

直型通道印刷电路板式冷却器流动传热实验研究

杨健^{1,2}, 成克用^{1,2,3*}, 淮秀兰^{1,2}

¹中国科学院工程热物理研究所传热传质研究中心, 北京

²中国科学院大学工程科学学院, 北京

³中国科学院大学南京学院, 江苏 南京

收稿日期: 2026年4月3日; 录用日期: 2026年4月20日; 发布日期: 2026年5月7日

摘要

针对超临界CO₂布雷顿循环系统中冷却器在拟临界工况下传热与流动特性复杂、预测精度不足的问题, 本文基于直型通道印刷电路板式换热器缩比样机开展了系统的实验研究。在不同质量流量和入口温度条件下, 获取了换热器在多工况下的传热与压降数据, 系统分析了入口温度与质量流量对换热性能及流动阻力的耦合影响规律, 并在此基础上建立了适用于直型通道结构的流动传热经验关联式。结果表明, 热侧CO₂入口温度升高可通过增大传热温差并强化拟临界区热物性效应显著提升换热能力, 而冷侧入口温度升高则导致传热驱动力减弱, 从而抑制换热过程; 相较而言, 入口温度变化对压降的影响较为有限。质量流量是主导换热器性能变化的关键参数, 其增加可通过提高雷诺数和强化湍流作用显著提升对流换热强度, 但同时引起压降快速增加, 体现出明显的热工水力耦合约束特征。进一步地, 基于实验数据通过非线性回归建立了CO₂侧与水侧努塞尔数及摩擦因子关联式, 其预测结果与实验数据吻合良好, CO₂侧与水侧的最大偏差分别控制在±20%和±10%、±10%和±5%以内, 具有良好的工程适用性。本研究从实验层面揭示了直型通道印刷电路板式冷却器在拟临界区域的流动与传热耦合机制, 所得关联式可为超临界CO₂布雷顿循环系统中冷却器的设计优化与性能预测提供可靠依据。

关键词

印刷电路板式换热器, 冷却器, 二氧化碳, 关联式

Experimental Study on Flow and Heat Transfer of Straight-Channel Printed Circuit Heat Exchangers Used as Coolers

Jian Yang^{1,2}, Keyong Cheng^{1,2,3*}, Xiulan Huai^{1,2}

*通讯作者。

¹Heat and Mass Transfer Research Center, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing

²School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

³University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing Jiangsu

Received: April 3, 2026; accepted: April 20, 2026; published: May 7, 2026

Abstract

To address the complexity of flow and heat transfer characteristics and the insufficient prediction accuracy of coolers operating under pseudo-critical conditions in supercritical CO₂ Brayton cycles, a systematic experimental investigation was conducted on a scaled-down straight-channel printed circuit heat exchanger (PCHE). Experiments were performed over a wide range of operating conditions, including different inlet temperatures and mass flow rates. The thermal-hydraulic performance, including heat transfer capacity and pressure drop, was obtained and analyzed. Particular attention was given to the coupled effects of inlet temperature and mass flow rate on heat transfer performance and flow resistance. Based on the experimental data, empirical correlations applicable to straight-channel configurations were developed. The results indicate that increasing the inlet temperature of the hot-side CO₂ significantly enhances heat transfer performance by enlarging the temperature difference and intensifying thermophysical property variations near the pseudo-critical region. In contrast, an increase in the cold-side inlet temperature weakens the driving temperature difference, thereby suppressing heat transfer. Compared with these effects, the influence of inlet temperature on pressure drop is relatively limited. The mass flow rate is identified as the dominant parameter governing the overall performance of the heat exchanger. Increasing the mass flow rate markedly enhances convective heat transfer by elevating the Reynolds number and strengthening turbulence, while simultaneously leading to a rapid increase in pressure drop, reflecting a pronounced thermo-hydraulic trade-off. Furthermore, empirical correlations for the Nusselt number and friction factor on both the CO₂ and water sides were developed using nonlinear regression. The correlations show good agreement with experimental data, with maximum deviations within $\pm 20\%$ and $\pm 10\%$ for CO₂, and $\pm 10\%$ and $\pm 5\%$ for water, respectively, demonstrating good engineering applicability. This study experimentally elucidates the coupled flow and heat transfer mechanisms of straight-channel PCHE coolers in the pseudo-critical region. The proposed correlations provide reliable guidance for the design optimization and performance prediction of coolers in supercritical CO₂ Brayton cycle systems.

Keywords

Printed Circuit Heat Exchanger, Cooler, Carbon Dioxide, Correlations

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

超临界 CO₂ 布雷顿循环发电系统具有效率高、响应快和体积紧凑的特点，可与化石能源、太阳能、核能等进行联合，被广泛关注[1]。冷却器用来将进入压气机的 CO₂ 温度降至拟临界温度附近，有效保证压气机高效率运行，是提升系统整体效率的关键部件[2]。传统管壳式换热器由于其体积庞大、效率较低、灵活性差，不适用于本系统。而印刷电路板式换热器(PCHE)采用化学蚀刻和真空扩散焊技术，通道尺寸

在 1~5 mm 范围, 最高可承压 90 MPa, 耐温 900℃, 紧凑度最高可达 5000 m²/m³ 以上, 非常适用于超临界 CO₂ 布雷顿循环发电系统[3]。因此, 开展超临界 CO₂ 印刷电路板式冷却器流动传热性能研究, 掌握其精准优化设计方法成为国内外研究热点[4]。

