

# 污水源冷热水机组的热力学分析

付红春<sup>1</sup>, 杜 垚<sup>1</sup>, 张建忠<sup>2</sup>

(1 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096 2 南京市建筑设计研究院, 江苏 南京 210005)

[摘要] 简要介绍污水源冷热水机组的工作原理及污水源的特性, 详细阐述了污水源冷热水机组在制冷和热泵工况下的各个设备的损失及整个机组的效率计算公式, 计算分析了机组在夏季制冷和冬季制热工况下各个设备在不同污水温度下的损失系数及整个机组的效率, 夏季制冷工况时, 机组的效率为 41.6% ~ 48.7%, 热泵工况时, 机组的效率为 54.2% ~ 59.1%。所得结果为提高系统的效率提供了有效途径。

[关键词] 污水源, 冷热水机组, 效率

[中图分类号] TK11+5 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2008)02-0036-05

## Thermodynamic Analysis of a Wastewater Source Plant Both as a Water Chiller and a Heat Pump

Fu Hongchun<sup>1</sup>, Du Kai<sup>1</sup>, Zhang Jianzhong<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Environment Southeast University, Nanjing 210096 China

2. Nanjing Architectural Design and Research Institute Co. Ltd, Nanjing 210005 China)

**Abstract** The working principles of wastewater source plant both as a water chiller and a heat pump and performances of wastewater source are briefly introduced in this paper. Then calculating formulas on exergy destroys in refrigeration and heat pump states of main units in wastewater source plant and exergy efficiency of this kind of plant are minutely stated which are used to analyze exergy losses in main units and exergy efficiency of the plant with different temperature wastewater sources in refrigeration and heat pump states. Exergy efficiency of the plant vary from 41.6% to 48.7% in cooling condition and from 54.2% to 59.1% in heating condition. According to the results, efficient approaches to increase exergy efficiency of wastewater source plant both as a water chiller and a heat pump are presented.

**Key words** wastewater source, plant both as a water chiller and a heat pump, exergy efficiency

近年来随着我国国民经济生产的发展, 城市污水排放量逐年增加. 据 2005 年国民经济和社会发展统计公报显示: 2005 年全年城市污水排放量达 610 亿 m<sup>3</sup>, 城市污水处理率达到 48.4%, 其中南京地区的日污水排放量为 130 万 t 左右, 城市污水处理率达到 80%. 中国是个严重缺水的国家, 因此污水的回收再利用越来越受到关注, 并且一些城市已在实际工程中运用. 南京市“十一五”期间将铺设超过 60 km 的城市污水再生利用管道, 这为城市二级污水作为热泵空调系统的热源提供了有利的条件<sup>[2]</sup>. 有效地利用城市污水中的热能, 为满足人们对 100℃ 以下的低温能源的需求开辟了一条新的途径, 具有长远的社会效益.

### 1 污水源冷热水机组的工作原理

污水源热泵冷热水机组的原理如图 1 所示, 夏季制冷时以城市污水作为冷凝器侧的冷源, 通过制冷循环取低温以满足用户制冷空调的需求; 冬季供热时以城市污水作为热源, 通过电驱动的压缩机把污水中蕴涵的低品位热能转变为更高品位的热能供给用户使用. 这种装置即可用作制冷降温设备, 又可用作供热采暖设备, 从而实现一机两用.

收稿日期: 2007-12-16

通讯联系人: 杜 垚, 教授, 研究方向: 制冷及低温工程. E-Mail: du-ka@seu.edu.cn

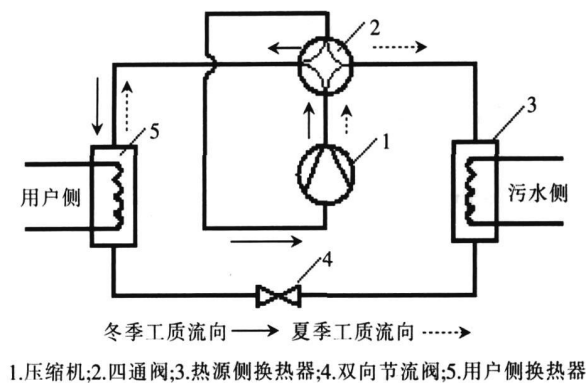


图1 污水源冷热水机组原理图  
Fig.1 Schematic diagram of the wastewater source plant both as a water chiller and a heat pump

