

污水源热泵在公共浴室废水热回收工程中的应用

纪鹏磊^{a,b}, 林真国^{a,b}, 蒋晏平^{a,b}, 于祥雷^{a,b}

(重庆大学 a. 城市建设与环境工程学院; b. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:公共浴室的洗浴废水中有大量的可回收热量。针对不同热回收系统的节能效果进行比较,提出了基于污水源热泵系统的热回收系统及在实际工程应用中需要注意的问题。以实际该工程为例进行经济性分析,表明该废热回收系统可以大幅度减少运行费用,值得广泛推广。

关键词:废热回收;性能比较;热平衡;经济性分析

中图分类号: TU834.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S1-0263-04

Application of Sewage Source Heat Pump in Heat-Recovery of Public Bathroom WasteWater

Ji Penglei^{a,b}, Lin Zhengu^{a,b}, Jiang Yanping^{a,b}, Yu Xianglei^{a,b}

(a. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering;

b. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: There is enormous recyclable thermal energy in public baths bath wastewater. In this paper, the energy saving effect of different heat recovery systems had been compared, a heat recovery systems and some practical engineering problems are proposed, in which the sewage source heat pump works as the main equipment. Meanwhile as an example the paper made an economic analysis of the project, Proved that the operating costs could be substantially reduced by using the heat recovery systems and be worth to be promoted.

Key words: waste heat recovery systems; performance comparison; thermal equilibrium; economic analysis

节能问题现已成为世界各国广泛关注的焦点,我国是一个人口众多,人均能源较少的大国,如何可持续发展更是一项具有重大意义的任务。因此有效利用能源,开发新型可再生能源,回收剩余能源等研究已经成为热门课题。

《建筑给水排水设计规范》(GB 50015-2003)5.1.1条规定洗浴热水的使用温度为40~45℃,经过洗浴过程,排放的废水温度仍然达到30~35℃,因此排放废水中有大量的可利用热能;此外,公共浴室的洗浴废水相对于其他分散洗浴废水来说,具有水量大,排放时间集中,适合余热回收等特点^[1]。因此,公共浴室的废水热回收具有巨大的节能潜力。

污水源热泵在公共浴室废水热回收系统具有良好的应用条件。二者结合不仅可以取得很好的节能效果,而且洗浴废水的水质满足一般机组直接使用的要求,解决了一直阻碍污水源热泵推广应用的水质问题^[2],简化了热回收系统,降低了初投资和运行费用。本文基于污水源热泵在公共浴室废水热回收工程中的应用开展相关分析。

1 废热回收系统的主要形式

不同的废热回收系统有不同的初投资和节能效果,因此选择合理的废热回收系统关系到废热回收工程的效益。如

今广泛采用的废热回收系统主要是直接式污水源热泵系统和间接式污水源热泵系统^[3]。

1.1 直接式系统

直接式污水源热泵系统主要应用于对水质要求较低的机组,洗浴废水由污水泵提升经水处理设备直接进入机组的蒸发器,放出热量后流回污水干渠(如图1所示)。

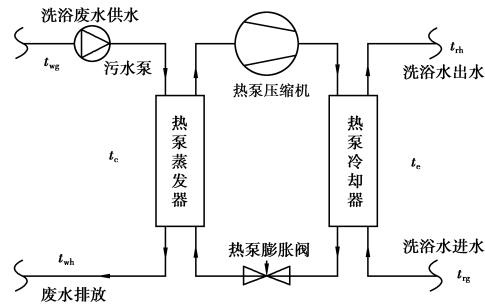


图1 直接式污水源热泵系统

热泵机组的制冷剂在蒸发器内直接吸收洗浴废水中的

热量,经热泵系统提升温度后将回收热量与机组能耗量之和释放到洗浴热水中。该系统的性能系数与洗浴热水在冷凝器侧的进出口温度及洗浴废水在蒸发器侧的进出口温度有关^[4]。

