

# 自动除污型污水-水换热器的数值模拟

沈朝, 姜益强, 姚杨

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

**摘要:**针对污水源热泵污水侧除污问题, 提出并设计了一种具有自动除污功能的壳管式换热器。基于分布参数法对其建立了稳态数学模型。采用矩阵控制的方法求解模型, 并对其除污前后不同的污水、循环水流量, 不同的换热面积下两侧流体的温度分布进行了研究。结果表明, 当换热器面积设计偏大时会出现局部热量反交换现象, 并指出了多发区。将除污功能应用于壳管式换热器, 相应地减小换热器的体积, 可使壳管式污水-水换热器在最佳工况下运行。

**关键词:**污水源热泵; 换热器; 自动除污; 稳态数学模型

**中图分类号:** TU833.3    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2011)03-0107-05

## Analysis of Sewage-water Heat Exchanger with the Function of Auto-de-fouling

SHEN Chao, JIANG Yi-qiang, YAO Yang

(School of Municipal and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** A sewage-water shell-tube heat exchanger with the function of de-fouling was proposed and designed for sewage-source heat pump. Its new simulation program which relies on a distribution parameter computational method was set up. Then the model was solved with the method of Matrix Control. Based on the model, the distribution of bilateral fluid temperature were studied, under the conditions of different flow rates and heat exchange area before and after the de-fouling. Results showed that there will be heat anti-transfer phenomenon if the heat exchanger area is bigger than need and the region of this phenomenon was point out. Setting the function of auto-de-fouling in shell-tube heat exchanger and reducing the equipment's volume accordingly can make the sewage-water heat exchanger run in the best conditions.

**Key words:** sewage source heat pump; heat exchangers; auto-de-fouling; steady-state model

利用地表水(城市污水、江河湖水、海水等)作为热泵冷热源为建筑供暖空调具有重要的节能、环保及经济价值<sup>[1-2]</sup>。除此之外,洗浴中心和游泳池<sup>[3]</sup>、油田<sup>[4]</sup>、药厂、啤酒厂、医院等的污水均可以因地制宜地回收热能以满足自身的工艺用能或厂区供热制冷的需要<sup>[5]</sup>。但由于污水水质恶劣,要实现污水冷热量的有效传递与转换,必须克服污物对换热设备的阻塞与污染问题<sup>[6]</sup>。针对这一问题,国内外开发了一些系统应用工艺。挪威、瑞典采用淋水式污水

换热器<sup>[7-8]</sup>,蒸发器每3~5 d用高压水冲洗一次,每年有1~2次化学清洗。日本开发的壳管式污水源热泵系统,传热管内带有自动移行的毛刷,并附有毛刷收容器以及可改变管内水流方向的四通阀<sup>[9-10]</sup>。管道的日冲洗次数为4~6次<sup>[11]</sup>,需要定期更换管道内毛刷。中国的大量研究侧重于污水冷热源的价值与前景方面,而对流动阻塞与换热问题研究较少,应用侧重于浸泡式系统,即将盘管直接浸泡在污水坑池中。由于是自然对流,且换热温差小,所需换热

收稿日期:2010-12-26

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAJ01A06)

作者简介:沈朝(1984-),男,博士生,主要从事污水源热泵的高效利用研究,(E-mail)Shenchao030647@163.com。

姜益强(通讯作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)jyq7245@163.com。

面积大,相应的管材用量和污水坑的体积都极大,其前景并不乐观<sup>[12]</sup>。针对这一问题,本文介绍了一种具有自动管外除污功能的壳管式污水换热器。自动除污型污水-水壳管式污水换热器是污水源热泵系统的关键设备之一,是笔者在污水换热器方面提出的一种除污装置<sup>[13]</sup>。该装置起到连续换热和除污的作用,其核心部件为管外除污设备。文章介绍了自动除污型污水-水换热器的结构原理,建立了污水-水换热器合理的数学模型,采用矩阵控制的方法求解模型,并对该换热器的运行特性进行了模拟研究。

