

江水源热泵套管式换热器换热效率的实验研究和模拟分析

周智勇^{1,2}, 王子云³, 付祥钊¹, 王 勇¹, 何 华¹

(1. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2. 华东交通大学 土木建筑学院, 南昌 330013;
3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:利用长江水源的江水源热泵系统是重庆市可再生资源利用的重要形式,其换热器的性能对系统能效具有显著的影响,论文研究了使用半圆环形折返管的套管式换热器的换热效率。实验证明折返管曲率的增加可以有效地提高换热器的换热效率,与直管套管式换热器相比,当 $R/r=5$ 时,其换热效率可提高2.5%。为分析半圆环形折返管的换热机理,论文利用计算流体力学(CFD)进行了流动、温度场和换热模拟。为保证在旋转流和大曲率情况下计算的准确性,模拟分析采用了修正后的RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,模拟分析的结果表明:折返管内存在者明显的二次流漩涡,它对边界层的扰动是造成换热器换热效率随着折返管曲率增加而提高的主要原因。论文综合实验和模拟分析结果,同时考虑江水的泥沙问题和换热效率,给出了半圆环形折返管的适宜曲率。

关键词:换热器;半圆环折返管;换热效率;二次流漩涡

中图分类号:TU831.4;TF066.2 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2009)04-0082-06

Experiment and Simulation on Heat Transfer Efficiency of Double-pipe Heat Exchanger for River Water-source Heat Pump

ZHOU Zhi-yong^{1,2}, WANG Zi-yun³, FU Xiang-zhao¹, WANG Yong¹, HE Hua¹

(1. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East-China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China; 3. China Railway Eryuan Engineering Group Co. LTD, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: The river water-source heat pump system is an important technique to utilize renewable energy in Chongqing and heat exchanger can influence overall energy efficiency of system obviously. A test was carried out to study the heat transfer efficiency of double-pipe heat exchanger with semicircular reentrant tube. It was found that the heat transfer efficiency would increase while curvature of semicircular reentrant tube rose. And when the ratio of R to r was five, heat transfer efficiency for semicircular reentrant tube would be increased 2.5% than that of straight double-pipe heat exchanger. Flow, temperature field and heat transfer process of semicircular reentrant tube were simulated with computational fluid dynamics (CFD) tool to study the heat transfer mechanism. The modified RNG $\kappa-\epsilon$ Turbulence Model was adopted to ensure the accuracy of simulation analysis under the situation of rotary flow and great curvature. Thus, it was indicated that there was obvious secondary flow vertex in reentrant tube. And disturbance of vertex on boundary layer was the main reason for which heat transfer efficiency of double pipe heat exchanger would increase as curvature of semi-toroidal reentrant tube rose. Based on the experiment and simulation, the

收稿日期:2009-02-08

基金项目:十一五国家科技支撑计划项目(2006BAJ01A06-3)

作者简介:周智勇(1970-),男,重庆大学博士研究生,主要从事建筑节能方面的研究,(E-mail)zzyblack@sohu.com.

recommended curvature for reentrant tube was proposed with the consideration of sediment in river-water and heat transfer efficiency of heat exchanger.

Key words: heat exchangers; semicircular reentrant tube; heat transfer efficiency; secondary flow vertex

能源安全和环境保护成为 21 世纪全球性问题,发展可再生能源成为缓解能源供应矛盾和应对气候的重要措施,预计 2050 年可再生能源将满足全球 50% 以上一次能源需求^[1]。我国经济正处于快速发展时期,能源和环境对可持续发展的约束日益严重,我国大规模可再生能源的资源基础使其可以成为未来主流甚至主导能源。长江重庆段夏季汛期平均流量达 50 000 m³/s,即使冬季枯水期也有 3 000 m³/s,因此沿江建筑可以利用江水源热泵充分开发丰富的长江淡水冷热资源^[2]。江水水处理、江水取水和换热器换热效率是江水源热泵系统能效水平的主要影响因素,相对于闭式江水源热泵系统,开式江水源热泵系统因采用强制对流换热而提高了冷热源利用效率,本文即主要研究开式间接江水源热泵系统换热器的换热效率。考虑到泥沙堵塞沉淀等问题和经济性因素,因此未选用壳管式换热器,而板式换热器对水质的严格要求因而也不予考虑,最终选用套管式换热器作为研究对象^[3]。

