

文章编号: 1008-1542(2021)04-0424-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



直管套管内超临界二氧化碳热力性能研究

崔海亭, 黄夏洁, 张欣悦, 张良锐

(河北科技大学机械工程学院, 河北石家庄 050018)

摘要:为了解决气冷器内不可逆损失对换热性能的影响问题,提高直管套管式气冷器的热力性能,对超临界二氧化碳套管式气冷器内二氧化碳与冷却水之间的热量传递过程进行了研究。采用 Fluent 数值模拟软件与熵产分析方法,通过改变操作压力、二氧化碳质量流量及冷却水的质量流量和进口温度进行数值计算,得出气冷器中二氧化碳和冷却水沿管长的温度分布情况,并依据热力学第二定律熵产分析方法,对直管套管内热力过程进行计算,得出沿管长的熵产分布情况。结果表明,随着压力的增加,沿管长方向的熵产逐渐增大;随着二氧化碳质量流量的增加,熵产逐渐减小;随着冷却水质量流量的增加,熵产增加幅度不明显;随着冷却水进口温度的增加,熵产随之减小。研究结果可为二氧化碳热泵气冷器运行参数与结构的设计以及二氧化碳热泵的工程应用提供一定的参考。

关键词:工程热力学;超临界二氧化碳;套管式气冷器;数值模拟;熵产分析;热力性能

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

doi: 10.7535/hbkd.2021yx04013

Research of thermal performance of supercritical carbon dioxide in straight pipe casing

CUI Haiting, HUANG Xiajie, ZHANG Xinyue, ZHANG Liangrui

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to solve the problems that the irreversible loss existing in the gas cooler has a great influence on its heat transfer performance, in order to improve the thermal performance of the straight tube tube-in-tube gas cooler, the heat transfer process between carbon dioxide and cooling water in supercritical carbon dioxide tube-in-tube gas cooler was studied. By using Fluent software and entropy generation analysis method, the temperature distribution of carbon dioxide and cooling water along the pipe length was obtained through changing the operating pressure, carbon dioxide mass flow, cooling water mass flow and inlet temperature; according to the entropy generation analysis method of the second law of thermodynamics, the thermodynamic process in the straight pipe casing was calculated, and the entropy generation distribution along the tube length

收稿日期: 2020-12-31; 修回日期: 2021-05-10; 责任编辑: 冯 民

基金项目: 国家自然科学基金(51706058); 河北省自然科学基金(B2021208017)

第一作者简介: 崔海亭(1964—), 男, 河北石家庄人, 教授, 博士, 主要从事蓄热与强化传热技术方面的研究。

E-mail: cuiht@126.com

崔海亭, 黄夏洁, 张欣悦, 等. 直管套管内超临界二氧化碳热力性能研究[J]. 河北科技大学学报, 2021, 42(4): 424-430.

CUI Haiting, HUANG Xiajie, ZHANG Xinyue, et al. Research of thermal performance of supercritical carbon dioxide in straight pipe casing [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2021, 42(4): 424-430.

was obtained. The results show that the entropy production along the tube length increases with the increase of pressure; with the increase of carbon dioxide mass flow, the entropy production gradually decreases; with the increase of cooling water mass flow rate, the increase of entropy production is not obvious; with the increase of cooling water inlet temperature, entropy production decreases. The research result may provide some reference for the operation parameters and structure design of CO₂ heat pump gas cooler, as well as for the engineering application of CO₂ heat pump.

