

超临界甲烷在竖直圆管内加热的数值模拟

郭占魁¹, 忻晔晨², 李 凌¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海船舶设备研究院, 上海 200031)

摘要: 在超临界压力下甲烷的相变现象消失, 并且物性变化非常剧烈, 换热过程变得相当复杂. 通过数值模拟软件 FLUENT 导入制冷剂物性软件 REFPROP 中超临界甲烷的材料模型, 在准确反映超临界甲烷的热力性能和传输物性变化的情况下, 采用数值模拟的方法对竖直加热圆管内超临界压力下甲烷的传热特性进行了研究. 在分析不同工况下超临界甲烷换热情况的基础上, 重点研究了浮升力对换热的影响, 并得出了适用于甲烷的浮升力影响判别标准. 结果表明: 换热系数随着压力的减小而增加; 当流体平均温度接近临界温度, 壁面温度大于临界温度时有利于换热; 在高热流密度, 低质量流量的条件下容易造成传热恶化; 浮升力改变了径向速度分布曲线, 抑制了湍动能的产生, 削弱了换热.

关键词: 超临界压力; 甲烷; 传热; 竖直圆管; 数值模拟

中图分类号: TK 026.4 **文献标志码:** A

Numerical Simulation on Supercritical Methane in a Heating Vertical Circular Tube

GUO Zhankui¹, XIN Yechen², LI Ling¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Marine Equipment Research Institute, Shanghai 200031, China)

Abstract: The physical properties of methane change drastically and the phenomenon of phase change vanishes under supercritical pressure, so the heat exchange process is extremely complex. The heat transfer characteristics of supercritical methane in a heating vertical circular tube were investigated numerically. The thermal performance and transport properties of supercritical methane were obtained by introducing the material model of methane in the refrigerant properties software REFPROP. The results show that it is advantageous to the heat transfer when the averaged fluid temperature is close to the critical temperature and the wall temperature is higher than the critical temperature. And the heat transfer coefficient increases with the decrease of pressure. High heat flux and low mass flow rate will cause the deterioration of heat transfer. Then the influence of buoyancy on the heat transfer was studied carefully and the buoyancy judgment standard suitable for methane was obtained. It is found that the buoyancy which changes the distribution of radial velocity and inhibits the generation of turbulent kinetic energy weakens the convective heat transfer.

Keywords: supercritical pressure; methane; heat transfer; vertical circular tube; numerical simulation

收稿日期: 2016-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51476102)

第一作者: 郭占魁(1991-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 超临界流体的换热过程. E-mail: 147640198@st.usst.edu.cn

通信作者: 李 凌(1976-), 女, 副教授. 研究方向: 数值传热. E-mail: lilong@usst.edu.cn

天然气是一种绿色环保、安全可靠的优质能源,广泛应用于工业、交通、航天等领域.通常开采的天然气经净化液化处理后,通过集装箱船海运等方式运输到接收终端^[1],终端用户经过气化后使用,气化过程对于天然气的高效利用以及安全性都很重要.一般液化天然气(LNG)的气化过程是在超临界压力下进行的^[2],超临界天然气的流动换热极其复杂,主要原因在于温度和压强的微小变动可以导致其热力性能和输运特性的剧烈变化,因此该过程的换热得到了研究人员的重视.而天然气的主要成分是甲烷,很多研究工作都采用甲烷代替 LNG 进行数值模拟,其结果的准确性是可以得到保证的^[3].王亚洲等^[4]对超临界压力下火箭冷却推进剂甲烷的湍流传热进行了数值研究,揭示了对流换热努塞尔数的变化规律.Xu 等^[5]对超临界甲烷在螺纹圆管中的冷却换热进行了数值模拟,得出了最有利于换热的螺纹高度.一般在研究强制对流换热时都会忽略浮升力的影响,然而由于超临界压力下甲烷的热物性变化剧烈(尤其在拟临界温度附近),即使是强制对流浮升力也可能对传热的影响非常大,不能忽视^[6].本文对超临界甲烷在竖直加热圆管中的流动换热进行数值模拟,重点分析了浮升力对换热的影响,研究工作有助于进一步了解超临界甲烷流动换热的机理.在计算超临界甲烷的物性时很多文献采用分段线性函数^[7]和自定义函数^[8]法,本文采用通过数值模拟软件 FLUENT 导入制冷剂物性软件 REFPROP 中甲烷材料模型的方法,以保证超临界甲烷物性的准确性.

