

# 模拟超临界水环境下煤气化所用换热器的研究

王宏那 宿向超

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

**摘要:** 针对在超临界水环境下进行煤气化过程所使用的管壳式换热器, 建立了在管程和壳程内同时存在物料流动和换热的三维管壳式换热器模型, 利用 CFX 软件(计算流体力学分析软件)对管程和壳程中物料的换热和相变过程进行了模拟研究, 成功应用 IAPWS IF97(国际通用工业用水和水蒸气热力性质计算公式)数据库模拟了超临界水的物性状态, 阐述了管程内物料从亚临界相到超临界相的转变过程。利用已有的实验结果对模型进行了验证。模拟结果表明, 随着壳程内物料流量增大, 壳程压降和传热系数随之增大; 壳程出口温度增大的速率渐趋平缓; 当换热器板间距从 117 mm 增大到 150 mm 时强化传热效果并不明显, 同时大大增加了壳程的流动阻力; 在压力为 23 MPa, 温度达 400-600 °C 的操作条件下, 换热器中辐射传热影响较大, 进行数值模拟时不应忽略这部分的影响。研究指出: 换热器结构设计时需要综合考虑传热和煤颗粒沉积的影响。

**关键词:** 管壳式换热器; 数值模拟; 超临界水; 煤气化

中图分类号: TK172 文献标识码: A  
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.06.002

## 引言

近些年来, 在超临界水环境下进行低温催化煤气化反应过程, 用来制造清洁能源(氢气和天然气), 引起了国内外大量学者的关注和研究<sup>[1-2]</sup>。其中换热器是超临界水煤气化过程中必不可少的热交换设备, 通常用来作为加热反应器进口冷物料的预热器, 同时也用作反应器出口热产物的冷却换热器。鉴于实验条件下不能直观地得到超临界相态的过程, 利用 CFD(计算流体力学方法)预测其内部流场和相变十分必要。

国内外研究者利用计算流体力学对换热器进行了广泛的数值模拟研究, 包括对其压降、传热、传热效率、传热系数、湍流混合以及停留时间分布的研究等<sup>[3-9]</sup>。对于换热器中相变的研究, 一般只针对常压下液态水到气态水的相变<sup>[10]</sup>, 对于从亚临界水到超临界水状态转变的过程研究较少, 而这一过程却

是超临界水煤气化反应前预热必经的过程, 对超临界水煤气化工艺过程的研究起着至关重要的作用。

本研究针对煤气化中的超临界水的相态转变过程, 建立了在管程和壳程内同时存在物料流动和换热的三维管壳式换热器 CFD 模型, 模拟了在不同超临界水流量条件下换热器壳程和管程的压力分布、温度场和传热系数, 指出了超临界水相变的过程, 以及辐射传热的影响。

## 1 换热器几何模型

本研究对管壳式换热器进行模拟研究, 其基本结构如图 1 所示, 为一单壳程双管程换热器。总长 1 050 mm, 管程为 16 × 2 根管, 管程出口入口如图 1 所示, 管程管径 15 mm, 管程容积为 0.008 2 m<sup>3</sup>。壳程入口管直径 50 mm, 壳程公称直径为 150 mm, 容积为 0.012 2 m<sup>3</sup>, 壳程采用上进下出式, 壁面绝热。

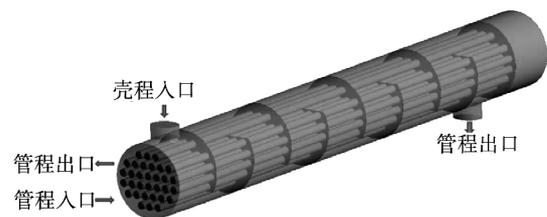


图 1 换热器物理模型

Fig. 1 The physical model of heat exchanger

## 2 数学模型与计算方法

网格划分使用 Gambit 软件(网格划分软件), 划分非结构化四面体网格, 壳程网格数为 118 万, 管程网格为 102 万, 在管程和壳程传热壁面的两侧分别划分了边界层, 保证了传热计算的准确性。