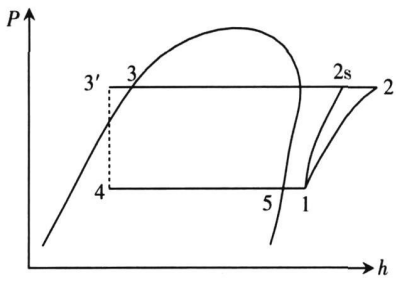


图2 循环  $p-h$  图  
Fig.2 Circulation  $p-h$  diagram

2 城市污水的特性<sup>[3, 4]</sup>

城市污水全年保持相对较高且稳定的温度, 而且具有以下特点: a) 流量大且全年流量稳定; b) 夏季温度低于室外温度, 冬季高于室外温度, 而且在整个供暖季和制冷季, 水温波动不大. 据国家统计局 2005 年全国各地区城市污水排放和处理情况的统计数据可知, 2005 年全国城市污水排放量为 359.52 亿 t, 污水处理厂集中处理率为 39.36%. 据北京高碑店污水处理厂长期测量的数据显示: 冬季污水水温为 13.5~16.5, 高出气温 20 多; 夏季污水水温为 22~25, 又比气温低 10 多. 通过对南京市城北污水处理厂的调查测量, 数据显示污水处理厂出来的二级出水夏季温度维持在 22~24, 冬季维持在 11~13, 全年污水温度变化在 15 以内, 具有冬暖夏凉的特点.

3 热泵系统的热力学性能分析

3.1 系统分析<sup>[5~8]</sup>

的概念既包含了热力学第一定律的内容, 又包括了热力学第二定律的内容, 所以既能说明能量的数量情况, 又能说明能量的质量情况 (即能量品位的高低), 而且突出了有关能量的性质、能量的损失和能量的转换效率等问题. 对系统进行分析时, 就可以对系统的能量分配情况从数量和质量两方面进行说明, 能够找出真正的损失所在, 从而找出节能的合理途径. 从这方面看, 分析比一般的能量平衡分析 (即热平衡分析法) 更合乎实际. 根据平衡关系式及建立效率公式的原则, 可以得出污水源冷热水机组的效率的计算公式.

系统损失最终评价的准则是多样的, 这主要取决于分析的目的. 如果以性能为出发点, 要求设计的效率最高, 则就应使系统总损失为最小; 如果是以整个使用期的费用最小为目标, 则应将系统的损失与设备成本费用联系起来, 以总费用为目标函数, 通过参数优化使目标函数达到最小; 如果以节能为目标, 分析的主要目的是揭示系统中损失的部位、类型和数量, 通过研究减少这些损失, 来最大限度地提高系统效率. 本文主要分析机组各设备的损失以寻找提高系统的效率的最有效途径.

现以如图 1 所示的循环为研究对象, 对污水源冷热水机组的损失进行分析, 计算各部件的损失. 本文的研究对象是直接换热式污水源冷热水机组, 其循环过程如图 2 所示, 循环忽略换热器及管道的压降损失. 该机组具有制冷和热泵双重功能, 夏季制取冷冻水, 冬季制取热水.

冷热水机组设备各部件的分析.

