

# 超临界 CO<sub>2</sub> 在螺旋管式冷却器内的传热特性研究

官万延, 陈玮玮, 鹿世化

(南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210023)

**[摘要]** 螺旋管结构紧凑、换热效率高, 在 CO<sub>2</sub> 气体冷却器中应用广泛. 超临界 CO<sub>2</sub> 热物性变化剧烈, 其在螺旋管内的传热特性异常复杂. 通过对不同冷却热流密度和质量流速工况下的数值模拟发现, 螺旋管内超临界 CO<sub>2</sub> 传热系数沿流动方向呈近似抛物线分布; 冷却热流密度越大, 传热系数峰值越高, 出现峰值的流动转角越小; 质量流速越大, 传热系数峰值越高, 出现峰值的流动转角越大; 不同热流密度与质量流速的比值决定整个流动方向传热系数的涨落, 基于此提出了一个适用于均匀冷却螺旋管内超临界 CO<sub>2</sub> 传热计算的关联式, 可为螺旋管式气体冷却器的优化与设计提供参考.

**[关键词]** 超临界 CO<sub>2</sub>, 螺旋管, 气体冷却器, 传热特性

**[中图分类号]** TK124; TK11+4 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2020)02-0001-06

## Study on the Heat Transfer Characteristics of Supercritical CO<sub>2</sub> in Helical Tube Gas Cooler

Guan Wanyan, Chen Weiwei, Lu Shihua

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** With compact structure and high heat exchange efficiency, helical tube is widely used in CO<sub>2</sub> gas cooler. The thermophysical properties of supercritical CO<sub>2</sub> change dramatically which makes the heat transfer characteristics of supercritical CO<sub>2</sub> in helical tubes more complicated. Through the numerical simulation of different conditions of cooling heat flux and mass flux, it is found that the distribution of heat transfer coefficient of supercritical CO<sub>2</sub> in the helical tube is approximately parabolic along the flow direction. The peak value of heat transfer coefficient (PV-HTC) increases with the increase of cooling heat flux, while where the PV-HTC appeared, the flow swirl angle shows the opposite tendency. The PV-HTC increases with the increase of mass flux, and where PV-HTC appeared, the flow swirl angle shows the same tendency. Since the ratio of heat flux to mass flux determines the distribution of heat transfer coefficient along the flow direction, a correlation suitable for supercritical CO<sub>2</sub> heat transfer calculation in uniformly cooled helical tube is proposed, which can provide a reference for optimization and design of helical tube gas cooler.

**Key words:** supercritical CO<sub>2</sub>, helical tube, gas cooler, heat transfer characteristics

当 CO<sub>2</sub> 的温度和压力均高于其临界点 ( $p_c = 7.377\ 3\ \text{MPa}$ ,  $t_c = 31.05\ ^\circ\text{C}$ ) 时, 就会处于一种介于气体和液体之间的中间状态, 即超临界状态. 超临界 CO<sub>2</sub> 具有气体一样低的动力粘度和液体一样高的密度, 扩散能力和溶解能力俱佳, 流动与传热特性优良, 环境友好而且易于获取, 因此成为化工、能源动力以及暖通空调等领域的研究焦点<sup>[1-3]</sup>. 超临界 CO<sub>2</sub> 的热物性参数随温度和压力呈现非线性剧变, 这导致其管内传热的机理异常复杂, 因此国内外研究者对超临界 CO<sub>2</sub> 在管内的流动与传热做了大量的研究. 其中关于超临界 CO<sub>2</sub> 在直管中的传热研究较多, 而螺旋管中相对较少. 螺旋管因其结构紧凑、换热效率高、单位容积利用率大, 在实际应用中常用作紧凑型换热器的换热管<sup>[2-3]</sup>.

螺旋管中超临界 CO<sub>2</sub> 的传热研究分为加热工况和冷却工况两种, 其中加热工况多用于动力工程, 而

收稿日期: 2020-03-27.

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK20180732)、中国博士后科学基金项目 (2018M632332)、江苏省高校自然科学基金项目 (18KJB470017).