直型通道 PCHE 由于结构简单最早被研究。Ancesh 等人[5]指出在直通道中设置凹槽可以有效增强换热。Seo 等人[6]研究结果表明逆流直通道 PCHE 换热性能最佳。Zhu 等人[7]指出与传统均匀直通道相比, 沿流动方向变截面可以提高传热系数 24%~27%。Zhang 等人[8]考察了直通道内浮升力引起的二次流对流动换热性能的影响。随后, 为了提升换热器的性能, 之字型、S 型、翼型等通道结构被提出。Ma 等人[9]指出之字型通道可以显著提升换热器的换热能力。Zhou 等人[10]测试了之字型印刷电路板式回热器, 换热量为 120 kW 时, 效率可达 95%, CO₂ 热侧和冷侧的压降分别为 48 kPa 和 41 kPa。Lee 等人[11]和 Bartel 等人[12]研究了通道截面和弯折角度对之字形通道流动换热性能的影响, 结果表明矩形截面和较小的角度可以提升换热效率, 但流动阻力也随之增加。Ngo 等人[13]提出 S 型通道结构, 此种结构的努塞尔数和压降系数比之字型分别高 24%~34%和 4~5 倍。Kim 等人[14]研究表明, NACA0020 翼型翅片通道结构的压降远低于其他结构。Cui 等人[15]利用场协同原理对翼型翅片进行改进, 使得换热器综合性能得到提高。

尽管提出如此多的新型通道结构, 但由于超临界 CO₂ 发电系统对冷却器的压降要求比较苛刻, 且考虑到复杂通道存在流动死区, 长期运行会导致污垢存留, 最终堵塞通道。因此, 工程中应用最适合的仍是直型通道。目前, 文献研究多基于数值模拟, 所研究的周期性模型与实际换热器结构存在差异。此外, CO₂ 在拟临界点附近物性变化剧烈, 导致在此温度范围内流动传热性能预测难度急增[16]。因此, 本文对超临界 CO₂ 印刷电路板式冷却器缩比样机进行实验测试, 考察入口温度、压力和流量对换热器性能的影响, 并凝练高精度 CO₂ 和水的流动传热关联式, 为超临界 CO₂ 布雷顿循环发电系统用换热器设计优化提供技术支撑。

2. 实验系统

2.1. 实验装置

实验装置主要由充注系统(灰色管线)、CO₂ 回路系统(红色管线)以及冷却水路系统(蓝色管线)三部分组成, 其整体流程如图 1 所示。在 CO₂ 侧入口与出口位置(A 点和 B 点)分别安装热电偶与压力传感器, 用于实时测量换热器热侧流体的温度与压力变化; 同时, 在 E 点布置差压测量装置, 用于获取 CO₂ 侧通道的整体压降。对应地, 在冷却水侧入口与出口位置(C 点和 D 点)同样布置热电偶与压力传感器, 以实现冷侧流体温度与压力参数的同步测量。通过上述多点测量手段, 可实现换热器两侧流体热力参数的完整采集, 为后续换热量计算及流动阻力分析提供基础数据。此外, 为保证实验数据的可靠性与可重复性, 实验系统在设计中充分考虑了测量精度及系统稳定性。CO₂ 侧采用科氏力质量流量计, 测试范围 0~3600 kg/h, 精度为±0.2%, 水侧采用电磁流量计, 测试范围 1.45~6 m³/h, 精度为±0.5%。温度测量采用 PT100, 精度为±0.5%, CO₂ 和水侧压力传感器测量范围分别为 0~12 MPa 和 0~3 MPa, 精度为±0.25%, 差压传感器测量范围为 0~0.3 MPa, 精度为±0.25%。关于实验装置的具体构成、各子系统功能、测量仪器精度以及实验操作与数据处理方法等详细内容, 可参考本团队已发表的相关研究成果[17]。

2.2. 测试样件及工况

本研究测试的换热器实物图如图 2 所示。换热器通道截面为半圆形, 热侧通道直径 1.1 mm, 通道数为 30 个, 板片数为 23 张板, 板片厚度 1.0 mm; 冷侧通道直径 1.4 mm, 通道数为 25 个, 板片数为 23 张, 板片厚度 1.2 mm。板片材质为 316L 不锈钢, 换热器芯体尺寸为 54 mm × 50.6 mm × 1450 mm (宽 × 高 × 长)。实验测试工况如下表 1 所示, 实验平台提供的测试条件涵盖测试工况。

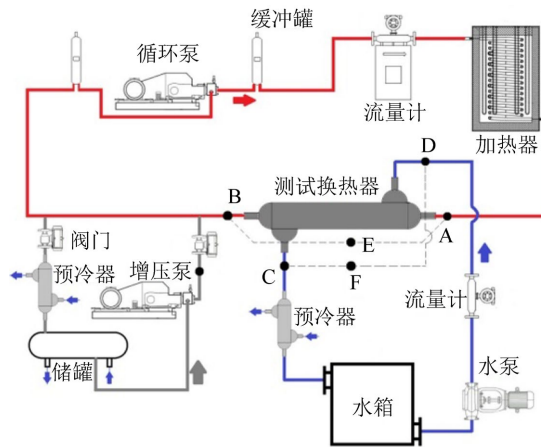


Figure 1. Experimental test flow chart
图 1. 实验测试流程图



Figure 2. Heat exchanger physical diagram
图 2. 换热器实物图

Table 1. Test conditions of the scaled-down cooler prototype
表 1. 冷却器缩比样机测试工况

工质	热侧(CO ₂)	冷侧(H ₂ O)
入口流量(kg/s)	0.15~0.24	0.1~0.5
入口温度(°C)	34.5~92.7	15~35
入口压力(MPa)	6.9~8.2	0.19~0.22