夏季制冷工况:

压缩机:

$$ex_{des, cp} = ex_{in, cp} - ex_{out, cp} + ex_{cp} = ex_1 - ex_2 + w_{cp}; \tag{1}$$

节流阀:

$$ex_{des, v} = ex_{in, v} - ex_{out, v} = ex_3 - ex_4; \tag{2}$$

蒸发器 (用户侧换热器):

$$ex_{des\ ev} = ex_{in\ ev} - ex_{out\ ev} - ex_{q1} = ex_4 - ex_1 - (ex_{w2} - ex_{w1});$$

(3)

冷凝器 (污水侧换热器):

$$ex_{des\ co} = ex_{qw} - (ex_{out\ co} - ex_{in\ co}) = ex_{w3} - ex_{w4} - (ex_3 - ex_2);$$

(4)

制冷工况 平衡方程式:

$$ex_{cp} + ex_{qw} = ex_{q1} + ex_{des};$$

(5)

制冷工况系统 效率:

$$ex = \frac{ex_{q1}}{ex_{pay}} = \frac{ex_{q1}}{ex_{cp} + ex_{qw}}.$$

(6)

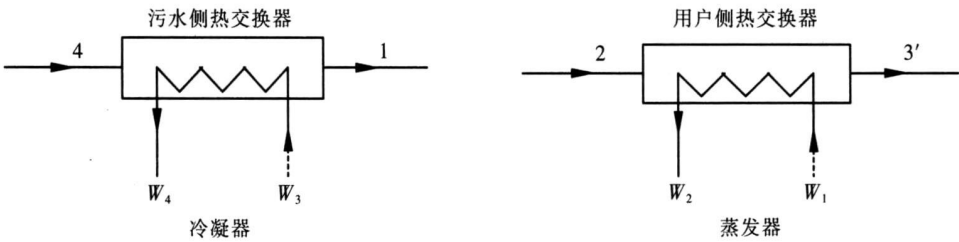


图 3 夏季制冷工况换热器流程图

Fig.3 Schematic diagram of the heat exchanger in cooling condition in summer

冬季热泵工况:

压缩机:

$$ex_{des\ cp} = ex_{in\ cp} - ex_{out\ cp} = ex_1 - ex_2 + w_{cp};$$

(7)

节流阀:

$$ex_{des\ v} = ex_{in\ v} - ex_{out\ v} = ex_3 - ex_4;$$

(8)

蒸发器 (污水侧换热器):

$$ex_{des\ ev} = ex_{qw} - (ex_{out\ ev} - ex_{in\ ev}) = ex_{w3} - ex_{w4} - (ex_1 - ex_4);$$

(9)

冷凝器 (用户侧换热器):

$$ex_{des\ co} = ex_{in\ co} - ex_{out\ co} - ex_{qh} = ex_2 - ex_3 - (ex_{w2} - ex_{w1});$$

(10)

热泵工况 平衡方程式:

$$ex_{qw} + ex_{cp} = ex_{qh} + ex_{des};$$

(11)

热泵工况系统 效率:

$$ex = \frac{ex_{qh}}{ex_{pay}} = \frac{ex_{qh}}{ex_{cp} + ex_{qw}}.$$

(12)

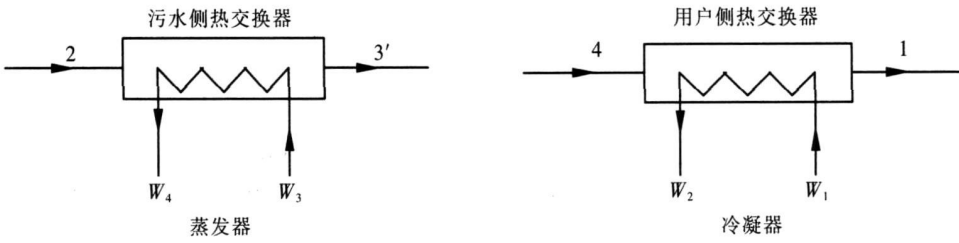


图 4 冬季热泵工况换热器流程图

Fig.4 Schematic diagram of the heat exchanger in heating condition in winter

制冷工况及热泵工况各设备的 损系数:

$$= \frac{ex_{des}}{ex_{pay}}.$$

(13)

式 (1) ~ (13) 中,  $ex_{des}$  为单位 损  $/(kJ/kg)$ ;  $ex_{in}$  为进入的单位  $/(kJ/kg)$ ;  $ex_{out}$  为出去的单位  $/(kJ/kg)$ ;  $ex_{qw}$  为污水 损 单位 损  $/(kJ/kg)$ ;  $ex_{q1}$  为 冷量 单位 损  $/(kJ/kg)$ ;  $ex_{qh}$  为 热量 单位 损  $/(kJ/kg)$ ;  $ex_{pay}$  为 耗 费  $/(kJ/kg)$ ; 为 损 系数;  $ex$  为 效率.