本工程采用的污水源热泵的蒸发器和冷凝器均为卧式壳管式,制冷剂与洗浴热水,洗浴废水的方式均为逆流。因此蒸发器处介质的对数平均温差为:

$$\Delta t_{m,e} = \frac{t_{w,g} - t_c - (t_{w,h} - t_e)}{\ln \frac{t_{w,g} - t_e}{t_{w,h} - t_e}} \quad (1)$$

$$\Delta t_w = t_{w,g} - t_{w,h} \quad (2)$$

其中: $\Delta t_{m,e}$ 为污水在蒸发器处换热的对数平均温差($^{\circ}\text{C}$), $t_{w,g}$ 、 $t_{w,h}$ 为污水进入、流出蒸发器的温度($^{\circ}\text{C}$), t_e 为热泵机组蒸发温度($^{\circ}\text{C}$), Δt_w 为污水在蒸发器处温降($^{\circ}\text{C}$)。

冷凝器处介质的对数平均温差为:

$$\Delta t_{m,c} = \frac{t_c - t_{r,h} - (t_c - t_{r,g})}{\ln \frac{t_c - t_{r,h}}{t_c - t_{r,g}}} \quad (3)$$

$$\Delta t_r = t_{r,g} - t_{r,h} \quad (4)$$

式中: $\Delta t_{m,c}$ 为热水在冷凝器处换热的对数平均温差($^{\circ}\text{C}$),

$t_{r,g}$ 、 $t_{r,h}$ 为热水进入、流出冷凝器的温度($^{\circ}\text{C}$), t_c 为热泵机组冷凝温度($^{\circ}\text{C}$), Δt_r 为洗浴水在冷凝器处温升($^{\circ}\text{C}$)。

根据式(1~4)计算可得^[5]

$$t_{c,z} = \frac{t_{r,g} \cdot e^{\frac{\Delta t_r}{\Delta t_{m,c}}} - t_{r,g} + \Delta t_r}{e^{\frac{\Delta t_r}{\Delta t_{m,c}}} - 1} \quad (5)$$

$$t_{e,z} = \frac{t_{w,h} \cdot e^{\frac{\Delta t_w}{\Delta t_{m,e}}} - t_{w,g}}{e^{\frac{\Delta t_w}{\Delta t_{m,e}}} - 1} \quad (6)$$

按逆卡诺循环计算直接式污水源热泵系统的理想性能系数^[6]为

$$\text{COP}_z = \frac{(t_{c,z} + 273.15)}{(t_{e,z} + 273.15) - (t_{c,z} + 273.15)} \quad (7)$$

1.2 间接式系统

间接式污水源热泵系统应用于对水质要求较高的机组,洗浴废水由污水泵提升经水处理设备后送入污水换热器换热,再将在换热器处加热的中介水送入机组的蒸发器换热(如图 2 所示)。

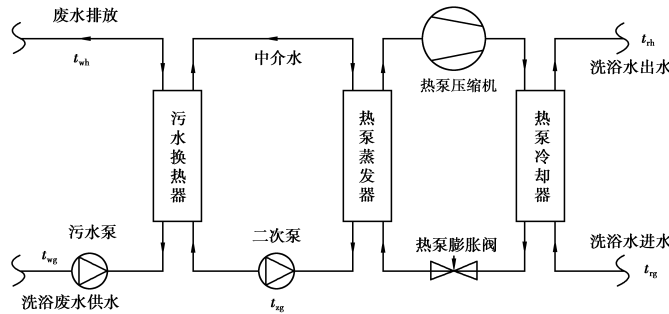


图 2 间接式污水源热泵系统

与直接式系统相同,需求出蒸发温度和冷凝温度用以计算系统性能系数,但在间接式系统中需要借助污水与中介水在换热器系统处的对平均温差^[7]。

$$\Delta t_{m,z} = \frac{t_{w,g} - t_{z,g} - (t_{w,h} - t_{z,h})}{\ln \frac{t_{w,g} - t_{z,g}}{t_{w,h} - t_{z,h}}} \quad (8)$$

$$\Delta t_{m,e} = \frac{t_{z,g} - t_c - (t_{z,h} - t_e)}{\ln \frac{t_{z,g} - t_e}{t_{z,h} - t_e}} \quad (9)$$

