

严寒地区公共浴池废水余热回收利用研究

李慧星,杨云龙,郑纤芳,赵一博

(沈阳建筑大学市政与工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 解决严寒地区公共浴池洗浴用水量大、洗浴废水余热浪费严重的问题,探讨系统机组制热性能和计算洗浴废水余热回收利用率.方法 以辽宁省沈阳某大学浴池洗浴废水余热回收利用情况为例,利用温湿度测试系统、超声波流量计等仪器设备对该高校污水源热泵系统洗浴废水进、出口温度,蒸发器和冷凝器的进出口温度等进行实测,通过计算确定机组制热性能系数(COP)及洗浴废水余热利用率,分析机组能效比.结果 洗浴废水进口温度为 $28.2 \sim 34.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度变化范围较小,比较稳定.机组 COP 值比较高且比较稳定,机组传热系数受洗浴人数和机组使用时间影响较大.洗浴废水中含有以COD为代表的微生物,通过测试发现洗浴废水水温较高,不利于COD等微生物的生长.严寒地区公共浴池余热利用率可以达到80%以上.结论 低品位余热回收用于严寒地区公共浴池洗浴废水回收是一种有效的余热利用方式,在现有余热回收利用技术的基础上,较好地保证了节能性和经济性.

关键词 余热回收技术;严寒地区;公共浴池;洗浴废水

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Study on Waste Heat Recovery and Utilization of Public Bath Pool Wastewater in Severe Cold Area

LI Huixing, YANG Yunlong, ZHENG Xianfang, ZHAO Yibo

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to solve the problems of large amount of bathing water and waste heat of bathing wastewater in public bathing pools in severe cold areas, the heating performance of the system unit was explored and the utilization rate of waste heat recovery of bathing wastewater was calculated. The bathing wastewater in a University of Shenyang, Liaoning Province was taken as an example. The inlet and outlet temperatures of bathing wastewater, the inlet and outlet temperatures of evaporators and condensers were measured by temperature and humidity measuring system, ultrasonic flowmeter and other instruments and equipment. The coefficient of heat production performance(COP) and the utilization rate of waste heat of bathing wastewater were calculated to analyze the energy efficiency ratio of the unit. When the inlet temperature of bathing wastewater was

收稿日期:2018-01-10

基金项目:国家十三五重点研发项目(2016YFB701-01)

作者简介:李慧星(1964—),女,教授,主要从事建筑室内环境空气质量保障技术方面研究.

28.2 ~ 34.5 C, the range of temperature change was small and relatively stable. When the COP value of the unit was relatively high and stable, the heat transfer coefficient of the unit is greatly affected by the number of bathers and the unit use time. Bath wastewater contains microorganisms such as COD, which is not conducive to the growth of microorganisms. The utilization rate of waste heat in public baths in severe cold areas can reach more than 80%. Low-grade waste heat recovery is an effective way to recover waste heat from bathing wastewater in public baths in severe cold areas. In this way, on the basis of the existing waste heat recovery technology, energy saving and economy are better guaranteed.

Key words: waste heat recovery technology; cold regions; public baths; bath waste water

我国严寒地区公共浴池具有洗浴用水瞬时出水量大、废水排放温度较高且相对稳定的特点. 洗浴热水温度一般为 38 ~ 40 ℃, 洗浴后含有很高热量的洗浴废水直接流入排水槽, 最终排进城市污水排水管道, 造成了大量的热能损失, 这种热能损失在高校、酒店等集中用热水的公共浴池最为突出^[1-6]. 目前仍有一部分高校浴池利用燃煤生产热水, 系统运行费用很高, 生成污染环境的有害气体, 而且严重危害运营人员的身体健康. 近几年一部分改造的高校浴池, 通过购买热电厂的热水来满足洗浴要求, 热电厂热水价格是 28 ~ 29 元/t, 很大程度上增加了洗浴成本, 而且热电厂的热水在输送过程中由于管道的散热存在较高的热量损失^[7-14]. 洗浴废水直接排放不仅废热量得不到充分的利用, 而且对环境造成一定的污染. 笔者通过对我国严寒地区某高校浴池余热回收实际工程运行数据调研测试, 计算洗浴废水余热利用率, 进而分析余热回收利用技术的应用效果.