2.3. 数据处理

换热器的平均换热量计算公式如下

$$Q_{ave} = \frac{m_h(H_{h,i} - H_{h,o}) + m_c(H_{c,o} - H_{c,i})}{2} \quad (1)$$

其中, m 是入口质量流量, H 是焓值, 下标 h 和 c 分别代表热侧和冷侧, i 和 o 分别代表入口和出口。

换热器热侧或冷侧通道压降计算公式如下

$$\Delta P_c = \Delta P_{tot} - \Delta P_{in} - \Delta P_{out} - \Delta P_a \quad (2)$$

其中, ΔP_{tot} 、 ΔP_{in} 、 ΔP_{out} 、 ΔP_a 分别为换热器进出口总压降, 换热器入口封头 - 通道截面入口段压降, 换

热器通道截面出口 - 出口封头段压降, 换热器通道内流动加速压降。

换热器传热系数计算公式如下

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{hot}}} + \frac{\delta}{k} + \frac{1}{h_{\text{cold}}}} \quad (3)$$

其中, h_{hot} 为热侧对流换热系数, h_{cold} 为冷侧对流换热系数, k 和 δ 分别是材料的导热系数和厚度。

雷诺数计算公式如下

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (4)$$

其中, ρ 和 μ 分别为密度和黏度, V 和 D 分别为速度和当量直径。

努塞尔数计算公式如下

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad (5)$$

普朗特数计算公式如下

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad (6)$$

其中, c_p 和 λ 为流体的定压比热和导热率。

摩擦因子计算公式如下

$$f = \frac{\Delta P_c}{2\rho V^2} \frac{D}{L} \quad (7)$$

偏差计算公式如下

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^s \left(\frac{|Y_{\text{exp},i} - Y_{\text{cal},i}|}{Y_{\text{exp},i}} \right)}{s} \quad (8)$$

其中 s 是实验数据点的数量, Y_{exp} 和 Y_{cal} 分别表示实验数据和预测数据。

不确定度分析计算公式如下

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (9)$$

$$\frac{\delta y}{y} = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial f}{\partial x} \delta x \right)^2} \quad (10)$$

其中, 换热量、传热系数、压降、努塞尔数和摩擦因子的不确定度分别为 3.56%, 3.81%, 4.23%, 4.53% 和 4.61%。

3. 结果与讨论

3.1. 冷热侧换热量热平衡验证

在实验测试过程中, 由于 CO_2 工质运行于接近拟临界点的压力和温度范围内, 其热物性参数(如密度、比热容和黏度等)对温度和压力变化极为敏感, 呈现出强烈的非线性特征。因此, 在换热器入口区域, 即

使外部调控条件保持相对稳定, CO_2 物性仍会随微小的温度、压力及流量波动发生显著变化, 进而导致系统运行状态呈现一定程度的周期性波动。在此情况下, 难以同时将入口压力、入口温度及质量流量三个关键参数在较长时间尺度内严格维持在理想恒定值, 这为实验数据的稳定获取与准确判定带来一定挑战。基于上述特点, 本文采用热平衡方法作为判定实验数据可靠性的主要依据。具体而言, 当换热器冷热两侧入口流量、入口压力及入口温度达到设定工况范围, 并在短时间内保持相对稳定时, 通过计算热侧 CO_2 放热量与冷侧水吸热量之间的偏差来评估数据的有效性。考虑到实验测量误差及系统波动的客观存在, 当冷热两侧换热量相对偏差不超过 20% 时, 可认为换热器在该工况下实现了较为充分且稳定的换热过程, 所采集的数据具有良好的可信度。如图 3 所示, 在设计工况及多种非设计工况下对换热器进行了系统测试, Q_c 与 Q_h 之间的偏差控制在 20% 以内时, 表明冷热流体之间的能量交换达到平衡状态。

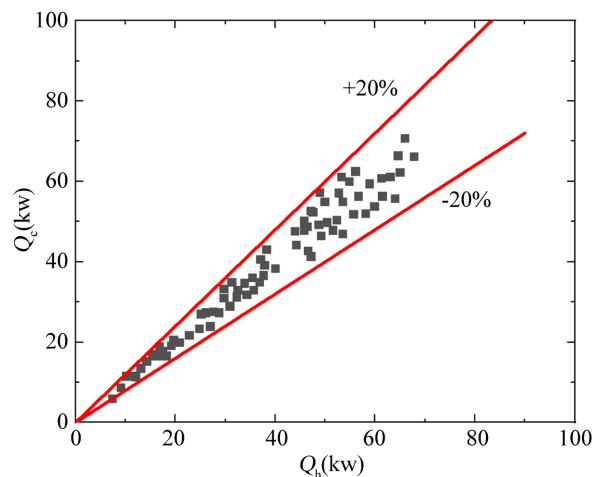


Figure 3. Verification of thermal balance between the cold and hot sides
图 3. 冷热侧热平衡验证

