

超临界碳氢燃料流动换热的仿真研究

鲍 文 李献领 徐志强 周伟星

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 建立了适用于温度、压力大范围变化的超临界碳氢燃料换热特性研究的一维模型, 试验验证了模型的可靠性, 基于该模型分析了质量流率、换热状态转换和压力等因素对超临界碳氢燃料的换热特性的影响。结果表明: 4.0 MPa 的低压力工况下, 在超临界碳氢燃料的拟临界温度附近存在传热强化现象, 而 7.0 MPa 的高压力工况下, 该传热强化现象消失; 不论质量流率的大小, 4.0 MPa 工况下的传热系数始终高于 7.0 MPa 工况下的传热系数, 压力的高低在超临界碳氢燃料的汽相换热区对传热性能的影响更为显著; 40 kg/(m²·s) 的低质量流率条件下, 由液相换热区向汽相换热区的换热状态转换将导致转换区附近的传热恶化, 而增大质量流率则可避免该问题的发生。

关 键 词: 超临界碳氢燃料; 换热状态转换; 压力; 质量流率; 传热特性

中图分类号: TQ038 文献标识码: A

引 言

碳氢燃料是一种密度高、能量大、使用安全、易存储且价格低廉的高性能液体燃料, 可同时作为燃料和冷却剂广泛应用于液体火箭发动机、超燃冲压发动机等动力装置, 在航空航天领域具有很广阔的应用前景^[1~3]。飞行器采用自身携带的碳氢燃料作为冷却剂, 可避免其携带额外的冷却剂所带来的巨大的体积惩罚和质量惩罚, 该冷却方法又称主动再生冷却^[4~5]。

在主动再生冷却过程中, 碳氢燃料的压力通常高于其临界压力以避免两相流的发生和改善传热效果。严格说来, 温度和压力同时超过其临界温度和临界压力的流体才称之为超临界流体。然而, 一般也可将压力超过临界压力的流体统称为超临界流体, 在临界温度以下称之为液相, 在临界温度以上称之为汽相, 临界温度点称之为相变点, 在临界温度点附近的大比热区称之为相变区。在主动再生冷却系统中, 超临界压力下的碳氢燃料的温度将从常温逐渐上升至较高温度, 甚至超过其临界温度, 从而使得

超临界碳氢燃料从液相区进入汽相区^[6~7]。该冷却过程中燃料物性变化剧烈、吸热过程复杂, 存在多次的传热强化现象, 并可能发生传热恶化^[8~12]。

由于超临界碳氢燃料的试验研究温度高、危险性大、成本高, 限制了试验研究的开展, 因此本研究设计了一个适用于温度、压力大范围变化的超临界碳氢燃料换热特性分析的计算平台, 试验验证了其可靠性。基于该计算平台重点分析了质量流率、换热状态转换和压力的变化对换热特性的影响。

1 超临界碳氢燃料流动换热模型

1.1 轴对称细长受热管建模

1.1.1 建模假设

- (1) 忽略燃料径向的物性变化;
- (2) 忽略动能和流动摩擦产生的热能;
- (3) 忽略重力势能;
- (4) 忽略流体和管道的轴向导热;
- (5) 忽略管壁内外壁面的温差;
- (6) 暂不考虑化学反应过程;

1.1.2 基本控制方程

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ —燃油密度, kg/m³; u —轴向速度, m/s; t —时间, s; x —轴向距离, m。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u h) = \frac{4}{d} \cdot q_f \quad (2)$$

式中: h —比焓, J/kg; d —管道内直径, m; q_f —管道内表面传入流体的热流, W/m²。

传入流体的内壁面热流:

$$q_f = \alpha \cdot (T_w - T_f) \quad (3)$$

式中: α —传热系数, W/(m²·K); T_w —壁面温度, K; T_f —中心流燃油温度, K。

收稿日期: 2011 - 05 - 05; 修订日期: 2011 - 12 - 06

作者简介: 鲍 文(1970 -), 男, 山东泰安人, 哈尔滨工业大学教授、博士生导师。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot (\rho u^2) \quad (4)$$

式中: p —燃油压力, Pa; λ —摩擦系数。

金属管壁的热存储:

$$C \cdot M \frac{\partial T_w}{\partial t} = Q_w - q_f \cdot A_i \quad (5)$$

式中: C —管壁金属材料的比热, J/(kg · K); M —单位长度的金属管质量, kg/m; Q_w —注入单位长度金属管的热量, W/m; A_i —单位长度管道的内表面积, m²。

