



基于超临界二氧化碳-氦气混合工质的适应性流道回热器性能实验研究

程文龙^{*}, 刘世宜, 赵锐

中国科学技术大学热科学和能源工程系, 合肥 230027

^{*} E-mail: wlcheng@ustc.edu.cn

收稿日期: 2020-03-14; 接受日期: 2020-07-10; 网络版发表日期: 2020-09-24

国家自然科学基金(批准号: 51876198)资助项目

摘要 回热器是超临界二氧化碳(supercritical CO₂, S-CO₂)布雷顿循环系统中最关键的设备之一, 其性能对系统效率有至关重要的影响. 研究发现, 适应性流道回热器可以有效地提高S-CO₂回热器性能. 基于此, 本文针对S-CO₂-He混合气体, 对适应性流道回热器的特性和效率进行了实验研究, 并与传统流道回热器以及S-CO₂回热器进行了对比分析. 首先, 本文在研制的适应性流道回热器的基础上, 针对S-CO₂-He混合气体搭建了回热器性能测试平台. 然后通过实验研究了不同质量分数CO₂-He混合气体在适应性流道中的传热特性, 并通过对高压侧压差、平均换热量、传热效率的变化规律的研究, 总结了He占比对换热器传热性能的影响规律. 实验结果显示, 与常规流道相比, 适应性流道换热器的压力损失减少了40%, 在质量流量较大时平均换热量增加明显, 传热效率提升1%; 相较于S-CO₂, 基于混合工质的回热器压力损失显著减少, 但平均换热量和传热效率会有所降低. 因此, S-CO₂-He混合气体的适应性流道回热器有效地提升了换热器的流动和换热性能, 可以为超临界系统中的回热器设计提供理论和实践基础.

关键词 S-CO₂布雷顿循环, CO₂-He混合气体, 适应性流道换热器, 压力损失, 传热效率

1 引言

能源问题一直是世界发展面临的重要挑战, 人类社会的每一个进步都是由新型能源的发现或者能源的新式利用推动的. 核能开发与利用为解决这一挑战提供了有力方法, 国际原子能机构研究表明, 到21世纪40年代初期, 世界全部动力输出中核动力至少占1/4^[1]. 核能作为一种清洁能源, 具有储备足、能量高、成本

低、无供电间隙等优点, 是最具有开发价值和发展潜力的新能源之一, 并在世界范围内获得了广泛的研究和关注^[2].

为了进一步提升核反应堆的能源转化效率, 同时解决核废料以及安全等问题, 国际核能研究机构最新提出了第四代核反应堆^[3,4]. 作为核反应堆中重要的系统, 冷却堆目前已发展出多种系统^[4,5], 以超临界二氧化碳(supercritical CO₂, S-CO₂)为工质的布雷顿循环由

引用格式: 程文龙, 刘世宜, 赵锐. 基于超临界二氧化碳-氦气混合工质的适应性流道回热器性能实验研究. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1339–1346
Cheng W L, Liu S Y, Zhao R. Experimental study on adaptive flow path regenerator based on supercritical CO₂-He (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 1339–1346, doi: [10.1360/SST-2020-0106](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0106)

于其换热效率高、能量密度大和性能稳定等优点, 被广泛应用于钠冷快堆和铅冷快堆^[4,6]。CO₂本身易获得、价格低、安全性能好^[7], S-CO₂的传热能力和热力学特性突出、稳定性良好, 已有广泛应用^[8]。

与常规循环相比, S-CO₂布雷顿循环可以明显降低压机、回热器和透平的尺寸, 使整个核动力系统结构更加紧凑, 同时可以提高系统的效率和安全性^[9]。同时, S-CO₂还可以提升整个布雷顿换热系统的能量密度, 减小回热器、透平和压机等设备的体积或使之更加紧凑, 在不影响整个循环系统性能的前提下使整个循环系统的体积更小^[10]。国内外学者围绕S-CO₂循环已经开展了一些研究, 与多种热源形式进行结合, 目前已经提出了简单回热、再压缩、中间冷却、预压缩、分流形式的布雷顿循环以及在此基础上的改进循环^[11-14]。研究表明, 回热器约占S-CO₂系统成本的50%以上, 也是系统中体积最大, 数量最多的设备。因此, 回热器是系统最关键的设备之一, 提升回热器效率对提高系统整体的效率有着至关重要的作用^[15]。