3.2. 入口温度对换热器性能的影响

为进一步分析热侧入口温度对直型通道印刷电路板式冷却器性能的影响, 在保持 CO_2 入口压力及冷侧质量流量基本恒定的条件下, 对不同 CO_2 入口温度工况进行了实验研究, 结果如图 4 和图 5 所示。

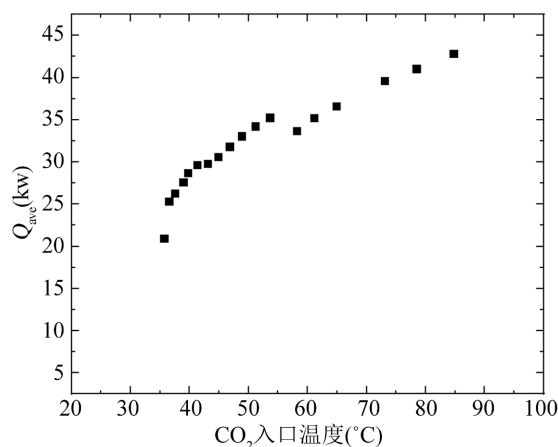


Figure 4. The change of heat transfer rate with the inlet temperature of CO_2 side
图 4. 换热量随 CO_2 入口温度的变化

由图4可以看出,随着热侧CO₂入口温度由35.6℃升高至84.7℃,冷却器换热量由20.9 kW提升至42.8 kW,整体呈现单调增长趋势。这主要是由于CO₂入口温度升高后,冷热两侧流体之间的平均温差增大,从而增强了传热驱动力。同时,在接近拟临界温度区域时,CO₂的定压比热容显著提高,使单位质量流体能够释放更多热量,进一步促进换热量提升。此外,较高的入口温度还能强化通道内的湍流程度,提高对流换热系数,从而共同导致换热性能的增强。

从图5可知,在所考察温度范围内,CO₂侧压降基本维持在16.59~23.67 kPa之间,整体呈现上升趋势,主要原因是随着入口温度的增加,CO₂密度减小,在质量流量保持恒定的情况下,速度增大,因此压降呈现上升趋势。而水侧压降为56.8 kPa,整体保持稳定,这是因为水侧物性基本无变化。

综合来看,提高CO₂入口温度能够有效提升换热器的换热能力,而不会显著增加系统压降,说明在满足材料耐温及系统安全性的前提下,适当提高热侧入口温度对提升冷却器性能具有积极意义。

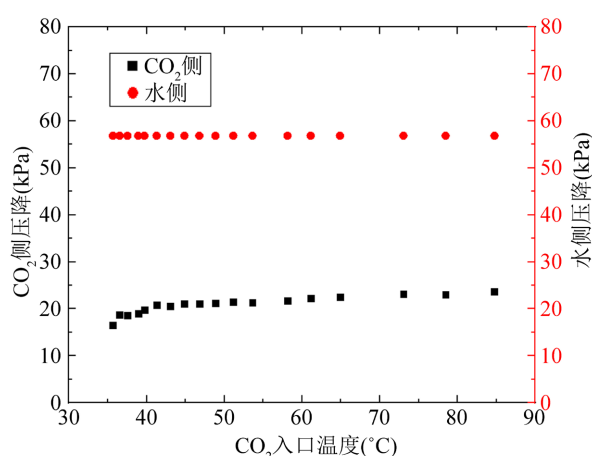


Figure 5. The change of pressure drop with the inlet temperature of CO₂ side
图5. 压降随CO₂入口温度的变化

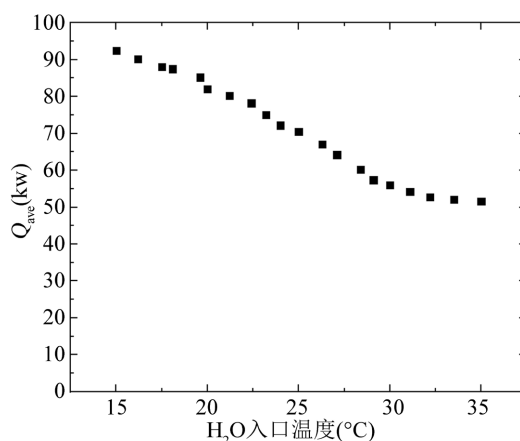


Figure 6. The change of heat transfer rate with the inlet temperature of water side
图6. 换热量随水侧入口温度的变化

在保持CO₂侧入口参数基本不变的条件下,通过调节冷侧水入口温度,对冷却器在非设计工况下的传热与流动性能进行了实验研究。由图6可以看出,随着水侧入口温度由约15℃升高至35℃,冷却器的换热量整体呈现下降趋势,从92.4 kW降低到51.6 kW。其主要原因在于,冷侧入口温度升高会减小冷热

流体之间的初始温差,从而削弱换热驱动力,导致单位时间内传递的热量减少。对于以温差驱动为主导的对流换热过程而言,冷端温度水平对换热器性能具有直接且显著的影响。

从图7可以看出,随着水侧入口温度的变化,CO₂侧压降从129.8 kPa升至140.9 kPa,这是因为水侧温度升高导致CO₂温度也升高,密度变小的同时速度增加,从而导致压降升高。而入口温度对流动阻力的影响较弱的原因在于,压降主要取决于质量流量、流速及通道结构,而在实验过程中这些参数保持不变;虽然温度变化会引起流体密度和黏度的改变,但在较小温度区间内,其对摩擦阻力的影响相对有限,因此压降未出现显著变化。