收稿日期: 2014-12-09; 修订日期: 2015-04-01

作者简介: 王宏那(1989-), 女, 中国市政工程华北设计研究总院有限公司助理工程师。

超临界水独特的物性是最难把握的一点,只有准确定义超临界水的物性,才能更可信地模拟超临界态的煤气化反应。本研究采用 IAPWS IF97 数据库数据来模拟计算超临界水的状态<sup>[11]</sup>。

应用 ANSYS CFX 13.0 软件进行模拟,采用稳态计算,流体采用气液混合物模型,超临界水物性采用 IAPWS 物性数据库数据,传热模型采用 thermal energy 模型(热能模型),湍流封闭模型应用  $k-\epsilon$ , 辐射传热模型应用 P1 模型,当考虑颗粒相时曳力应用 gidaspow 模型,颗粒间应用颗粒碰撞模型。由于本研究的换热器仍处于设计阶段,研究中简化为物料中仅含超临界水,并对其换热和相变进行模拟研究。

亚临界的液态水为平衡限制组份,超临界态水为平衡自由组份。壳程和管程分别为两个域,之间的管程管壁和壳程折流挡板为可传热的壁面,接触热阻为  $0.0002 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。壳程的外壁面为绝热。

壳程为上进下出,进料温度  $570 \text{ }^\circ\text{C}$ ,压力  $23 \text{ MPa}$ ,处于超临界状态,折流挡板 8 块,板间距  $117 \text{ mm}$ ,出口相对压力为  $0 \text{ Pa}$ (参考压力为  $23 \text{ MPa}$ )。管程为下进上出,为减小网格数简化模型,未模拟管程左侧的管箱段。如图 1 所示,靠下部的 16 根管为管程入口,上部的 16 根管为管程出口,压力  $23 \text{ MPa}$ ,温度  $370 \text{ }^\circ\text{C}$  处于亚临界状态。管路采用三角形排列。时间步长采用自由时间步长,收敛标准为  $10^{-4}$ ,观测点出口温度、两侧传热系数在迭代时间步 300 步左右达到稳定值,在迭代时间步 600 步时结束计算,单个算例所需时间  $18 \text{ h}$ 。结果显示收敛性良好,RMS 残差已达到收敛标准。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 模型验证

由于换热器处于设计阶段,本研究采用实验中的盘管对模型进行验证。盘管全长  $20 \text{ m}$ ,管径  $12 \text{ mm}$ ,直管段  $3 \text{ m}$ ,弯管段  $2 \text{ m}$ ,共两圈,容积为  $0.00226 \text{ m}^3$ ,水平放置。水与物料混合后进入盘管,出口压力值  $24.1 \text{ MPa}$ ,实验条件下的进出口压差值列于下表中,以实验温度  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  为例,水煤浆浓度为水煤质量比  $6.27$ ,盘管进出口压差为  $0.139 \text{ MPa}$ ,模拟同实验条件下的盘管压降为  $0.14 \text{ MPa}$  相对误差小于  $1\%$ ,由此验证了 CFD 模型模拟的可靠性。

表 1 不同进料条件下的压降值的实验验证

Tab. 1 The experimental verification of pressure drop values under different feeding conditions

| 水煤质量比 | 浓度 / % | 温度 / $^\circ\text{C}$ | 进出口压差实验值 / MPa | 进出口压差模拟值 / MPa |
|-------|--------|-----------------------|----------------|----------------|
| 6.27  | 20     | 500                   | 0.139          | 0.140          |
| 5.28  | 15     | 600                   | 0.211          | 0.213          |
| 4.17  | 10     | 600                   | 0.127          | 0.128          |

#### 3.2 相变及温度场/压力场

超临界水管程走冷流体,即需要被加热的反应物料,入口温度  $370 \text{ }^\circ\text{C}$ ,处于亚临界状态,将被加热到超临界状态。壳程走热流体,即从反应器反应完成后循环回来的热流体,入口温度  $570 \text{ }^\circ\text{C}$ ,处于超临界状态。