由于在临界点附近S-CO₂的比热容、密度均出现剧烈的变化, 从而使得回热器两侧换热量产生比较大的差距, 导致回热器中“夹点”问题出现, 会对回热器的压力损失和换热效率都产生不良影响, 最终影响整个循环的效率^[16]。针对这一问题, 研究者提出了一种适应性流道回热器, 通过改变流道的尺寸适应流体的物性变化, 降低夹点效应的影响, 原理图如图1和2所示, 图3为流道内部S形肋片结构。回热器的尺寸为60 mm×250 mm×20 mm, 其中包括八层流道: 四层冷流道和四层热流道, 如图4所示。研究表明该回热器不但可以有效地降低S-CO₂换热过程的压力损失, 还可

以提升换热效率^[16,17]。

此外, 研究发现工质的选择与优化也显著影响超临界动力系统的工作效率。尤其是工质的临界参数是影响循环效率的关键。例如, 临界点较低的超临界流体通常具有较高透平膨胀比, 较低的压缩机入口温度, 进而可以提高循环效率^[18]。CO₂正是由于具有较低的临界参数, 使得S-CO₂布雷顿循环始终处于超临界区, 显著降低了压缩机耗功, 提高循环效率^[19]。尽管如此, 为了进一步降低临界点以获得更高的系统效率, 研究

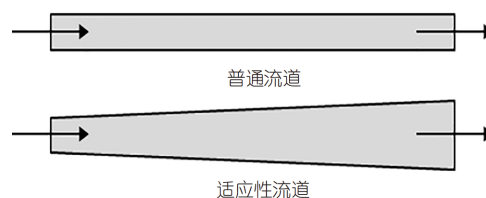


图2 两种流道结构俯视图

Figure 2 Top view of two flow channel structures.

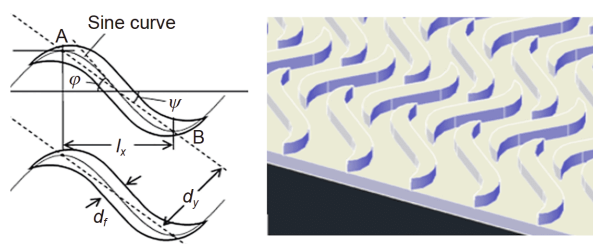


图3 (网络版彩图)S形肋片示意图。AB=4.8 mm, $d_y=2.7$ mm, $d_x=0.8$ mm, $L_x=4.8\cos\psi$, $\psi=40^\circ$

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of S-shaped fins. AB=4.8 mm, $d_y=2.7$ mm, $d_x=0.8$ mm, $L_x=4.8\cos\psi$, $\psi=40^\circ$.

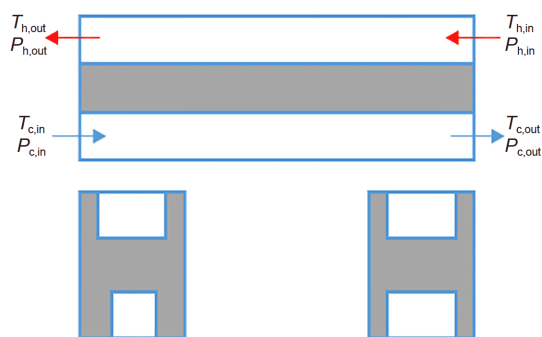


图1 (网络版彩图)适应性流道回热器原理示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of adaptive flow path regenerator.

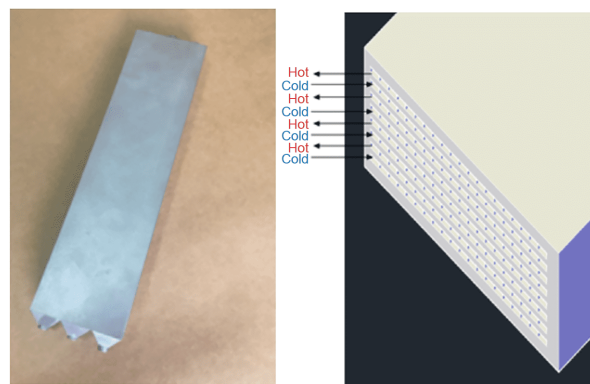


图4 (网络版彩图)回热器实物图和截面图

Figure 4 (Color online) Physical and cross-sectional diagram of regenerator.

