

江河水污垢对小管径恒壁温管内对流换热影响

王子云^{1,2}, 龙恩深¹, 付祥钊³, 王 勇³

(1. 四川大学 建筑与环境学院, 成都 610065; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031;

3. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘 要:为有效提高江河水冷热源的利用率,应用热力学第一、第二定律和湍流流动理论,讨论和分析了污垢对恒壁温小管径管内对流换热过程热力学性能的影响。分析结果表明,有污垢存在时,污垢层导热引起的熵产在管内对流传热熵产中占主要部分,而温差传热引起的熵产则相对较小,且在雷诺数较大,管径较小的流动中,会出现粘性流动引起的熵产大于温差传热引起的熵产;随雷诺数的增大和污垢热阻的产生,熵增率都是单调增加的。因此在利用江河水发展水源热泵时,要充分考虑污垢热阻对换热器性能的影响,尤其是污垢层导热热阻的影响。

关键词:换热管;污垢热阻;热力学分析;熵产

中图分类号: TU833.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)03-0100-05

Thermodynamic Analysis of River Water Fouling on Constant Wall Temperature Tube of Small Diameter

WANG Zi-yun^{1,2}, LONG En-shen¹, FU Xiang-zhao³, WANG Yong³

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group CO. LTD, Chendu 610031, P. R. China;

3. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: In order to improve utilization of cold and heat source from river, turbulence theory and entropy generation theory were adopted to analyze the effect of fouling on convective heat transfer performance in small diameter tube of constant wall temperature. It is found that the entropy generation caused by conduction of fouling plays a more important role in total entropy generation of heat transfer process through a duct than that in cveast rate of caused by temperature difference. The entropy generation caused by viscous flow is more than the entropy generation caused by temperature difference in flow with bigger Reynolds and small radius. The increase rate of entropy generation monotonically increase with Reynolds and the generation process of fouling resistance. Thereafter, the effect of fouling resistance on the heat transfer performance of water source heat pump heat exchanger should be paid more attention, when river water are used as the cold and heat source of heat pump.

Key words: heat exchange tube; fouling resistance; thermodynamic analysis; entropy generation

目前利用江河水发展水源热泵是建筑节能的热点^[1-4],以长江重庆段为例,其特点是夏季江水中不仅含有无机盐类,还有泥沙、有机悬浮物等^[1],如对江水进行净化处理,一则费用过高,二则由于水处理

温升,会降低冷源的品位,而直接利用江水作为冷源,必然对热泵用冷凝器换热效果有影响,文献[2]对长江水源热泵系统的开式和闭式系统性能进行了研究,在开式系统中由于长江水直接进入热泵冷凝

收稿日期:2009-09-20

基金项目:国家十一五科技支撑计划项目(2006BAJ01A06-3)

作者简介:王子云(1972-),男,博士,主要从事可再生能源利用和流动传热研究,(E-mail)wzyfirst@163.com。

器中换热,随着夏季运行时间增加,由于污垢的影响,机组性能有所下降;文献[4]以长江重庆段江水为换热介质,实验分析了江河水污垢热阻形成的机理,在管内江水流速为 0.5 m/s 时,在机组运行 400 h 后,污垢热阻可达到 $1.4 \times 10^{-4} (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$;目前江河水的泥沙对换热管的堵塞以及江河水产生的污垢对换热的影响是发展江河水源热泵的主要问题,文献[5-9]对管内对流换热过程的熵产进行了大量研究,并讨论了有关参数对其不可逆性的影响;文献[10]中对大传热温差情况下和大管径换热管中污垢对对流换热影响进行了分析。而目前江水源热泵用换热器中,传热温差一般在 20°C 以内,且为增强换热,换热管内径也较小,通常采用内径为 10~30 mm 的换热管,换热管内受迫对流换热过程是水源热泵用换热器所采用主要的换热方式^[11-13]。目前尚未有江河水污垢对江水源热泵用小管径换热管内对流换热影响的热力学分析文献,也没有评价江河水污垢对小管径管内对流换热的具体理论方法,该文利用热力学第一、二定律和熵产分析法,在恒壁温工况下探讨由于江河水引起的污垢对小管径管内对流换热过程性能的影响,从而为定量分析污垢对传热和流阻性能的影响提供有效途径,也为利用江河水发展水源热泵的研究提供污垢影响的评价和参考理论。