通讯作者: 陈玮玮, 博士, 讲师, 研究方向: 超临界流体传热. E-mail: chenweiwei@njnu.edu.cn

冷却工况常见于空调制冷领域. Bai 等<sup>[4]</sup>基于 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型对非常规重力场加热工况下的超临界  $\text{CO}_2$  的传热机理进行了模拟, 得出了超临界  $\text{CO}_2$  在超重力、微重力和零重力下浮升力和离心力相互耦合作用的传热特性, 最后给出了螺旋管中超临界  $\text{CO}_2$  在 0~6 g 重力加速度作用下的传热关联式. 顾骞等<sup>[5]</sup>在等壁温加热条件下, 采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型对螺旋管内超临界  $\text{CO}_2$  的传热特性进行数值模拟, 得出了螺旋管内超临界  $\text{CO}_2$  在传热过程中的温度、流速、密度和传热系数的分布和变化规律. 王开正等<sup>[1]</sup>、Zhang 等<sup>[6-8]</sup>、Liu 等<sup>[9]</sup>采用 SST  $k-\omega$  湍流模型对加热工况下螺旋管中超临界  $\text{CO}_2$  的对流传热特性进行了数值模拟, 分析了浮升力、径向力和流动加速的混合作用对传热的影响, 提出了螺旋管内超临界  $\text{CO}_2$  的传热计算准则关联式. Devandran 等<sup>[10]</sup>采用多层因子设计分析的方法对加热工况下超临界  $\text{CO}_2$  在螺旋管内的水力工况进行优化设计, 分析表明质量流速对  $Nu$  数的影响最大, 其次是入口压力, 而对于摩擦因子, 最主要的影响因素是入口压力. Rao 等<sup>[11]</sup>借助 ANSYS FLUENT 软件模拟了加热工况下螺旋管中超临界  $\text{CO}_2$  的压降、摩擦系数、 $Nu$  数, 发现  $Nu$  数随进口质量流速和热流密度的增加而显著增大, 而摩擦系数  $f$  则呈现出相反的变化趋势. 若想获得较高的传热量, 需提供较高的入口压力值.

国内外关于超临界  $\text{CO}_2$  在螺旋管中的冷却传热研究相对少见. Xu 等<sup>[3,12-14]</sup>、Wang 等<sup>[15]</sup>从实验研究和数值模拟两个方面对水平螺旋管内超临界  $\text{CO}_2$  的传热特性与机理、传热影响因素、传热准则关联式以及传热过程的焓分析等进行了详细的研究, 认为浮升力、离心力和热物性参数变化的耦合作用导致了流动和传热相关参数在管道截面上的特殊分布. Yang<sup>[16]</sup>采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型对水平布置的螺旋管内超临界  $\text{CO}_2$  的传热和压降特性进行了数值模拟, 结果显示由于二次流的缘故, 螺旋管中的传热系数和压降比直管中要大, 分析了工况参数对传热和压降的影响关系, 提出了一个可用于传热计算的准则关联式.

以上研究表明, 现有关于超临界  $\text{CO}_2$  在螺旋管中的传热研究主要针对加热工况, 冷却工况的研究相对较少且多集中于水平螺旋管. 本文基于可压缩流体的连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程以及 SST  $k-\omega$  湍流模型并考虑热物性参数剧变的影响, 对均匀热流密度冷却工况竖直螺旋管内超临界  $\text{CO}_2$  的流场和温度场进行求解; 得出了不同冷却热流密度和质量流速对超临界  $\text{CO}_2$  沿流动方向传热分布的作用关系; 根据计算结果提出了一个适用于均匀冷却竖直螺旋管内超临界  $\text{CO}_2$  传热计算的关联式. 本文的研究结论可为竖直布置螺旋管式气体冷却器的优化与设计提供参考.

## 1 数值模拟及结果验证

### 1.1 控制方程

超临界  $\text{CO}_2$  的热物性参数随温度发生非线性变化, 尤其在拟临界区域, 强烈的浮升力和流动加速效应导致超临界  $\text{CO}_2$  的流动与传热特性较为复杂, 且  $\text{CO}_2$  在螺旋管内的流动还受到离心力作用, 这进一步增加了其数值模拟的难度. 因此, 本文采用可压缩的守恒方程和 SST  $k-\omega$  湍流模型为数值模拟的控制方程组, 其张量形式具体如下<sup>[17]</sup>:

连续方程:

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0. \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_i. \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_j h)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_j h'} \right) + S_T. \quad (3)$$