者通过将 CO_2 与其他气体混合来实现 CO_2 临界参数的调节^[20]. 其中氦气(He)临界点较低, 同时化学惰性高、气体流动性好、安全无毒, 与 CO_2 混合后的混合工质性能稳定, 混合后可以降低 S-CO_2 的临界点, 提升超临界系统效率^[21].

综上所述, 适应性流道回热器可以有效地提高单一工质—— S-CO_2 的换热效率并降低压力损失. 同时通过将 S-CO_2 与He混合可降低临界点参数, 进一步提高循环效率. 基于此, 本文通过将 S-CO_2 -He混合气和适应性流道换热器相结合, 研究不同条件下 CO_2 和He的混合气体在适应性流道回热器中的换热特性, 探索进一步提升 S-CO_2 换热器性能的方法, 最终为提高 S-CO_2 布雷顿循环效率提供理论和实践基础.

2 实验系统和误差分析

2.1 实验系统

图5为 S-CO_2 -He回热器性能测试系统的示意图, 测试系统主要包括三个循环单元: 超临界流体(CO_2 -He)循环、水路循环和油路循环. 在 CO_2 -He循环中,

CO_2 和He分别从容器中被注入到低压储气罐中, 然后经流量调节阀进入压缩机, 被压缩后的高压 CO_2 -He在压缩机出口经流量调节阀和分流阀形成三个流路: 一路通过流量调节阀后, 经过回热器和油加热器加热, 达到一定的温度和压力后进入待测回热器, 为高温低压侧. 另一路由水浴加热后进入待测回热器的另一侧, 为低温高压侧, 在待测回热器换热后再进入回热器加热另一侧进口端的 CO_2 -He, 最后经调节阀注入中压储气罐. 最后一路经流量调节阀调节后进入中压储气罐. 最终三路 CO_2 -He汇入中压储气罐后, 再通过换热器换热进入低压气体储罐, 完成测试系统循环.

水路循环的作用是调节回热器低温侧混合气体的温度. 这主要是因为气体流经储气罐以及调节阀时, 产生节流效应导致温度下降, 为了保证气体的超临界状态, 采用水路循环中的电加热器和蒸发器对气体进行进一步加热, 以达到理想的压缩机进口温度.

在回热器的高温侧, 气体温度高于 100°C , 因此在本测试系统中采用恒温油浴加热混合气体, 油路循环系统由油箱、油加热器、换热器和油泵组成.

图6为搭建的 S-CO_2 -He回热器测试系统实物图.

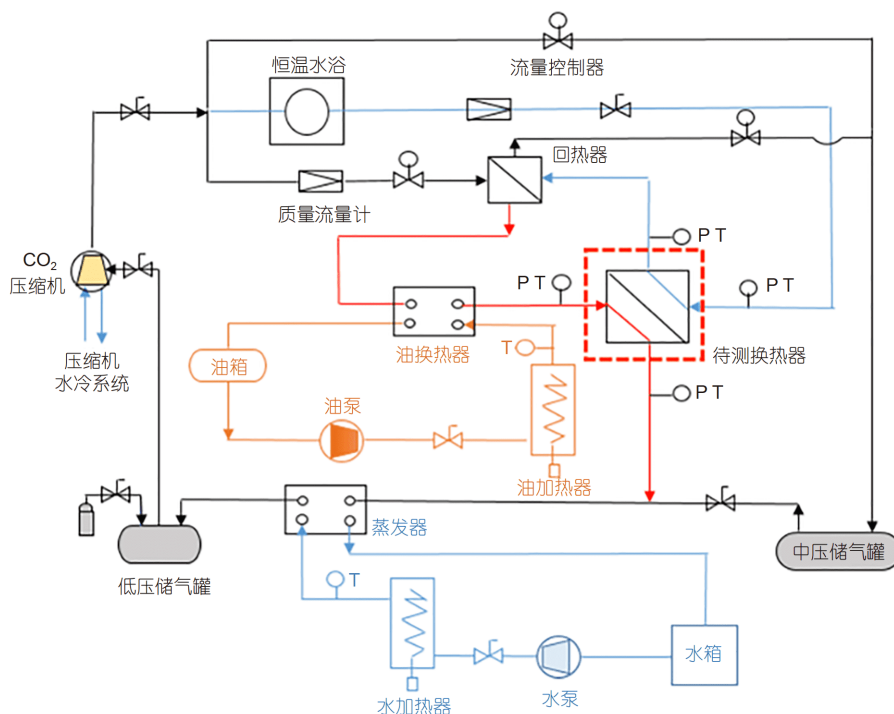
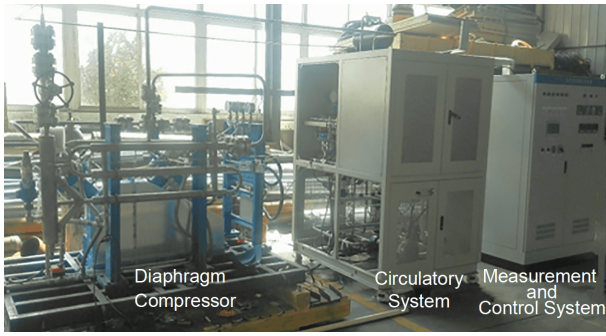