Keywords: engineering thermodynamics; supercritical carbon dioxide; casing air cooler; numerical simulation; entropy production analysis; thermal performance

目前,随着人们环保意识的增强,全球气候变暖、臭氧层破坏、自然环境污染等问题越来越受到重视。由于CFCS(氯氟烃气体)类和HFC(氟代烷烃)类制冷工质不能满足绿色环保政策的要求,因此对自然工质的研究成为国内外学者关注的重点^[1-7]。陈光明等^[8]和李连生^[9]分析研究了几种自然工质在国内外的发展前景,总结了制冷剂的替代进程,认为自然工质潜力巨大,采用健康环保的自然工质成为发展趋势。挪威LORENTZEN^[10]认为二氧化碳是21世纪最具发展前景的制冷剂,提出了超临界制冷循环理论。二氧化碳作为一种纯天然的制冷工质具有很大优势,其安全性高,来源广泛,价格低廉,单位溶剂制冷量大,对环境友好,且无毒无害,深受国内外学者的关注^[11-17]。二氧化碳工质在超临界条件放热过程中存在相当大的温度滑移,有利于将水加热到更高温度,减小温差传热引起的不可逆损失^[18]。气冷器内部的传热过程是一个不可逆过程,不可逆损失对气冷器的热力性能影响很大。研究分析运行参数对不可逆损失在气冷器中的分布情况,对于优化运行、提高系统用能效率具有重要意义^[19]。一些报道基于热力学第二定律的熵产分析,从能量角度评价和分析了气冷器的用能效率^[20-21]。

本文拟采用Ansys Fluent软件开展超临界二氧化碳流体在直管套管中的流动和换热特性数值模拟研究,计算不同工况下熵产沿管长的分布情况。

1 熵产计算

耗散效应等不可逆因素导致高品位能转化为低品位能产生熵产。根据文献^[19],对于沿管长的熵产可按式(1)计算,管段的换热量可按式(2)计算。数值模拟计算采用分布参数法,将气冷器划分为 j 段,以水和二氧化碳入口参数作为初始条件,将前一段气冷器出口参数作为下一段气冷器的入口参数并依次计算,直到完成整个气冷器计算。

$$S_{g,j} = \frac{Q_j}{T_{w,j}} - \frac{Q_j}{T_{r,j}}, \quad (1)$$

式中: $T_{w,j}$ 是第 j 段冷却水平均温度,K; $T_{r,j}$ 是二氧化碳平均温度,K; Q_j 是换热量,kW。

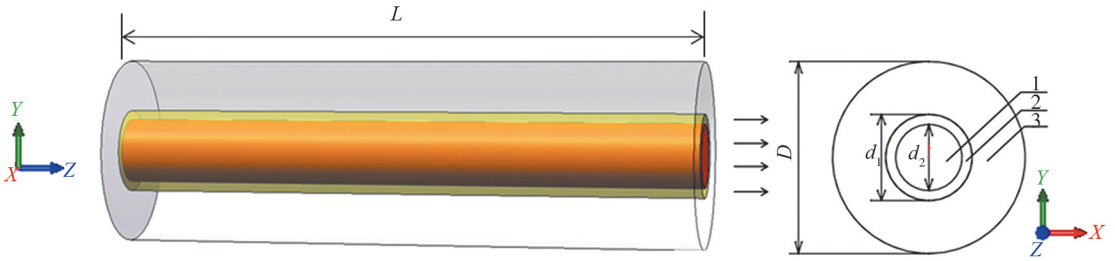
$$Q_j = c_{p,j} m_r (t_{r,i,j} - t_{r,o,j}), \quad (2)$$

式中: $c_{p,j}$ 是第 j 段二氧化碳的定压比热,kJ/(kg·K); m_r 为二氧化碳质量流量,kg/s; $t_{r,i,j}$, $t_{r,o,j}$ 是二氧化碳进出口温度。

2 数值模拟

2.1 物理模型

直管套管换热器模型如图1所示。直管套管换热器外管内径 $D=29$ mm,材料为铜;内管管径 $d_2=10$ mm,壁厚1.5 mm,铜管,管段总长度 $L=1$ m。换热器内管工质为超临界二氧化碳,内外管间工质为冷水。为了降低模型的复杂度,简化Fluent模拟过程以便顺利进行数值模拟计算,做出如下假设:1)假设直管套管换热器的外管与外界没有热量交换;2)忽略套管外管壁厚的影响。