阻力特性:

$$\lambda = \begin{cases} 64/Re & Re \leq 2320 \\ 0.11 \left(\frac{\delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25} & Re > 2320 \end{cases} \quad (6)$$

式中: δ —绝对粗糙度, m; Re —雷诺数。

补充方程:

$$\begin{cases} p = p(\rho, h) \\ T_f = T_f(\rho, h) \end{cases} \quad (7)$$

1.2 戊烷的热物理性质

选用含有 5 个碳原子的戊烷作为碳氢燃料,它具有较低的临界温度 469.77 K 和临界压力 3.374 MPa。戊烷物性由美国 1990 年的 NIST Supertrapp 数据库计算得到。当前计算的物性的有效压力范围 3.4 ~ 25 MPa,有效的温度区间 270 ~ 1 200 K。以计算得到的戊烷密度为例分析碳氢燃料的物性特征,如图 1 所示。

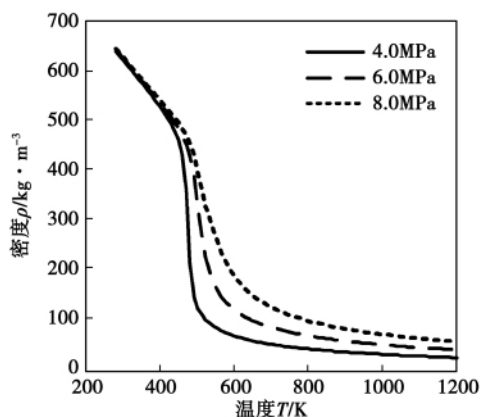


图 1 不同压力下密度随温度的变化曲线

Fig. 1 Curves showing a change of the density with the temperature at different pressures

图 1 中,当压力为 4.0 MPa、温度从 285 K 升高到 1200 K 时,戊烷的密度减小到原来的 1/10 以下;

在临界温度附近的密度受压力的影响较大。因此超临界碳氢燃料流动换热计算必须同时考虑温度和压力的影响。本研究选择二维插值的建模方法,以温度和压力为自变量,以物性参数为因变量完成戊烷物性的建模。

1.3 传热关系式的选择

目前,尚没有一个被普遍认可的超临界碳氢燃料换热的试验关联式。本研究采用文献 [6] 的传热关系式。超临界碳氢燃料的传热存在两个确定换热区,即液相换热区和汽相换热区,由于煤油组分多,传热过程还存在一个不确定的过渡区 [6]。本研究选用单组分的纯戊烷作为研究对象,可忽略过渡区的存在,假设当燃料达到临界温度时,换热状态由液相换热直接变成汽相换热。传热关系式为:

$$Nu = \begin{cases} 0.0065 \cdot Re^{0.89} \cdot Pr^{0.4} \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.1} & T_f \leq 469.77 \\ 0.000045 \cdot Re^{1.4} \cdot Pr^{0.4} \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.1} & T_f > 469.77 \end{cases} \quad (8)$$

式中: Pr —普朗特数; μ_f —中心流温度对应的动力黏度, Pa · s; μ_w —壁面温度对应的动力黏度, Pa · s; Nu —努谢尔数。

1.4 模型校验

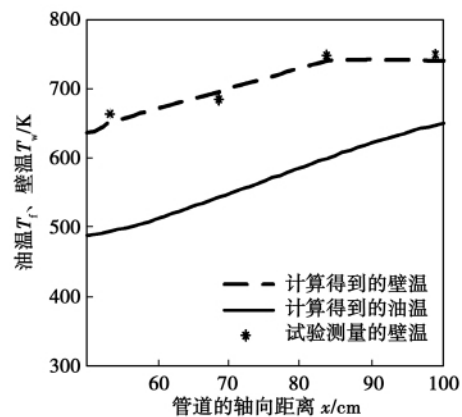


图 2 超临界碳氢燃料汽相换热区的轴向的壁温和燃油温度分布

Fig. 2 Distribution of the axial wall surface temperature and the fuel temperature in the steam-phase heat exchange zone of the supercritical hydrocarbon fuel

为了验证所建模型的可靠性,试验校验了超临界戊烷在超临界流体液相换热区和超临界流体汽相换热区的多个换热工况,图 2 给出其中一个工况的超临界流体汽相换热区的校验结果,工况为:进口质

量流率 $400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,进口燃油温度 285 K ,出口压力 4.0 MPa ,出口燃油温度 650 K 。壁温的计算结果和相应的试验测量结果基本吻合 ,表明了采用当前所建模型进行相关的换热特性的定性研究的可行性。