综合分析可知,降低水侧入口温度有利于增大传热温差,从而显著提高换热器的换热性能,而对系统压降影响较小。因此,在实际工程应用中,应尽可能降低冷却水入口温度,以提升冷却器效率并保证系统运行稳定性。

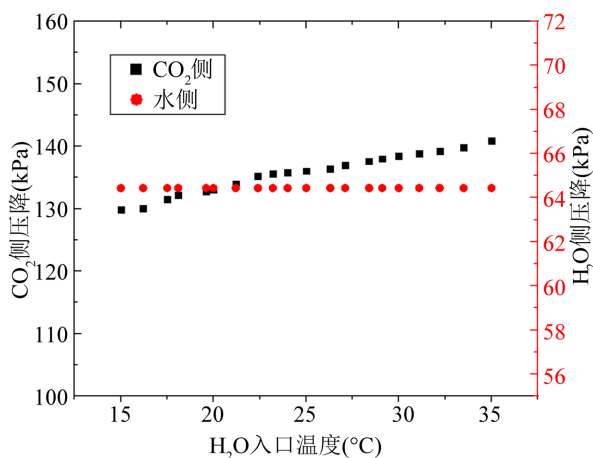


Figure 7. The change of pressure drop with the inlet temperature of water side
图7. 压降随水侧入口温度的变化

3.3. 入口流量对换热器性能的影响

在保持CO₂入口温度及压力基本不变的条件下,通过改变热侧CO₂入口质量流量,对冷却器的传热与流动特性进行了实验研究。由图8可以看出,随着CO₂入口质量流量由0.15 kg/s增加至0.24 kg/s,冷却器换热量由16.9 kW显著提升至62.2 kW,呈现出明显的非线性增长趋势。当质量流量增加约60%时,换热量提高幅度达到268%,说明流量对换热性能具有极为显著的强化作用。其主要原因在于:一方面,质量流量增加直接导致通道内流速提高,使雷诺数显著增大,从而强化湍流程度,提高对流换热系数;另一方面,流量增加使单位时间内参与换热的CO₂质量增多,流体携带热量的能力增强。此外,在拟临界区域附近,CO₂物性对温度和流速变化高度敏感,流动强化还会进一步促进边界层破坏和热量传递,从而导致换热量呈现出超线性增长特征。由图9可知,随着CO₂入口流量的增加,热侧压降由15.7 kPa迅速升高至48.3 kPa,增幅较为显著。这主要是由于流速提高导致摩擦阻力增加,同时局部阻力损失(如入口效应及流动发展段)也随之增强。在微通道结构中,压降与流速通常呈近似二次关系,因此随着质量流量的增加,压降上升趋势明显加快。此外,CO₂在拟临界区附近密度变化较大,也会对流动加速压降产生一定影响,使得整体压降进一步增加。

综合来看,提高CO₂入口质量流量能够显著强化换热性能,但同时会带来较大的压降损失。因此,在实际工程设计中,需要在换热强化与压降约束之间进行权衡,在满足系统允许压降范围的前提下,合理选择CO₂侧质量流量,以实现冷却器综合性能的最优。

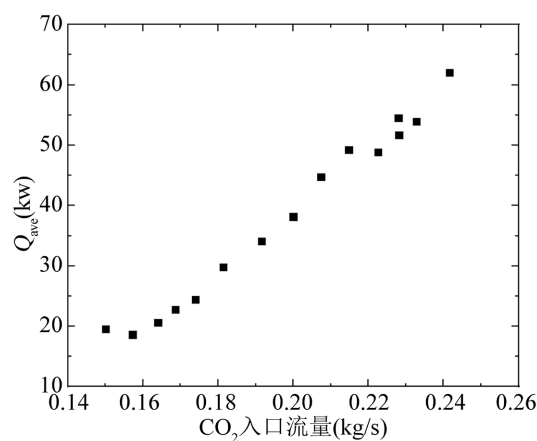


Figure 8. The change of heat transfer rate with the inlet flow rate of CO₂
图 8. 换热量随 CO₂ 入口流量的变化

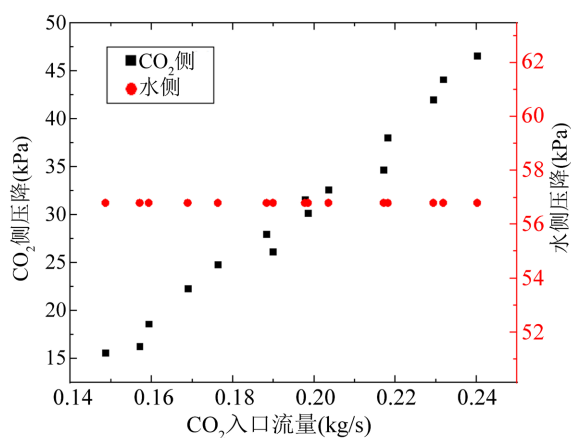


Figure 9. The change of pressure drop with the inlet flow rate of CO₂ side
图 9. 压降随 CO₂ 入口流量的变化