1—二氧化碳流通区域；2—内厚区域；3—冷却水流通区域。

图1 同心直管套管管壁物理模型

Fig.1 Physical model of concentric straight pipe casing

2.2 数学模型

采用标准 $k-\epsilon$ 模型进行计算,该计算模型具有精度高、计算速度快等优势,其中包括连续性方程、动量方程、能量方程、湍动能方程和耗散率方程等多组流体力学控制方程^[22]。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{3}$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \mu_t)(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{2}{3}\delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k}] - \frac{\partial(\delta_{ij})}{\partial x_i} \tag{4}$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i C_p T) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\Gamma + \frac{\mu_t C_p}{\sigma T}) \frac{\partial T}{\partial x_i}] + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}) + \rho \epsilon \tag{5}$$

湍动能 k 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j K) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma K}) \frac{\partial K}{\partial x_j}] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \rho \epsilon \tag{6}$$

湍流耗散率 ϵ 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + \frac{c_1 \epsilon}{k} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - c_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{7}$$

湍流黏度 μ_t 定义如下:

$$\mu_t = \frac{c_\mu k^2}{\epsilon} \tag{8}$$

2.3 网格划分及质量检查

图2给出了直管套管的网格示意图,利用 Gambit 软件,采用结构化四面体网格类型对模型全流域进行网格划分,图2 a)、图2 b)是其局部放大图显示网格,网格质量检查设置如图2 c)所示,网格质量指标 Equisize Skew 表示计算单元的歪斜度,其值为0时网格质量最好;其值为1则网格质量最差。如图2 c)所示,Equisize Skew 在0~0.4之间(lower-upper)的网格数占了99.69%,结果显示网格质量较好。

2.4 数值计算方法及可靠性验证

采用 Fluent 软件进行数值模拟,超临界二氧化碳物性参数由 Refprop 物性查询软件获得,编写好后由用户自定义连接到 Fluent 应用。压力-速度耦合采用 SIMPLEC 算法,压力插值格式选择 PRESTIO!,动量、能量、湍动能、湍流耗散率等采用二阶快速 QUICK 格式。考虑

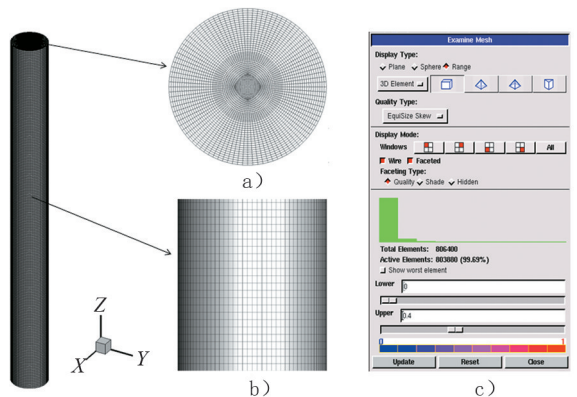


图2 网格划分示意图

Fig.2 Grid division diagram

考虑

到影响气冷器的因素是质量流量、压力、温度,参考相关文献后,对进口温度为 343 K、压力在 8~10 MPa 的超临界二氧化碳在直管套管内的冷却换热进行了数值模拟,各参数设置如表 1 所示。

表 1 边界条件

Tab.1 Boundary conditions

边界	边界类型	参数	数值
CO ₂ 进口	质量流量入口	质量流量/(kg·s ⁻¹)	0.018/0.023/0.028
		温度/K	343
CO ₂ 出口	压力出口	压力/MPa	8/9/10
		温度/K	300
冷却水进口	质量流量入口	质量流量/(kg·s ⁻¹)	0.03/0.04/0.05
		温度/K	282/288/293
冷却水出口	压力出口	压力/MPa	0
		温度/K	300
壁面		滑移,固定墙	

数值模拟计算对网格数要求较高,选择合适的网格数进行模拟,可以保证精度要求,节约计算时间。以二氧化碳沿程温度作为标准,通过 case1,case2 和 case3 网格数分别为 211 200,415 800 和 806 400 的 3 组网格模型进行网格无关性验证。如图 3 所示,沿二氧化碳流动方向,温度剧烈变化最后呈平缓变化趋势,当模型网格数量大于 case1 时,case2 和 case3 温度分布不再受网格尺寸的影响。综合考虑网格密度以及二氧化碳温度变化趋势,选择 case3 的网格较为合适。