地源热泵包括土壤源热泵、地下水源热泵和地表水源热泵,国外土壤源热泵研究文献较多,关于地下水源热泵研究文献相对较少,关于地表水源热泵的文献则更少见。地下水源热泵相关文献如 Liu Nanxi 等测试了使用近共沸混合制冷剂的适度高温水源热泵的系统能效^[4], Arif Hepbasli 通过模型对太阳能辅助家用热水器集成地下水源热泵的系统性能进行了评估^[5]。国外对于套管式换热器的研究主要通过实验和模拟分析其换热性能,如 Timothy J. Rennie 和 Vijaya G. S. Raghavan 通过数值模拟方法研究了螺纹套管式换热器中流动换热对换热性能的影响^[6], Ebru Kavak Akpinar 通过实验证明了螺纹套管式换热器的传热性能优于光面套管式换热器^[7], Wen-Lih Chen 和 Wei-Chen Dung 通过数字模拟的方法指出顺流套管式换热器传热性能稍优于逆流套管式换热器^[8], N. Targui 和 H. Kahalerras 对多孔式套管换热器的流动和传热进行了模拟分析并给出了优化结构^[9]。

目前国内关于土壤源热泵和地下水源热泵的研究文献较多,有关江水源热泵的文献大多为工程设计介绍,而有价值的研究文献相对较少。关于江水源热泵的研究文献,如张文宇等对黄浦江水作为冷热源进行了可行性分析^[10],王明国等对长江水源作

为冷热源的进行了探讨^[11],王勇等对开式和闭式江水源热泵的系统能效进行了实验对比研究^[12]。而对套管式换热器的研究则主要是对其在土壤源热泵中的应用研究,如赵军等依据能量平衡建立了地下浅埋套管式换热器传热模型^[13],王欣等在 V. C. Mei 传热模型的基础上,结合系统能量方程和热传导方程建立了套管式换热器的传热模型^[14],陈颖等研究了单 U 形管、双 U 形管和套管换热器分别在热泵连续运行与间歇运行方式下换热量随时间的变化趋势^[15]。

国内外相关研究文献一般采用实验测试或者数值模拟分析的方法,或者对水源热泵系统的整体性能进行研究,或者仅仅对套管式换热器进行研究,或者对套管式换热器在土壤源热泵中的应用进行研究,尚无对套管式换热器在江水源热泵中的应用研究。该文则综合采用实验测试和数值模拟对套管式换热器在江水源热泵中的应用进行研究,首先通过实验测试不同曲率半圆环折返管换热器和直管换热器(共 6 组)的换热系数,测试结果表明换热系数随着曲率的增加而呈上升的趋势,随后通过数值模拟进行了换热微观机理研究,分析结果表明:不同曲率情况下,二次流漩涡对边界层扰动的强弱变化是造成换热效率变化的主要原因。该章还在综合各种因素的基础上,给出了江水源热泵中使用半圆环形折返管的套管式换热器的设计优化参数。

1 套管式换热器换热效率实验研究

1.1 测试对象

套管式换热器内布置换热管时,常存在弯管、折返管、突扩管和突缩管等管件^[16],换热管内流体在经过这些管件时,流动中存在的涡旋使得流态变得复杂:如弯管和折返管内存在明显的垂直于主流方向的二次旋流^[17],使得在整个弯管和折返管内的流动呈螺旋流动的状态,而突扩管和突缩管的拐角处存在漩涡^[18-20],这些流态对换热效果都产生一定的影响。在进行单流道套管式换热器设计时,为节省空间使其尽量紧凑,同时为增强换热效果,套管式换热器常使用半圆环形折返管。实验测试了 6 组套管式换热器的换热效率,其中 5 组换热器使用了不同曲率的半圆环形折返管(见图 1 中(a)),另外一组换热器为直管(见图 1 中(b)),两者展开长度相同。