$$\Delta t_{m,c} = \frac{t_c - t_{r,h} - (t_c - t_{r,g})}{\ln \frac{t_c - t_{r,h}}{t_c - t_{r,g}}} \quad (10)$$

$$\Delta t_z = t_{z,g} - t_{z,h} \quad (11)$$

式中: $\Delta t_{m,z}$ 为中介水与污水在换热器处的对数平均温差($^{\circ}\text{C}$), $t_{z,g}$ 、 $t_{z,h}$ 为中介水进、出蒸发器的温度($^{\circ}\text{C}$), Δt_z 为中介水在蒸发器处温降($^{\circ}\text{C}$)。

因两系统采用相同的污水源热泵机组,因此蒸发器,冷凝器形式,各符号含义及介质流向均与直接式系统相同,在此不做多余介绍。

根据式(8~11)计算可得

$$t_{z,h} = \frac{(t_{w,g} - \Delta t_w) e^{\frac{\Delta t_w - \Delta t_r}{\Delta t_{m,z}}} - (t_{w,g} - \Delta t_z) t_{c,j}}{e^{\frac{\Delta t_w - \Delta t_r}{\Delta t_{m,z}}} - 1} \quad (12)$$

$$t_{c,j} = \frac{t_{r,g} \cdot e^{\frac{\Delta t_r}{\Delta t_{m,c}}} - t_{r,g} + \Delta t_r}{e^{\frac{\Delta t_r}{\Delta t_{m,c}}} - 1} \quad (13)$$

$$t_{e,j} = \frac{t_{z,h} \cdot e^{\frac{\Delta t_z}{\Delta t_{m,e}}} - t_{z,h} - \Delta t_z}{e^{\frac{\Delta t_z}{\Delta t_{m,e}}} - 1} \quad (14)$$

按逆卡诺循环计算间接式污水源热泵系统的理想性能系数为

$$\text{COP}_j = \frac{(t_{c,j} + 273.15)}{(t_{e,j} + 273.15) - (t_{c,j} + 273.15)} \quad (15)$$

1.3 两系统性能比较

1) 性能比较

在实际工程中,通常比较经过实际 COP 即应用电动机效率,压缩机效率等系数对理论 COP 修正后的数值。但直接式和间接式系统的理论 COP 都使用相同的修正系数修正,所以两系统的理论 COP 可以作为比较两系统性能指标^[8]。

为了方便比较两系统的性能参数比较,现做如下假设:

- ①两系统从污水中取相同的热量,即两系统的 Δt_w 相同,
- ②假设中介水在蒸发器处温降 Δt_z 与污水在蒸发器处温

降 Δt_w 相同。

通过比较式(5), (13), 不难得出在上述假设的情况下热泵机组冷凝温度 t_c 相等。结合系统性能系数的计算公式, 可知系统的性能系数主要取决于 t_c , 即两系统中蒸发温度高的那一个的性能系数 COP 更大。

现用 N 代表(6)式减去(14)式的结果^[9], 因假设 $\Delta t_z = \Delta t_w$, 则 $\Delta t_z = \Delta t_w = t_{w,g} - t_{w,h}$ 则

$$N = \frac{t_{w,h} \cdot e^{\frac{\Delta t_w}{\Delta t_{m,e}}} - t_{w,g} - (t_{z,h} \cdot e^{\frac{\Delta t_z}{\Delta t_{m,e}}} - t_{z,h} - \Delta t_z)}{e^{\frac{\Delta t_w}{\Delta t_{m,e}}} - 1} = \frac{t_{w,h} \cdot e^{\frac{\Delta t_w}{\Delta t_{m,e}}} + t_{z,h} - t_{z,h} \cdot e^{\frac{\Delta t_w}{\Delta t_{m,e}}} - t_{w,h}}{e^{\frac{\Delta t_w}{\Delta t_{m,e}}} - 1} = t_{w,h} - t_{z,h} \quad (16)$$