为了保证数值模拟结果的可靠性,根据文献[23]的气冷器比例建立物理模型,采用其实验工况对本数值模拟进行设置,模拟数据和实验数据的对比如图 4 所示。由图 4 可知,模拟数据与实验数据的局部换热系数曲线趋势基本吻合,最大误差为 15%,二者平均误差为 3.7%,误差较小。考虑到实验误差,可认为模型数值模拟能够较正确地反映流体流动换热性能,具有一定的可信度。

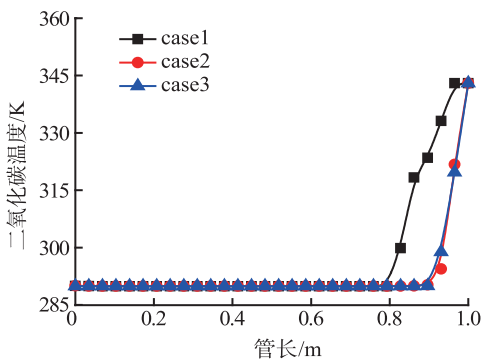


图 3 二氧化碳沿程温度变化图

Fig.3 Temperature variation of carbon dioxide along the way

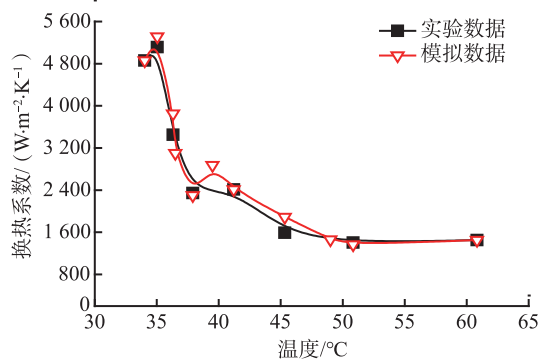


图 4 直管套管气冷器内流体温度与换热系数关系图

Fig.4 Relationship between fluid temperature and heat transfer coefficient in straight tube casig gas cooler

3 结果分析

3.1 不同压力操作条件下的气冷器熵产分布

图 5、图 6 给出了 3 种压力下气冷器内二氧化碳和冷却水平均温度及熵产沿管长的分布情况。二氧化碳进口温度为 343 K、质量流量为 0.023 kg/s、冷却水进口温度为 282 K、进口质量流量为 0.03 kg/s,对二氧化碳进口压力分别为 8,9,10 MPa 时的情况进行数值模拟,得出在 3 种操作压力下二氧化碳和冷却水的平均温度随压力的增大而增大,冷却水平均温度的增幅不明显。沿管长方向,随着压力的增大,0.7 m 之前二者之间的温差随压力的增大而增大,0.7 m 之后二者温差随压力的增大而减小,这种变化会对超临界二氧化碳