## 1 自动除污型污水换热器的工作原理和结构尺寸

自动除污型污水-水换热器应用于间接式污水源热泵系统,系统原理如图 1 所示。

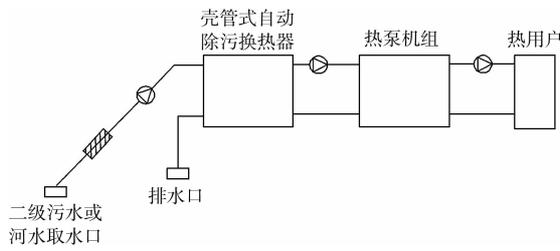
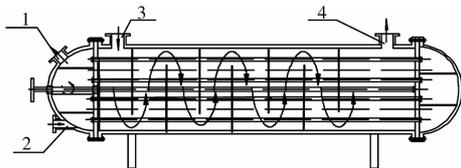


图 1 间接壳管式污水源热泵系统示意图

与以往不同,管外自动除污型污水换热器有其特有的结构(见图 2)。1)污水在管外流动,循环水在管内流动,两侧流体在流动过程中换热。2)壳体中心轴上设有一根可以转动的转轴,上面刻有螺纹。折流板由 2 块不锈钢板和中间橡胶夹层组成。折流板设置成独立体,中间转轴和换热管穿过折流板。中间转轴与折流板以螺纹连接,换热管与折流板的胶皮夹层接触。该设备除污时转动中间转轴,在螺纹作用下折流板沿轴向移动。折流板橡胶夹层刮擦换热管实现自动除污。



1. 循环水出口;2. 循环水入口;3. 污水入口;4. 污水出口

图 2 污水-水壳管式换热器结构示意图

污水-水壳管式换热器主要包括壳体、循环水转向端盖、换热管、折流板、管板以及中间转轴等。换热管穿过折流板并通过管箍固定在管板上,可以拆卸。折流板由 2 个塑料夹板和中间的胶皮夹层组成,上下交错依次在壳体内轴向排开。污水从壳体

上侧左端进入右端流出,在壳体内受折流板的作用而上下迂回前进。循环水由管程的左下端进入换热管,经过 6 个管程后从左上端流出管程。循环水的转向是通过两端的端盖实现的,在转向腔体内循环水充分混合。两侧流体在壳体内实现污水与循环水的换热。换热管材质可根据经济条件等选用钛、铝塑、紫铜、黄铜、镀锌铜管、碳钢电镀铜合金、不锈钢等。为防止锈蚀,与污水接触的其他装置,如壳体、管板等都采用镀锌材质。

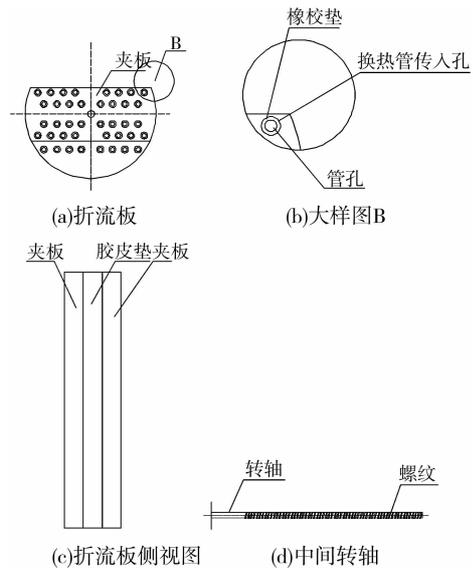


图 3 污水-水换热器部件图

针对夏季运行工况设计了 2 种不同换热面积的污水-水壳管式换热器。污水进/出口温度为 20/28 °C,循环水设计进/出口温度为 33/23 °C。换热管采用紫铜光管,壳体采用不锈钢材料。具体参数见表 1。

表 1 换热器的结构尺寸

名称	换热器一	换热器二
壳体直径 $D/m$	0.7	0.7
单管程长度 $L/m$	4	3.51
单管总根数 $N$	615	615
折流板间距 $B/m$	0.23	0.23
折流板数目	16	15
换热管间距 $S/m$	0.024	0.024
换热管外径 $d_o/m$	0.019	0.019
换热管内径 $d_i/m$	0.015	0.015
换热面积/ $m^2$	131.38	115.29