图5 (网络版彩图) S-CO_2 -He回热器测试系统示意图

Figure 5 (Color online) Schematic diagram of supercritical CO_2 -He regenerator test system.

图 6 (网络版彩图)S-CO₂-He实验系统Figure 6 (Color online) Supercritical CO₂-He experiment system.

由图可以看出, 整个测试系统主要由三个部分组成: 超临界气体压缩机、流体循环系统和测量控制系统. 实验系统中使用的压缩机为G2V-40/50-200型隔膜压缩机, 吸气压力为5 MPa, 最高可以输出20 MPa的排气压力. 流体循环系统包括管路、阀门、加热器、换热器以及储气系统. 测量控制系统主要实现实验参数的控制和采集, 主要参数为温度、压力、流量, 同时测试系统通过后台嵌入的计算软件, 可以集成输出换热量、传热效率等间接参数.

2.2 实验不确定性分析

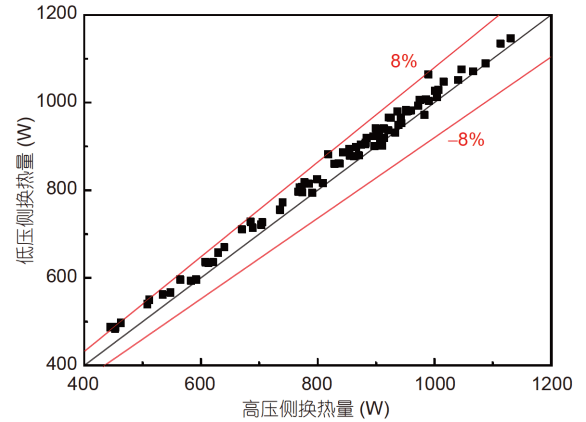
本测试系统为高温、高压系统, 需要对实验的不确定性进行分析. 实验过程中不确定性主要取决于测试参数: 温度、压力、压差和质量流量的测量误差. 系统测温选用的是铂电阻热电偶, 其测量精度为 $\pm 0.15^\circ\text{C}$, 压力传感器和差压传感器的测量精度均为 $\pm 0.1\%$, 质量流量计的测试精度为 $\pm 0.35\%$.

对于换热量和传热效率等间接测试参数, 依据误差传递公式, 间接误差可以由如下公式进行计算^[22]:

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2}. \quad (1)$$

基于直接测试参数的不确定性, 并利用以上公式可以计算出回热器换热量和传热效率的不确定度分别为 $\pm 2.5\%$ 和 $\pm 3.5\%$.

此外, 为了验证回热器的稳定性, 在实验进行前需要提前测试回热器两侧的换热量, 用来确定回热器的热平衡性, 测试结果如图7所示. 图中对不同工况下的回热器高压侧和低压侧换热量进行了对比, 发现低压侧换热量明显高于高压侧换热量, 这主要是因为低压

图 7 (网络版彩图)CO₂-He回热器两侧热平衡验证Figure 7 (Color online) Verification of thermal balance on both sides of CO₂-He regenerator.

侧流体温度高, 当释放热量到高压侧时有部分热量损耗到外部环境中. 尽管如此, 图中显示所有的数据点都靠近热平衡线, 高压侧吸热量与低压侧放热量间的差异控制在8%以内, 证明回热器绝热保护良好, 热平衡性满足实验要求.

3 结果与讨论

实验将确定高压进口压力为14 MPa, 低压进口压力为8 MPa, 高压侧和低压侧的进口温度分别为328和435 K, 高低压侧流量比为0.65以模拟布雷顿循环的最佳比例^[21], 通过调节不同流量对不同质量分数的工质和不同流道作对比分析.