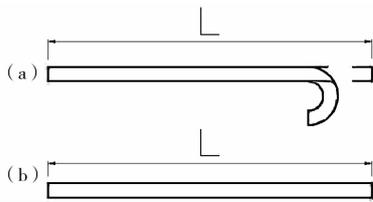


图 1 实验用套管式换热器

为增强换热效果,套管式换热器换热管内径 $2r$ 一般为 $10\sim 20\text{ mm}$,其值比较稳定, R 可根据需要确定(见图 2)。当 R/r 取值过大,则换热器所占空间就会太大。因此实验就分别取 $R/r=5.0, 10.0, 20.0, 40.0$ 和 60.0 对折返管内部流动换热进行分析。实验选用的换热管参数:换热基管外径为 15 mm ,内径 12 mm ;外管外径 25 mm ,内径 21 mm 。

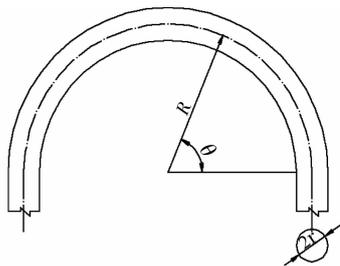


图 2 半圆环形折返管

1.2 平台简介

为研究套管式换热器的换热效率,需测试冷凝器水侧进口水温 and 流量以及出口水温,为此建立了如图 3 所示的实验平台,平台由以下部分组成:(1)蓄水池;(2)冷却水泵;(3)流量计;(4)和(8)温度测点;(5)冷凝器;(6)热力膨胀阀;(7)盘管;(9)压缩机。

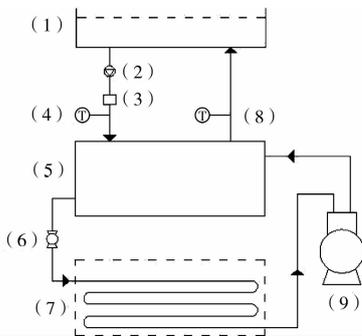


图 3 换热器实验平台

1.3 分析方法

取得测试数据后,可根据式(1)计算换热器换热系数 $K(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C}))$:

$$K = \frac{Q_k}{A_i \Delta t_m} \tag{1}$$

式(1)中, Q_k 为换热量, W ; A_i 为换热管内表面积, m^2 ; Δt_m 为换热器平均温差, C 。

1.4 测试结果分析

经计算可得 $K_0 = 2\ 105\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$,半圆环形折返管换热器的 $\Delta K_n (\Delta K = K_n - K_0)$ 值与直管换热器的 K_0 的比值随 R/r 的变化情况见图 4 所示。实验结果表明:在相同条件下,半圆环形折返管换热器换热效率随着曲率的增加而上升。当 $R/r=5$ 的时候,与直管换热器相比,其换热系数数值增加了 2.5% 。受限于套管式换热器的形式和折返管的尺寸,直接用实验研究折返管对换热效率的影响比较困难,故可利用 CFD 数值模拟分析半圆环形折返管的换热机理。

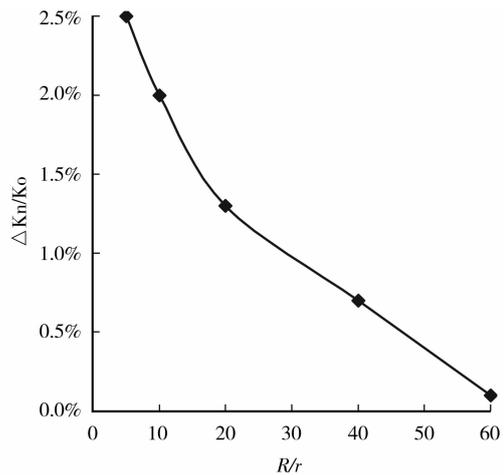


图 4 不同换热器换热效率比较

2 半圆环形折返管换热的数值模拟分析

2.1 数值分析模型介绍

由于半圆环折返管管径没有突变情况,不会产生流动的不稳定性,同时考虑到旋转流和弯管曲率的因素,该文采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型^[21-22],该模型在计算中考虑了如下修正:

1)有效粘性系数的模化 湍流涡粘性是通过微分方程得到的,它是根据重整化群理论通过理论推导出^[23]:

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\epsilon} \mu}\right) = 1.72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\nu^3 - 1 + C_v}} d\hat{\nu} \tag{2}$$