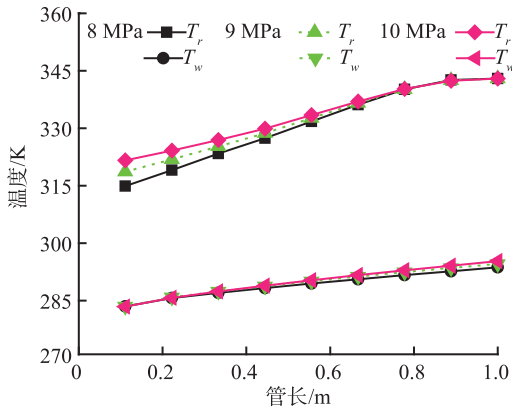


图 5 不同压力下 T_r, T_w 图

Fig.5 T_r, T_w diagram under different pressures

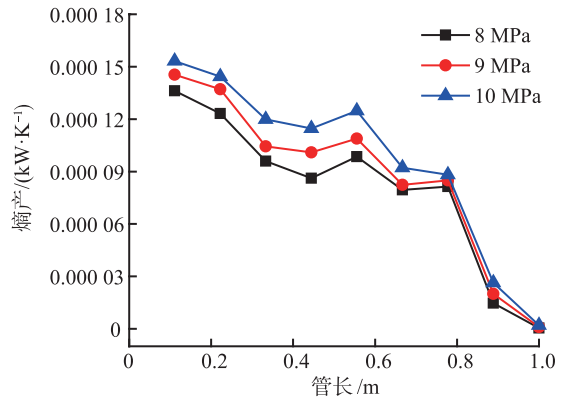


图 6 不同压力下熵产分布图

Fig.6 Distribution of entropy production under different pressures

碳的热物理性质产生较大影响。由图 6 不同压力下熵产分布图的对比可知,熵产沿管长方向是降低的趋势,且随着压力的增大而增大。这是因为沿管长方向,随着压力的增大,冷却水温度逐渐升高,与二氧化碳之间换热势差减小,故熵产减小。二氧化碳在高温侧的定压比热随压力的增大而增大,气冷器内二氧化碳温度降低幅度减小,平均温度升高,二氧化碳与冷却水的换热平均温差增大,产生的不可逆损失变大,故熵产随压力的增加而增加。

3.2 二氧化碳质量流量对气冷器熵产的影响

二氧化碳进口温度为 343 K、进口压力为 8 MPa、冷却水进口温度为 282 K、进口质量流量为 0.03 kg/s,对二氧化碳进口质量流量分别为 0.018, 0.023, 0.028 kg/s 时的情况进行数值计算,结果如图 7 所示,熵产沿管长呈逐渐减小趋势,且随着二氧化碳质量流量的增大而减小。随着二氧化碳质量流量的增加,气冷器内总的换热量增大,二氧化碳和冷却水平均温度增大,冷却水温度增长幅度增大,二氧化碳与冷却水传热温差减小,不可逆势差减小,故熵产减小。

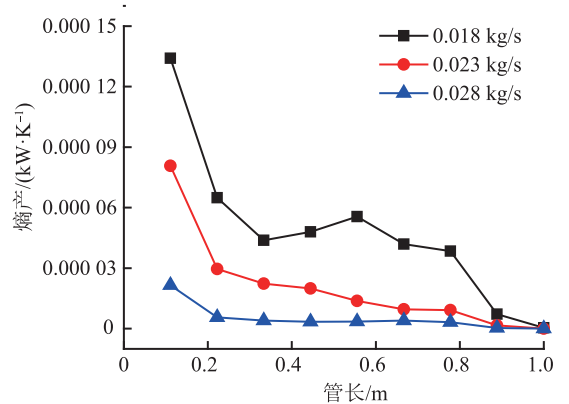


图 7 不同二氧化碳质量流量时的熵产分布图

Fig.7 Distribution of entropy production under different mass flow rates of carbon dioxide

3.3 冷却水进口质量流量对气冷器熵产的影响

二氧化碳进口质量流量为 0.023 kg/s、进口温度为 343 K、进口压力为 8 MPa、冷却水进口温度为 282 K,对冷却水进口质量流量分别为 0.03, 0.04, 0.05 kg/s 时的情况进行数值模拟计算,分析结果如图 8、图 9 所示。由图 8 可知,其他操作条件一定时,随着冷却水质量流量的增大,超临界二氧化碳沿程水温变化不明显,冷却水温度沿着流动方向逐渐升高。图 9 给出了不同冷却水质量流量下熵产沿管长的分布曲线,分析可知,在管长为 0.3 m 之前熵产分布呈现下降趋势,但不同质量流量冷却水引起的熵产变化不明显。在 0.4~0.8 m,熵产随冷却水质量流量变化波动不明显。在 0.7~1.0 m,不同冷却水流量下的熵产分布曲线十分接近,基本无变化。当二氧化碳质量流量一定时,气冷器内熵产沿管长方向随着冷却水质量流量的增大变化不大,说明冷却水流量对熵产分布的影响很小。