2 超临界碳氢燃料流动换热计算

基于上述模型 ,研究了质量流率、由超临界碳氢燃料的液相区到汽相区的换热状态转换和压力的变化对超临界碳氢燃料传热特性的影响。试验进口燃油温度 285 K ,出口燃油温度 750 K ,出口压力 4.0 MPa 。工况 1 ~ 工况 3 的进口质量流率分别为 1200 、 400 和 $40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2.1 质量流率对传热特性的影响

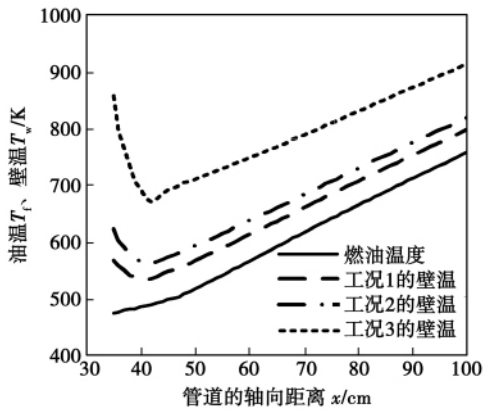


图 3 轴向的温度分布

Fig. 3 Axial temperature distribution

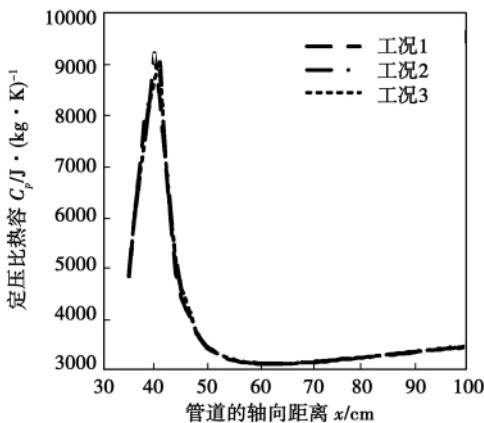


图 4 轴向的定压比热容分布

Fig. 4 Constant pressure specific heat axial distribution

图 3 中 3 组工况轴向的燃油温度分布相同 ,对比图 5 中同一空间位置处的传热系数可以看出 ,燃

油温度相同时 随着质量流率的增加 ,传热系数快速增加。传热系数的变化反映在壁面温度的分布上 ,如图 3 所示 ,当质量流率由 40 上升至 $400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,对应的热流在增大 ,此时相应的壁面温度随热流的增加反而降低近 100 K ,足见质量流率的增大使得传热过程显著增强。

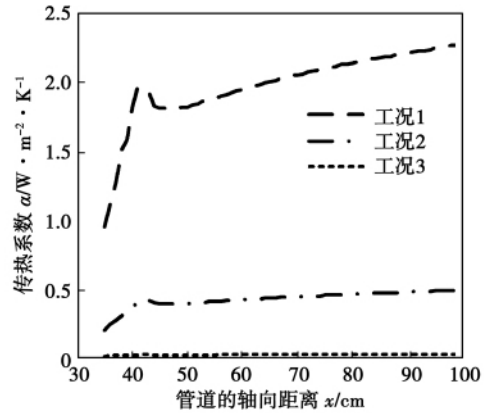


图 5 轴向的传热系数分布

Fig. 5 Heat transfer coefficient distribution along the axial direction

计算得到的燃油温度和壁面温度均高于戊烷的临界温度 ,故该换热状态为超临界流体的汽相换热。随着燃油温度的逐渐上升 ,3 条壁面温度曲线均先下降而后逐渐上升 ,该过程表明对应壁面温度的低谷处发生了传热强化。对应图 3 中 3 组工况下的壁面温度最低点处 ,图 5 中的传热系数则出现了峰值 ,从而进一步表明在该点发生了传热强化。在图 4 中 ,对应传热强化现象发生的位置 ,定压比热容也产生了相应的峰值 ,依据拟临界温度的定义 ,可认为该点的燃油温度为对应压力下的拟临界温度。综合图 3 ~ 图 5 的参数变化特性 ,可得出在燃油的拟临界温度附近将发生传热强化的结论。