其中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; k 为湍动能, m^2/s^2 ; μ 为粘度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_{eff} 为有效粘性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; $\hat{\nu} = \mu_{\text{eff}}/\mu, C_v = 100$ 。

通过对(2)进行积分,可以获得湍流传输随有效雷诺数和涡尺度变化关系的较准确的描述,从而使模型能够较好处理低雷诺数区或壁面区。在高雷诺数时,对式(2)进行积分可得: $\mu_t = \rho C_\mu k^2/\epsilon$,常数 $C_\mu = 0.0845$ 。

2) 涡旋修正 若主流存在旋转或者旋流时,湍流特征一般会受到主流的影响。为了在模型中考虑这一影响,对湍流粘性系数做如下修正:

$$\mu_t = \mu_{t0} f\left(a_s, \Omega, \frac{k}{\varepsilon}\right) \quad (3)$$

其中 μ_{t0} 是没有旋流修正时的湍流粘性系数,采用式(2)或者 $\mu_t = \rho C_\mu \kappa^2 / \varepsilon$ 进行计算。 a_s 为旋流常数,取 0.07,在旋流中可取更大的数值, Ω 为旋转特征数。

3) ε 方程中 $C'_{2\varepsilon}$ 的修正

$$C'_{2\varepsilon} = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3} \quad (4)$$

由上式可知,当对应低应变率区($\eta < \eta_0$)时,上式右边第二项为正,其结果使得 RNG $k - \varepsilon$ 模型所得到的湍流涡旋粘性比标准 $k - \varepsilon$ 模型要高;反之,当对应高应变率区($\eta > \eta_0$)时,上式右边第二项为负,其结果使得 RNG $k - \varepsilon$ 模型所得到的湍流涡旋粘性比标准 $k - \varepsilon$ 模型要低。这样使得 RNG $k - \varepsilon$ 模型对于考虑了高应变率或大曲率过流面等因素的影响,从而提高了模型在旋转流和大曲率情况下的计算准确性,江水源热泵套管式换热器内存在旋流和弯曲现象,因此本文选择 RNG $k - \varepsilon$ 模型作为流场流动换热的湍流模型^[24]。数值方法采用有限体积法离散格式(二阶迎风格式,网格采用六面体格式)离散相

应的控制微分方程,利用 Simple 算法求解离散的连续性、动量、能量、湍动能和耗散率方程^[25],并对计算结果的网格划分无关性进行分析,使计算结果相对网格变化不超过 1%^[26-28]。模拟边界条件取流动介质 298 K 的水,流量为 310 mL/s,壁温为 313 K。

2.2 半圆环形折返管流动模拟分析

取 $R/r=5.0, 10.0, 20.0, 40.0, 60.0, \theta=90^\circ$ 和 $R/r=60.0, \theta=180^\circ$ 的截面速度矢量图进行分析(雷诺数 $Re=2.8 \times 10^4$),由图 2 中 a 至 e 可以看出:当流体流过折返管时,流体惯性作用使得管壁靠近外侧(图 5 左侧)的地方压力增大,靠近管壁内侧(图 5 右侧)的地方压力减小,而上下两侧压力变化不大,因此靠近壁面附近的流体沿着壁面由外侧向内侧流动,而管中间的流体则由内侧向外侧流动,从而形成垂直于主流方向的两个对称的漩涡,并且漩涡中心更靠近管壁内侧。这两个漩涡和主流叠加可使流体产生两股螺旋流,从图中也可以看出随着 R/r 的增大,即随着曲率的减小,漩涡中心更靠近管中心。而从图 5(e)和图 5(f)比较可以看出,从 90° 到 180° 的管段内漩涡位置没有变化,这说明在折返管的后半段,二次流已经比较稳定,并且可以和管道中的主流一起形成以水平轴线为对称轴线的两个稳定的螺旋流。