在分析的过程中, 为了便于对比分析不同结构的回热器的性能优劣, 需要引入一个通用的判断准则, 基于此本文通过引入传热效率用以表征换热器的性能, 其定义为回热器的实际换热速率与最大可能的换热速率之比:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}}. \quad (2)$$

当假设回热器与环境之间的传热以及势能和动能的变化可以忽略, 热流体和冷流体的能量平衡方程为

$$q = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}), \quad (3)$$

$$q = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}), \quad (4)$$

其中下标h和c分别指混合工质的热、冷流体; i和o代表进出口, 式中温度为工质在指定位置处的平均温度.

最大可能换热速率 $q_{\max}$ 可表示为

$$q_{\max} = C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i}), \quad (5)$$

其中, $C_{\min}$ 代表两侧流体热容中较小的热容.

因此, 传热效率的定义可以表示为

$$\varepsilon = \frac{C_h(T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i})}, \quad (6)$$

或

$$\varepsilon = \frac{C_c(T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i})}. \quad (7)$$

3.1 与S-CO₂对比

如图8所示为不同质量分数混合工质在不同质量流量情况下的压力损失比较. 可以看出, 压力损失均随质量流量增大而增大, 纯CO₂压力损失最大, 随着He占比增加, 压力损失逐渐降低, He质量分数为10%的CO₂-He混合物降低压力损失40%左右, 但随He质量分数占比增加, 降低幅度越来越小. 这是因为与纯CO₂相比, 纯He的压力损失较小, 因此通过混合He可有效降低换热过程的压力损失, 但随He质量分数的进一步增大, 压力损失减小不明显, 可以预见的是, 在He质量分数更大的情况下, 高压侧的压力损失变化将越来越小, 最终趋于恒定值.

图9是不同比例混合工质在不同质量流量下的平均换热量比较. 可以看出, 随着质量流量的增大, 不同质量分数的混合工质的平均换热量都在增大, 但在同

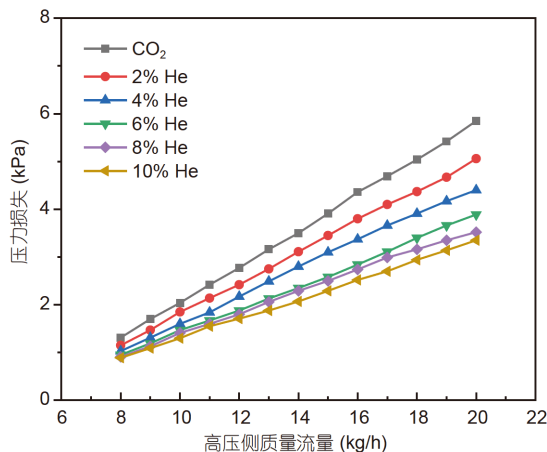


图8 (网络版彩图) 高压侧压力损失对比

Figure 8 (Color online) Comparison of high pressure side pressure loss.

流量下, 纯CO₂的平均换热量最大. 这是因为与纯CO₂相比He的换热效果较差, 导致CO₂-He混合气体的传热性能随He比例增大而降低. 但由图9可以发现, 随着He比例升高, 换热量下降趋势变缓.

图10比较了不同比例混合工质在不同质量流量下的传热效率. 可以发现, 所有工质传热效率都随质量流量增大而减小, 纯CO₂传热效率最高, 随着He占比增大, 传热效率逐渐降低, 这是因为He在占比低的时候, 因为自身传热效率相较于CO₂低, 故会恶化传热.

3.2 与传统恒流道回热器对比

选取He质量分数为10%的混合工质进行实验, 实

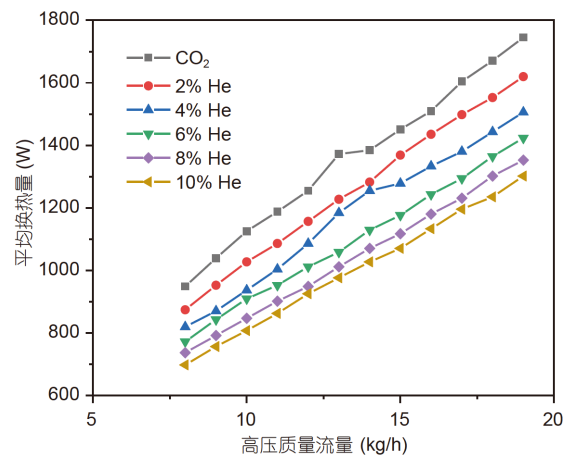


图9 (网络版彩图) 不同质量流量下的平均换热量比较

Figure 9 (Color online) Comparison of average heat exchange volume under different mass flow.