在壳程流量保持不变的条件下,比较管程流量不同的条件下流场和温度场的变化。在  $0.3 \text{ kg/s}$  和  $0.15 \text{ kg/s}$  的管程流量下管程超临界相水的质量分数分布如图 2 所示。入口均为亚临界状态下的液体,被加热后出口均变为超临界态。从模拟结果很好地给出了管程冷流体从亚临界到超临界状态的变化以及相变发生的位置。当管程流量从  $0.3 \text{ kg/s}$  减小一半时,由于管程流体流速降低,停留时间增大,相变的位置离入口更近。

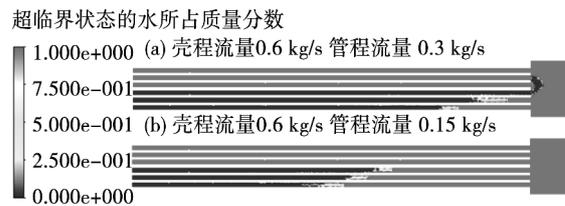


图 2 管程超临界态水质量分数分布

Fig. 2 Distribution of water mass fraction in supercritical state of pipe side

为减小误差,模拟设定参考压强为  $23 \text{ MPa}$ ,则出口处相对压强为  $0 \text{ Pa}$ ,如此得到相对压强的管程分布图 3。

结果可见,当管程流量从  $0.3 \text{ kg/s}$  减小到  $0.15 \text{ kg/s}$  时,管程压降明显降低。

管程冷流体被逐步加热,流量较小的管程流体停留时间长,被加热到的温度较高。管程流量在  $0.3 \text{ kg/h}$  时,出口温度为  $650.76 \text{ K}$ ,加热温升为  $7.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。管程的温度分布如图 4 所示。

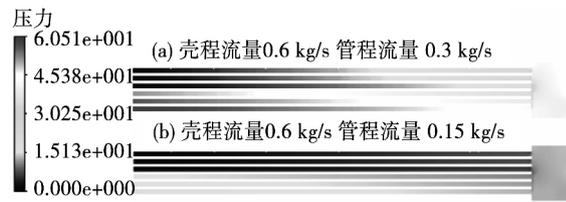


图 3 管程相对压力分布

Fig. 3 Relative pressure distribution in pipe side

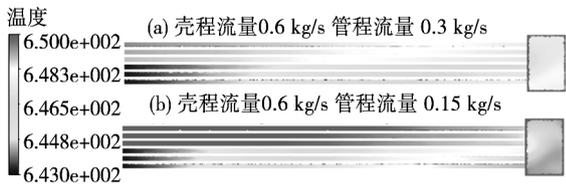


图 4 管程温度分布

Fig. 4 Temperature distribution in pipe side

### 3.3 壳程不同热流体流量的影响

壳程流量从 0.075 kg/s 到 1.0 kg/s 变化时,壳程内压降、出口温度和壳程传热系数的变化如图 5 所示。由图可见,在保持管程流量不变的情况下,将壳程流量从 0.075 kg/s 逐步增大到 1.0 kg/s 时,超临界水流速增大,整体压降显著增大;同时,流动强化了传热,壳侧的传热系数也随之增大。壳程出口温度开始迅速增加。继续加大流量,温度增加趋势逐渐平缓。说明过大的流量增量对传热温差的影响将变得不明显,因此,为了保证降低能耗同时保持强化传热,有必要对壳程流量进行优化。

### 3.4 挡板间距的影响

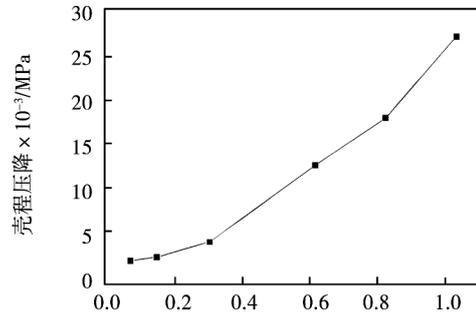
对于双管程单壳程的换热器,尝试采用更大的挡板间距,以此来减小在大流量操作条件下的壳程压降。