因为换热器内介质为逆流流动, 所 $t_{w,h} > t_{z,h}$, 即 $COP_z > COP_j$ 。

上述问题可理解为在从污水中取出相同热量及相同热负荷的情况下, 间接系统比直接系统多经过一道换热过程, 也就多损失一部分热量, 这样间接式系统的蒸发温度便会更低^[10]。因此, 直接式污水源热泵系统的性能系数要大。

2) 其他方面比较

直接式系统形式简单, 操作方便, 而且初投资较低, 同时能够更好的回收热量, 但污水易在机组蒸发器处结垢, 所以需要定时清洗机组^[11], 同时过高温度的水直接引入蒸发器会影响机组回油, 损伤压缩机, 降低机组使用年限。

间接式系统中使用中介水系统保证了水质, 减少机组结垢, 这样不仅保护了机组, 同时也保证了系统的性能系数。但采用污水换热器会增加系统的初投资、机房面积及运行费用。同时换热器处的结垢也会影响热回收效果。

2 公共浴室废热回收的工程实例

2.1 工程概况

本工程为沈阳地区一家公共浴室的废热回收工程, 下列是通过前期现场考察及后期工程运行中得出的实测数据: 冬季洗浴热水温度设置在 $41 \sim 44 \text{ }^\circ\text{C}$, 夏季洗浴热水温度 $38 \sim 42 \text{ }^\circ\text{C}$ 。洗浴废水的全年排放温度在 $30 \sim 32 \text{ }^\circ\text{C}$ 。洗浴废水的主要热损失发生在管道排水过程中, 到达废水池洗浴废水的温度约为 $31 \text{ }^\circ\text{C}$ 。沈阳地区的自来水的初始计算温度是在 $7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.2 系统简介

鉴于上文对直接和间接式系统的比较和洗浴废水的特殊性(即洗浴废水的温度比较高, 直接与蒸发器换热易损伤压缩机), 本工程采用梯级利用原理回收热能。所谓梯级利用^[12], 即回收 $30 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 的洗浴废水通过不同形式的换热器来预热自来水, 换热后降温的洗浴热水作为热泵的蒸发器的低温热源, 经预热后的自来水作为洗浴热水的补水进入机组。这样洗浴废水的排放温度将降至 $10 \text{ }^\circ\text{C}$, 甚至更低, 从而回收大量的热量。本工程的废热回收系统的具体流程如图 3 所示。

1) 洗浴废水从浴室流出后, 经过毛发收集器等简单的净化处理后, 排至污水储存池。

设置污水池的目的是使洗浴废水更加集中, 便于利用, 也便于对非满负荷情况下的工况进行调节, 相比使用变频泵

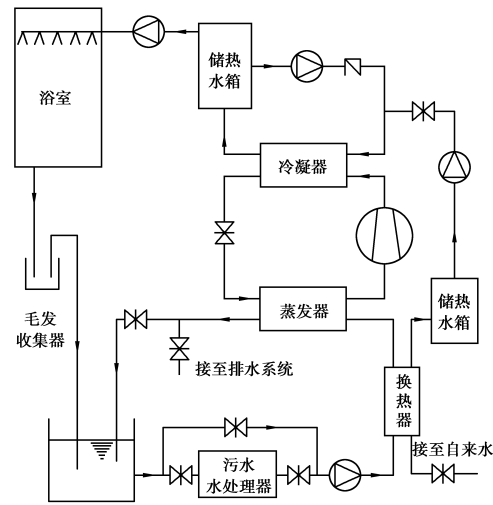


图 3 洗浴废水废热回收系统流程图

的调节方式^[13], 更加经济节能, 而且集中存放便于保温, 可以减少热损失, 回收的热量也越大。

2) 污水池中的洗浴废水经污水泵送至板式换热器同自来水换热, 换热后的洗浴废水继续作为水源热泵的廉价热源, 后排出。

根据不同工作条件和水质情况选择是否开启污水处理设备。另外如洗浴洗浴废水经过蒸发器后仍有很高的温度^[14], 那么可以将洗浴废水再次排至废水收集池。

3) 从板式换热器流出的自来水直接接入污水源热泵冷凝器内换热, 加热后的自来水作为洗浴的补水进入储热水箱以供洗浴。

整个洗浴热水的加热过程只需要耗费相对较少的电能^[15], 具有非常好的节能效果, 同时因为无化石燃料的燃烧, 大大降低了污染。因此本套系统具有比较大的推广空间和可行性。

