动均匀性、换热效率与压降之间进行权衡:锯齿翅片换热效率最高,但压降最大且流动均匀性受流量影响显著;打孔翅片压降最小,但换热效率相对较低;波纹翅片各项性能均介于二者之间。针对该换热器压降要求,适宜选择节距较大的锯齿翅片或打孔翅片。

4 结果讨论

上述结果表明,翅片结构对2 K超流氦板式换热器性能的影响,本质上是流动阻力、换热强度与流体物性变化三者耦合作用的结果。对于板式换热器,入口封头内的流场分布决定了各通道的初始流量分配,而翅片结构则通过改变通道阻力,

进一步调节各通道对压力差的响应程度。因此,翅片结构的变化首先作用于流量分配,进而影响换热过程。

与常温工况不同,2 K附近氦的物性随温度变化极为剧烈,换热过程会显著改变流体密度分布。对于低压侧通道,局部换热增强虽有助于提高换热效率,但也可能导致通道内温升增大、密度下降,从而反向影响质量流量分配。这表明,在2 K超流氦工况下,流动分配并非由封头结构或流道阻力单独决定,而是受到传热过程的反向调节,呈现出显著的流动-换热耦合特征。

锯齿翅片节距的影响进一步印证了这一规律。节距减小时,流动扰动增强,流道阻力增大,有利于削弱封头局部流场对通道分配的主导作用,从而改善流动均匀性;但与此同时,换热增强也会加剧低

压侧的温度与密度变化,并带来更大的压降损失。因此,节距对换热器性能的影响并非单调,而是均匀性、换热性能与压降三者共同权衡的结果。

不同翅片类型的比较表明,翅片结构优化不存在脱离约束条件的统一最优解。锯齿翅片通过更强的流体扰动获得较高的换热能力,但其阻力代价也最为显著;打孔翅片则以较低压降为主要优势。这说明,对于2 K超流氦板翅式换热器,翅片结构的选择应结合具体运行要求进行综合评价,而不能仅依据单一换热指标判断优劣。

5 结 论

本文建立了板翅式换热器的流动与换热数值模型,系统研究了目标工况下换热器的换热特性,重点分析了冷热耦合换热、锯齿翅片节距及翅片类型对流动不均匀性与换热性能的影响规律。主要结论如下:

(1)高压侧与低压侧通道的质量流量分布通过换热作用相互耦合。由于高压侧中间通道流量显著高于两侧,对应低压侧通道气氦温度升高、密度降低,进而引起中间通道流量下降。这一温度-密度-阻力反馈机制使得低压侧流量分布趋于均匀,流动不均匀度指标 STD 较非耦合工况降低67.6%,表明冷热耦合效应显著改善了流动均匀性。

(2)锯齿翅片节距对超流氦板翅式换热器的流体分配具有显著影响。节距过大(如30 mm)或过小(如5 mm)时,中间通道与两侧通道流量差较大,流动均匀性较差;节距适中时(10 mm),流量分布最为均匀。同时,换热效率随节距减小而单调增加,压降则随节距减小而显著增大。翅片节距的选择需在流动均匀性、换热效率与压降之间进行权衡。

(3)换热器性能与翅片类型密切相关。不同翅片结构的阻力特性差异导致流量分布趋势不同:阻力越强的翅片(如锯齿翅片),中间通道流量受密度效应影响越显著,流量越低;阻力较弱的翅片(如打孔翅片),流量分布受惯性效应主导。在换热效率方面,锯齿翅片最高,其次为波纹翅片,打孔翅片最低;压降变化规律与之相同,锯齿翅片压降最大,打孔翅片压降最小。综合考虑超流氦低温系统对出口压降低于100 Pa的工程要求,建议在低压侧优先选用打孔翅片或节距较大的锯齿翅片,以在满足压降约束的前提下获得较优的换热性能。

符 号 说 明

- $2A$ ——波纹翅片的波幅,mm
 C_1, C_2 ——多孔介质的黏性阻力系数和惯性阻力系数
 D_i ——通道的流量分配比(通道流量与平均流量的比值)
 i ——通道编号
 n ——通道总数
 P ——锯齿翅片的节距,mm
 Re ——Reynolds数
 STD ——各通道流量的不均匀度标准差
 h ——翅片的翅高,mm
 h_{in}, h_{out} ——高压侧的入口和出口焓值, J/kg
 $h_{hot,in}, h_{hot,out}$ ——高压侧在0.3 MPa、4.5 K和2 K状态下的焓值, J/kg
 q_i ——通道*i*的质量流量, kg/s
 $\bar{q}$ ——通道的平均质量流量, kg/s
 s ——翅片的间距, mm
 t ——翅片的厚度, mm
 w_0 ——波纹翅片的节距, mm
 α ——打孔翅片的打孔率
 ε ——换热效率(实际焓差与理想焓差的比值)
 μ ——流体的黏度, Pa·s
 ρ ——流体的密度, kg/m³