模拟对比了壳程和管程流量都为 0.15 kg/h 时,且在同样换热器长度下,具有 8 块折流挡板、挡板间距为 117 mm 的换热器和具有 6 块折流挡板、板间距为 150 mm 换热器的流动和传热结果。

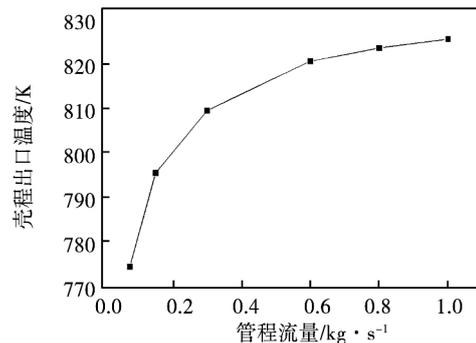
由图 6 压力云图可见,当降低折流挡板的数目时,压降从 586 Pa 降到 405 Pa,壳程的压降显著降低。

温度分布图 7 可见,板间距虽然有所改变,但壳程的出口温度都在 790 K 左右,差别不大。可知,在此换热器操作条件下,增加折流板数,减小板间距,

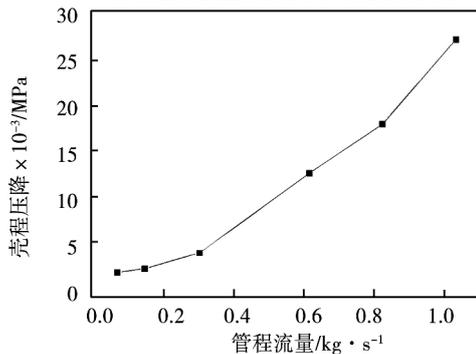
强化传热效果并不明显,同时却大大增加了壳程的流体流动阻力,使得壳程压降增大明显。因此在此操作条件下,仅出于传热考虑可以使用 150 mm 的板间距,即 6 块折流挡板。



(a) 壳程压降随壳程流量的变化



(b) 壳程流量对壳程出口温度的影响



(c) 不同壳程流量下的壳程传热系数

图 5 不同壳程流量下的壳程压降、出口温度和传热系数

Fig. 5 Shell side pressure drop, the temperature of the outlet and heat transfer coefficient under various flux in shell side

与此同时,由速度矢量图 8 可以看出,在两种板间距的结构条件下,都会出现“流动死区”,这些区域不仅会因为流速很小导致局部结垢以及煤颗粒沉积,同时也会影响总体传热效果。因此,实际换热器结构设计时需要综合考虑传热和沉积的影响。