下标: cp 为压缩机; v 为节流阀; ev 为蒸发器; co 为冷凝器.

3 2 实例计算分析

污水源冷热水机组的污水温度夏季在 15~ 27 之间变化, 冷水机组以污水作为冷却水制取 12~ 7 的冷冻水; 冬季污水温度在 10~ 20 之间变化, 热水机组以污水作为热源, 依热泵工况运行制取 40~ 45 的热水. 冬、夏季污水进出口均取 5 温差, 换热器采用的是逆流式, 两换热器的换热介质 (污水、用户侧冷热水) 的进口与制冷剂出口的温差取 6 , 过冷度和过热度均取 3 , 压缩机绝热效率取 0.75 本文设定环境状态为: 夏季: 33 、1bar 冬季: 0 、1bar

在夏季制冷工况时, 保持冷水机组冷冻水的进出口温度保持不变 (12/7 ), 污水的温度在 15~ 27 之间变化时, 依照上述的公式 (1) ~ (6) 及公式 (13) 可以得出: 随着污水温度的变化, 系统的各个设备的损系数见图 5 系统的总 效率及 COP 值的变化见图 6 系统运行时从污水中提取的 值及其占总输入的比率见图 7 在冬季热泵工况时, 保持热水机组制取的热水进出口温度保持不变 (40/45 ), 污水的温度在 10~ 20 之间变化时, 依照上述的公式 (7) ~ (12) 及公式 (13) 可以得出: 随着污水温度的变化, 系统的各个设备的 损系数见图 8 系统的总 效率及 COP 值的变化见图 9 系统运行时从污水中提取的 值及其占总输入的比率见图 10

3 3 结果及分析

通过以上对机组各个设备的详细计算可以看出, 在夏季制冷工况时, 随着污水温度的上升, 压缩机的压比增大, 导致单位质量制冷剂流量的耗功和节流损失增加, 冷水机组的 COP 值及 效率降低, 压缩机的 损系数增大, 蒸发器和冷凝器的 损系数略有降低, 机组从污水中得到的冷量 及污水输入 在整个机组输入 中所占的比率降低. 而冬季热泵工况各个设备的变化趋势和夏季制冷工况正好相反. 制冷工况时当水温高于 17 时各个设备中压缩机的 损所占的比例最大 (15.9% ~ 21.5%), 整个机组的 效率为 48.7% ~ 41.6%, 热泵工况时各个设备中压缩机的 损所占的比例最大 (15.5% ~ 17.8%), 整个机组的 效率为 54.2% ~ 59.1%.

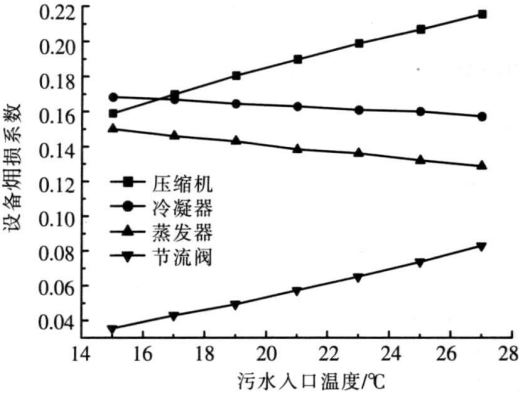


图 5 制冷工况各设备损系数的变化

Fig.5 The variation of the plant components efficiency defects in cooling condition