1 洗浴废水余热回收技术

1.1 运行原理

废水余热回收技术是将洗浴废水中的热量用于生产热水, 将冷量传递给建筑物. 洗浴废水水温与室外空气环境温度相比变化要小, 因而系统的运行情况稳定^[15-16]. 图 1 为洗浴废水余热回收流程图, 洗浴废水首先流经集水池, 经过滤后流入废水池, 通过污水源热泵进行换热, 换热后洗浴废水通过排水

排到城市污水管网. 而污水源热泵则利用从洗浴废水回收的热量加热自来水, 被加热后热水与自来水相混合后, 达到洗浴要求的水温后供洗浴使用. 洗浴废水产生的热量会因季节变化、围护结构不同、洗浴不同时段等因素可能会造成不稳定, 因此设置了电热辅助装置, 以保证随时达到洗浴温度的要求^[17-18].

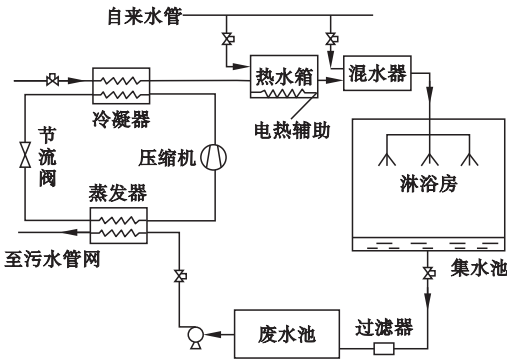


图 1 洗浴废水余热回收技术流程图

Fig. 1 Flow chart of waste heat recovery of bath waste water

1.2 污水源热泵系统运行原理

通过污水源热泵来提取洗浴废水中蕴含的能量, 替代传统燃煤锅炉等热源来生产热水, 在循环过程中只利用了少量的电能, 符合目前北方地区大力推广“煤改电”的时代要求. 洗浴废水属于可再生能源, 温度范围变化小, 不受环境因素影响, 使得整个系统在运行过程中节能且高效^[19].

由于洗浴废水的成分复杂, 存在大量毛发、碱性污染物, 与其他类型的余热回收技术相比, 对系统的各部件要求更高. 尽管在洗浴

废水在与换热器换热的时候,较大的固体废弃物已经被过滤掉,但是洗浴废水中仍有一些细小的杂质,降低了换热效果^[20].

2 余热回收效果测试

2.1 浴池基本概况

笔者以辽宁省沈阳某大学浴池洗浴废水余热回收利用情况为例,分析严寒地区公共浴池废水的余热回收利用.该高校地处辽宁省沈阳市浑南区,洗浴人数约为2 000人/d,浴池洗浴废水的余热采用污水源热泵系统收集,并用于生产热水,约使用600 t/d热水.浴池洗浴废水水量较多、温度高且稳定.

浴池机房采用了10台污水源热泵机组,6台使用4备用.每台机组配2台压缩机.热源侧循环泵为5台立式单级离心泵;用户侧一次循环泵和二次循环泵均为3台立式单级离心泵;补水泵2台.污水池外形长宽高为16 m×16 m×6.5 m,污水通过污水池中新型板式换热器与循环水换热,生产热水温度为45~56℃,机组设备参数如表1所示.

表1 污水源热泵机组参数

Table 1 Parameters of sewage sourceheat pump kW			
机组型号	制热量	功率	制冷量
WKLXP5	1 936	402	1 683
4TGDN	1 936	402	1 683

2.2 测点布置

测试的数据采集分别为人工读取和测试仪器自动采集两种方法.为了更加准确地分析污水源热泵系统各部分的温度变化规律,将测量仪器采集频率设置为20次/h,浴池用水量和用电量每小时人工读取两次.环境温度T0的测点位于通风处记录,G1为总水表的读数,测点位于总管道上,G2为分水表的读数测点位于生活用水分管道上.余热回收利用系统具体测试方法和测点布置如表2所示.

表2 余热回收利用系统测点布置

Table 2 Layout of measurement point for waste heat recovery and utilization system		
测点标号	所测温度	测点位置
T1	水箱热水温度	热水箱出水口
T2	洗浴废水温度	污水池进水口
T3	洗浴废水温度	换热器污水出口
T4	污水排水温度	污水排水口
T5	环境温度	浴池通风处

其中洗浴热水水温除热水箱出口之外,还布置在了各个直线花洒管上,洗浴废水排水温度的测点位于废水排水口.