1 物理模型及数学模型

本文建立二维物理模型如图 1 所示.图中: G 为进口质量流量; g 为重力加速度; X 为圆管长度; r 为圆管半径.圆管直径为 4 mm,长为 1 200 mm.由于计算模型轴对称,为了节省计算时间,只需取圆形管道区域的一半进行计算.超临界甲烷物性变化剧烈,为了更好地模拟近壁面区域较大的温度梯度,需把第一层网格布置在粘性底层内.

假设甲烷在圆管内的换热达到稳定状态,忽略壁厚的影响.控制方程如下:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{U}\varphi) = \text{div}(\Gamma_{\varphi}\text{grad } \varphi) + S_{\varphi} \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; t 为时间; φ 为通用变量; $\mathbf{U}$ 为速度矢量; Γ_{φ} 为广义扩散系数; S_{φ} 为广义源项.当 φ 为

1, U , T 时,上式分别为连续方程、动量方程、能量方程,其中, T 为温度.

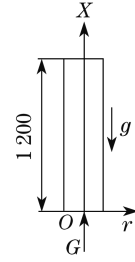


图1 物理模型

Fig.1 Physical model

考虑到近壁面区低雷诺数流体分子粘性对计算的影响,本文采用 RNG $k - \epsilon$ 湍流模型和强化壁面函数相结合的方法,其湍动能和耗散率方程分别为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \alpha_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \alpha_{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R \quad (3)$$

式中: k 为湍动能; ϵ 为耗散率; u 为速度,下标 i, j 分别表示 x, y 方向; μ_t 为湍动粘度; μ 为动力粘度; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; G_b 为浮力影响引起的湍动能 k 的产生项; Y_M 为可压缩湍流膨胀引起的湍流耗散项; $\alpha_k, \alpha_{\epsilon}$ 分别为湍动能和耗散率的有效普朗特数的倒数; $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ 为经验常数; R 为 RNG $k - \epsilon$ 与标准 $k - \epsilon$ 方程相比的增加项.

竖直圆管边界条件为质量流量进口、压力出口和无滑移恒热流加热壁面.为了能更全面地模拟超临界甲烷的流动换热情况,本文考虑了多种工况条件:质量流量为 50~400 kg/(m²·s);进口温度为 170~210 K;进口压强为 6~9 MPa;热流密度为 15~120 kW/m².

局部换热系数 h 采用下式计算:

$$h = \frac{q}{T_w - T_b} \quad (4)$$

式中: q 为热流密度; T_w 为壁面温度; T_b 为横截面流体的质量平均温度^[9].

采用 SIMPLEC 算法来进行压力速度的耦合求解,QUICK 算法离散动量和能量方程,二阶迎风格式离散湍动能和湍流耗散方程.当进出口质量流量守恒,监测的出口温度曲线和残差曲线恒定不变时,

认为计算收敛.

2 模拟结果及分析

2.1 模型的验证

本文首先进行了算法的验证. 由于超临界甲烷具有易燃易爆性, 不便于做实验, 所以实验研究较少. 而对超临界 CO_2 的实验研究工作则比较成熟, 并且超临界下甲烷的物性变化特性和 CO_2 具有一定的相似性. 因此, 本文对超临界压力 CO_2 自下向上流过内径为 2 mm 的加热圆管的对流换热进行了数值模拟并与文献[10]的实验结果进行比较. 图 2 是模拟得到的壁面温度的变化情况和文献[10]的对比结果, 由图 2 可知, 模拟结果和实验数据吻合较好, 证明了论文数值模拟的可靠性. 此外, 论文对网格进行了无关化验证, 最终所取可以保证计算精度和速度的网格数为 $35 \times 3\,000$.