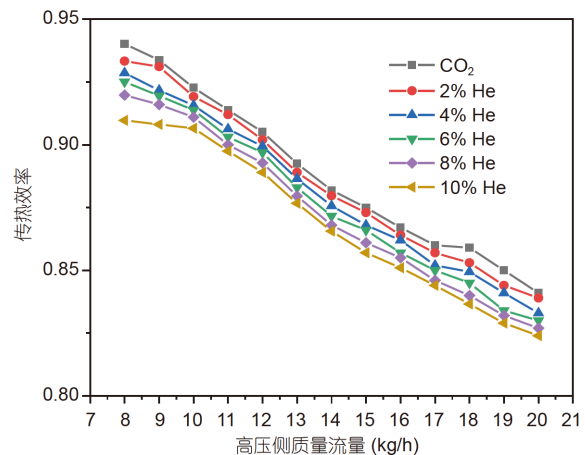


图10 (网络版彩图) 不同质量流量下传热效率对比

Figure 10 (Color online) Comparison of heat transfer efficiency at different mass flows.

验过程中, 通过将回热器的高低压侧转换实现变流道和恒流道的对比分析. 图11为混合工质在不同流道不同高压侧质量流量下的压力损失比较, 可以看到随高压侧质量流量增大, 压力损失都在变大, 这是因为随着质量流量增加, 内部流动的流动阻力增大, 故压力损失增加. 但与纯 CO_2 工质现象相近, 在使用 CO_2 -He混合工质时, 变流道依然可显著降低压力损失, 可将压力损失控制在常流道的30%.

图12比较了不同流道的混合工质平均换热量, 可以发现在随质量流量增加, 两种流道中的混合工质平均换热量均上升, 在低质量流量时, 两种流道的换热

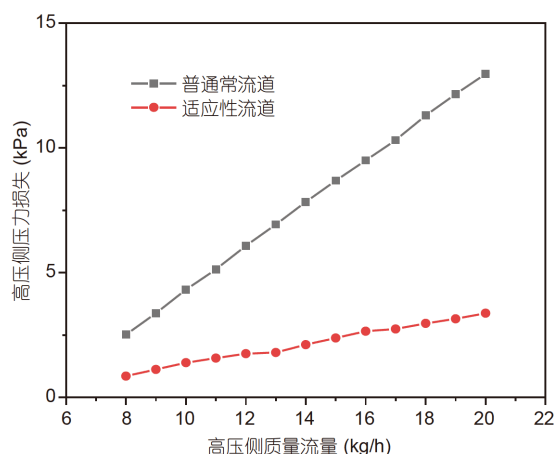


图11 (网络版彩图)混合工质在两种流道中的高压侧压差比较

Figure 11 (Color online) Comparison of high-pressure side pressure loss of mixed working fluid in two flow channels.

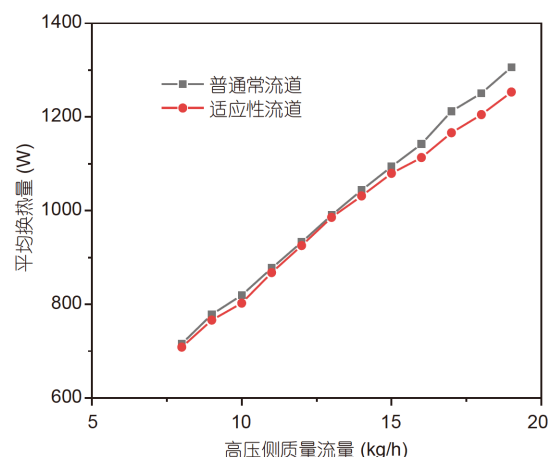


图12 (网络版彩图)两种流道中的平均换热量
Figure 12 (Color online) Average heat transfer in two flow channels.