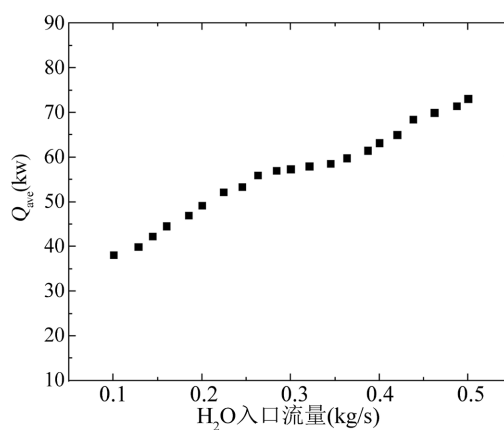


Figure 10. The change of heat transfer rate with the inlet flow rate of water side
图 10. 换热量随水侧入口流量的变化

在保持热侧 CO₂ 入口参数基本不变的条件下, 通过调节冷侧水入口质量流量, 对直型通道印刷电路板式冷却器的传热与流动性能进行了实验研究。由图 10 可以看出, 随着水侧入口质量流量的增加, 冷却

器换热量整体呈上升趋势。这表明提高冷侧流量有助于增强换热器的传热能力。其主要原因在于，较大的水流量还意味着单位时间内参与换热的冷流体质量增多，冷侧吸热能力增强，能够更有效地将热侧 CO₂ 释放的热量带走，因此换热量随之增大。对于此类逆流换热器而言，冷侧流量的提升还会改善沿程温度分布，使局部传热驱动力维持在较高水平，从而进一步促进整体换热性能提升。

由图 11 可知，随着水侧入口质量流量的增加，水侧压降明显增大，从 12.7 kPa 增加至 88.4 kPa，其原因在于，压降主要由本侧流体的流速、黏性摩擦及局部阻力决定。当水侧质量流量增加时，流速升高导致沿程摩擦损失迅速增加，同时入口与出口区域的局部损失也相应增大，因此水侧压降呈明显上升趋势。而 CO₂ 侧压降则从 202.4 kPa 降低至 127.4 kPa，这是由于水侧流量增加，CO₂ 出口温度降低，平均密度增大，在质量流量不变的情况下速度降低导致的。

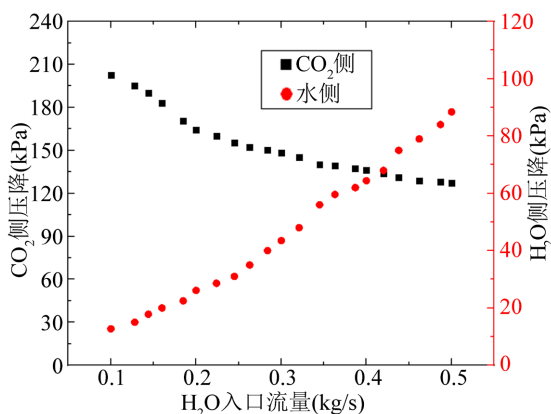


Figure 11. The change of pressure drop with the inlet flow rate of water side
图 11. 压降随水侧入口流量的变化

综合分析可知，提高水侧入口质量流量能够有效强化冷却器换热性能，但也会增加水侧泵送功耗和系统运行阻力。因此，在工程应用中，冷侧流量不宜一味增大，而应结合换热需求、压降限制及运行能耗进行综合优化，以获得更优的热工水力综合性能。

3.4. 流动传热经验关联式

利用非线性曲线拟合方法对实验测试数据进行拟合，得到直型通道换热器 CO₂ 侧 Nu 和 f 的经验关联式如下：

$$Nu = 0.002391 Re_{in}^{0.5279} Pr^{0.3578} \left(\frac{T_{CO_2}}{T_{pc}} \right)^{-4.1356} \quad (11)$$

$$f = 0.08326 Re_{in}^{-0.25596} \quad (12)$$

其中， $5363 \leq Re_{in} \leq 29771$ ， $1 \leq Pr \leq 29$ ， $1.07 \leq T_{CO_2}/T_{pc} \leq 1.42$ 。

努塞尔数关联式中引入 T_{CO_2}/T_{pc} (即 CO₂ 侧流体平均温度与拟临界温度之比) 这一变量，主要是为了反映 CO₂ 当前热状态与拟临界状态之间的相对关系。其次，从参数归一化处理角度看，拟临界温度 T_{pc} 随压力变化而变化，采用温度比而非单独使用绝对温度，有利于削弱不同压力水平下量纲温度直接比较所带来的局限，使关联式更适用于本文所讨论的超临界工况范围。

图 12 和图 13 展示了热侧 CO₂ 在直型流道中努塞尔数 Nu 与摩擦因子 f 的相关性与实验计算结果之间的对比。从图中可以看出，拟合关联式对 Nu 和 f 的预测均能够较好覆盖实验数据散点，整体趋势与实

验结果保持一致。具体而言, Nu 与关联式拟合的最大偏差为 $\pm 20\%$, 平均偏差为 9.41%; 而摩擦因子 f 的最大偏差为 $\pm 10\%$, 平均偏差为 4.65%, 均在工程可接受范围内。