3.4 冷却水进水温度对气冷器熵产的影响

二氧化碳进口温度为 343 K、质量流量为 0.023 kg/s、进口压力为 8 MPa、冷却水进口质量流量为 0.03 kg/s,对冷却水进口温度分别为 282, 288, 293 K 时的情况进行数值模拟,结果如图 10、图 11 所示。随着冷却水进口温度的升高,管内冷却水和二氧化碳的平均温度升高,但二氧化碳平均温度的升高幅度小于冷却水平均温度的升高幅度,这就减小了冷却水和二氧化碳的温差,从而使产生的不可逆势差减小,故熵产随着冷却水进口温度的升高而减小。

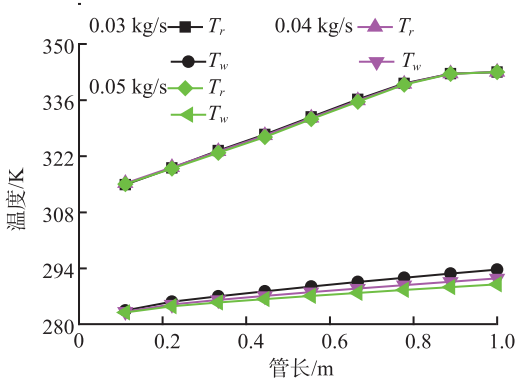


图 8 不同冷却水质量流量下 T_r, T_w 图
Fig.8 T_r, T_w diagram under different cooling water mass flow rates

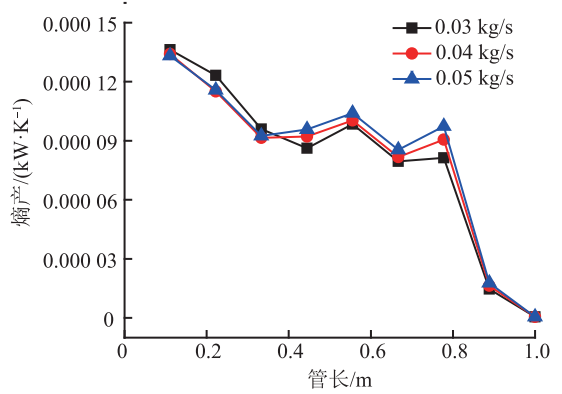


图 9 不同冷却水质量流量下的熵产分布图
Fig.9 Distribution of entropy production under different cooling water mass flow rates

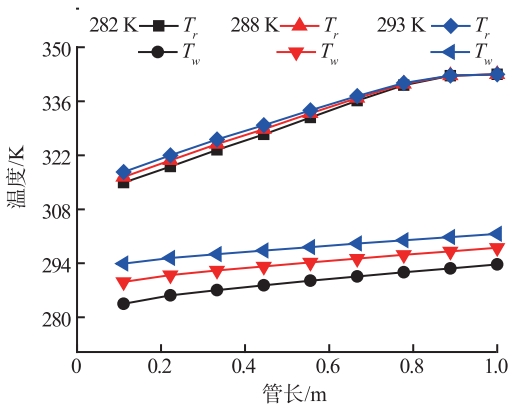


图 10 不同冷却水进口水温下 T_r, T_w 图
Fig.10 T_r, T_w diagram under different cooling water inlet temperature

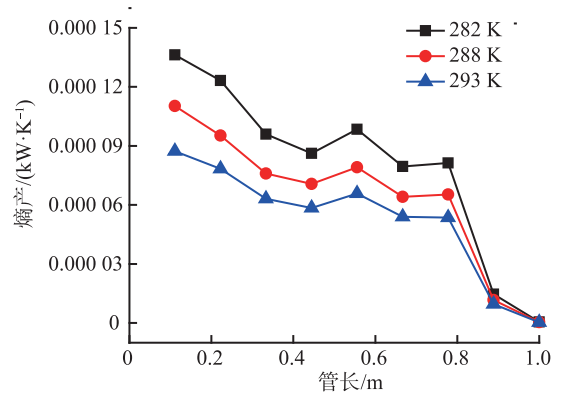


图 11 不同冷却水进口水温下的熵产分布图
Fig.11 Distribution of entropy production under different cooling water inlet temperature