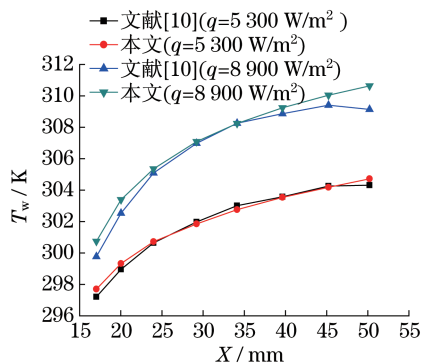


图 2 模拟和实验数据中壁面温度的验证

Fig.2 Validation of wall temperature in numerical simulation by experimental data

2.2 不同工况下竖直圆管内换热情况的数值模拟

图 3~4 是不同进口压力下局部换热系数 h 和比定压热容 c_p 的变化, 其中 P 是进口压强. 随着进口压力的升高, 换热系数逐渐减小, 而且幅度很大. 在一定的压力下, 沿程换热系数先是逐渐增加达到一个峰值后又逐渐减小, 其变化趋势和图 4 中比定压热容的变化趋势类似. 分析其原因主要是比定压热容的变化对换热起着主导作用, 换热随着比定压热容的增加而加强, 随着比定压热容的减小而减弱. 当压力越接近临界压力时, 比定压热容峰值越大, 变化越剧烈, 所以换热更强.

图 5~6 是不同进口温度下壁面温度、流体温度和局部换热系数的变化, 图中, T_{in} 为流体进口温度, T_{pc} 为拟临界温度. 图 5 中壁面温度和流体平均温度

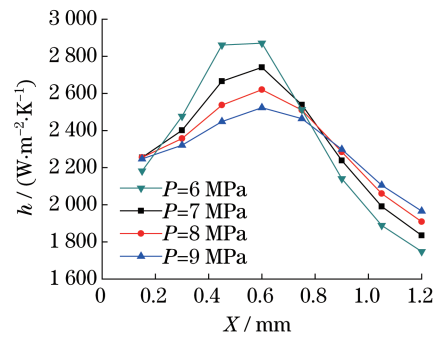


图 3 进口压力对局部换热系数的影响

Fig.3 Influence of inlet pressure on the local heat transfer coefficient

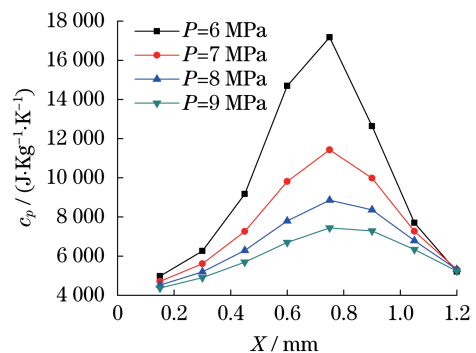


图 4 进口压力对局部 c_p 的影响

Fig.4 Influence of inlet pressure on the local specific heat at constant pressure

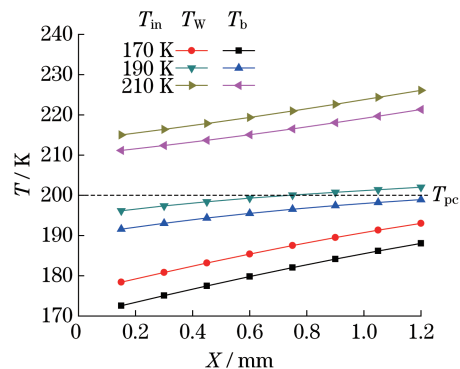


图 5 进口温度对局部壁面温度和流体温度的影响

Fig.5 Influence of inlet temperature on the local wall temperature and averaged fluid temperature

之间的关系分为 3 个部分: $T_b < T_w < T_{pc}$, $T_b < T_{pc} < T_w$ 和 $T_{pc} < T_b < T_w$. 由图 6 可知第二部分 $T_b < T_{pc} < T_w$, 即进口温度为 190 K 的换热系数远大于另外两种情况, 是因为其流体平均温度接近拟临界温度, 在拟临界温度附近甲烷物性变化剧烈尤其是比定压热容的变化加强了换热.