式中,  $i, j$  表示张量指标, 取 1, 2, 3 时, 分别代表坐标轴 3 个方向;  $p$  为压力 (Pa);  $u$  为速度 (m/s);  $\rho$  为密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $c_p$  为定压比热容 ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ );  $h$  为比焓 ( $\text{J}/\text{kg}$ );  $\mu$  为动力粘度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ );  $\lambda$  为导热系数 ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ );  $f$  为单位质量力 ( $\text{m}/\text{s}^2$ );  $S_T$  为粘性耗散项 ( $\text{W}/\text{m}^3$ ). 其中, 脉动项  $\rho \overline{u'_i u'_j}$  和  $\rho \overline{u'_j h'}$  分别为雷诺应力和湍流热通量, 两者均为未知量, 需引入湍流模型, 才能使控制方程有唯一确定的解.

1.2 网格划分

本文采用的螺旋管物理模型及其网格划分如图 1 所示. 螺旋管竖直布置,其几何尺寸:内径为 9 mm,管长为 5 338 mm,节距为 32 mm,绕径为 283 mm<sup>[2]</sup>. 几何模型采用结构化的六面体网格划分,轴向和周向网格均匀,半径方向网格尺寸向壁面处等倍数递减,而管截面中心网格扭曲率较大,可采用“钱币画法”来解决.

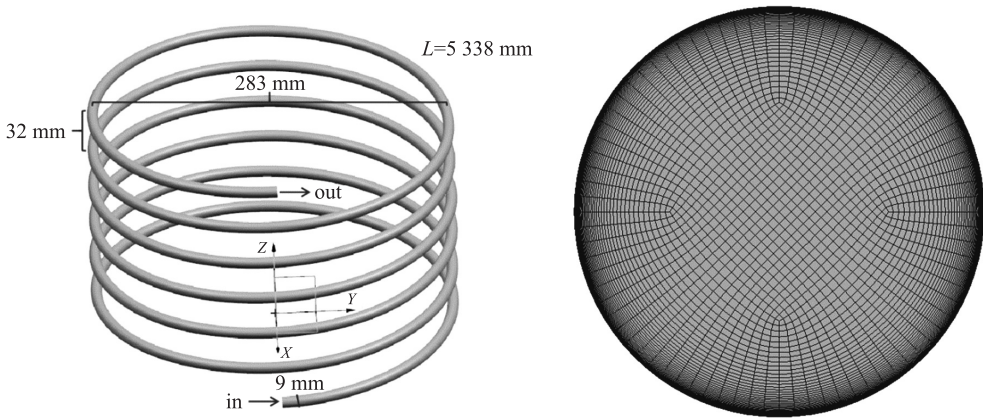


图 1 螺旋管物理模型及网格划分

Fig. 1 Physical model and mesh generation of the helically tube

1.3 模型验证

为了验证模型的准确性,需要进行网格无关性和计算结果的验证. 本文创建三种不同类型的结构化网格,其径向、周向、轴向以及网格总数分布分别为:Case 1(18×60×400,404 609),Case 2(25×80×400,739 444)以及 Case 3(31×100×400,1 174 529). 数值模拟的求解过程借助 ANSYS CFD 软件 Fluent 来计算,其详细实施过程如表 1 所示<sup>[17]</sup>. 将计算结果与文献[2]的实验结果( $p=8\text{ MPa}$ , $d=9\text{ mm}$ , $G=97.8\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , $q=9.03\text{ kW}/\text{m}^2$ )进行对比,发现两者基本吻合,如图 2 所示. 分析发现,当网格加密至 Case 2 和 Case 3 时,计算结果相差不大,显然 Case 2 的计算结果与网格数无关,同时具有可接受的计算精度,因此本文后续分析都基于 Case 2 所示网格划分办法.