1 未考虑污垢时管内对流换热过程的熵产和传热量

管内强制对流换热如图 1 所示,考虑管内流动处于充分发展阶段,不考虑入口段的影响,物性参数为常数,流动不记纵向导热和热损失的影响,流动为稳态流动。通常水在管内的流动为不可压缩流体流动,对于图 1 中微元控制体 dx ,应用能量平衡方程、流体热力学性质和热力学第二定律,分析得到微元控制体 dx 的温差对流传热和粘性流动引起的熵产分别为^[14]:

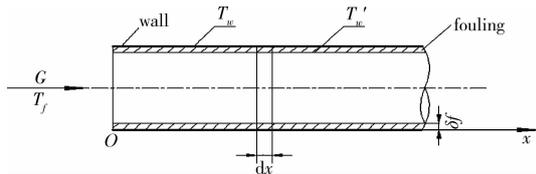


图 1 恒壁温时管内对流换热过程

$$d(\Delta S_{\Delta T}) = Gc_p \left(\frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_w} \right) dT_f \quad (1)$$

$$d(\Delta S_{\Delta p}) = \frac{G}{\rho T_f} (-dp) \quad (2)$$

式中, ΔS 为流体的熵产, W/K ; T_w 为壁面温度, K ; T_f 为流体温度, K ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; p 为流体压力, Pa ; G 为流体质量流量, kg/s ; c_p 为流体定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

对(1)和(2)应用传热理论和湍流理论进行数值积分得到^[10]:

$$\Delta S_{\Delta T} = Gc_p \left\{ \ln \frac{1 - N_{Tf} \exp(-4StN_L)}{1 - N_{Tf}} - N_{Tf} [1 - \exp(-4StN_L)] \right\} \quad (3)$$

$$\Delta S_{\Delta p} = \frac{Gc_p f Re^2}{8StN_{Tw}} \cdot \left[\ln \frac{1 - N_{Tf} \exp(-4StN_L)}{1 - N_{Tf}} + 4StN_L \right] \quad (4)$$

同时由 $dQ/G = c_p dT_f$ 可得换热管的传热量 Q :

$$Q = Gc_p \Delta T_i [1 - \exp(-4StN_L)] \quad (5)$$

式中, St 为斯坦顿数, $St = h_m / (\rho c_p u_m)$; h_m 为管内平均对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; d_i 为管内径, m ; u_m 为流体平均流速, m/s 。 N_L 为无因次特征长度, $N_L = L/d_i$; L 为管长, m ; Re 为流体雷诺数; N_{Tf} 为无因次的入口换热温差, $N_{Tf} = (T_w - T_{fi})/T_w$; N_{Tw} 为无因次壁温, $N_{Tw} = T_w / [\mu^2 / \rho^2 c_p d_i^2]$; μ 为流体动力粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, f 为流动阻力系数。

2 虑污垢时管内对流换热过程的熵产和传热量

以图 1 所示的管内对流换热过程作为研究对象,考虑管内壁存在一层厚为 δ_f 的污垢层。用上标“'”表示考虑污垢时的有关物理量。为分析问题方便起见,先假定污垢处于稳定状态,污垢均匀分布在管内壁,且不考虑污垢表面粗糙度的影响,污垢表面温度为 T'_w ;管壁表面温度仍保持恒定为 T_w ;流体质量流量和入口温度仍为 G 和 T_{fi} ;其他假定条件同不考虑污垢时的情况,该微元体由温差对流传热和粘性流动引起的熵产仍然可采用(1)和(2)计算,只是把其中的 T_w 和 T_f 改为 T'_w 和 T'_f ,并用 dp'/dx 代替 dp/dx ,积分得到^[10]:

$$\Delta S'_{\Delta T} = Gc_p \left[\ln \frac{1 - N_{Tf} \exp(-AL)}{1 - N_{Tf}} - \frac{1}{B} \ln \frac{1 - BN_{Tf} \exp(-AL)}{1 - BN_{Tf}} \right] \quad (6)$$

$$\Delta S'_{\Delta p} = \frac{Gc_p f' Re'^2}{2d'_i N'_{Tw}} \cdot \frac{1}{A} \cdot \left[\ln \frac{1 - N_{Tf} \exp(-AL)}{1 - N_{Tf}} + AL \right] \quad (7)$$

式中, $A = \frac{8St'\lambda_f}{d'_i [2\lambda_f + h'_m d'_i \ln(d_i/d'_i)]}$;

$$B = \frac{h'_m d'_i \ln(d_i/d'_i)}{2\lambda_f + h'_m d'_i \ln(d_i/d'_i)};$$

$$N'_{Tw} = T_w / [\mu^2 / \rho^2 c_p d_i^2]; Re' = \rho u'_m d'_i / \mu。$$

由于污垢的存在,将使原有的传热过程增加了污垢层的导热过程,因此在计算此时的管内传热过程的熵产时,还需要考虑由污垢层导热引起的熵产 $\Delta S'_f$,即:

$$d(\Delta S'_f) = Gc_p \left(\frac{1}{T'_w} - \frac{1}{T'_f} \right) dT'_f \quad (8)$$

积分得：

$$\Delta S'_f = Gc_p \left\{ \frac{1}{B} \ln \frac{1 - BN_{Tfi} \exp(-AL)}{1 - BN_{Tfi}} - N_{Tfi} [1 - \exp(-AL)] \right\} \quad (9)$$

积分 $dQ'/G = c_p dT'_f$ 得到换热管的传热量 Q' ：

$$Q' = Gc_p \Delta T_i [1 - \exp(-AL)] \quad (10)$$

3 污垢对管内湍流换热影响的熵增率

由上述分析结果可见，污垢的存在不仅影响到传热和流动过程的不可逆性，而且还影响到传热量的多少，因此比较考虑污垢前后单位传热量熵产的大小更为合理，用如下污垢对管内对流换热过程性能影响的指标，即单位传热量的相对熵增率 η ^[10]：

$$\eta = \frac{\Delta S'_f / Q' - \Delta S / Q}{\Delta S / Q} = \frac{\Delta S'_{qT} - \Delta S_q}{\Delta S_q} = \frac{\Delta S'_{qT} + \Delta S'_{qp} + \Delta S'_{qf} - 1}{\Delta S_{qT} + \Delta S_{qp}} \quad (11)$$

4 污垢对小管径管内对流换热过程影响的数学分析

4.1 数值分析流程

由于(3)、(4)、(6)、(7)以及(10)等式中，需要给出对流换热系数、摩擦阻力系数，以及污垢层的厚度，以下给出空调热泵用换热管中这些参数的湍流计算公式，考虑污垢前后的对流换热其努塞尔(Nusselt)数 Nu' 和 Nu 均可以由工程中广泛采用的迪图斯-贝尔特(Dittus-Boelter)公式表示^[15]：

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (12)$$

在不考虑污垢粗糙度对流动的影响情况下，管道摩擦阻力系数在考虑污垢前后时均可采用布拉休斯公式 ($Re = 4 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$)^[16]：

$$f = 0.3164 Re^{-0.25} \quad (13)$$

工程实际中难以直接测试污垢层厚度 δ_f 的数值，通常采用热工原理间接计算得到。分析图 1 传热过程，由传热学理论得：

产生污垢前的传热系数：

$$k = h_m \quad (14)$$

产生污垢后的传热系数：

$$k' = \frac{1}{\frac{d_i}{2\lambda_f} \ln(d_i/d'_i) + \frac{d_i}{h'_m d'_i}} \quad (15)$$