图 7 为热流密度对局部换热系数的影响. 图中

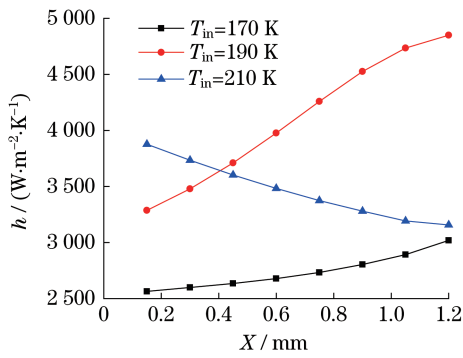


图6 进口温度对局部换热系数的影响

Fig.6 Influence of inlet temperature on the local heat transfer coefficient

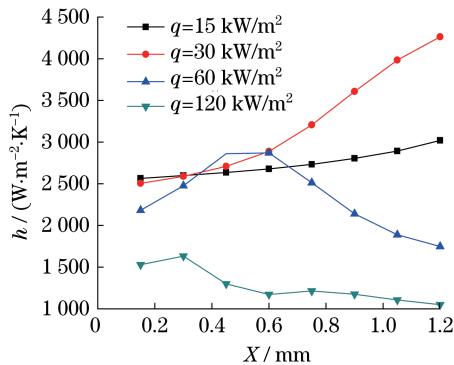


图7 热流密度对局部换热系数的影响

Fig.7 Influence of heat flux on the local heat transfer coefficient

随着热流密度的增加,圆管的换热不一定加强,当热流密度增加到一定程度,换热减弱甚至恶化.分析其原因,当热流密度较低时,出口温度小于拟临界温度,换热系数逐渐变大是因为比定压热容逐渐增大.当热流密度继续增加,出口温度大于拟临界温度,比定压热容急剧减小,所以换热系数会出现一个峰值,此时整个圆管的平均换热系数已经下降.继续增加热流密度,流体进入圆管后平均温度很快达到拟临界温度,此时换热系数也达到一个峰值,随后比定压热容迅速减小,在几乎整个圆管内,换热系数都处于一个较低的值,传热发生恶化.

2.3 浮升力对换热的影响以及评判标准

圆管换热过程中,由于在横截面上不均匀的温度场,尤其在拟临界温度附近,造成了不均匀的密度场,从而产生浮升力的影响^[11].在研究浮升力的过程中,Jackson 等^[12]提出了浮升力影响换热的评判标准:

$$Bo^* = Gr^* / (Re^{3.425} Pr^{0.8}) < 5.6 \times 10^{-7} \quad (5)$$

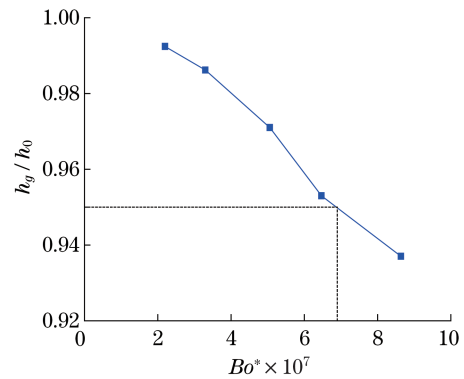
$$Gr^* = g\beta q d^4 / (\lambda \nu^2) \quad (6)$$

式中: Bo^* 为浮升力判据无量纲数; Gr^* 为格拉晓夫

数; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; β 为体积膨胀系数; d 为圆管直径; λ 为导热系数; ν 为运动粘度.

文献[12]认为满足式(5)~(6)时,由浮升力引起的换热系数的改变小于5%,浮升力的影响可以忽略.本文评判标准对超临界水和 CO_2 加热时的实验数据能够较好地满足,但是对超临界甲烷的适用情况尚未有相关研究.

为了进一步得到适用于超临界甲烷的浮升力评判标准 Bo^* ,本文计算了在压力为6 MPa、热流密度为60 kW/m²下,质量流量 G 分别为0.002, 0.002 26, 0.002 51, 0.003, 0.003 5 kg/(m²·s),有重力和零重力流动加热时的情况.当有重力时计算的对流换热系数 h_g 和零重力时的对流换热系数 h_0 的差别等于5%时,对应的 Bo^* 就是超临界甲烷的评判标准.其中不同工况下的对流换热系数 h 和 Bo^* 取平均值计算.图8为 h_g/h_0 与 Bo^* 的关系,可知 h_g 和 h_0 差别等于5%时所对应的 Bo^* 值大约为 6.9×10^{-7} .即在超临界甲烷的强制对流中,当 $Bo^* < 6.9 \times 10^{-7}$ 时,浮升力对换热的影响可以忽略.