## 2 模型的建立和理论分析

对换热器的模拟首先要建立壳管式换热器的数学模型。换热器管程数为  $n$ ,在每一管程有  $m$  根换

热管。由于在换热器两端循环水转向端盖的作用,同一管程中每根换热管的入口端循环水温度相同,在出口端循环水混合,温度也将一样。这样同一管程中的换热管换热特性基本一致。污水侧,轴向上通过折流板将污水分成若干程。

将模型微元划分,左右方向以折流板为分界线划分为 $j$ 列,上下方向污水横掠一个管程划分为一个微元,如图4中微元块1。由于换热器除污功能的要求,第 $j$ 列的轴向宽度为 $2 \times B$ ,是其它列宽度的2倍。第 $j$ 列仍按微元块1划分,换热面积为微元块1的2倍(为方便描述以后也称为微元块1)。在第1列和第 $j$ 列分别划分为5个微元块1。第2列至第 $j-1$ 列分别划分出4个微元块1。污水流过上缺口折流板和下缺口折流板时,以微元块2的方式划分,如图4中微元块2。所以划分出 $5 \times 2 + 4 \times (j-2) + (j-1)$ 个微元块。这是分布参数法建模。由于污水、循环水多管程多壳程交叉换热,使得模拟计算中不能按一侧流体的流向依次计算出微元块参数。这里需同时设出各微元块参数,通过匹配同时求解。

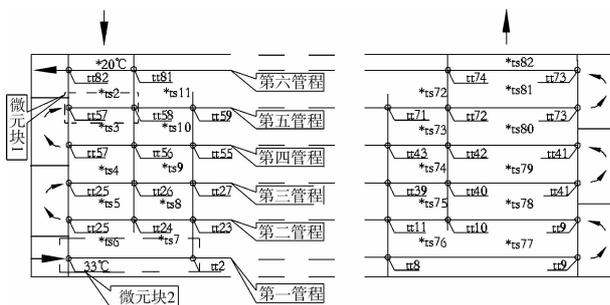


图4 污水-循环水换热器的模型图

按循环水的流动方向,在每个微元块的进口、出口处分别设出循环水平均参数。每个微元块循环水的出口参数也是下一个微元块入口参数。在污水流动方向上,在每个微元入口、出口处分别设出污水的平均参数,每个微元块污水的出口参数也是下一个微元块污水的进口参数。入口条件包括流体的温度、流量等。在每个微元块的计算中,分为循环水侧和污水侧2部分。

换热过程由循环水侧流动换热和污水侧流动换热2个环节组成。由此可计算各微元的未知量。

循环水侧:

$$q_t = \bar{m}_t \times c_{p,t} \times (t_{t,i} - t_{t,o}) \quad (1)$$

$$\text{污水侧: } q_s = \bar{m}_s \times c_{p,s} \times (t_{s,o} - t_{s,i}) \quad (2)$$

$$\text{制冷剂侧与污水侧传热方程: } q = KA\Delta t \quad (3)$$

$$\text{微元块1传热面积: } A = \frac{\pi(d_i + d_o)}{2} \times B \quad (4)$$

微元块2传热面积:  $A = \pi(d_i + d_o) \times B$  (5)  
式中: $B$ 为折流板间距; $\Delta t$ 为换热温差; $K$ 为传热系数。

$$q_t = q_s = q \quad (6)$$

对整个换热过程编制程序,就得到了壳管式换热器的分布参数模型,程序算法流程图见图5。

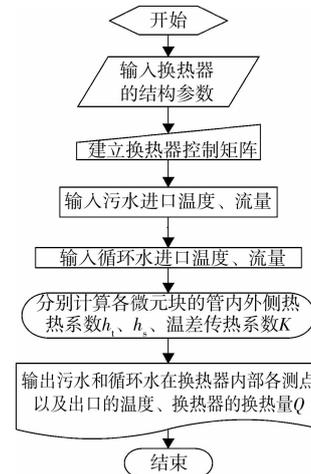


图5 管外除污型污水换热器的算法流程图

### 3 模拟结果及分析

因为在实际运行时,换热器污水、循环水进出口温度都要求有一个特定值,故流量比也是一个固定值。本次模拟中按 $M_s/M_t = 1.25$ 的比例取值。模拟中,污水入口温度为 $20^\circ\text{C}$ ,循环水入口温度为 $33^\circ\text{C}$ 。污垢热阻在换热器未除污时选定TEMA标准推荐的未净化污水在温度小于 $52^\circ\text{C}$ 的污垢热阻值 $5.28 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ,由于残余污垢,除污后污垢热阻取 $2.84 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  [14]。对表1中所设计的2种换热面积的污水换热器进行模拟研究。