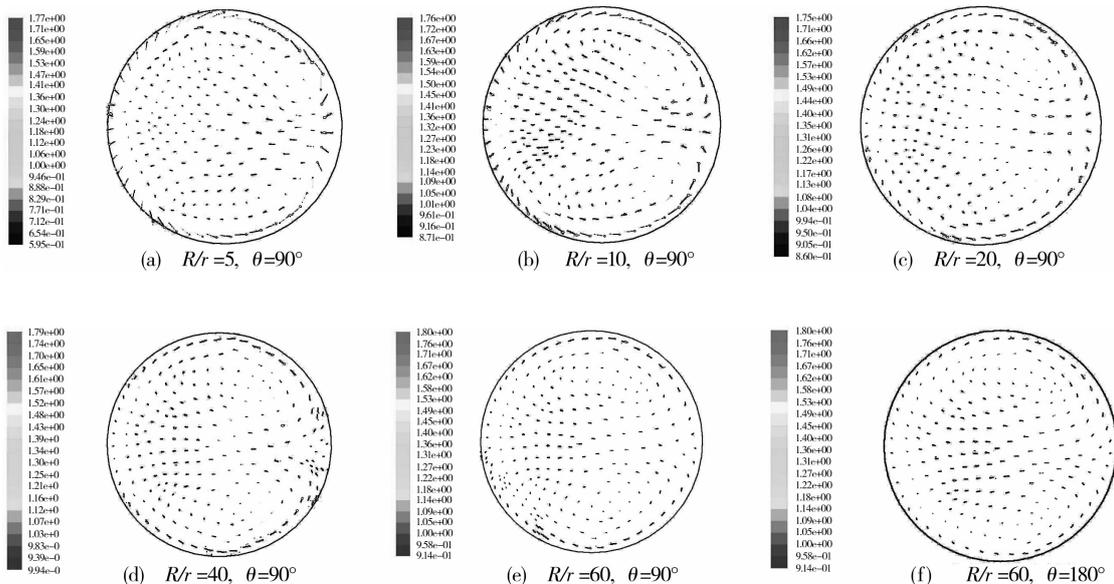


图 5 截面速度矢量图

2.3 半圆环形折返管温度场模拟分析

由图 6 可以看出半圆环形折返管截面的无量纲温度(无量纲温度为 $t^* = \frac{t - t_0}{t_w - t_0}$, t 为流体温度, t_0 为流体进口初始温度, t_w 壁面温度)分布,与直管截面无量纲温度以管中心对称分布不同,其温度分布

以水平轴线呈对称性分布。由图可知,由于二次流的作用使得管壁附近的流体由弯管外侧向内侧流动,而管中心的流体则由弯管内侧向外侧流动,从而使水平轴线上的流体温度在内侧升高的比在外侧更快。

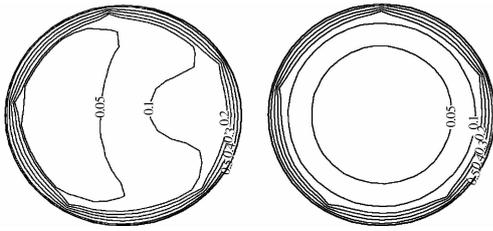


图 6 $R/r=10$ 的折返管和直管的出口截面温度等值线

2.4 半圆环形折返管换热模拟分析

为分析折返管的 R/r 对其换热特性的影响, 与不同 R/r 折返管相对应且具有相同长度的直管也分别进行了数值模拟。在充分发展湍流状态下(雷诺数 $Re=2.8 \times 10^4$), 折返管对流换热努塞尔数 Nu 与相应的直管的努塞尔数 Nu_0 的比值随 R/r 的变化情况见图 7 所示。由图 7 可以看出当 R/r 增大时, 折返管和直管的换热系数差值减小, 当 $R/r=5.0$ 时, 折返管的换热系数可比直管的增加 9.2%, 而当 $R/r=60.0$ 时, 折返管的换热系数和直管的换热系数已经基本相同。若曲率太大则换热器盘管就会因布置过于紧凑而不利于换热, 但是为进一步研究换热系数的变化规律, 该文取 $R/r=3$ 继续进步模拟分析, 此时换热系数增加率为 10.1%, 这表明换热系数随曲率增加而提高的趋势是稳定的。