2.2 换热状态的转换对传热特性的影响

超临界压力下 ,燃油从常温升高到临界温度以上的过程中 ,其传热特性将经历从超临界碳氢燃料的液相区到汽相区的换热状态转换^[6]。基于换热状态转换的假设和传热关系式 (8) ,讨论了两组典型工况下换热状态的转换对传热特性的影响。图 6、图 7 分别给出进口质量流率为 40 和 $1200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时的轴向的传热系数分布。带标识的曲线是超临界压力下燃油从低温到高温、由超临界流体液相换热到超临界流体汽相换热的换热状态转换的实际工作过程。

图 6 中超临界碳氢燃料液相换热曲线始终高于超临界碳氢燃料的汽相换热曲线,表明小质量流率工况下自管道的进口到管道的出口,超临界碳氢燃料液相换热公式的计算结果始终高于汽相换热公式的计算结果。因此,由超临界碳氢燃料的液相区到汽相区的换热状态转换(约 37 cm 处)是传热系数由高到低的一个变化过程。随着质量流率的增加,超临界碳氢燃料汽相换热公式的计算结果将高于液相换热公式的计算结果,如图 7 中轴向约 16 cm 处的计算结果所示。另外,图 7 中换热状态转换(约 37 cm 处)发生时,传热系数的变化是一个由低到高的变化过程。

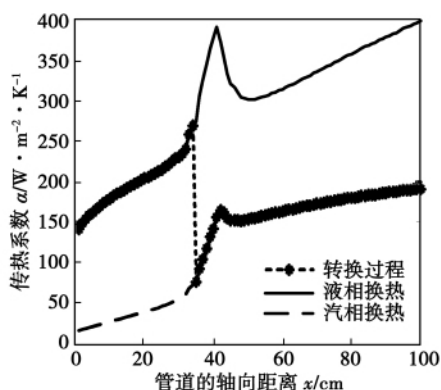


图 6 质量流率 40 kg/(m²·s) 时轴向传热系数分布
Fig. 6 Axial heat transfer coefficient distribution when the mass flow rate is 40 kg/(m²·s)

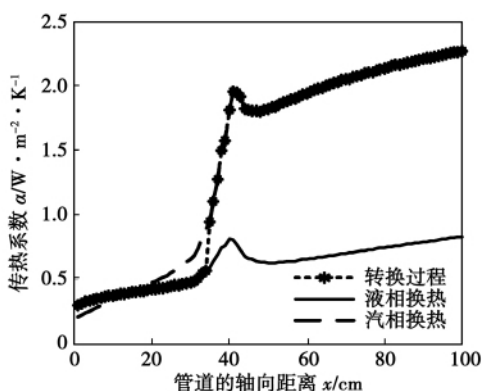


图 7 质量流率 1200 kg/(m²·s) 时轴向传热系数分布
Fig. 7 Axial heat transfer coefficient distribution when the mass flow rate is 1200 kg/(m²·s)

因此,质量流率较低时,换热状态转换的发生使得传热系数显著变小,甚至可以严重削弱拟临界温度附近(如图 6 中约 42 cm 处)的传热强化效果,从

而导致转换区附近的传热状况恶化;而当质量流率较高时,传热状态转换不仅没有使传热系数降低,反而使传热系数快速上升,并保持了拟临界温度附近(如图 7 中约 42 cm 处)的传热强化优势。

2.3 压力对传热特性的影响

从图 1 中可以看出,压力对戊烷物性的影响比较大,下面对比分析了高、低压力对传热特性的影响。试验进口燃油温度为 285 K,出口燃油温度为 750 K,出口压力分别为 4.0 和 7.0 MPa,进口质量流率分别为 1 200 和 40 kg/(m²·s) 的 4 组工况的传热系数分布如图 8 ~ 图 9 所示。

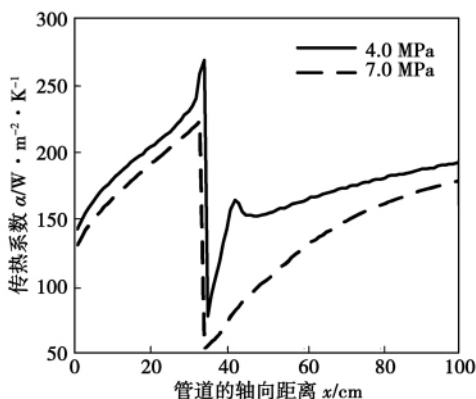


图 8 质量流率 40 kg/(m²·s) 时轴向传热系数分布
Fig. 8 Axial heat transfer coefficient distribution when the mass flow rate is 40 kg/(m²·s)