图6、7分别为除污后污水流量为 $14.91 \text{ kg/s}$ 、循环水流量为 $11.98 \text{ kg/s}$ 时换热器一中污水和循环水的温度沿流动方向的分布情况。从图6中可以看出,污水沿流动方向温度整体呈上升趋势,但在微元序号为72、79的局部区段温度出现下降趋势;与之对应,在图7中循环水的温度总体呈下降的趋势,但在微元序号为50、75的局部区段有温度上升的趋势。经分析,图6污水温度下降的区段与图7中循环水温度上升区段恰好处在同一个微元内,这一现象符合能量守恒定律。整个换热过程目的是循环水向污水传递热量,但在局部却出现了污水向循环水传递热量现象,故我们将这种现象称为“热量反交换”。

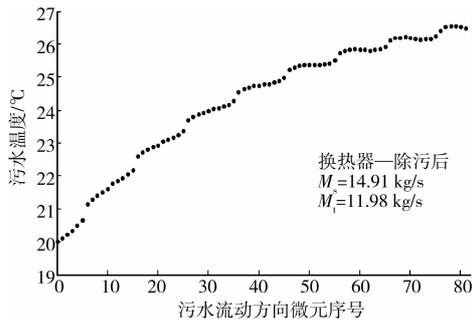


图 6 有热量反交换时污水温度变化

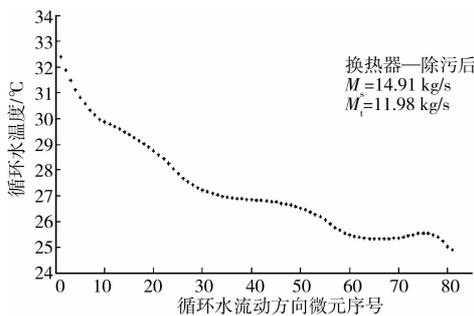


图 7 有热量反交换时循环水温度变化

通过多组污水以及循环水温度分布曲线可知“热量反交换”现象多发生在换热器的右上角,如图 8 所示。此处为污水出口与循环水最后 2 个管程交叉处。这是由于污水在循环水第一管程末端(换热器右下角)与刚流入换热器的高温循环水换热,温度升高后,直接流到第 5、6 管程(换热器右上角)与将要流出换热器的低温循环水换热。此处污水温度高于循环水温度,故出现“热量反交换”。此过程污水充当载热体将第 1 管程中循环水的热量传递给第 5、6 管程中低温循环水,产生热短路。图 9、10 为两侧流体流量增加后,换热器一中污水以及循环水温度沿流动方向的分布图。从图中可以看出两侧流体温度在流动方向呈单调的趋势,并没有出现“热量反交换”现象。

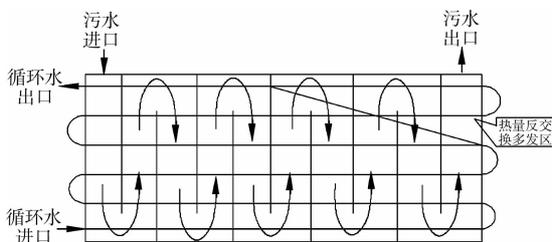


图 8 热量反交换多发区示意图

图 11 给出了“热量反交换”微元个数的变化情况。进而分析了影响“热量反交换”的因素。其中换热器二的换热面积比换热器一的小(见表 1)。图中可以看出,随污水流量的增加,热量反交换区域减小直至消失。在相同污水流量下,换热器的换热面积