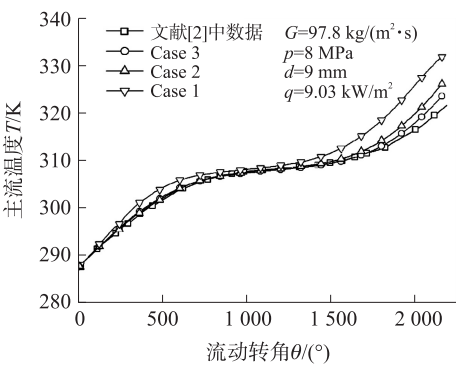


图 2 网格无关性验证

Fig. 2 Grid independence validation

表 1 数值模拟实施过程

Table 1 Numerical simulation implementation process

实施步骤	实施过程
选择湍流模型	采用 SST $k-\omega$ 湍流模型,勾选 Low-Re Correction、Viscous Heating 和 Curvature Correction 分别用来考虑近壁面低雷诺数影响、粘性耗散效应和流动曲率修正. 湍动普朗特数利用超临界条件下的 Mohseni-Bazargan 关系式计算获得. 在 Fluent 中重新定义超临界 CO <sub>2</sub> 热物性参数:利用 REFPROP 软件获取 50 组目标温度范围内超临界 CO <sub>2</sub> 的热物性参数,选择分段线性插值,编写进 Journal 文件,在 Fluent 软件中导入该 Journal 文件即可实现对 50 组热物性参数的自动输入. 其中 Journal 文件为:
加载物性参数	"Create/Edit Materials * Frame1 * Table1 * TextEntry1 (Name)" " (supercritical-carbon-dioxide)" "Piecewise-Linear Profile * (Points)" 50 Profile * Table2 (Data Points Value)" $T_1 \rho_1 \cdots T_{50} \rho_{50}$ "Piecewise-Linear Profile * (Points)" 50 Profile * Table2 (Data Points Value)" $T_1 c_{p1} \cdots T_{50} c_{p50}$ "Piecewise-Linear Profile * (Points)" 50 Profile * Table2 (Data Points Value)" $T_1 \lambda_1 \cdots T_{50} \lambda_{50}$ "Piecewise-Linear Profile * (Points)" 50 Profile * Table2 (Data Points Value)" $T_1 \mu_1 \cdots T_{50} \mu_{50}$
设置边界条件	入口采用“质量流量进口”条件,超临界 CO <sub>2</sub> 的入口温度和质量流速保持不变;出口采用“压力出口”条件,超临界 CO <sub>2</sub> 的出口压力保持不变;壁面采用“静止壁面 & 无滑移”条件,恒定热流密度.
选择求解方法	选择压力基双精度求解器,压力与速度的耦合采用 SIMPLEC 算法来求解,为保证模型求解精度,各方程离散均采用二阶迎风格式,密度松弛因子 0.8,其他保持软件默认.
设置收敛准则	能量守恒方程的收敛残差设置为 0.000 001,其余方程均设置为 0.000 1. 当出口截面的主流温度不再变化且残差曲线趋于水平,则判断计算过程收敛.

## 2 结果分析与讨论

一般来说,对于常用的螺旋管式气体冷却器,管内径、工质的入口压力和入口温度都为已知参数或在很小的范围内变动,工质的热流密度  $q$  和质量流速  $G$  才是决定其在螺旋管内传热特性的最重要的工况参数,因此本文将通过数值模拟来获取不同  $q$  和  $G$  对超临界  $\text{CO}_2$  局部传热系数的影响,分析其变化规律,总结其传热计算关联式。

### 2.1 热流密度的影响

图 3 反映的是不同冷却热流密度下超临界  $\text{CO}_2$  在螺旋管内的主流温度和局部传热系数随流动转角的变化关系。由图 3(a)可知,主流温度  $T_b$  随流动转角的增大逐渐减小,且流动转角对应的入口附近和出口附近  $T_b$  的变化率较大,而中间对应的拟临界区域  $T_b$  的变化较为平缓,热流密度的绝对值越大,该平缓区域的位置越靠近入口。由图 3(b)可知,传热系数  $\alpha$  随流动转角的增大而增大,在拟临界区域达到峰值,然后逐渐减小,总体呈现出近似抛物线分布,热流密度的绝对值越大,传热系数  $\alpha$  在拟临界区域达到的峰值越高。图 3 所示规律是由于拟临界区域流体物性变化剧烈,浮升力和离心力共同作用导致冷热流体互相掺混,使得管流截面温度更加均匀,传热得到显著地强化。