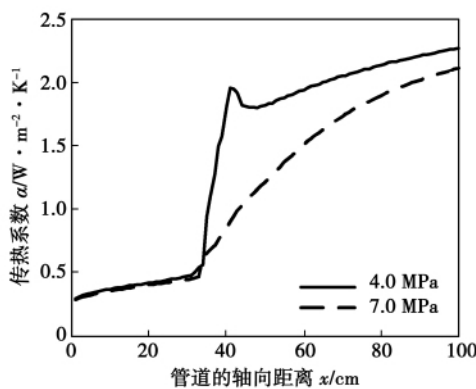


图 9 质量流率 1200 kg/(m²·s) 时轴向传热系数分布
Fig. 9 Axial heat transfer coefficient distribution when the mass flow rate is 1200 kg/(m²·s)

图 8 中,同一空间位置处 4.0 MPa 下的传热系数始终高于 7.0 MPa 下的传热系数,尤其超临界流体换热区(37 cm 至出口处)高、低压力工况下的传热系数差距更大。图 9 中也表现出同样的趋势。

参照图 6 可知,图 8 中 4.0 MPa 压力下的第一个尖峰是由超临界碳氢燃料的液相换热向汽相换热的换热状态转换所致,而第二个尖峰是拟临界温度附近的传热强化所致。同样的小质量流率条件下,随着压力升高至 7.0 MPa,由换热状态转换所致的传热系数尖峰依然存在,而拟临界温度附近的传热强化现象则消失。图 9 中大质量流率工况下,与工作压力的低、高无关,由超临界碳氢燃料液相换热向超临界碳氢燃料汽相换热的换热状态转换所致的传热系数尖峰消失;而与图 8 中工况相似 4.0 MPa 压力下的拟临界温度附近传热强化现象依然存在,但是 7.0 MPa 压力下的拟临界温度附近的传热强化现象消失。

因此,相同的质量流率和燃油温度条件下,工作压力越低,传热系数则越高,尤其在超临界碳氢燃料的汽相区,压力对传热系数的影响更为显著;高压条件下,拟临界温度附近的传热强化现象消失,相比低压工况,轴向的传热系数的变化也相对比较平缓;小质量流率工况下,不论工作压力的高低,由超临界碳氢燃料的液相区向超临界碳氢燃料的汽相区的换热状态转换发生时,传热系数均会出现一个由高到低的变化过程。

3 结 论

(1) 在 4.0 MPa 的低压力工况下,在碳氢燃料的拟临界温度附近存在传热强化现象;而在 7.0 MPa 的高压力工况下,拟临界温度附近的传热强化现象消失,轴向的传热系数的变化也相对比较平缓。工作压力的高低影响着拟临界温度附近超临界碳氢燃料的传热强化现象的发生。

(2) 不论质量流率的大小,4.0 MPa 工况下的传热系数均高于 7.0 MPa 工况下的传热系数值,因此仅从传热性能的角度考虑,压力越低,则传热系数越高,尤其在超临界碳氢燃料温度大于其临界温度的汽相换热区,压力对传热系数的影响更为显著。

(3) 质量流率为 $40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,由超临界碳氢燃料液相换热区到汽相换热区的换热状态转换造成了转换区附近的传热恶化问题,而质量流率为 $1200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,传热恶化则不再发生。因此,小质量流率条件下,换热状态的转换将导致传热恶化问题,且不论工作压力的高低,该问题始终存在。在冷却通道设计时,针对不同的碳氢燃料,有必要确

定一个最小的质量流率,使得在该质量流率条件下换热状态转换发生时,超临界碳氢燃料的汽相区的传热系数不低于其液相区的传热系数。

参考文献:

- [1] Edwards T. Liquid fuels and propellants for aerospace propulsion: 1903 - 2003 [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19 (6): 1089 - 1107.
- [2] Huang H, Sobel D. Endothermic heat - sink of hydrocarbon fuels for scramjet cooling [R]. AIAA - 2002 - 3871, 2002.
- [3] Kazmar R. Airbreathing hypersonic propulsion at Pratt & Whitney - Overview [R]. AIAA - 2005 - 3256, 2005.
- [4] Daniau E, Bouchez M. Fuel reforming for scramjet thermal management and combustion optimization [R]. AIAA - 2005 - 3403, 2005.
- [5] Huang H, Spadaccini L J, Sobel D R. Fuel-cooled thermal management for advanced aeroengines [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power - Transactions of The ASME*, 2004, 126 (2): 284 - 293.
- [6] ZHONG Feng-quan, FAN Xue-jun. Heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2009, 23 (3): 543 - 550.
- [7] Ward T A, Ervin J S. Simulations of flowing mildly-cracked normal alkanes incorporating proportional product distributions [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2004, 20 (3): 394 - 402.
- [8] Hitch B D, Karpuk M E. Experimental investigation of heat transfer and flow instabilities in supercritical fuels [R]. AIAA - 1997 - 3043, 1997.
- [9] Hitch B D, Karpuk M E. Enhancement of heat transfer and elimination of flow oscillations in supercritical fuels [R], AIAA - 1998 - 3759, 1998.
- [10] 罗毓珊, 陈听宽. 高参数小管内煤油的传热特性研究 [J]. *工程热物理学报*, 2005, 26 (4): 609 - 612.
LUO Yu-shan, CHEN Ting-kuan. Investigation of the heat transfer characteristics of kerosene in a tube with a small diameter at high parameters [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2005, 26 (4): 609 - 612.
- [11] 胡志宏, 陈听宽. 高热流条件下超临界压力煤油流过小直径管的传热特性 [J]. *化工学报*, 2002, 53 (2): 134 - 138.
HU Zhi-hong, CHEN Ting-kuan. Heat transfer characteristics of kerosene at a supercritical pressure passing through a small-diameter tube in a large heat flux [J]. *Journal of Chemical Industry*, 2002, 53 (2): 134 - 138.
- [12] HUA Yi-xin, WANG Ya-zhou. A numerical study of supercritical forced convective heat transfer of n - heptane inside a horizontal miniature tube [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2010, 52 (1): 36 - 46.
- [13] Ely J, Huber M. NIST standard reference database 4 - NIST thermo-physical properties of hydrocarbon mixtures. National Inst. of Standards, Gaithersburg, MD, Feb, 1990.

(丛敏编辑)

el for depicting the gas-liquid two-phase flow and heat transfer in a bulk packing tower was established. Through calculation, the speed, porosity, pressure and seawater temperature distribution of the fluid inside the tower at different liquid-gas ratios were acquired and the pressure loss and seawater outlet temperature were compared with the test values. The predicted values are in relatively good agreement with the test ones. The analytic and calculation results show that a wall-surface flow phenomenon conspicuously exists in places nearing the wall surface, of which the causes lie in that the porosity nearing the wall surface is obviously higher than that in the central area. The seawater temperature distribution at the top portion is not comparatively uniform while that nearing the wall surface has a relatively big fluctuation and gradually tends to be uniform towards the central area of the tower. From the top to the lower portion along the height of the tower, the seawater temperature gradually decreases and no longer changes (basically) when reaching the half height of the tower ($\Delta T < 0.1 \text{ K}$), indicating that the heat exchange at the half height of the tower has been basically completed. **Key words:** seawater desulfurization, bulk packing, numerical simulation, heat transfer

超临界碳氢燃料流动换热的仿真研究 = **Simulation Study of the Flow and Heat Exchange of a Supercritical Hydrocarbon Fuel** [刊 汉] BAO Wen, LI Xian-ling, XU Zhi-qiang, ZHOU Wei-xing (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(1). - 107 ~ 111

Established was a one-dimensional model for studying the supercritical hydrocarbon fuel heat exchange characteristics when the temperature and pressure are changing in a wide range. The reliability of the model in question has been verified by the test. Moreover, the influence of such factors as the mass flow rate, heat exchange state conversion and pressure etc. on the heat exchange characteristics of the supercritical hydrocarbon fuel was also analyzed based on the model. It has been found that at a low pressure of 4.0 MPa, an intensified heat transfer phenomena of the supercritical hydrocarbon fuel exists at places nearing the pseudo-critical temperature while at a high pressure of 7.0 MPa, the above-mentioned intensified heat transfer disappears. No matter what the mass flow rate is, the heat transfer coefficient at 4.0 MPa is invariably higher than that at 7.0 MPa. Furthermore, the magnitude of the pressure has an even conspicuously influence on the heat exchange performance in the steam-phase heat exchange zone of the supercritical hydrocarbon fuel. At a low mass flow rate of $40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, the conversion of the heat exchange state from the liquid-phase heat exchange zone to the steam-phase heat exchange zone will lead to a heat transfer deterioration around the heat exchange zones, however, to increase the mass flow rate can avoid the problem. **Key words:** supercritical hydrocarbon fuel, heat exchange state conversion, pressure, mass flow rate, heat transfer characteristics