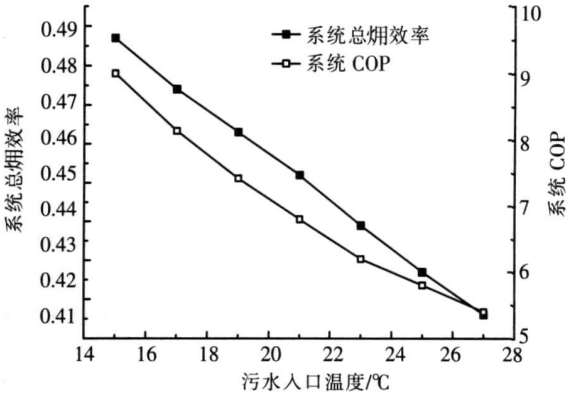


图 6 制冷工况系统的总焓效率及 COP 值的变化

Fig.6 The variation of the system total exergy efficiency and COP in cooling condition

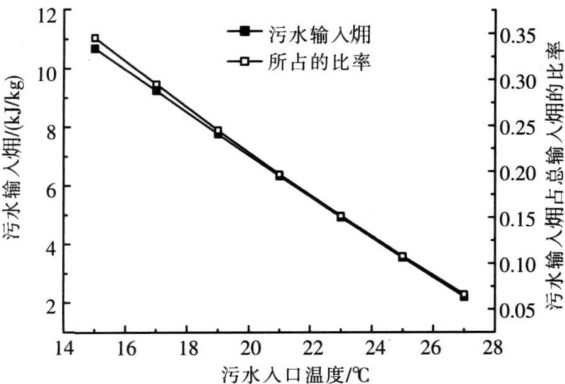


图 7 制冷工况自污水中提取的焓及其占总输入焓的比率

Fig.7 Exergy from waster water and the ratio account for total exergy in cooling condition

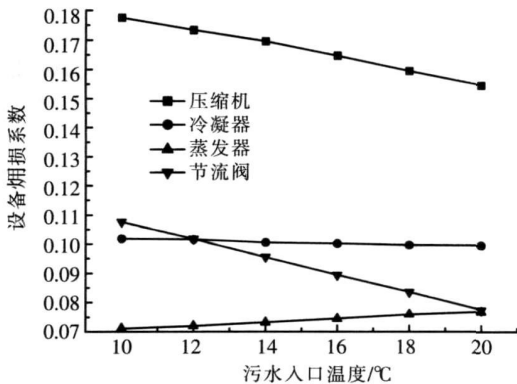


图 8 热泵工况各设备损系数的变化

Fig.8 The variation of the plant components efficiency defects in heating condition

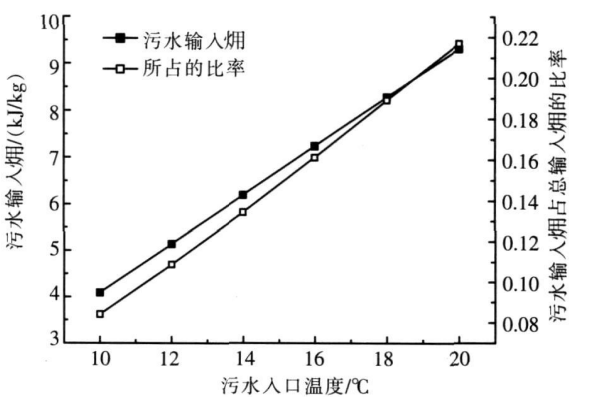
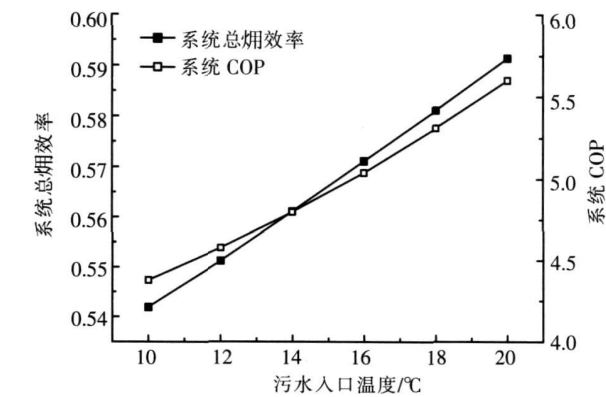