图8 h_g/h_0 和 Bo^* 的关系Fig.8 Relationship between h_g/h_0 and Bo^*

在压力为6 MPa、热流密度为60 kW/m²及进口温度为170 K恒定不变的条件下,分析了不同质量流量下浮升力对换热的影响.图9(见下页)是超临界甲烷浮升力对换热影响判别的标准,图10~11(见下页)分别为不同轴向位置处径向速度和湍动能的变化,其中 U 为径向速度.由图9可知浮升力随着质量流量的增加而减小.在类似液体区,浮升力的影响是强烈的,而且它对换热产生了不利影响;在虚线以下的类似气体区,其对换热的影响是可以忽略不计的.分析其原因:流体在竖直加热圆管向上流动时,横截面的温度变化梯度大,导致近壁面处流体密度远小于流体中心处.浮升力对近壁面处流体的加速远大于流体中心处,因此壁面到流体中心的速度

梯度大大减小,速度曲线发生扭曲,导致剪切应力减小,抑制湍流动能的产生,从而削弱了换热. 相同的热流密度,当质量流量大的时候,流体温度升幅较小,从而横截面温度梯度较小,浮升力也变小. 从图 10~11 中可以看出,在圆管前半部分类似液体区,径向速度分布几乎为一条直线,湍动能几乎为 0,浮升力减少了湍流的产生,损害了换热. 在圆管后半部分类似气体区径向速度分布梯度逐渐变大,湍动能的产生逐渐恢复,浮升力对换热的影响减弱.

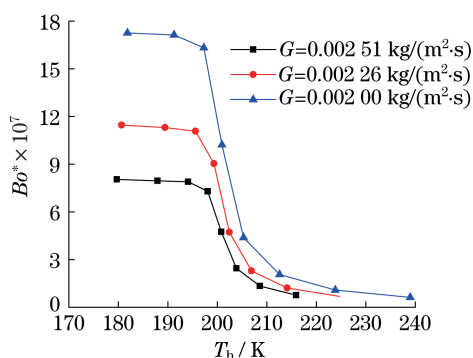


图 9 浮升力影响判别标准

Fig.9 Buoyancy effect on the judgement standard

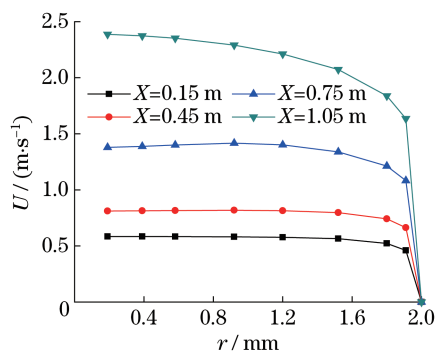


图 10 不同轴向位置处径向速度变化

Fig.10 Radial velocity changes at different axial locations

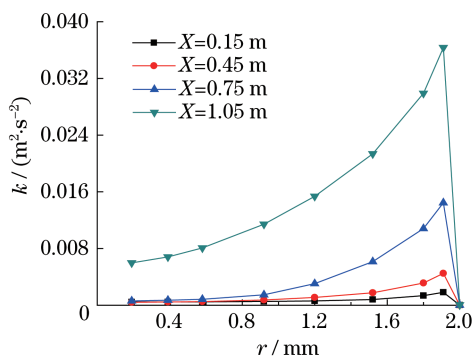


图 11 不同轴向位置处径向湍动能变化

Fig.11 Radial turbulent kinetic energy changes at different axial locations

3 结 论

本文采用数值模拟的方法对竖直加热圆管中超临界甲烷的换热特性进行了研究,重点分析了浮升力对换热情况的影响. 在本文研究的条件下,得出如下结论:

a. 当拟临界温度介于流体温度和壁面温度之间时,换热效果最好.

b. 当热流密度增加到一定程度时,局部换热系数并没有随着增加反而减小,造成传热恶化.

c. 文章得出了适用于超临界甲烷的浮升力判别标准,当 $Bo^* > 6.9 \times 10^{-7}$ 时,浮升力对换热的影响不能忽略. 在此基础上进一步研究发现浮升力扭曲了圆管横截面的速度分布曲线,抑制了湍动能的产生,削弱了换热.