3 系统经济性分析

以上述沈阳项目为例, 对污水源热泵系统, 燃气锅炉系统和燃油锅炉系统等三种热水供应方案分别进行经济性的分析比较。

首先核算出系统需要的总供热量, 然后计算各系统提供这些热量所需耗费的能源量, 最后计算所需费用, 并进行比较^[16-18]。

通过上表可以看出:

1) 与其他系统相比, 热泵系统在运行费用方面具有比较大的优势, 同时便于浴室今后扩建, 而且随着浴室扩建, 热泵系统将具有更大的节能效应和经济方面的优势。

2) 热泵机组不消耗化石燃料, 所以对于环境的污染最低, 同时安全性远远优于其他系统。

3) 热泵系统在机房的布置上更加灵活, 同时也省去了花费在燃料存放, 运输系统, 诸如储油间, 燃气管道上的费用。

热泵废热回收系统还具有安装简单, 便于控制的优点。虽然热泵系统的初投资较大, 但综合比较多个工程案例^[19], 污水源热泵废热回收系统还是最为经济的。因此, 该系统具有很大的推广价值。

表 1 不同系统的运行费用对比

	需要加热的 热量/kJ	废热回收的 热量/kJ	总热量 /kJ	所耗能源的 发热值 ^[14] /kJ	所耗费能源 的数量	所需能源 的单价	运行费用 /(元·天 ⁻¹)
热泵机组	1.9×10^7	8.1×10^6	2.7×10^7	3 600/kW·h	1 364 kW·h	0.86 元/kW·h	1 173
燃气锅炉	2.7×10^7	0	2.7×10^7	38 931/m ³	769 m ³	3.9 元/m ³	2 999
燃油锅炉	2.7×10^7	0	2.7×10^7	42 700 ⁴ /kg	702 kg	8.2 元/kg	5 756

4 工程中需要注意的几个问题

4.1 满足系统的设计计算

能量的梯级利用可以更好的回收能源,但是因为两个部分的热回收量不确定,容易出现板式换热器回收过多的热量,导致热泵机组无法正常工作^[20],因此该系统正常运行需要蒸发器出口的废水温度满足制冷剂的蒸发要求,本项目使用品牌的机组要求污水在蒸发器出口温度大于 9 °C。

以下是笔者使用 Matlab 软件确定换热器参数的选型的计算过程,具体运行过程如图 4 所示,其中:

V, V_w, V_r, V_l 分别为洗浴总水,洗浴废水,需要提供的热水,冷水的体积;

t_{wg}, t_{wz}, t_{wh} 分别洗浴废水进入换热器,流出换热器,流入蒸发器的温度;

$t_x, t_r, \epsilon_{th}, t_z, t_{yr}$ 分别指洗浴供水温度,洗浴热水温度,机组制热系数,自来水温度,预热水出板式换热器的温度。

会含有少量固体悬浮物和各种杂质^[1],同时因为污水需要先经过板式换热器,污水源热泵,若污水处理不当则会在重要设备处增大污垢热阻,从而导致整个系统的节能性下降^[8]。所以污水的处理对本系统有着比较大的影响。

实际工程可以采用水区侧开口,加除垢装置等方法减少污垢对系统的影响^[21]。本工程在系统中安装毛发收集器的同时安装污水处理仪,根据水质不同决定不同的水处理方式,从而减少因为污水水质的变化对系统性能带来的影响。