图 9 热泵工况系统的总烟效率及 COP 值的变化

Fig.9 The variation of the system total exergy efficiency and COP in heating condition

图 10 热泵工况自污水中提取的烟及其占总输入烟的比率

Fig.10 Exergy from waster water and the ratio account for total exergy in heating condition

4 结论

(1)通过 分析可以得出,夏季制冷工况时,随着污水温度的升高,冷水机组的 COP 值及 效率降低,整个机组的 效率为 48 7% ~ 41 6%,热泵工况时,随着污水温度的升高,热水机组的 COP 值及 效率升高,整个机组的 效率为 54 2% ~ 59 1%.

(2)污水源冷热水机组节能的主要部件是压缩机,提高压缩机本身的技术指标,是提高整个制冷系统效率的关键,整个机组换热器 损系数随污水温度的变化较小,而节流阀的 损系数随污水温度的变化比较明显.

[参考文献] (References)

[ 1 ] 龙惟定. 试论中国的能源结构与空调冷热源的选择取向 [ J ]. 暖通空调, 2000, 30( 5 ): 27-32  
Long Weidin China s energy structure and trends in heating /cooling source selection[ J ]. Joumal ofHV&AC, 2000, 30(5): 27-32 ( in Chinese)

[ 2 ] 南京两污水厂将配备中水回用设备. <http://www.jshb.gov.cn/jshb/showinfo/showinfo.aspx?infoid=b3a7618f-56a1-40e1-9cd1-aca976c7ecba>  
Equipment recovering reclaimed water will be equipped in two Wastewater Treatment Plant in nanjing <http://www.jshb.gov.cn/jshb/showinfo/showinfo.aspx?infoid=b3a7618f-56a1-40e1-9cd1-aca976c7ecba> ( in Chinese)

[ 3 ] 白莉. 城市污水热能利用技术的实验研究 [ D ]. 长春: 吉林大学, 2002 10-15.  
Bai Li Experimental research on recovery and utilization of urban sewage heat energy[ D ]. Changchun Jilin University, 2002 10-15 ( in Chinese)

[ 4 ] 周文忠. 污水源热泵系统和污水冷热能利用前景分析 [ J ]. 暖通空调, 2004, 34( 8 ): 25-29  
Zhou Wenzhong Prospect of sewage source heat pump systems and cooling and heating energy utilization of sewage[ J ]. Journal ofHV&AC, 2004 34( 8 ): 25-29 ( in Chinese)

[ 5 ] 杨思文, 余六一, 孔庆熙, 等. 高等工程热力学 [ M ]. 北京: 高等教育出版社, 1987  
Yang Siwen, Yu Liyi, Kong Qingxi et al. Advance Engineering Thermodynamics[ M ]. Beijing Higher Education Press, 1987 ( in Chinese)

[ 6 ] 傅秦生. 能量系统的热力学分析方法 [ M ]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005 32-45.  
Fu Qingsheng The thermodynamic Analysis Method of Energy System[ M ]. Xi an Xi an Jiaotong University Press, 2005 32-45 ( in Chinese)

[ 7 ] H km et Eser, Mustafa Inalli Mehmet Eser, et al. Energy and exergy analysis of a ground-coupled heat pump system with two horizontal ground heat exchangers [ J ]. Building and Environment, 2006( 10 ): 1-10

[ 8 ] Onder Ozgener, Arif Hepbasli 太阳能辅助热泵系统的能与 分析研究 [ J ]. 可再生能源研究, 2004( 12 ): 482-496  
Onder Ozgener, Arif Hepbasli A review on the energy and exergy analysis of solar assisted heat pump systems [ J ]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2004( 12 ): 482-496 ( in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]