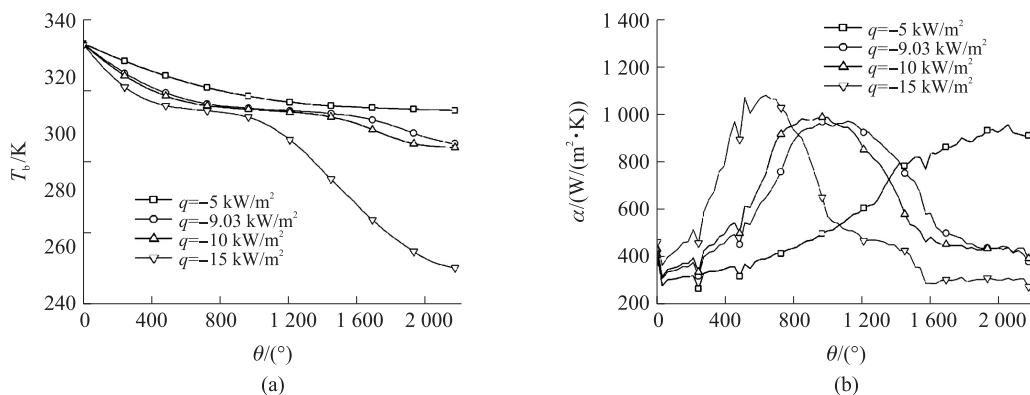


图 3 热流密度对超临界传热的影响( $p=8 \text{ MPa}$ ,  $d=9 \text{ mm}$ ,  $G=97.8 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ )

Fig. 3 The influence of heat flux on supercritical heat transfer( $p=8 \text{ MPa}$ ,  $d=9 \text{ mm}$ ,  $G=97.8 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ )

### 2.2 质量流速的影响

图 4 为不同质量流速下超临界  $\text{CO}_2$  在螺旋管内的主流温度和局部传热系数随流动转角的变化关系。由图 4(a)可知,主流温度  $T_b$  随流动转角的增大逐渐减小,同样可以发现入口附近和出口附近  $T_b$  的变化率较大,而中间对应的拟临界区域  $T_b$  的变化较为平缓,质量流速越大,该平缓区域的位置越靠近出口。由图 4(b)可知,传热系数  $\alpha$  随流动转角的增大而增大,在拟临界区域达到峰值,然后逐渐减小,总体呈现出近似抛物线分布,质量流速越大,传热系数  $\alpha$  在拟临界区域达到的峰值越高。由于浮升力和离心力作用强化了热质交换速率,在拟临界区域  $\text{CO}_2$  的热物性剧烈变化,使得管流截面冷热流体掺混得到显著强

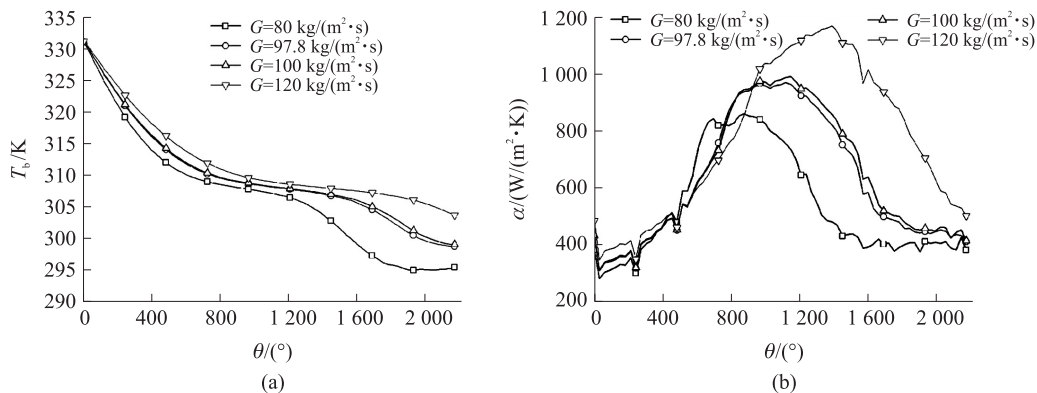


图 4 质量流速对超临界传热的影响( $p=8 \text{ MPa}$ ,  $d=9 \text{ mm}$ ,  $q=-9.03 \text{ kW/m}^2$ )

Fig. 4 The influence of mass flux on supercritical heat transfer( $p=8 \text{ MPa}$ ,  $d=9 \text{ mm}$ ,  $q=-9.03 \text{ kW/m}^2$ )



化,而质量流速的增大会进一步放大这种效果。

### 2.3 螺旋管内传热关系式的建立

由以上数值模拟的分析可知,超临界 CO<sub>2</sub> 在竖直螺旋管内的冷却传热系数主要由热流密度、质量流速及流动转角(局部位置)决定,不同热流密度和质量流速下沿流动方向呈现的类似抛物线分布表明传热系数可以表示为三者之间某种特定的函数关系。