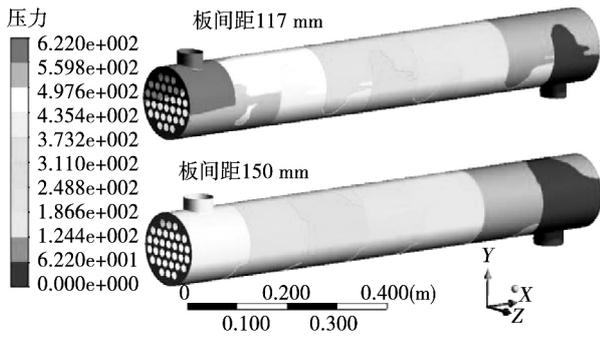


图 6 壳程压力云图

Fig. 6 Pressure atlas in shell side

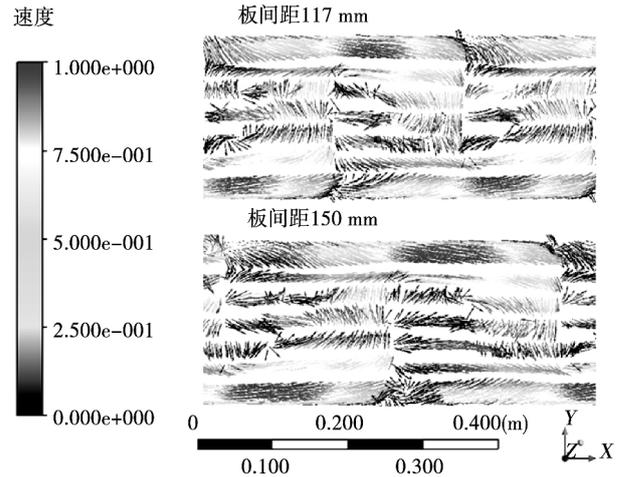


图 8 壳程速度矢量图

Fig. 8 Vector of velocity in shell side

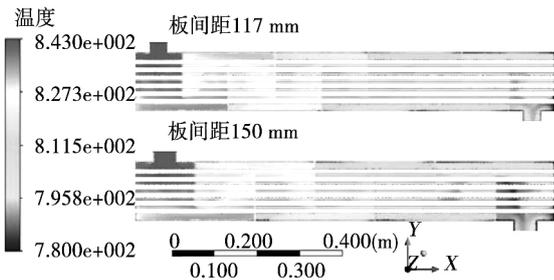


图 7 壳程温度云图

Fig. 7 Temperature atlas in shell side

### 3.5 辐射传热的影响

对比同条件下加辐射传热模型和不加辐射传热模型的情况如表 2 所示。结果可见,在不考虑辐射传热的情况下,超临界态的换热器的壳程的出口温度同考虑辐射传热的结果相差较大,仅考虑对流传热的壳程温差明显较小,只有 21 K,仅为考虑辐射传热情况下的一半,也即辐射传热在超临界态水总传热中占有一定比例,由此可见辐射传热在此操作条件下不可忽略,模拟应考虑辐射传热的影响。

表 2 辐射传热的影响

Tab. 2 The impact of radiation heat transfer

| 辐射传热 | 壳程流量<br>/kg · s <sup>-1</sup> | 管程流量<br>/kg · s <sup>-1</sup> | 壳程压降/Pa | 壳侧传热系数/W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> | 管侧传热系数/W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> | 壳程出口温度/K | 壳程温差/K |
|------|-------------------------------|-------------------------------|---------|--|--|----------|--------|
| 不考虑  | 0.15                          | 0.15                          | 607     | 390  | 1 559  | 822      | 21     |
| 考虑   | 0.15                          | 0.15                          | 586     | 398  | 2 027  | 796      | 47     |

## 4 结 论

建立了超临界水环境下进行煤气化过程所使用的换热器模型,应用 CFX 并采用 IAPWS 物性数据库准确地计算了超临界水环境的物性,并成功地模拟了水从亚临界态到超临界态的转变,直观地阐述了管程内超临界水相变的过程,并得出以下结论:

(1) 壳程流量增大,壳程压降随之增大,同时传热系数也随之增大;壳程出口温度先增大后随之趋于平缓。因此,为了保证降低能耗同时保持强化传

热,有必要对壳程流量进行优化。

(2) 增大挡板间距(此换热器板间距从 117 mm 增大到 150 mm)对强化传热效果并不明显,也大大增加了壳程的流动阻力。出于传热效果的考虑此换热器选用 150 mm 板间距即可。在实际设计中还应综合考虑传热和沉积的影响。

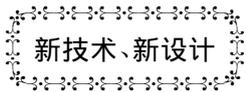
(3) 在压力为 23 MPa,温度为 400 - 600 °C 的操作条件下换热器的辐射传热所占比例较大,模拟时应更多考虑辐射传热的影响。