2.3 测试内容与测试装置

2.3.1 测试内容

在该高校洗浴废水余热回收利用系统测试的主要内容:辽宁沈阳地区整年室外温度变化情况,浴池的室内温度以及相对湿度,浴池用户侧进出水温度以及洗浴污水进出口位置的水温及流量,污水源热泵机组的耗电量及系统循环水泵的耗电量.

2.3.2 测试装置及测试要求

(1)水温度测试仪:采用温度计(电阻温度计)、温湿度自记仪,不低于±0.2℃的准确度.

(2)水流量测试仪:超声波流量计,准确度不低于测量值的±5%.

(3)温湿度测试仪:各类空气温度计,准确度不低于±0.5℃;空气湿度计,准确度不低于±10%.测试的主要仪器主要使用温湿度自记仪、超声波流量计等.

3 结果与分析

3.1 洗浴废水余热回收效果计算理论依据

(1)洗浴废水中可以提取的热能计算.

$$Q_y = G \times c \times \Delta T / 3\,600. \tag{1}$$

式中:Q_r为洗浴废水中可提取的低品位热能,kW;G为洗浴废水的小时流量,kg/h;c为水的比热容,J/(kg·℃);ΔT为洗浴废水进出水的温差,℃.

(2)污水源热泵余热回收系统的性能系数计算.

$$COP = \frac{q_c}{P}.$$
 (2)

式中: COP 为污水源热泵余热回收系统的制热性能系数; q_c 为机组制热量; P 为热泵系统机组制热时的输入功率,kW.

(3)污水源热泵系统换热系数计算.

$$K = \frac{Q_m}{F\Delta t_m}.$$
 (3)

式中: K 为污水热泵系统换热系数, $W/(m^2\cdot^{\circ}C)$; F 为系统传热面积, m^2 ; Q_m 为洗浴废水换热量,w; Δt 为对数平均传热温差, $^{\circ}C$.

(4)余热回收利用率计算.

$$\vartheta = \frac{Q_{回}}{Q_{废}} \times 100\%.$$
 (4)

式中: ϑ 为余热回收利用率; $Q_{回}$ 为回收的洗浴废水余热热量,GJ; $Q_{废}$ 为洗浴废水余热总热量,GJ.

3.2 系统性能测试结果分析

为了更好地检测洗浴废水的水质和系统运行的情况,测试时间和浴池开放时间保持一致,浴池开放时间为8:00—21:00,洗浴人数约为2 000 人/d,测试时间为30 d.

图2 为该高校浴池洗浴废水进、出口不同时刻平均温度变化情况,洗浴废水进口温度为28.2 ~ 34.5 $^{\circ}C$.

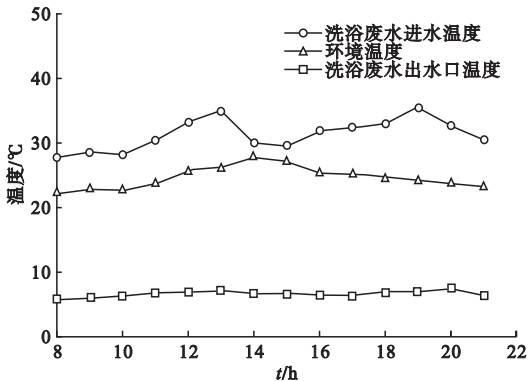


图2 洗浴废水进、出口温度及环境变化

Fig. 2 Temperature and environmental changes of bath wastewater at inlet and outlet

从图中可以看出洗浴废水的温度在不同时间有所不同,洗浴高峰期温度较高,在早上和下午温度会有所下降,但温度均高于测试期间室外环境平均温度,且温度变化范围较小,比较稳定,可以用于生产热水的热源.浴池洗浴废水出水口温度为5.2 ~ 8.6 $^{\circ}C$,运用污水源热泵余热回收技术通过吸收洗浴废水中大部分的热能,消耗一定量的电能能够生产洗浴需要的水.

从式(2)和式(3)可知机组蒸发器与冷凝器随时间的变化规律会直接影响到污水源热泵的瞬时吸热量和放热量.图3 为测试期间污水源热泵机组蒸发器及冷凝器的进、出口平均温度的变化情况,可以看出,热泵机组冷凝器进口位置的平均温度为44 ~ 46 $^{\circ}C$,出口平均温度为47 ~ 50 $^{\circ}C$,温差约为3 $^{\circ}C$ 到4 $^{\circ}C$.热泵机组蒸发器的进口位置平均温度为9.2 $^{\circ}C$,出口位置平均温度为7.4 $^{\circ}C$,平均温差约为1.8 $^{\circ}C$.