由污垢热阻定义 $R_f = \frac{1}{k'} - \frac{1}{k}$ 以及 $d'_i = d_i - 2\delta_f$ 可得计算污垢层厚度的方程为：

$$\frac{d_i}{2\lambda_f} \ln[d_i/(d_i - \delta_f)] + \frac{d_i}{h'_m(d_i - \delta_f)} - \frac{1}{h_m} - R_f = 0 \quad (16)$$

由于式(16)是隐式函数，无法求得解析解，而且考虑污垢后的管内对流换热系数 h'_m 是随着污垢层厚度 δ_f 的变化而变化的， δ_f 的确定反过来也依赖于 h'_m 的计算，这更加大了 δ_f 的计算难度，给整个熵产解析分析带来困难，因此采用数值方法进行分析，公式(16)采用牛顿迭代法求解，而 h'_m 的求解根据 δ_f 值同步地采用迭代方式求解，整个熵产分析计算程序原理见图 2 所示的流程图。

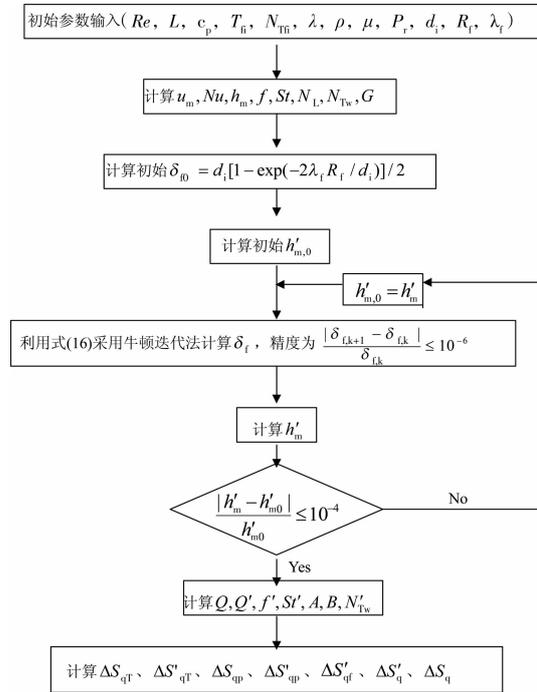


图 2 熵产分析程序流程图

4.2 污垢对小管径管内对流换热影响的熵产分析

4.2.1 单位传热量的熵产随雷诺数的变化

以管长为 3 m 的换热管为研究对象，换热管入口水温取 298 K，计算过程中流体物性取为常物性，以流体进口温度为参考温度，污垢热阻值取 0.000 3 m² · K/W^[17]，水垢导热系数取 2 W/(m · K)^[18]，入口换热温差参数 $N_{Tfi} = 0.063$ (管壁温度为 318 K)。分析内径为 0.013 m 换热管单位传热量熵产随雷诺数 Re (无污垢时) 的变化情况，见图 3。图中分别给出了 ΔS_{qT} 、 $\Delta S'_{qT}$ 、 ΔS_{qp} 、 $\Delta S'_{qp}$ 、 $\Delta S'_{qf}$ ，以及考虑污垢前后管内流动换热单位传热量的总熵产 $\Delta S'_q$ 、 ΔS_q 。

由图 3 可以看出换热管内有污垢时， $\Delta S'_{qT}$ 随雷诺数 Re 的增大而减小，而 ΔS_{qT} 随 Re 的增大而缓慢增加，且 $\Delta S'_{qT}$ 小于 ΔS_{qT} ，其差值随着 Re 的增大而增大；从图中也可以看出考虑污垢前后流体质量流量不变时，由于污垢层的存在使得管道流动截面变小，流动阻力增加，从而使得 $\Delta S'_{qp}$ 大于 ΔS_{qp} ，且随着雷诺数 Re 的增加其差值更明显，在雷诺数 Re 较小时， ΔS_{qp} 和 $\Delta S'_{qp}$ 较其它原因引起的熵产要小