5 结论

1)污水源热泵在公共浴室废水热回收系统上具备良好的适宜性和工程应用价值,是值得推广的节能方案。

2)直接式污水源热泵废热回收系统的性能要优于间接式污水源热泵废热回收系统,在水质允许的情况下应优先考虑直接式系统。

3)污水源热泵废热回收系统在实际工程运行中取得了非常好的经济效益。以本项目为例,相比于原燃气锅炉系统,每日可以节省 54.2% 的费用。

4)污水源热泵系统在公共浴室废热回收工程的应用中仍需要注意换热器参数确定、增加备用热源和水质处理等实际问题,以保证系统正常运行并取得良好的节能效果。本工程中通过设置换热器参数将污水流出换热器的温度设置为 19.5 °C 时,污水流出蒸发器的温度为 9.6 °C,系统可以正常运行。

参考文献:

[1] 金振家,宫峰. 污水热能在建筑节能中的应用[J]. 建筑节能, 2009, 37(1): 67-69.

[2] Zhao X L, Fu L, Zhang S G, et al. Study of the performance of an urban original source heat pump system[J]. Energy Convers Manage, 2010, 51: 765-770.

[3] 吴荣华,岳利茜,李琪. 直接式与间接式污水源热泵系统的比较[J]. 暖通空调, 2011, 41(9): 111-114.

[4] Chua K J, Chou S K, Yang W M. Advances in heat pump systems; a review[J]. Apply Energy, 2010, 87 (12): 3611-3624.

[5] Torio H, Schmidt D. Development of system concepts for improving the performance of a waste heat district heating network with energy analysis [J]. Energy and Buildings, 2010, 42: 1601-1609.

[6] Yao Y, Song Y, Na W. Research of system performance of sewage-source heat pump with fouling effect[J]. (In Chinese) J Harbin Inst Technol, 2009, 39 (4): 99-603.

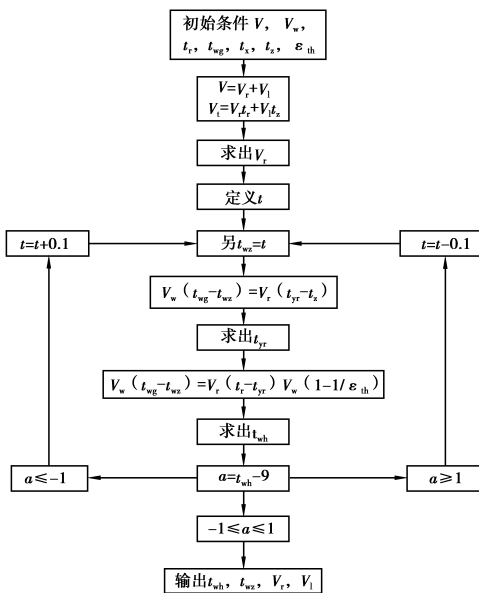


图 4 废热回收系统的设计计算流程图

4.2 备用热源和可靠性问题

在实际工程中,有时会出现没有废水的情况。比如:浴室第一次投入使用,设备检修,浴室扩建等。为了能使系统正常运行,有时需要对作为低温热源的废水或者自来水进行加热。因此需要考虑备用热源。为了适应不同热水负荷下的工况,设置废水收集池和中间水池也是非常必须的。

4.3 关于污水处理的问题

虽然洗浴废水经过简单处理,沉淀后水质比较好,但还

市现阶段政府办公建筑的总体能耗水平。通过能耗调研,为重庆市后期即将展开的大规模公共建筑节能改造和节能运行管理提供一定的参考。

通过调研分析,可以初步获得如下主要结论:政府办公建筑能源结构中,电耗占主要比例,燃气与燃油少量使用,因此,政府办公建筑节能的重点用能形式是电能;调研结果显示,政府办公建筑能耗密度随着建筑规模的增大而减小,而采用中央空调的建筑能耗大于非中央空调的建筑能耗;建筑采用节能管理优化措施可以降低建筑能耗。

随着重庆市建筑节能工作的不断深入推进,政府办公建筑的节能监管和改造工作也将作为试点示范推行,因此,客观的掌握和分析该类建筑的能耗分布和影响,将会为后续工作的开展奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 武涌,赵靖. 国外大型公共建筑节能运行管理:案例分析、经验做法与启示建议[J]. 城市发展研究,2009,12(16):1-9.
- [2] 重庆市城乡建设委员会关于下达我市国家机关办公建筑和大型公共建筑节能监管体系建设任务的通知(渝建[2010]171

号),2010.