效果基本相当, 但随着质量流量的增大, 变流道的平均换热量逐渐高于常流道, 这是因为质量流量较低时, 换热都进行得比较完全, 故变流道设计对传热的提升效果并不显著. 而随着质量流量愈来愈大, 换热量更大但也更不完全, 这时变流道对换热效果的增强优势便逐渐显现出来. 可以说明在低流速区间内, 变流道优势并不明显, 但质量流量增大到一定值后, 变流道带来的对传热的优化作用愈加显著.

图13是两种流道传热效率的比较, 可以看出随高压质量流量增大, 两种流道的传热效率都在降低, 这是因为热传导在低质量流量时能进行得更充分, 但变流道侧传热效率在同工况下比常流道侧高1%, 说明相较于常规恒流道换热器, 变流道确实达到了设计效果, 即流道的变化适应了传热过程中工质在不同位置的不同物理性质, 混合工质在变流道换热器中换热效率更高.

4 结论

本文主要探讨了在一种新型适应性流道换热器中, CO_2 -He混合工质的传热特性及其变化规律. 用实验的方法研究了He在混合工质中的比重对 CO_2 -He混合工质在适应性流道回热器中流动和换热性能的影响. 研究发现, 在He质量分数小于10%的情况下, CO_2 -He混合工质换热器压力损失比纯 CO_2 小, He的比重越大, 压力损失降低越显著; 与此同时, 平均换热量和传

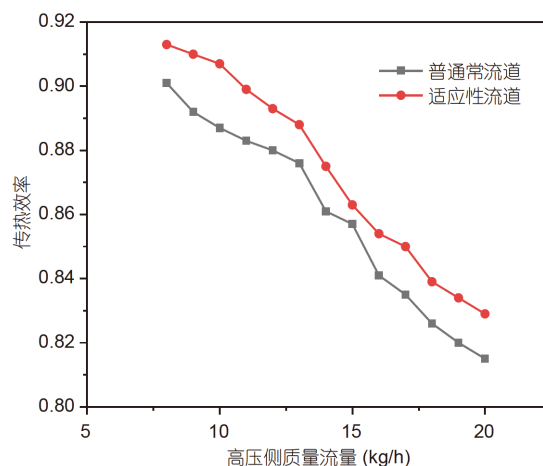


图13 (网络版彩图)混合工质在两种流道中的传热效率
Figure 13 (Color online) Heat transfer efficiency of mixed working fluid in two flow channels.

热效率较纯CO₂工质有所下降, 这是由He本身的物理性质导致的. 此外, 与常规流道回热器相比, CO₂-He混合气体在变流道回热器中的压力损失降低显著, 可降低40%; 在高质量流量时, 平均换热量也得到了提升,

传热效率提升1%. 通过本文的研究, 证明了基于CO₂-He混合气体的适应性流道回热器的流动和换热性能都具有明显的优势, 可以为超临界系统的回热器设计提供一种有效的思路.