根据上述结论,热流密度和质量流速对传热系数峰值的影响规律一致,即传热系数峰值大小正相关于热流密度和质量流速的绝对值,但关于峰值出现的位置则出现相反的结论,即热流密度越大,峰值位置越靠近入口,质量流速越大,峰值位置越靠近出口。因此本文尝试将热流密度和质量流速的比值  $q/G$  作为一个整体引入传热系数关系式,可使  $q$  和  $G$  对目标关联式峰值位置的影响保持一致。为提高传热关系式的通用性,流动转角(局部位置)采用无量纲位置  $z/L$  来度量,其中  $z$  为流动局部位置距离入口的弧线长度, $L$  为螺旋管换热部分的总长度。改变  $q$  和  $G$ ,通过数值模拟获得 2 774 组数据,利用商业软件 1stOpt 的曲线拟合功能,得出最终的竖直螺旋管内超临界 CO<sub>2</sub> 传热关联式。

$$\frac{Nu_b}{Nu_{D-B,b}} = \frac{0.37 - 0.446 \frac{z}{L} + 3.49 \frac{q}{G} + 0.39 \left( \frac{z}{L} \right)^2 + 10.08 \left( \frac{q}{G} \right)^2 - 1.53 \frac{z}{L} \frac{q}{G}}{1 - 1.92 \frac{z}{L} + 9.17 \frac{q}{G} + 1.25 \left( \frac{z}{L} \right)^2 + 22.8 \left( \frac{q}{G} \right)^2 - 7.97 \frac{z}{L} \frac{q}{G}}, \quad (4)$$

式中,  $Nu_{D-B,b}$  为常规流体在管内强制对流传热的 Dittus-Boelter 关联式,其具体表达式为  $Nu_{D-B,b} = 0.023 Re_b^{0.8} Pr_b^{0.3}$ ;  $z/L$  为局部位置  $z$  与管道总换热长度  $L$  的无量纲比值;  $q/G$  为热流密度与质量流速的比值,其中  $q$  为负值,表示冷却工况。

将数值模拟(工况范围:  $p=8$  MPa,  $d=9$  mm,  $G=80 \sim 120$  kg/(m<sup>2</sup>·s),  $q=-(5 \sim 15)$  kW/m<sup>2</sup>) 所获得的 2 774 组努塞尔数  $Nu_b$  与关联式(4)计算所得努塞尔数  $Nu_{b,fi}$  进行对比,结果发现,新关联式与数值模拟的数据总体贴合度较好,87.7%的计算数据点落在  $\pm 20\%$  的误差带内,如图 5 所示。因此该关联式可为冷却工况下气体冷却器的传热设计和优化提供计算方便。同时,本文也为非此工况下的螺旋管内超临界 CO<sub>2</sub> 传热特性和传热关联式的建立提供参考。

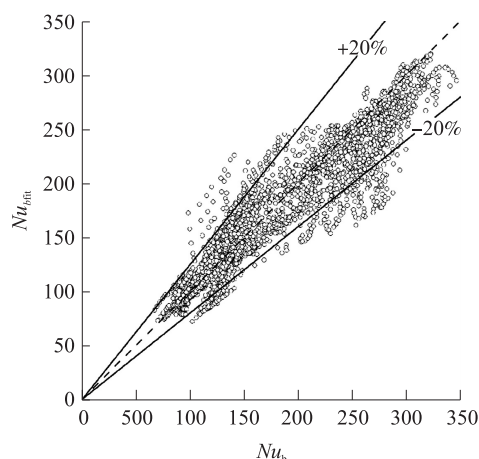


图5 传热关联式适应性分析

Fig. 5 Heat transfer correlation adaptability analysis

## 3 结论

本文基于可压缩流体的守恒方程组和 SST  $k-\omega$  湍流模型对竖直螺旋管内超临界 CO<sub>2</sub> 的冷却传热特性及传热计算的准则关联式进行研究,得出以下结论:

(1) 螺旋管内超临界 CO<sub>2</sub> 传热系数沿流动方向呈近似抛物线分布,冷却热流密度越大,传热系数峰值越高,出现峰值的流动转角越小;质量流速越大,传热系数的峰值越高,出现峰值的流动转角越大。