- [3] Ding Y, Zhou X W, GAO Yafeng, et al. Features of AC system energy consumption of one hotel in Chongqing (Southwest district, China) and suggestions on its operating management[J]. Energy Education Science and Technology Part A-Energy Science And Research, 2011,28(1):63-70.
- [4] 张宇. 重庆市公共建筑能源审计实施细则的编制和应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
- [5] 梁境,李百战. 中国公共建筑节能管理与改造制度研究[J]. 建筑科学,2007,23(4):9-13.
- [6] Ding Y, Li B Z. Part load operation coefficient of air-conditioning system of public building[J]. Energy and Buildings 2010, 42(10):1902-1907.
- [7] Ding Y, Li B Z. Method for acquiring part load distribution coefficient of air conditioning system[J]. Journal of Central South University of Technology, 2009,16(1):95-99.
- [8] 张立文. 重庆市公共建筑空调运行现状调研及节能运行控制[D]. 重庆大学,2009年.

(编辑 胡英奎)

(上接第266页)

- [7] Wang K, Feng C, Xing Z W. Development and experimental validation of a high-temperature heat pump for heat recovery and building heating[J]. Energy Build., 2009,41:732-737.
- [8] 李建兴,赵力,池勇志. 不同换热形式的污水热泵工程运行能效分析[J]. 中国给水排水,2009,25(2):98-101.
- [9] Meggers F. Exergy optimized wastewater heat recovery: minimizing losses and maximizing performance Proceedings: 8th International Conference for Enhanced Building Operation (ICE-BO)[C]. German Federal Ministry of Economics and Technology, Berlin, October (2008)
- [10] Zhuang Z Y, Zhang C H, Wu D Z, et al. Optimization design for the heat-exchange conditions of the sewage source heat pump system[J]. Fifth international workshop on energy and environment of residential buildings and third international conference on built environment and public health, vols. I and II, 2009: 1626-1633.
- [11] 李瑞霞,李文伟,尤晶. 直接式污水源热泵系统在奥运村换热站中的应用[J]. 暖通空调,2009,39(5):139-141.
- [12] 黄春松等. 洗浴废热回收利用工程的技术与经济性分析[J]. 节能. 2010(02):69-71.
- [13] Zhuang Z Y, Zhang C H, Mu K, et al. The frequency conversion technology on the sewage source heat pump system[C]. Fifth International Workshop on Energy and Environment of Residential Buildings and Third International Conference on Built Environment and Public Health, vols. I and II, 2009:1652-

1659.

- [14] 安青松,史琳,汤润. 基于污水源热泵的大型集中洗浴废水余热利用研究[J]. 华北电力大学学报. 2010,37(1):57-61.
- [15] Funamizu N, Iida M, Sakakura Y, et al. Reuse of heat energy in wastewater: implementation examples in Japan[J]. Water Science Technology, 2001,43:277-285.
- [16] 刘传乾,徐菱虹,卢琼华. 污水源热泵用于集供暖的技术经济分析[J]. 建筑热能通风空,2009,39(5):139-141.
- [17] 空调通风系统运行管理规(GB50365-2005)[S]. 中国建筑工业出版社,北京,2006,2-46.
- [18] Wu R H, Xu Y, Sun D X, et al. Technology economic analysis of heat pump temperature rising in sewage disposal process in cold climate area[J]. Acta Energetica Solar Science, 2008,29(3): 267-271.
- [19] Huang K, Wang H, Zhou X. Heat pump for high school bathroom heat recovery[J]. Renew. Energy Resource. Greenery Future, 2006(8):1-6.
- [20] Meggers F, Leibundgut H. The potential of wastewater heat and energy decentralized high-temperature recovery with a heat pump[J]. Energy and Buildings, 2011,43:879-886.
- [21] 张吉礼,马良栋. 污水源热泵空调系统污水侧取水、除污和换热技术研究进展[J]. 暖通空调,2009,37(7):41-47.

(编辑 吕建斌)