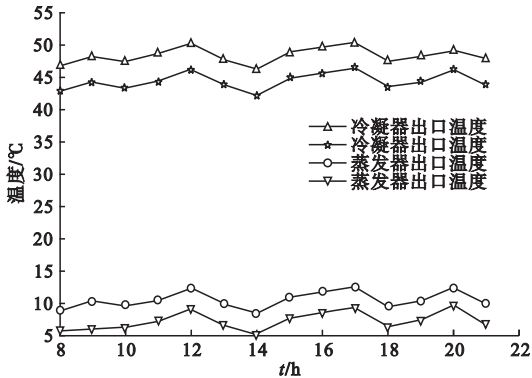


图3 系统蒸发器和冷凝器的进、出口温度变化

Fig. 3 Temperature changes at inlet and outlet of system evaporator and condenser

根据式(2)计算此余热回收系统的制热性能系数,通过计算测试数据,得出 COP 值随时间的变化(见图4).由图4 可知,该污水源热泵机组的瞬时制热性能系数比较稳定, COP 最低值为4.8, COP 最高值为6.5, COP 平均值为5.7,在考虑污水源热泵系统中整体功耗,计算得出能耗比在4.5左右,可见此余热回收系统机组性能比较稳定,能效比高.

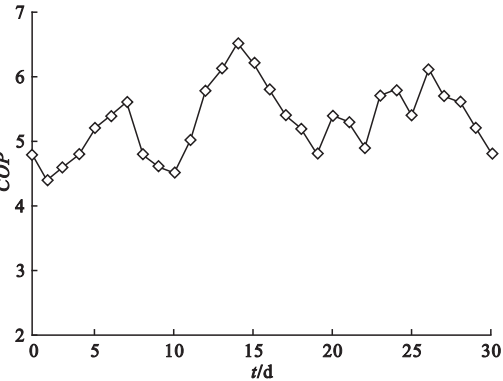


图4 污水源热泵系统COP值变化

Fig. 4 COP value change of sewage source heat pump system

通过式(3)计算整理可得测试期间污水换热器的平均传热系数 K 随时间的变化规律(见图5),平均传热系数变化曲线在一天中会出现两个极值,分别是在12:00和19:00,这是由于该时段洗浴人数较多,洗浴废水排水量大,可利用的余热量较多,可以看出洗浴人数是影响公共浴池洗浴废水余热回收系统传热系数的一个关键因素.除此之外,热泵如果使用时间较长,换热器内壁容易形成较厚的污垢,也会使污水换热器传热系数显著降低.

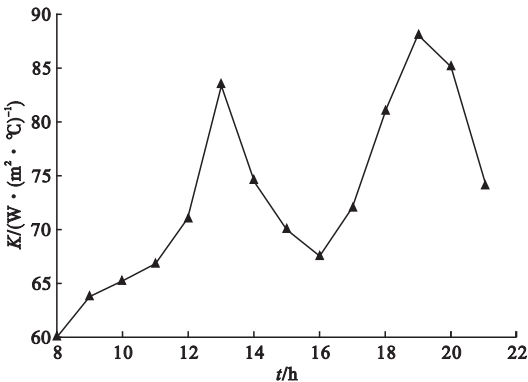


图5 污水源热泵系统传热系数变化规律

Fig. 5 Variation of heat transfer coefficient K in sewage source heat pump system

考虑到微生物会对机组性能产生影响,对洗浴废水与生活废水的相关参数进行比较.可以发现,高校集中浴池洗浴废水的水质硬度、水质碱度和可溶性固体得含量均低

于生活废水;在产生无机污垢方面,洗浴废水与生活废水相比,更不容易生成碳酸钙等沉淀;从微生物污垢方面考虑,洗浴废水中的COD接近生活废水3倍.微生物生长速度会随着温度升高不断加快,会在25℃达到最高,之后会逐渐下降,而洗浴废水的温度是32~37℃.因此,虽然洗浴废水中以COD为代表的微生物含量较高,但洗浴废水较高的水温不利于微生物的生长.