越大热量反交换区域越大,并且除污后热量反交换区域会增大。由此说明除污作用相当于增大了换热器的换热面积。结果表明,“热量反交换”区域的大小与两侧流体的流量、换热器换热面积的大小以及是否除污有关。

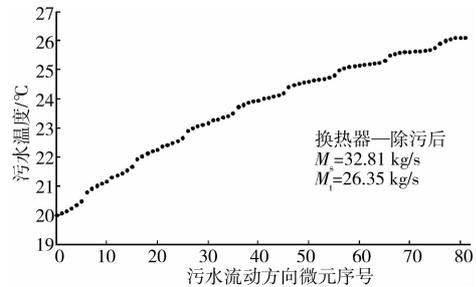


图 9 无热量反交换时污水温度变化

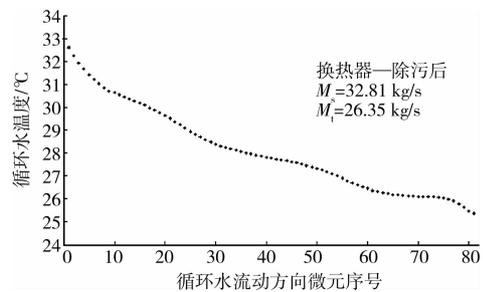


图 10 无热量反交换时循环水温度变化

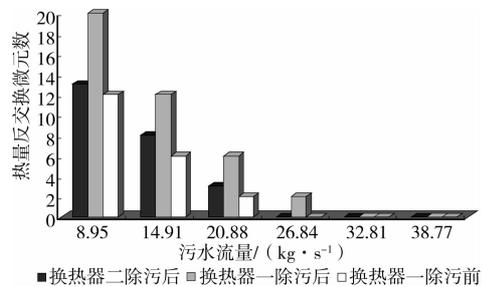


图 11 热量反交换微元个数与污水流量关系

图 12 为换热器一除污前后换热量随污水流量变化关系。结果显示,除污后要比除污前的换热量大。且换热量随两侧流体流量的增加呈直线上升。图 9、12 综合说明,将除污功能应用于壳管式换热器,减小换热器的体积,使其恰好不发生“热量反交换”现象,是壳管式污水-水换热器的最佳运行工况。

图 13 所示为两侧流体的进出口温差随流量变化关系。随着流量的增加,污水以及循环水的进出口温差稍有降低的趋势,但降低程度并不明显,循环水温差从 8.19°C 降到了 7.24°C;污水温差从 6.55°C 降到了 5.79°C。这个温度变化在实际工程中是微乎其微的可以忽略。所以对一个已定的换热器,当两侧流体的进口温度给定时,流量变化对流体出口温度的影响很小。

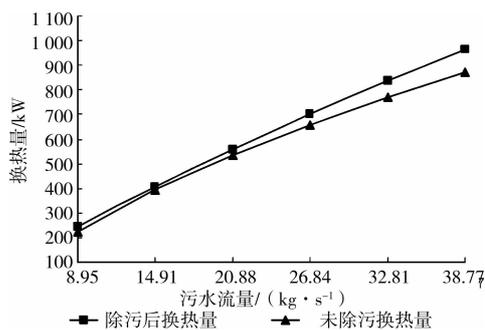


图12 换热器一除污前后换热量随流量的变化

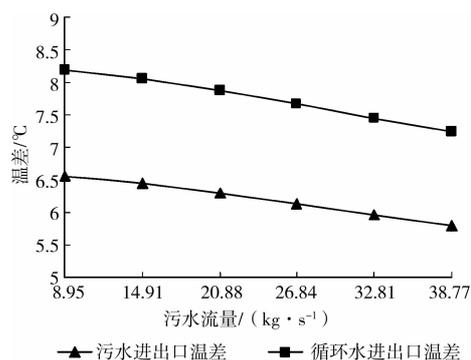


图13 换热器二两侧流体进出口温差与流量的关系

## 4 结论

提出了除污型污水-水壳管式换热器,阐述了其结构原理。采用数值模拟的方法对其进行了模拟研究,得到如下结论:

1)当流量小换热器面积较大时,在换热器的局部会出现热短路即“热量反交换”现象。两侧流体流量越大,热量反交换面积越小。

2)除污后壳管式换热器可大大提高换热量。将除污功能应用于壳管式换热器,并相应减小换热器的体积,使其恰好不发生“热量反交换”现象,是壳管式污水-水换热器的最佳运行工况。

3)对一个已定的换热器,当两侧流体的进口温度给定时,流量变化对流体出口温度的影响很小。

### 参考文献:

- [1] 江亿. 我国建筑能耗状况及有效的节能前途[J]. 暖通空调, 2005, 35(5):30-40.  
JIANG YI. Current building energy consumption in China and effective energy efficiency measures [J]. HV&AC, 2005, 35(5): 30-40.
- [2] 管成,史琳,程邨,等. 再生水二级出水水温特点与热利用[J]. 华北电力大学学报, 2007,34(2): 31-34.  
ZAN CHENG, SHI LIN, CHENG YE, et al. Temperature characteristics of secondary effluent and its thermal application [J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(2):31-34.
- [3] BAEK N C, SHIN U C, YOON J H. A study on the

design and analysis of a heat pump heating system using wastewater as a heat source[J]. Solar Energy, 2005, 78(3):427-440.

- [4] TANG G H, ZHUANG Z N. Analysis of the energy-saving plan of the heaters in an oil refinery [J]. Chemical Machinery, 2000,6:352-354.
- [5] HOLMGREN K. Role of a district-heating net work as a user of waste heat supply from various sources the ease of Goteborg[J]. Applied Energy, 2006,83(12): 1352-1354.
- [6] 吴荣华,林福军,孙德兴.城市原生污水冷热源应用的关键因素研究[J]. 哈尔滨商业大学学报:自然科学版, 2004,20(6):95-97.  
WU RONG-HUA, LIN FU-JUN, SUN DE-XING. Study on key sectors of applying untreated sewage water of city using as cool and heat sources[J]. Journal of Harbin University of Commerce; Natural Sciences Edition, 2004,20(6):95-97.
- [7] 刘光远,陈兴华. 俄罗斯热泵新技术介绍[J]. 能源研究与利用, 2001(3): 17-19.  
LIU GUANG-YUAN, CHEN XING-HUA. Russia's new technology for heat pump [J]. Research and Utilization of Energy. 2011(3): 17-19.
- [8] 吴荣华,孙德兴. 哈尔滨望江宾馆利用城市污水中的能源[J]. 中国给水排水, 2003(12): 92-93.  
WU RONG-HUA, SUN DE-XING. Energy use of urban sewage in Wang Jiang Hotel Harbin[J]. China Water & Wastewater, 2003(12):92-93.
- [9] NORIO A. Evaluation of energy use in district heating and cooling plant using sewage and one using air as heat source [J]. Journal of the Japan Institute of Energy, 2000(5): 446-454.
- [10] YOSHII T. Technology for utilizing unused low temperature difference energy[J]. Journal of the Japan Institute of Energy, 2001(8):696-706.
- [11] 尹军,陈雷,王鹤立. 城市污水的资源再生及热能回收利用[M]. 北京:化学工业出版社, 2003.
- [12] 吴荣华,孙德兴,张成虎,等. 城市污水源热泵的应用与研究现状[J]. 哈尔滨工业大学学报,2006,38(8):1326-1329.  
WU RONG-HUA, SUN DE-XING, ZHANG CHENG-HU. Application and progress of urban wastewater as a cool and heat source[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006,38(8): 1326-1329.
- [13] 姜益强,姚杨,马最良,等. 具有快速除污功能的完全可拆装的管壳式换热器:中国, ZL200810064925.7[P]. 2010-06-23.
- [14] 吴荣华,孙德兴,张成虎,等. 热泵冷热源城市原生污水的流动阻塞与换热特性[J]. 暖通空调,2005,35(2):86-88.  
WU RONG-HUA, SUN DE-XING, ZHANG CHENG-HU, et al. Flowing block and heat transfer characteristics of urban sewage as cold and heat source of heat pumps[J]. HV & AC, 2005, 35(2):86-88.