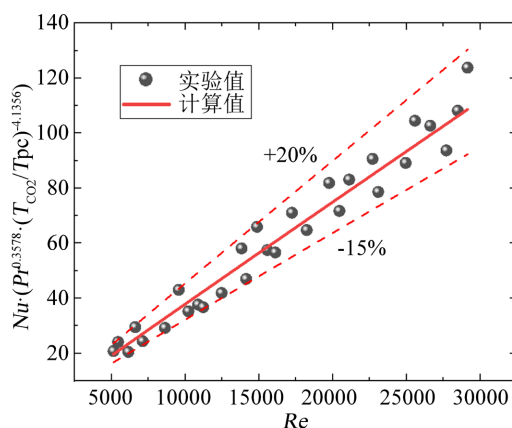


Figure 12. Heat transfer correlation on CO₂ side
图 12. CO₂ 侧传热关联式

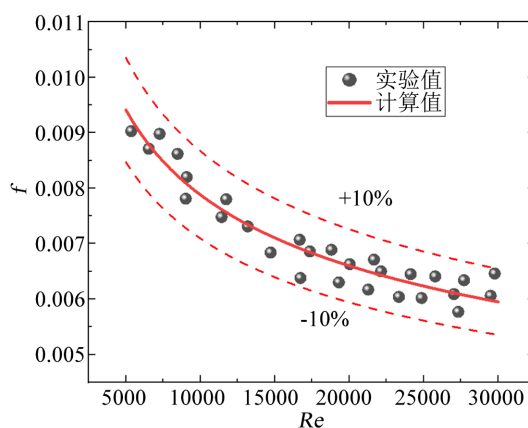


Figure 13. Friction factor correlation on CO₂ side
图 13. CO₂ 侧摩擦因子关联式

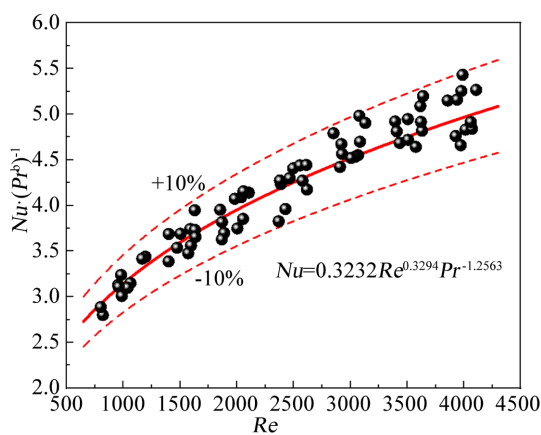


Figure 14. Heat transfer correlation on water side
图 14. 水侧传热关联式

利用非线性曲线拟合方法对实验测试数据进行拟合,得到直型流道换热器水侧 Nu 和 f 的经验关联式如下所示:

$$Nu = 0.3232Re_{in}^{0.3294} Pr^{-1.2563} \quad (13)$$

$$f = 0.7383Re_{in}^{-0.4281} \quad (14)$$

其中, $500 \leq Re_{in} \leq 4500$, $0.6 \leq Pr \leq 2.2$ 。

图 14 和图 15 展示了冷侧水在直行通道中努塞尔数 Nu 与摩擦因子 f 的相关性与实验数据之间的对比。可以看出,拟合关联式能够有效覆盖实验数据,整体趋势与实验结果高度一致。具体而言, Nu 与拟合曲线的最大偏差为 $\pm 10\%$, 平均偏差为 3.38%; 摩擦因子 f 的最大偏差为 $\pm 5\%$, 平均偏差为 1.38%, 均在工程可接受范围内。

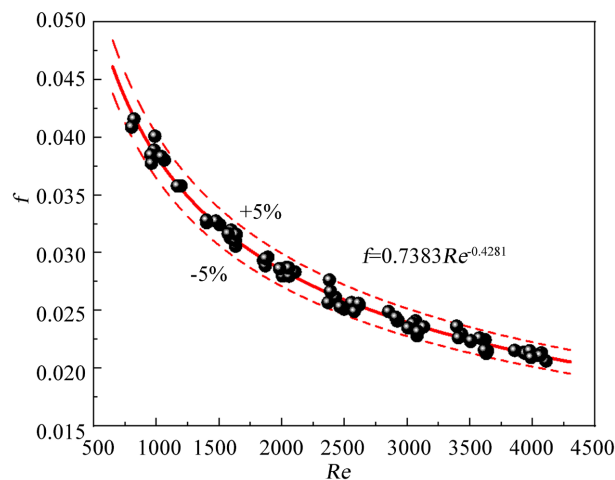


Figure 15. Friction factor correlation on water side

图 15. 水侧摩擦因子关联式

4. 结论

本文针对超临界 CO_2 布雷顿循环系统中冷却器的应用需求,开展了直型通道印刷电路板式冷却器缩比样机的流动与传热实验研究,系统考察了入口温度及质量流量对换热器性能的影响规律,并建立了相应的流动传热经验关联式。主要结论如下:

(1) 入口温度对换热器传热性能具有显著影响,而对压降影响较小。随着热侧 CO_2 入口温度升高,换热量显著增加,其原因在于平均温差增大及拟临界区附近 CO_2 比热容提升;而冷侧水入口温度升高则会削弱传热驱动力,使换热量降低。总体而言,温度参数主要通过影响温差及流体物性改变传热能力,对流动阻力的作用相对有限。

(2) 入口质量流量是影响换热器综合性能的关键因素。无论是热侧 CO_2 还是冷侧水,质量流量增加均会显著强化换热过程,其机理在于流速提高使湍流增强、对流换热系数增大,同时单位时间内参与换热的流体质量增加。但与此同时,压降随流量增加呈明显上升趋势,尤其在微通道结构中表现更为显著,因此需在换热强化与压降约束之间进行优化权衡。