得多,但在雷诺数较大时, $\Delta S'_{qp}$ 会超过 $\Delta S'_{qT}$, 这说明在管径小而流体速度大时,文献[10]的分析结果不够全面,在有污垢情况下,会出现流动阻力不可逆性要超过温差传热的不可逆性;而 $\Delta S'_{qf}$, 随着雷诺数 Re 的增加,其值是增大的; $\Delta S'_q$ 则由于污垢的存在增加了整个换热过程的不可逆性,而大于 ΔS_q 。

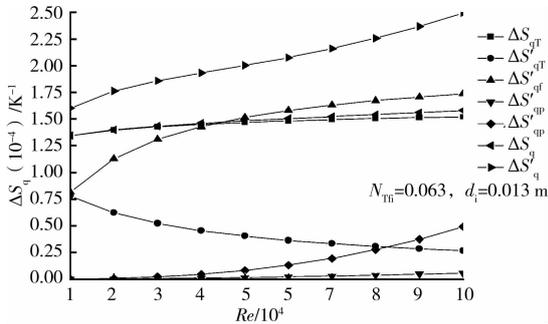


图 3 对流换热单位传热量熵产随雷诺数的变化

4.2.2 单位传热量的熵产随污垢热阻的变化

江河水的污垢热阻 R_f 值一般在 7×10^{-4} ($m^2 \cdot K$)/W 以下^[17], 而且污垢热阻的形成是一个渐进的、长时间的变化过程,因此有必要分析不同的污垢热阻 R_f 下管内对流换热引起的单位传热量熵产变化,分析结果见图 4。从图中可见,污垢热阻 R_f 从 1×10^{-4} ($m^2 \cdot K$)/W 变化到 5×10^{-4} 时,减小 67% 左右; $\Delta S'_{qf}$ 增加 80% 左右; $\Delta S'_{qp}$ 增加 20% 左右;而 $\Delta S'_{qp}$ 也是增加的,当污垢层增加到一定数值时,其与属于同一数量级。而且从图中可以看出,随着污垢热阻 R_f 的增加, $\Delta S'_{qf}$ 在整个对流换热熵产中所占的比重会大大增强,而则相对很小了,因此由污垢层导热引起的单位传热量的熵产 $\Delta S'_{qf}$ 在污垢形成过程中更应该受到关注。

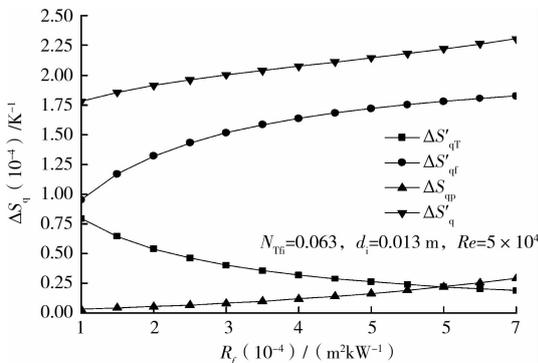


图 4 对流换热单位传热量熵产随污垢热阻的变化

4.3 污垢对小管径管内对流换热影响的熵增率分析

4.3.1 熵增率随雷诺数和入口温差的变化

图 5 给出了熵增率 η 随雷诺数 Re (无污垢时) 的变化情况,从图中可以看出,随着雷诺数 Re 的增大,熵增率 η 是增大的,且在计算的雷诺数范围内,都有熵增率 $\eta > 0$,这表明由于污垢的存在,使得管