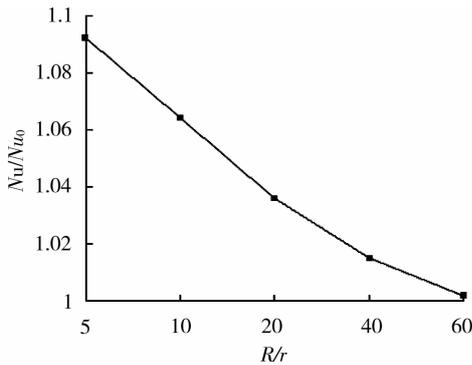


图 7 半圆环形折返管换热特性

2.5 半圆环形折返管换热综合分析

综合 2.2、2.3 和 2.4 的模拟分析结果, 可知引起半圆环形折返管换热特性变化的主要原因: 当 R/r 很小时, 截面二次流漩涡更靠近壁面, 而且漩涡范围小且强度大, 对边界层的扰动强, 可以明显减小边界层的厚度, 因此换热系数增加明显; 当 R/r 很大时, 漩涡向管道中心移动, 而且范围变大且强度变小, 对边界层的扰动减小, 因此相对于湍流对边界层的扰动已经不是很明显了, 此时其换热系数与直管接近。

3 结 论

1) 套管式换热器换热效率实验结果表明, 半圆环形折返管套管式换热器换热效率随着曲率的增加

而提高, 当 $R/r=5$ 时, 其换热系数较直管套管式换热器可提高 2.5%。

2) 半圆环形折返管换热的换热模拟表明, 其对流换热努塞尔数 Nu 随曲率增加而上升, 当 $R/r=5.0$ 时, 折返管的换热系数可比直管的增加 9.2%。

3) 半圆环形折返管流场模拟表明, 其曲率增加时, 截面二次流漩涡更靠近壁面, 而且漩涡范围变小且强度增加, 对边界层的扰动变强, 可以明显减小边界层的厚度, 导致换热系数增加。

4) 如果考虑长江水泥沙含量高的影响, 为保证单流道换热器中泥沙分离程度相对较小^[29], 同时综合考虑换热效率, 取 $R/r=10$ 比较适宜。

参考文献:

- [1] BARIS BAGCI. Towards a zero energy island [J]. Renewable Energy, 2009, 34(3): 784-789.
- [2] CHEN XIAO, ZHANG GUO-QIANG, PENG JIAN-GUO, et al. The performance of an open-loop lake water heat pump system in south China [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(17-18): 2255-2261.
- [3] AHMAD FAKHERI. Heat exchanger efficiency [J]. Journal of Heat Transfer, 2007, 129(9): 268-276.
- [4] LIU NAN-XI, LIN SHI, HAN LI-ZHONG, et al. Moderately high temperature water source heat-pumps using a near-azeotropic refrigerant mixture [J]. Applied Energy, 2005, 80(4): 435-447.
- [5] ARIF HEPBASLI. Exergetic modeling and assessment of solar assisted domestic hot water tank integrated ground-source heat pump systems for residences [J]. Energy and Buildings, 2007, 39(12): 1211-1217.
- [6] TIMOTHY J RENNIE, VIJAYA G S RAGHAVAN. International journal of thermal sciences [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 45(12), :1158-1165.
- [7] EBRU KAVAK AKPINAR. Evaluation of heat transfer and exergy loss in a concentric double pipe exchanger equipped with helical wires [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(18-19), : 3473-3486.
- [8] CHEN WEN-LIN, WEI-CHEN DUNG. Numerical study on heat transfer characteristics of double tube heat exchangers with alternating horizontal or vertical oval cross section pipes as inner tubes [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(6): 1574-1583.
- [9] N TARGUI, H KAHALERRAS. Analysis of fluid flow and heat transfer in a double pipe heat exchanger with porous structures [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(11): 3217-3229.
- [10] 张文宇, 龙惟定. 地表水源热泵以黄浦江水作为冷热源的可行性分析 [J]. 暖通空调, 2008, 38(3): 15-20.