(3) 基于实验数据建立了 CO_2 侧与水侧的流动传热经验关联式,预测结果与实验数据吻合良好,其中 CO_2 侧努塞尔数和摩擦因子的最大偏差分别控制在 $\pm 20\%$ 和 $\pm 10\%$ 以内,平均偏差分别为 9.41% 和 4.65%;水侧分别控制在 $\pm 10\%$ 和 $\pm 5\%$ 以内,平均偏差分别为 3.38% 和 1.38%。所建立的关联式能够较好反映直型

通道印刷电路板式冷却器的传热与流动特性，可为超临界 CO₂ 布雷顿循环系统中换热器的设计与性能预测提供可靠依据。

基金项目

国家重点研发计划重点专项(2023YFB4102200)。

参考文献

- [1] 马小峰, 姜培学, 祝银海. 基于超临界 CO₂ 布雷顿循环的飞行器热电转换系统动态仿真与瞬态特性分析[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(2): 343-351.
- [2] 王兵兵, 乔加飞. 不同超临界 CO₂ 布雷顿循环性能的对比研究[J]. 汽轮机技术, 2019, 61(1): 4-8.
- [3] 丁源, 童自翔, 王文奇, 曹锋. 超临界二氧化碳印刷电路板式换热器设计及应用研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(5): 1351-1356.
- [4] 黄俊杰, 韩增孝, 郭江峰, 等. 超临界 CO₂ 微通道换热器研究进展[J]. 制冷学报, 2023, 44(4): 1-14.
- [5] Aneesh, A.M., Sharma, A., Srivastava, A., Vyas, K.N. and Chaudhuri, P. (2016) Thermal-hydraulic Characteristics and Performance of 3D Straight Channel Based Printed Circuit Heat Exchanger. *Applied Thermal Engineering*, **98**, 474-482. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.046>
- [6] Seo, J., Kim, Y., Kim, D., Choi, Y. and Lee, K. (2015) Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics in Straight Microchannel of Printed Circuit Heat Exchangers. *Entropy*, **17**, 3438-3457. <https://doi.org/10.3390/e17053438>
- [7] Zhu, B., Ma, L., Zhang, Q. and Shi, H. (2024) An Investigation of the Thermo-Hydraulic Performance of a Novel Double Tube Heat Exchanger with Variable Cross-Section Inner Tube for Trans-Critical CO₂ Cycle. *Applied Thermal Engineering*, **253**, Article ID: 123825. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123825>
- [8] Zhang, H., Guo, J., Huai, X., Cui, X. and Cheng, K. (2019) Buoyancy Effects on Coupled Heat Transfer of Supercritical Pressure CO₂ in Horizontal Semicircular Channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **134**, 437-449. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.045>
- [9] Ma, T., Li, L., Xu, X., Chen, Y. and Wang, Q. (2015) Study on Local Thermal-Hydraulic Performance and Optimization of Zigzag-Type Printed Circuit Heat Exchanger at High Temperature. *Energy Conversion and Management*, **104**, 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.016>
- [10] Zhou, J., Cheng, K., Zhang, H., Liu, B., Huai, X., Guo, J., et al. (2020) Test Platform and Experimental Test on 100 Kw Class Printed Circuit Heat Exchanger for Supercritical CO₂ Brayton Cycle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **148**, Article ID: 118540. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118540>
- [11] Lee, S. and Kim, K. (2013) Comparative Study on Performance of a Zigzag Printed Circuit Heat Exchanger with Various Channel Shapes and Configurations. *Heat and Mass Transfer*, **49**, 1021-1028. <https://doi.org/10.1007/s00231-013-1149-4>
- [12] Bartel, N., Chen, M., Utgikar, V.P., Sun, X., Kim, I., Christensen, R., et al. (2015) Comparative Analysis of Compact Heat Exchangers for Application as the Intermediate Heat Exchanger for Advanced Nuclear Reactors. *Annals of Nuclear Energy*, **81**, 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.03.029>
- [13] Ngo, T.L., Kato, Y., Nikitin, K. and Tsuzuki, N. (2006) New Printed Circuit Heat Exchanger with S-Shaped Fins for Hot Water Supplier. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **30**, 811-819. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2006.03.010>
- [14] Kim, T.H., Kwon, J.G., Yoon, S.H., Park, H.S., Kim, M.H. and Cha, J.E. (2015) Numerical Analysis of Air-Foil Shaped Fin Performance in Printed Circuit Heat Exchanger in a Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle. *Nuclear Engineering and Design*, **288**, 110-118. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.03.013>
- [15] Cui, X., Guo, J., Huai, X., Cheng, K., Zhang, H. and Xiang, M. (2018) Numerical Study on Novel Airfoil Fins for Printed Circuit Heat Exchanger Using Supercritical CO₂. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **121**, 354-366. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.015>
- [16] 施伟杰, 王艳娟, 于滨汇, 等. 湍流普朗特数对竖直圆管高热流超临界二氧化碳流动传热性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(19): 7684-7693.
- [17] Cheng, K., Zhou, J., Zhang, H., Huai, X. and Guo, J. (2020) Experimental Investigation of Thermal-Hydraulic Characteristics of a Printed Circuit Heat Exchanger Used as a Pre-Cooler for the Supercritical CO₂ Brayton Cycle. *Applied Thermal Engineering*, **171**, Article ID: 115116. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115116>