参考文献:

- [1] 何法江,曹伟武,严平. 烟气冲击旋子型 LNG 气化器设计与实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2012, 34 (3): 298-302.
- [2] 王博杰,匡以武,齐超,等. 中间介质气化器中超临界 LNG 换热过程分析[J]. 化工学报, 2015, 66 (S2): 220-225.
- [3] 李仲珍,郭少龙,陶文铨. 超临界 LNG 管内流动与换热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2013, 34 (12): 2314-2317.
- [4] 王亚洲,华益新,孟华. 超临界压力下低温甲烷的湍流传热数值研究[J]. 推进技术, 2010, 31 (4): 606-611, 622.
- [5] XU K K, TANG L J, MENG H. Numerical study of supercritical-pressure fluid flows and heat transfer of methane in ribbed cooling tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 84: 346-358.
- [6] DU Z X, LIN W S, GU J M. Numerical investigation for heat transfer of supercritical CO₂ cooled in a vertical circular tube[J]. Heat Transfer Engineering, 2012, 33 (10): 905-911.
- [7] 靳书武,武锦涛,银建中. 水平圆管内超临界甲烷对流换热数值模拟[J]. 应用科技, 2015, 42 (5): 67-71.
- [8] WANG Y Z, HUA Y X, MENG H. Numerical studies of supercritical turbulent convective heat transfer of cryogenic-propellant methane [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2010, 24 (3): 490-500.

(下转第 57 页)

- [42] POPOVIC B M, BANDJUR M V, RAICEVIC A M. Robust fingerprint enhancement by directional filtering in Fourier domain [J]. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 2011, 107(1): 37 - 40.
- [43] RAJAN R A, SUDHA N, KUMAR P A. O-F Estimation based on curved Gabor filter for fingerprint image enhancement [C] // *Proceedings of the 2013 5th International Conference on Advanced Computing (ICoAC)*. Chennai: IEEE, 2013: 405 - 412.
- [44] LIU M H, CHEN X Y, WANG X D. Latent fingerprint enhancement via multi-scale patch based sparse representation [J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2015, 10(1): 6 - 15.
- [45] WEI K F, LIU M H. Latent fingerprint enhancement based on orientation guided sparse representation [M] // YOU Z S, ZHOU J, WANG Y H, et al. *Biometric Recognition*. Chengdu: Springer, 2016: 205 - 213.
- [46] CHEN G, CHEN N, ZENG Y. An improved OPTA fingerprint thinning algorithm based on neighborhood searching [C] // *Proceedings of 2012 International Conference on Computer Science and Information Processing (CSIP)*. Xi'an: IEEE, 2012: 637 - 640.
- [47] 张永良. 滑动指纹拼接与指纹匹配的算法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- [48] DARWISH AA, ZAKI W M, SAAD O M, et al. Human authentication using face and fingerprint biometrics [C] // *Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*. Liverpool: IEEE, 2010: 274 - 278.
- [49] 葛彦平. 基于匹配融合的指纹与指静脉双模态生物识别技术的研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.
- [50] CAO Z X, ZHANG R D, YANG Y, et al. Discrete-time robust iterative learning Kalman filtering for repetitive processes [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, 61(1): 270 - 275.

(编辑: 丁红艺)

(上接第34页)

- [9] 张康, 韩昌亮, 任婧杰, 等. SCV 蛇形换热管内超临界 LNG 传热特性数值模拟 [J]. *化工学报*, 2015, 66(12): 4788 - 4795.
- [10] 张宇, 姜培学, 石润富, 等. 竖直圆管中超临界压力 CO₂ 在低 Re 数下对流换热研究 [J]. *工程热物理论*, 2008, 29(1): 118 - 120.
- [11] 郭韵, 曹伟武, 严平, 等. 天然气加热炉结构及其传热特性分析 [J]. *上海理工大学学报*, 2009, 31(3): 251 - 254.
- [12] JACKSON J D, HALL W B. Influences of buoyancy on heat transfer to fluids flowing in vertical tubes under turbulent conditions [M] // KAKAC S, SPALDING D B. *Turbulent Forced Convection in Channels and Bundles*. Washington, DC: Hemisphere, 1979: 613 - 640.

(编辑: 丁红艺)