- ZHANG WEN-YU, LONG WEI-DING. Feasibility analysis of surface-water heat pumps with Huangpu River water as cold and heat source [J]. *Heating Ventilation & Air Conditioning*, 2008, 38(4): 15-20.
- [11] 王明国,付祥钊,王勇,等. 利用长江水作水源热泵冷热源的探讨[J]. *暖通空调*, 2008, 38(4): 33-82.
- 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 pump[J]. *Heating Ventilation & Air Conditioning*, 2008, 38(4): 33-82.
- [12] 王勇,顾铭,肖益民. 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.
- WANG YONG, GU MING, XIAO YI-MING. Comparative analysis on experiment about open-loop system and close-loop system of WSHP at Yangtze River. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2009, 31(2): 126-130.
- [13] 赵军,袁伟峰,朱强,等. 地源热泵的套管式地下换热器传热研究[J]. *天津大学学报*, 2002, 35(3): 345-347.
- ZHAO JUN, YUAN WEI-FENG, ZHU QIANG. Heat transfer research on underground coaxial pipe heat exchanger for ground source heat pump[J]. *Journal of Tianjin University*, 2002, 35(3): 345-347.
- [14] 王欣,俞亚南,高庆丰. 地源热泵垂直套管式换热器传热研究[J]. *暖通空调*, 2005, 35(6): 16-19.
- WANG XIN, YU YA-NAN, GAO QING-FENG. Research on heat transfer of double-pipe heat exchanger for ground-source heat pumps [J]. *Heating Ventilation & Air Conditioning*, 2005, 35(6): 16-19.
- [15] 陈颖,杨敏,史保新. 夏热冬暖地区三种地理管换热器冬季换热能力的实验研究[J]. *暖通空调*, 2008, 38(2): 9-12.
- CHEN YING, YANG MIN, SHI BAO-XIN. Experimental investigation into heat exchange performance of three ground heat exchangers in winter in hot summer and warm winter zone [J]. *Heating Ventilation & Air Conditioning*, 2008, 38(2): 9-12.
- [16] 刘春雷,栾江峰,刘明冲. 管壳式换热器振动疲劳与强化传热技术评析[J]. *无机盐工业*, 2008, 40(11): 57-59.
- LIU CHUN-LEI, LUAN JIANG-FENG, LIU MING-CHONG. Analysis on vibration fatigue and heat transfer enhancement technology of shell and tube heat exchangers[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2008, 40(11): 57-59.
- [17] 周正贵. 计算流体力学基础理论与实际应用[M]. 江苏:东南大学出版社,2008.
- [18] CHU PAN, HE YA-LING, LI RUI, LEI YONG-GANG. Three-dimensional numerical analysis of fin-and-oval tube heat exchanger with longitudinal vortex generators [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(3): 488-490.
- [19] GU XIN-DONG, WANG QI-WU. Numerical research on flow field and temperature field of shell side near-wall region of longitudinal shell-and-tube heat exchanger[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30(4): 683-686.
- [20] HUGHES, J P SHAW, G H TUCKER, et al. Numerical simulations and experimental measurements of the flow in a multi-tube heat exchanger[J]. *Journal of Process Mechanical Engineering*, 2005, 219(4): 319-326.
- [21] M MOAWED. Experimental investigation of natural convection from vertical and horizontal helicoidal pipes in HVAC applications [J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46(18-19): 2996-3013.
- [22] T A JANKOWSKI, F C PRENGER, A RAZANI. Experimental study of a curved rotating heat pipe[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2008, 130(10): 225-228.
- [23] FLUENT Inc. FLUENT User's Guide[M]. America: Fluent Inc., 2003.
- [24] ZHANG MING-LIANG, SHEN YONG-MING. Three-dimensional simulation of meandering river based on 3-D RNG κ -E turbulence model [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2008, 20(4): 448-455.
- [25] 王经. 传热学与流体力学基础[M]. 上海:上海交通大学出版社,2007.
- [26] A DEHBI. Turbulent particle dispersion in arbitrary wall-bounded geometries; A couple CFD-Langevin-equation based approach[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2008, 137: 342-352.
- [27] A DEHBI. A CFD model for particle dispersion in turbulent boundary boundary layer flows[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2008, 283: 707-715.
- [28] CHEN YI-TUNG, CHEN HUA-JUN, ZHANG JIN-SUO, et al. Viscoelastic flow in rotating curved-pipes [J]. *Physics of Fluids*, 2006, 18(8): 68-70.
- [29] 王子云,付祥钊,王勇,等. 半圆环折返管内长江水固液两相流的数值模拟[J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(12): 1410-1414.
- WANG ZI-YUN, FU XIANG-ZHAO, WANG YONG, et al. Numerical simulation of solid-liquid flow of Yangtze River water in a semi-annulus reentry tube [J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(12): 1410-1414.

(编辑 胡玲)