参 考 文 献

- [1] 唐琳. 我国研发成功-271℃超流氦大型低温制冷装备[J]. 科学新闻, 2022, 24(3): 23.
Tang L. China has successfully developed a large-scale cryogenic refrigeration equipment with -271℃ superfluid helium[J]. Science News, 2022, 24(3): 23.
- [2] Bradu B, Brodzinski K, Gahier V, et al. LHC low-beta quadrupole magnets: cryogenic refrigeration capacity and improved controls for luminosity optimization[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2687(8): 082023.
- [3] 唐景春, 贾帅, 陈长琦, 等. 超流氦系统中2~4 K负压换热器换热性能的数值模拟[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(12): 1598-1603.
Tang J C, Jia S, Chen C Q, et al. Numerical simulation of heat transfer performance of 2-4 K sub-atmospheric heat exchanger in superfluid helium cryogenic system[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2021, 44(12): 1598-1603.
- [4] 任志文, 黄桂朝, 刘具龙, 等. 超大型负压低温换热器的热工特性分析[J]. 真空与低温, 2025, 31(1): 98-103.
Ren Z W, Huang G C, Liu J L, et al. Analysis of thermal characteristics of ultra-large negative pressure cryogenic heat exchangers[J]. Vacuum and Cryogenics, 2025, 31(1): 98-103.
- [5] 王哲, 厉彦忠, 李正宇, 等. 液氦/超流氦制冷系统负压换热器仿真及优化设计[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(8): 143-150.
Wang Z, Li Y Z, Li Z Y, et al. Simulation and optimization for sub-atmospheric heat exchanger of liquid helium/superfluid helium refrigeration system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong

- University, 2016, **50**(8): 143–150.
- [6] Zhu K Y, Chang Z Z, Li M, et al. Design, optimization and experimental testing of 2 K cryogenic plate-fin heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, **223**: 119973.
- [7] Wen J, Li C L, Hao H W, et al. Numerical investigation on fin configuration improvement of 2 K sub-atmospheric plate-fin heat exchangers for the superfluid helium cryogenic systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, **196**: 117290.
- [8] 朱黎明, 范大军, 王先进, 等. 超流氦低温系统板式换热器的设计与优化[J]. 真空与低温, 2023, **29**(5): 511–517.
- Zhu L M, Fan D J, Wang X J, et al. Design and optimization of plate heat exchanger for the superfluid helium cryogenic system[J]. Vacuum and Cryogenics, 2023, **29**(5): 511–517.
- [9] 李超龙, 许世峰, 文键, 等. 负压低温板翅式换热器锯齿翅片性能的数值模拟研究[J]. 真空与低温, 2021, **27**(2): 141–145, 177.
- Li C L, Xu S F, Wen J, et al. Numerical simulation of serrated fin performance of plate fin heat exchanger under negative pressure and low temperature condition[J]. Vacuum and Cryogenics, 2021, **27**(2): 141–145, 177.
- [10] 朱柯宇, 常正则, 李梅, 等. 千瓦级 2 K 超流氦板翅式换热器初步设计优化[J]. 原子能科学技术, 2022, **56**(10): 2146–2154.
- Zhu K Y, Chang Z Z, Li M, et al. Preliminary design optimization of 2 K superfluid helium plate-fin heat exchanger in kilowatt scale[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, **56**(10): 2146–2154.
- [11] 郝鸿伟, 文键, 赵欣, 等. 超流氦系统负压低温板翅式换热器新型波纹-锯齿翅片的性能研究[J]. 西安交通大学学报, 2021, **55**(11): 1–7.
- Hao H W, Wen J, Zhao X, et al. Study on the performance of a new-type sine-offset fin for negative pressure low temperature plate-fin heat exchanger in superfluid helium system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, **55**(11): 1–7.
- [12] 刘轸伦, 何崇超, 丁培, 等. 超流氦负压换热器设计与数值模拟研究[J]. 低温工程, 2025(1): 70–77, 86.
- Liu Y L, He C C, Ding P, et al. Design and numerical simulation of superfluid helium sub-atmospheric heat exchanger[J]. Cryogenics, 2025(1): 70–77, 86.
- [13] 文键, 厉彦忠, 周爱民, 等. 板翅式换热器入口结构的改进[J]. 吉林大学学报(工学版), 2006, **36**(2): 177–182.
- Wen J, Li Y Z, Zhou A M, et al. Improvement of entrance configuration in plate-fin heat exchanger[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, **36**(2): 177–182.
- [14] 王少华, 文键, 李亚梅, 等. 带有导流翼的板翅式换热器封头结构优化研究[J]. 化学工程, 2013, **41**(7): 24–28.
- Wang S H, Wen J, Li Y M, et al. Configuration optimization of wing panel header in plate-fin heat exchanger[J]. Chemical Engineering, 2013, **41**(7): 24–28.
- [15] Yang H Z, Wen J, Gu X, et al. Improvements on flow distribution and heat transfer performance of plate-fin heat exchangers by quasai-S type header configuration[J]. Heat Transfer Engineering, 2017, **38**(18): 1547–1560.
- [16] 李登洪. 板翅式换热器封头与翅片结构优化及性能协调设计[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
- Li D H. Structure optimization and performance coordination design of inlet header and fin in plate-fin heat exchanger[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.
- [17] 辛杰, 唐凌虹, 刘佳伦, 等. 板翅式换热器内气液两相流分配特性数值分析[J]. 机电工程技术, 2024, **53**(4): 222–226.
- Xin J, Tang L H, Liu J L, et al. Study on distribution characteristics of gas-liquid two-phase flow in plate-fin heat exchanger[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, **53**(4): 222–226.
- [18] 彭翔, 高启龙. 面向封头流动不均匀性的板翅式换热器通道布局优化设计[J]. 化工机械, 2021, **48**(2): 268–273, 282.
- Peng X, Gao Q L. Optimal design of passage arrangement for plate-fin heat exchanger with inlet flow maldistribution in header[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2021, **48**(2): 268–273, 282.
- [19] 曹学文, 石倩, 彭文山. 板翅式换热器结构优化及其性能数值模拟[J]. 油气储运, 2019, **38**(9): 1048–1053.
- Cao X W, Shi Q, Peng W S. Structure optimization and performance numerical simulation of plate-fin heat exchanger[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, **38**(9): 1048–1053.
- [20] Tang Z C, He S, Li N Q, et al. Non-equilibrium overlapping grid method with two-phase porous media model for printed circuit heat exchanger based steam generator[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, **232**: 125960.
- [21] Du J, Zhao H T. Numerical simulation of a plate-fin heat exchanger with offset fins using porous media approach[J]. Heat and Mass Transfer, 2018, **54**(3): 745–755.
- [22] Du J, Deng J. Heat transfer enhancement using non-equally structure in a plate-fin heat exchanger with offset fins[J]. Thermal Science, 2022, **26**(6 part B): 4919–4930.
- [23] 譙厚峰, 蔡或青, 杜昶, 等. 基于多孔介质模型的翅片换热器性能预测[J]. 低温与超导, 2025, **53**(8): 1–6.
- Qiao H F, Cai Y Q, Du C, et al. Performance prediction of fin heat exchanger based on porous medium model[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2025, **53**(8): 1–6.
- [24] 李淑娟. 基于多孔介质方法的板翅式换热器流动传热特性模拟研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2024.
- Li S M. Simulation study on flow heat transfer characteristics of plate-fin heat exchanger based on porous media approach[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2024.
- [25] 张冰. 板翅式换热器封头内流体分配特性及结构优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- Zhang B. Study on flow distribution characteristics in head of plate fin heat exchanger and structural optimization[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [26] 余建祖. 换热器原理与设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- Yu J Z. Principle and design of heat exchanger[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2006.
- [27] 李翠, 夏程萍, 刘睿奇, 等. 氦负压板翅式换热器的流动不均匀性[J]. 化工进展, 2026, **45**(1): 40–49.
- Li C, Xia C P, Liu R Q, et al. Flow maldistribution in sub-atmospheric plate-fin heat exchangers with helium[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2026, **45**(1): 40–49.
- [28] 李翠, 刘睿奇, 朱柯宇, 等. 千瓦级 2K 负压板翅式换热器性能研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, **56**(10): 4411–4423.
- Li C, Liu R Q, Zhu K Y, et al. Performance study of kilowatt-class 2K sub-atmospheric plate-fin heat exchanger[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2025, **56**(10): 4411–4423.

- [29] 邹中宇, 张启勇, 朱志刚, 等. 锯齿型翅片内不同温区氦气流动与传热性能对比及节距对翅片性能影响的研究[J]. 真空与低温, 2024, **30**(3): 274–281.

Zou Z Y, Zhang Q Y, Zhu Z G, et al. Numerical investigation on heat transfer and flow performances of helium gas in serrated fins channels[J]. Vacuum and Cryogenics, 2024, **30**(3): 274–281.