4 结 论

建立了超临界二氧化碳直管套管式气冷器模型,简要分析了二氧化碳工质的热力学特性,基于热力学第二定律的熵产计算方法,通过改变操作参数进行数值计算,得到了气冷器内熵产的分布情况和主要影响因素。主要结论如下:

- 1)在不同操作压力下,熵产随着压力的增大而增大,沿管长方向熵产逐渐减小。
- 2)随着二氧化碳质量流量的增大,冷却水和二氧化碳之间的换热温差减小,不可逆势差减小,气冷器内熵产减小。
- 3)相对于其他操作参数,冷却水质量流量的改变对气冷器内熵产分布的影响较为明显,气冷器内熵产随冷却水进口温度的升高而减小。

本文只针对特定结构尺寸下的直管套管开展数值模拟,研究了工质进出口参数对管内不可逆性熵产分布的影响,后续可从改变直管套管模型的长度、管径,或者将其他结构模型与直管套管作对比等方面开展研究。

参考文献/References:

[1] 史婉君,张建君,高春利,等.浅析我国制冷剂标准的发展[J].制冷与空调,2016,16(3):83-87.
SHI Wanjun,ZHANG Jianjun,GE Chunli, et al.Analysis of the development of refrigerant standards in China[J].Refrigeration and Air-conditioning,2016,16(3):83-87.

[2] 马一大,王派,李敏霞,等.温室效应及第四代制冷工质[J].制冷技术,2017,37(5):8-13.