### 参考文献:

[1] Vostrikov A A, Pсарov S A, Dubov D Y, et al. Kinetics of coal con-

- version in supercritical water[J]. *Energy & Fuels* 2007 21(5): 2840–2845.
- [2] Wang S, Guo Y, Wang L, et al. Supercritical water oxidation of coal: Investigation of operating parameters' effects, reaction kinetics and mechanism [J]. *Fuel Processing Technology* 2011, 92(3): 291–297.
- [3] 徐志明, 王月明, 张仲彬. 板式换热器单边流动与对角流动数值模拟[J]. *热能动力工程* 2011 26(6): 675–680.  
XU Zhi-ming, WANG Yue-ming, ZHANG Zhong-bin. Numerical simulation of the unilateral and diagonal Flow in the plate-type heat exchangers[J]. *Journal of engineering for thermal energy and power* 2011 26(6): 675–680.
- [4] 古新, 董其伍, 刘敏珊. 周期性模型在管壳式换热器数值模拟中的应用[J]. *热能动力工程* 2008 23(1): 64–68.  
GU Xin, DONG Qi-wu, LIU Mei-shan. Application of a periodic model in the numerical simulation of shell-and-tube heat exchangers [J]. *Journal of engineering for thermal energy and power* 2008, 23(1): 64–68.
- [5] Tsai Y C, Liu F B, and Shen P T. Investigations of the pressure drop and flow distribution in a chevron-type plate heat exchanger [J]. *International communications in heat and mass transfer*, 2009 36(6): 574–578.
- [6] Jayakumar J, Mahajani S, Mandal J, et al. Experimental and CFD estimation of heat transfer in helically coiled heat exchangers[J]. *Chemical engineering research and design*, 2008. 86(3): 221–232.
- [7] Kritikos, K, Albanakis C, Missirlis D, et al. Investigation of the thermal efficiency of a staggered elliptic-tube heat exchanger for aeroengine applications [J]. *Applied Thermal Engineering* 2010, 30(2): 134–142.
- [8] Freund S and Kabelac S. Investigation of local heat transfer coefficients in plate heat exchangers with temperature oscillation IR thermography and CFD [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2010 53(19): 3764–3781.
- [9] Habchi C, Lemenand T, Valle D D, et al. Turbulent mixing and residence time distribution in novel multifunctional heat exchangers-reactors [J]. *Chemical engineering and processing: process intensification* 2010 49(10): 1066–1075.
- [10] 胡琼. 管壳式换热器冷凝传热研究与数值模拟 [硕士学位论文]. 湖北: 华中科技大学 2011.  
HU Qing. Research and numerical simulation of condensation and heat transfer in shell and tube heat exchanger [master's degree paper]. Hubei: Huazhong University of Science and Technology 2011.
- [11] Wagner W, Kruse A. The industrial standard IAPWS-IF97 for the thermodynamic properties and supplementary equations for other properties [J]. *Properties of Water and Steam*, Springer, 1998. 1–354.

(陈滨 编辑)



DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2015.06.003

## 立式余热锅炉成功地用于叶尔比勒电站扩容工程

据《Gas Turbine World》2015年5–6月刊报道,利用CMI的立式余热锅炉构成燃气轮机联合循环电站,对伊拉克库尔德斯坦原有燃气轮机简单循环电站进行了重新匹配动力、增加装机容量的改造。

使用立式余热锅炉完成重新匹配动力的首座电站是Erbil天然气电站。值得注意的是在偏远和复杂地区建造电站时,立式余热锅炉具有许多设计优点。

在项目改造的第三阶段,增加了8台CMI Energy公司的双压余热锅炉、2台额定功率为250 MW的GE C-7型汽轮机和2台在15℃环境温度和6.66 kPa压力下工作的GEA Energietechnik 40单元空冷式冷凝器。

采用新余热锅炉的Erbil电站可以达到:

- 使电站(装置)热效率提高到55%–56%左右。
- 给库尔德斯坦地区提供约15%电力供应。
- 容许电厂(装置)在其整个使用寿命期间以基本负荷或其它任何组合方式运行。

(吉桂明 摘译)

吸热型碳氢燃料的定压比热测量研究 = **Study of the Measurement of the Specific Heat Capacity of a Heat Absorption Type Hydrocarbon Fuel at a Constant Pressure** [刊 汉] HUANG Shu-jun , GUO Ya-jun ( College of Environment and Municipal Engineering , Xi'an University of Architectural Science and Technology , Xi'an , China , Post Code: 710055) , YANG Zhu-qiang , LIU Zhao-hui , BI Qin-cheng ( National Key Laboratory on Multi-phase Flow in Power Engineering , Xi'an Jiaotong University , Beijing , China , Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(6) . -833 -836