内传热和流动过程的不可逆性增加,且随着雷诺数的增加,污垢的影响越来越大。由图也可以看出,当入口换热温差参数 $N_{Tfi} > 0.1$ 时,曲线是呈向上凸的,在 Re 较小时,熵增率 η 增加较快,随着 Re 增大,熵增率 η 的增加变化趋于缓慢;但当 $N_{Tfi} < 0.1$ 时,曲线会出现拐点,先是呈向上凸的变化,随着 Re 增大,会出现向下凹的情况,拐点的出现,证明在 N_{Tfi} 较小且雷诺数 Re 较大时,粘性流动引起的熵产对熵产率的影响开始比较明显,使得曲线的斜率增加,进而出现拐点。因此,在 N_{Tfi} 较小且雷诺数 Re 较大时,粘性流动引起的熵产应该是要考虑的影响因素。

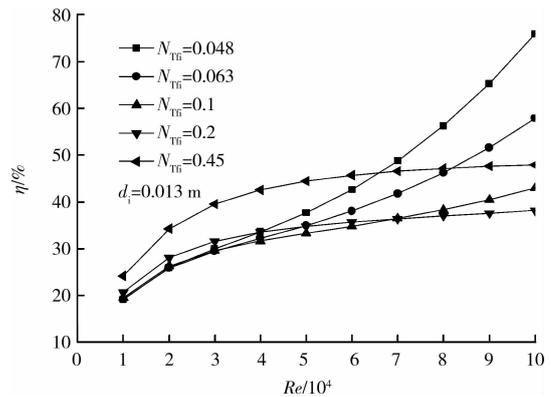


图 5 单位传热量的熵增率随雷诺数的变化

4.3.2 熵增率随污垢热阻的变化

图 6 给出了熵增率 η 随污垢热阻 R_f 的变化情况,从图中可以看出,随着污垢热阻 R_f 的增大,熵增率 η 是增大的,污垢热阻 R_f 从 1×10^{-4} ($m^2 \cdot K$)/W 变化到 5×10^{-4} ($m^2 \cdot K$)/W 时,熵增率 η 要增加 25% 左右,可见伴随着污垢的形成,会引起整个对流换热过程的不可逆性的增加。

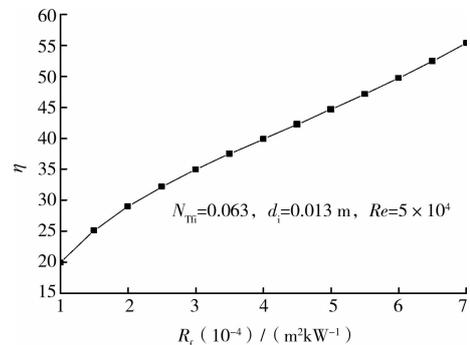


图 6 单位传热量的熵增率随污垢热阻的变化

5 结论

1) 由于污垢的存在使得管内对流传热单位传热量总熵产不但增加了,而且组成也发生了改变,在无污垢时,单位传热量的熵产主要是由于温差对流传热引起的熵产;而有污垢时,主要由温差对流传热引起的熵产和污垢层的导热引起的熵产组成。而且

随着雷诺数的增加,污垢层的导热引起的熵产比温差对流传热引起的熵产更大。

2) 在有污垢情况下,管径小而速度大的管内对流换热,会出现流动阻力不可逆性超过温差传热的不可逆性。

3) 随着污垢热阻的增加,污垢层的导热引起的熵产在整个对流传热熵产中所占的比重会大大增强,而温差传热引起的熵产则相对减小,因此由污垢层导热引起的单位传热量的熵产在污垢形成过程中更应该受到关注。

4) 随雷诺数的增大,熵增率是单调增大的,且在计算的雷诺数范围内,都有熵增率 $\eta > 0$; 当入口换热温差参数 $N_{Tfi} > 0.1$ 时,熵增率曲线是呈向上凸的;当 $N_{Tfi} < 0.1$ 后,曲线会出现拐点,先是呈向上凸的变化,随着 Re 增大,会出现向下凹的情况;随着污垢热阻的增加,熵增率是单调增加的。

参考文献:

- [1] 王子云,付祥钊,王勇,等. 重庆市发展长江水源热泵的水源概况分析[J]. 重庆建筑大学学报,2008,30(1):92-94,104
WANG ZI-YUN, FU XIANG-ZHAO, WANG YONG, et al. Analysis of Yangtze river water as a potential source for developing a water source heat pump in Chongqing [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(1): 92-94, 104.
- [2] 王勇,顾铭,肖益民,等. 长江水源热泵开式与闭式实验对比分析[J]. 土木建筑与环境工程,2009,31(2):126-130,137.
WANG YONG, GU MING, XIAO YI-MIN, et al. Comparative analysis on experiment about open-loop system and close-loop system of WSHP at Yangtze river [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(2): 126-130, 137.
- [3] 王明国,付祥钊,王勇,等. 利用长江水作热泵冷源源的探讨[J]. 暖通空调,2008,38(4):33-34.
WANG MING-GUO, FU XIANG-ZHAO, WANG YONG, et al. Discuss on using Yangtze river water as heat and cold sources of water source heat pumps[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(4): 33-34.
- [4] 王子云,付祥钊,全庆贵. 长江水源热泵换热器传热流动特性研究[J]. 煤气与热力,2008,28(2):7-10.
WANG ZI-YUN, FU XIANG-ZHAO, TONG QING-GUI. Research on heat exchange flow performance of heat exchanger of Yangtze river water-source heat pump[J]. Gas & Heat, 2008, 28(2): 7-10.
- [5] HOOMAN KAMEL, GURGENCI HAL, MERRIKH, et al. Heat transfer and entropy generation optimization of forced convection in a porous-saturated duct of rectangular cross-section [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(3): 2051-2059.
- [6] BEJAN A. A study of entropy generation in fundamental convective heat transfer [J]. ASME J of Heat Transfer, 1979, 101: 718 - 725.
- [7] NAGP K, MUKHERJEE P. Thermodynamic optimization of convective heat transfer through a duct with constant wall temperature [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1987, 30 (2) :401 - 405.
- [8] SAHIN A Z. Second law analysis of laminar viscous flow through aduct subject to constant wall temperature [J]. ASME J of Heat Transfer, 1998, 120 (2) :76 - 83.
- [9] SAHIN A Z. Entropy generation in turbulent liquid flow through a smooth duct subject to constant wall temperature [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2000, 43 (8) :1469-1478.
- [10] 吴双应. 对流传热过程的热力学分析及其应用[D]. 重庆:重庆大学,2004.
- [11] 姚杨,宋艳,那威. 污垢对污水源热泵系统性能影响[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(4):599-603
YAO YANG, SONG YAN, NA WEI. Research of system performance of sewage-source heat pump with fouling effect [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(4): 599-603.
- [12] 吴荣华,张承虎,庄兆意,等. 地表水源热泵管式换热法及其特性研究[J]. 太阳能学报,2007,28(12):1389-1393
WU RONG-HUA, ZHANG CHENG-HU, ZHUANG ZHAO-YI, et al. Research on the thimble heat-transfer method and its characteristic of surface water source heat pump system [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2007, 28(12): 1389-1393.
- [13] 王子云,付祥钊,全庆贵. 利用长江水作热泵系统冷源的技术分析[J]. 中国给水排水,2007,23(6):6-9
WANG ZI-YUN, FU XIANG-ZHAO, TONG QING-GUI. Technical analysis on using Yangtze river water as cold and heat sources of heat pump [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(6): 6-9.
- [14] BEJAN A. Entropy generation through heat and fluid flow [M]. New York: Wiley, 1982
- [15] 杨世铭,陶文铨. 传热学 [M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [16] 龙天渝. 流体力学 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004.
- [17] JAMES M, CHENOWETH. Final report of the HTRI/TEMA joint committee to review the fouling section of the TEMA Standards [J]. Heat Transfer Engineering, 1990, 11(1): 73-105.
- [18] 杨善让,徐志明,孙灵芳. 换热设备污垢与对策 [M]. 北京:科学出版社, 2004.

(编辑 王秀玲)