- MA Yitai, WANG Pai, LI Minxia, et al. Greenhouse effect and the fourth generation of refrigerant[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2017, 37(5): 8-13.
- [3] 崔海亭, 易长乐, 刘思文. 扭曲圆管内超临界 CO₂ 冷却换热的数值模拟[J]. 河北科技大学学报, 2018, 39(3): 261-267.
CUI Haiting, YI Changle, LIU Siwen. Numerical simulation of cooling heat transfer of supercritical carbon dioxide in twisted elliptical tubes[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2018, 39(3): 261-267.
- [4] 王雷, 李小燕. 丹麦、瑞士制冷剂替代: 以自然工质与环境和谐相处[J]. 电器, 2016(2): 66-69.
WANG Lei, LI Xiaoyan. Denmark Switzerland refrigerant substitution: Living in harmony with the environment with natural refrigerants[J]. Electrical Appliances, 2016(2): 66-69.
- [5] 徐良才, 郭英海, 公衍伟, 等. 浅谈中国主要能源利用现状及未来能源发展趋势[J]. 能源技术与管理, 2010, 6(3): 155-157.
XU Liangcai, GUO Yinghai, GONG Yanwei, et al. Talk on the status of energy utilization and the development trend of future energy in China[J]. Energy Technology and Management, 2010, 6(3): 155-157.
- [6] 彭伯彦. 日本氟利昂类制冷剂的使用和管理指南[J]. 制冷与空调, 2014, 14(11): 55-59.
- [7] 包继虎, 朱丰雷, 谢鸿玺, 等. 自然工质的研究现状及面临的问题[J]. 制冷, 2020, 39(3): 36-43.
BAO Jihu, ZHU Fenglei, XIE Hongxi, et al. The research progress and confronting problem on natural refrigerants[J]. Refrigeration, 2020, 39(3): 36-43.
- [8] 陈光明, 蒋皓波. 自然制冷剂在国外的研究进展[J]. 低温与特气, 1996(4): 16-19.
CHEN Guangming, JIANG Haobo. Research progress of natural refrigerants abroad[J]. Low Temperature and Specialty Gases, 1996(4): 16-19.
- [9] 李连生. 制冷剂替代技术研究进展及发展趋势[J]. 制冷学报, 2011, 32(6): 53-58.
LI Liansheng. Research progress on alternative refrigerants and their development trend[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(6): 53-58.
- [10] LORENTZEN G. Revival of carbon dioxide as a refrigerant[J]. International Journal of Refrigeration, 1994, 17(5): 292-301.
- [11] 李先碧, 冯雅康. 二氧化碳跨临界循环制冷的研究进展[J]. 真空与低温, 2007, 13(3): 173-177.
LI Xianbi, FENG Yakang. The research progress on the carbon dioxide transcritical circulation refrigeration[J]. Vacuum and Cryogenics, 2007, 13(3): 173-177.
- [12] 冯凯, 蔡觉先. CO₂ 制冷技术的研究发展[J]. 节能, 2017(12): 8-14.
FENG Kai, CAI Juexian. The research and development of CO₂ refrigeration technology[J]. Energy Conservation, 2017(12): 8-14.
- [13] NEKSA P. CO₂ heat pump systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 25(4): 421-427.
- [14] 车媛媛. 空气源跨临界 CO₂ 热泵热水器系统的性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
CHE Yuanyuan. Performance Study of Air Source Transcritical CO₂ Heat Pump Water Heater System[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [15] 刘光林. 关于中央空调设计与节能维护问题分析[J]. 科技创新与应用, 2018(1): 117-118.
LIU Guanglin. Analysis of central air conditioning design and energy saving maintenance[J]. Technology Innovation and Application, 2018(1): 117-118.
- [16] 崔海亭, 刘思文, 王少政. 超临界 CO₂ 水平直管内冷却换热的数值模拟[J]. 河北科技大学学报, 2019, 40(3): 252-258.
CUI Haiting, LIU Siwen, WANG Shaozheng. Numerical simulation of convection heat transfer of supercritical carbon dioxide in horizontal straight tube[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(3): 252-258.
- [17] 王少政, 崔海亭, 黄夏洁. 矩形盘旋式螺旋管中超临界 CO₂ 流动传热特性研究[J]. 压力容器, 2020, 37(7): 34-43.
WANG Shaozheng, CUI Haiting, HUANG Xiajie. Study on heat transfer characteristics of supercritical carbon dioxide flow in rectangular coiled spiral tube[J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(7): 34-43.
- [18] KIM M H, PETTER J, BULLARD C W. Fundamental process and system design issues in CO₂ vapor compression systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(2): 119-174.
- [19] 李昶, 吕静, 马逸平. CO₂ 套管式气冷器用能效率的热力学第二定律分析[J]. 建筑节能, 2017, 45(4): 20-23.
LI Chang, LYU Jing, MA Yiping. Energy consumption efficiency of a CO₂ tube-in-tube gas cooler under second law of thermodynamics[J]. Building Energy Efficiency, 2017, 45(4): 20-23.
- [20] 陈维汉, 钱壬章. 换热器传热过程的熵产分析[J]. 华中理工大学学报, 1989, 17(6): 21-27.
CHEN Weihang, QIAN Renzhang. Performance analysis of heat transfer in the heat exchanger by entropy generation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1989, 17(6): 21-27.
- [21] 张利坤, 王文红, 肖静静. CO₂ 跨临界循环中气体冷却器的熵产分析[J]. 山西建筑, 2009, 35(19): 177-178.
ZHANG Likun, WANG Wenhong, XIAO Jingjing. Entropy generation analysis of gas cooler in CO₂ trans-critical cycle[J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(19): 177-178.
- [22] 汪健生, 崔凯. 纵流式换热器流动与传热特性的数值研究[J]. 河北工业科技, 2005, 22(2): 55-59.
WANG Jiansheng, CUI Kai. Numerical study of flow and heat transfer of longitudinal flow heat exchanger[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2005, 22(2): 55-59.
- [23] 胡特特, 吕静, 杨大章, 等. 超临界二氧化碳在套管式换热管中的实验研究[J]. 建筑热能通风空调, 2014, 33(2): 19-22.
HU Tete, LYU Jing, YANG Dazhang, et al. Experimental study of supercritical carbon dioxide in the casing tube heat transfer tubes[J]. Building Energy & Environment, 2014, 33(2): 19-22.