(2) 冷却热流密度、质量流速及流动转角(局部位置)三者共同决定整个流动方向传热的变化规律,传热系数的涨落与它们存在比较稳定的函数关系。

(3) 根据数值模拟结论,获取了 2 774 组数值实验数据,基于此提出一个对常规流体在管内强制对流传热的 Dittus-Boelter 关联式的修正模型,该模型 87.7% 的计算数据点落在  $\pm 20\%$  的误差带内,可为气体冷却器的设计和优化提供方法。

## [参考文献](References)

- [1] 王开正,徐肖肖,刘朝,等. 超临界 CO<sub>2</sub> 在螺旋管中换热特性的数值模拟[J]. 太阳能学报,2017,38(4):1102-1108.
- [2] 王淑香,张伟,牛志愿,等. 超临界压力下 CO<sub>2</sub> 在螺旋管内的混合对流换热[J]. 化工学报,2013,64(11):3917-3926.

- [3] 徐肖肖,吴杨杨,刘朝,等. 水平螺旋管内超临界  $\text{CO}_2$  冷却换热的数值模拟[J]. 物理学报,2015,64(5):258-264.
- [4] BAI W J,ZHANG S J,LI H R,et al. Effects of abnormal gravity on heat transfer of supercritical  $\text{CO}_2$  in heated helically coiled tube[J]. Applied Thermal Engineering,2019,159:113833.
- [5] 顾骞,余南阳. 等壁温下超临界  $\text{CO}_2$  于螺旋管内对流传热的数值模拟[J]. 制冷与空调(四川),2017,31(6):576-581.
- [6] ZHANG S J,XU X X,LIU C,et al. Experimental and numerical comparison of the heat transfer behaviors and buoyancy effects of supercritical  $\text{CO}_2$  in various heating tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2020,149:119074.
- [7] ZHANG S J,XU X X,LIU C,et al. The buoyancy force and flow acceleration effects of supercritical  $\text{CO}_2$  on the turbulent heat transfer characteristics in heated vertical helically coiled tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2018,125:274-289.
- [8] ZHANG S J,XU X X,LIU C,et al. The heat transfer of supercritical  $\text{CO}_2$  in helically coiled tube:Trade-off between curvature and buoyancy effect[J]. Energy,2019,176:765-777.
- [9] LIU X X,XU X X,LIU C,et al. Numerical study of the effect of buoyancy force and centrifugal force on heat transfer characteristics of supercritical  $\text{CO}_2$  in helically coiled tube at various inclination angles[J]. Applied Thermal Engineering,2017,116:500-515.
- [10] DEVANDRAN D,OMER A N,RAO N T,et al. Investigation on effect of some operating conditions on flow and heat transfer of supercritical  $\text{CO}_2$  in helical coiled tubes via multilevel factorial methodology[J]. Malaysian Journal of Industrial Technology,2017,2(2):23-30.
- [11] RAO N T,OMER A N,DEVANDRAN G,et al. Investigation on flow and heat transfer of supercritical  $\text{CO}_2$  in helical coiled tubes at various supercritical pressures[J]. MATEC Web of Conferences,2018,225(3):01018.
- [12] XU X X,LIU C,DANG C B,et al. Experimental investigation on heat transfer characteristics of supercritical  $\text{CO}_2$  cooled in horizontal helically coiled tube[J]. International Journal of Refrigeration,2016,67:190-201.
- [13] XU X X,ZHANG Y D,LIU C,et al. Experimental investigation of heat transfer of supercritical  $\text{CO}_2$  cooled in helically coiled tubes based on exergy analysis[J]. International Journal of Refrigeration,2018,89:177-185.
- [14] LIU X X,XU X X,LIU C,et al. The effect of geometry parameters on the heat transfer performance of supercritical  $\text{CO}_2$  in horizontal helically coiled tube under the cooling condition[J]. International Journal of Refrigeration,2019,106:650-661.
- [15] WANG K Z,XU X X,LIU C,et al. Experimental and numerical investigation on heat transfer characteristics of supercritical  $\text{CO}_2$  in the cooled helically coiled tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2017,108:1645-1655.
- [16] YANG M. Numerical study of the heat transfer to carbon dioxide in horizontal helically coiled tubes under supercritical pressure[J]. Applied Thermal Engineering,2016,109:685-696.
- [17] 陈玮玮. 管内超临界流动传热特性及应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.

[责任编辑:陈 庆]