参考文献

- 1 IAEA. Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050. Vienna, 2012
- 2 GIF. Gen IV International Forum Symposium Proceedings 2012 Annual Report. San Diego, 2013
- 3 GIF. Gen IV International Forum 2012 Annual Report. San Diego, 2013
- 4 GIF. A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. U.S. DOE G, San Diego, 2002
- 5 IAEA. Introduction to the fourth generation nuclear reactor system (in Chinese). 2012-09-19, <http://wenku.baidu.com/view/6788ce1fc281e53a5802ffd9.html> [IAEA. 第四代核反应堆系统简介. 2012-09-19, <http://wenku.baidu.com/view/6788ce1fc281e53a5802ffd9.html>]
- 6 Ahn Y, Bae S J, Kim M, et al. Review of supercritical CO₂ power cycle technology and current status of research and development. *Nucl Eng Tech*, 2015, 47: 647–661
- 7 Wikipedia. Carbon dioxide. 2012, <http://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%8C%E6%B0%A7%E5%8C%96%E7%A2%B3>
- 8 Cabeza L F, de Gracia A, Fernández A I, et al. Supercritical CO₂ as heat transfer fluid: A review. *Appl Thermal Eng*, 2017, 125: 799–810
- 9 GIF. Gen IV International Forum 2011 Annual Report. Paris, 2011
- 10 Sandia National Laboratories. Sandia Brayton cycle turbines. 2011, https://share.sandia.gov/news/resources/news_releases/Brayton.cycle.turbines/
- 11 He Y L, Wang K, Du B C, et al. Non-uniform characteristics of solar flux distribution in the concentrating solar power systems and its corresponding solutions: A review (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 3208–3237 [何雅玲, 王坤, 杜保存, 等. 聚光型太阳能热发电系统非均匀辐射能流特性及解决方法的研究进展. 科学通报, 2016, 61: 3208–3237]
- 12 Angelion G. Carbon dioxide condensation cycles for power production. *J Eng Gas Turb Power*, 1968, 90: 287–295
- 13 Dostal V, Hejzlar P, Driscoll M J. The supercritical carbon dioxide power cycle: Comparison to other advanced power cycles. *Nucl Tech*, 2006, 154: 283–301
- 14 Moiseyev A, Sienicki J J. Investigation of alternative layouts for the supercritical carbon dioxide brayton cycle for a sodium-cooled fast reactor. *Nucl Eng Des*, 2009, 239: 1362–1371
- 15 Cheng W L, Huang W X, Nian Y L. Global parameter optimization and criterion formula of supercritical carbon dioxide Brayton cycle with recompression. *Energy Convers Manage*, 2017, 150: 669–677
- 16 Ding M. Study on supercritical carbon dioxide adaptive flow path regenerator (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018 [丁淼. 超临界适应性流道回热器研究. 硕士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2018]
- 17 Ding M, Liu J, Cheng W L, et al. An adaptive flow path regenerator used in supercritical carbon dioxide brayton cycle. *Appl Thermal Eng*, 2018, 138: 513–522
- 18 Guo J Q, Wang K, Zhu H H, et al. Thermodynamic analysis of brayton cycles using supercritical carbon dioxide and its mixture as working fluid (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2017, 38: 695–702 [郭嘉琪, 王坤, 朱含慧, 等. 超临界CO₂及其混合工质布雷顿循环热力学分析. 工程热物理学报, 2017, 38: 695–702]
- 19 Xi H, Li M J, He Y L, et al. A graphical criterion for working fluid selection and thermodynamic system comparison in waste heat recovery. *Appl Thermal Eng*, 2015, 89: 772–782
- 20 Jeong W S, Jeong Y H. Performance of supercritical brayton cycle using CO₂-based binary mixture at varying critical points for SFR applications. *Nucl Eng Des*, 2013, 262: 12–20
- 21 Guo K L, Wang C L, Qiu S Z, et al. Analysis on thermoelectric conversion characteristic of brayton cycle in megawatt-class nuclear electric propulsion system (in Chinese). *Atomic Energy Sci Tech*, 2019, 53: 16–23 [郭凯伦, 王成龙, 秋穗正, 等. 兆瓦级核电推进系统布雷顿循环热电转换特性分析. 原子能科学技术, 2019, 53: 16–23]
- 22 Moffat R J. Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis. *J Fluids Eng*, 1982, 104: 250–258

Experimental study on adaptive flow path regenerator based on supercritical CO₂-He

CHENG WenLong, LIU ShiYi & ZHAO Rui

Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

A regenerator is the key unit in a supercritical CO₂ (S-CO₂) Brayton cycle, and its performance shows significant influence on the cycle efficiency. Previous studies indicated that an adaptive flow path regenerator (AFPR) could improve the thermal and flow performance of an S-CO₂ regenerator. Therefore, for the supercritical mixture of CO₂ and He, this study proposed an experiment to investigate the performance of an AFPR and performed a comparative study between a conventional flow path regenerator (CFPR) and an AFPR using S-CO₂. The heat transfer rate of the AFPR with different mass fractions of S-CO₂ and He was determined, and the effect of the proportion of He on the AFPR performance was summarized by analyzing the mean heat transfer rate, effectiveness, and change in pressure drop at the high-pressure side. The experimental results showed that the pressure drop in the AFPR using CO₂-He reduced by 40% compared with that in the CFPR. Moreover, under a higher flow rate than that of the CFPR, the heat transfer rate of the AFPR improved and the effectiveness increased by 1%. Furthermore, compared with the AFPR using S-CO₂, the AFPR using S-CO₂-He showed a lower pressure drop. However, its mean heat transfer rate and effectiveness decreased. As a result, the flow and heat transfer performance can be improved by the AFPR using S-CO₂-He; this can serve as the theoretical and practical base for the design of supercritical systems.

S-CO₂ Brayton cycle, super critical CO₂-He, AFPR, pressure drop, effectiveness

doi: [10.1360/SST-2020-0106](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0106)