At subcritical and supercritical pressures ,an on-line measurement was performed of the specific heat capacity at a constant pressure of a heat absorption type hydrocarbon fuel. Based on the energy conservation theory ,a set of device for measuring the specific heat capacity at a constant pressure was designed and the geometrical dimensions and structures of the device under discussion were optimized. On the basis of the device in question being calibrated by using deionized water and cyclohexane ,when the pressure ranges from 2.0 to 5.0 MPa and the temperature from 333 K to 903 K ,the specific heat capacities of the heat absorption type hydrocarbon fuel were measured and the curves showing changes of the specific heat capacity with temperature were obtained. The test results show that in the low temperature zone ,the specific heat capacity at a constant pressure will smoothly and stably increase with an increase of the temperature and reach the peak values at the pseudocritical and critical temperature respectively. After a heat absorption type chemical reaction has taken place in the high temperature zone ,the specific heat value will ceaselessly increase with an increase of the temperature while the peak value of the specific heat capacity at a constant pressure in the critical and pseudocritical zone will gradually decrease with an increase in the pressure. However ,the peak value in the critical and pseudocritical temperature zone will decrease with an increase of the pressure and the specific heat capacity in the high temperature chemical reaction zone will increase with an increase of the pressure.

**Key words:** specific heat at a constant pressure ,hydrocarbon fuel ,supercritical pressure

模拟超临界水环境下煤气化所用换热器的研究 = **Numerical Simulation Study of a Heat Exchanger for Use in the Supercritical Water Coal Gasification Process** [刊 汉] WANG Hong-na , SU Xiang-chao ( China Municipal Engineering North China Design and Research Institute Co. Ltd. , Tianjin , China , Post Code: 300074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(6) . -837 -841

A three-dimensional model for shell-and-tube heat exchangers for use in the coal gasification process in the environ-

ment of supercritical water was established and a numerical simulation study was made of the heat exchange and phase-change process of materials in both tube and shell side by making use of the software CFX ( computational fluid dynamics analytic software) . The IAPWS IF97 database was successfully used to numerically simulate the physical property and state of the supercritical water and the phase-change process of the material in the tube side from its subcritical state to supercritical one was expounded. By making use of the available test results ,the model in question was verified. The simulation results show that the pressure drop and heat transfer coefficient in the shell side will increase with an increase in the flow rate in the shell side. The growth rate of the temperature at the outlet of the shell side will first become big and then small. To increase the interval of the baffles in the heat exchanger from 117 mm 150 mm will be not conspicuous in enhancing the heat transfer effectiveness ,however ,the flow resistance in the shell side will increase greatly. At a pressure of 23 MPa ,under the operating condition of the temperature changing from 400 °C to 600 °C ,the influence of the radiative heat transfer in the heat exchanger is relatively big. When a numerical simulation is made ,the amount of heat transferred in the form of radiation cannot be ignored. The actual structure of the heat exchange will be finalized by comprehensively considering the influence of the heat transferred and coal particle deposition. The above-mentioned numerical simulation results can offer a certain theoretical significance and practical value in engineering projects in the design and study of the heat exchangers for use in supercritical water coal gasification process. **Key words:** shell and tube type heat exchanger ,numerical simulation ,supercritical water ,coal gasification

**γ 射线法测量亚临界汽-水两相流截面含气率的实验研究 = Experimental Study of the γ-ray Method for Measuring the Gas Content in a Cross Section with a Subcritical Steam-water Two-phase Flow [刊 汉 ]HU Ri-cha ,LUO Zhi-chao ( Changchun Optic Precision Machinery and Physics Research Institute ,Changchun ,China , Post Code: 130033) ,BI Qin-cheng ,LU Hai-cai ( National Key Laboratory on Multi-phase Flow in Power Engineering ,Xi'an Jiaotong University ,Beijing ,China ,Post Code: 710049) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30( 6) . -842 -847**

By adopting a single narrow beam γ-ray method ,the void fraction in a section featuring a subcritical steam-water two-phase flow in a vertical riser was measured. The operating conditions in the riser were given as follows: the pressure ranged from 17 MPa to 21 MPa ,the mass flow speed of the working medium was in a range from 600 kg/