4 结 论

(1)高校浴池洗浴废水四季水温适宜,是污水源热泵系统的理想低位热源.发展应用浴池洗浴废水余热回收利用是改变以化石燃料为主的热热水生产方式现状的有效途径,为可再生能源拓展了新的利用空间.

(2)测得机组制热性能系数COP值比较高且比较稳定,总传热系数受洗浴人数和机组使用时间影响较大,计算出该浴池的余热回收利用率达到了80%以上,低品位余热回收用于严寒地区高校浴池洗浴废水回收是一种有效的余热利用方式.在现有余热回收利用技术的基础上,较好的保证了节能性和经济性.

(3)污水水质及水温是影响污水源热泵机组运行的主要因素,但高校浴池洗浴废水的水质硬度、水质碱度和可溶性固体得含量均低于生活废水,以COD为代表的微生物含量较高,但洗浴废水较高的水温不利于微生物的生长,不会影响热泵机组的换热效果和稳定性.

参考文献

[1] 黄坤荣,王林,卿德藩. 热泵技术在浴室废热回收上的应用研究[J]. 制冷与空调,2005(1):79-81.
(HUANG Kunrong, WANG Lin, QING De-fan. Applicative research on heat pump technology used for recycling and reusing waste heat in bathroom[J]. Refrigeration and air conditioning,2005(1):79-81.)

[2] CHUA K J, CHOU S K, YANG W M. Advances in heat pump systems(a review)[J].

- Applied energy, 2010, 87(12): 3611 – 3624.
- [3] 郑晓琴. 洗浴废水热回收热泵系统的分析与研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
(ZHENG Xiaoqin. The analysis and research of reclamation and reuse of public bath sewage [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.)
 - [4] 袁周华. 基于洗浴废水热能梯度利用的高效节能制热水系统[J]. 可再生能源, 2016, 34(4): 579 – 582.
(YUAN Zhouhua. The dual heat source heat pump applied to bath which for recycling heat energy efficient energy-saving hot water supply system [J]. Renewable energy resources, 2016, 34(4): 579 – 582.)
 - [5] FLEMING W S. Ground-source heat pump design and operation-experience within an Asian country [J]. Ashrae transactions, 1998, 104: 771 – 774.
 - [6] 葛敏哲. 严寒地区矿井回风余热回收利用研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.
(GE Minzhe. The study of coal mine return air waste heat recovery and utilization in the cold regions [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2013.)
 - [7] ARASHI N, INABA 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, 79(5): 446 – 454.
 - [8] 丁乐. 节能技术在高校学生浴室改造中的应用[J]. 能源研究与利用, 2012(3): 49 – 50.
(DING Le. The application of energy saving technology in the renovation of college students' bathtub [J]. Energy research & utilization, 2012(3): 49 – 50.)
 - [9] 胡敏东, 金苏敏. 浴室废水余热回收热泵热水系统的焓分析[J]. 流体机械, 2010, 10: 78 – 83.
(HU Mindong, JIN Sumin. Exergy analysis on heat pump heating system for domestic hot water using waste water as a heat source [J]. Fluid machinery, 2010, 10: 78 – 83.)
 - [10] 寇广孝, 王汉青, 王贤林. 热泵用于浴室生产热水的理论热力循环分析[J]. 流体机械, 2003, 31(4): 49 – 50.
(KOU Guangxiao, WANG Hanqing, WANG Xianlin. Analysis on the thermal circulation of electrical heat pump applied in the public bathing House [J]. Fluid machinery, 2003, 31(4): 49 – 50.)
 - [11] GRAY D D, GIORGINI A. The validity of the Boussinesq approximation for liquids and gases [J]. Heat mass transfer, 1976, 191: 545 – 551.
 - [12] 黄坤荣, 王汉青, 寇广孝, 等. 热泵机组的热力经济性分析[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2004, 18(3): 45 – 47, 58.
(HUANG Kunrong, WANG Hanqing, GUAN Guangxiao, et al. The thermal economic analysis of heat pumps [J]. Journal of university of south China (natural science), 2004, 18(3): 45 – 47, 58.)
 - [13] 黄坤荣, 刘升学, 王汉青. 某高校热泵型浴室热回收系统的设计方案探讨[J]. 电力与能源, 2005, 26(1): 31 – 32.
(HUANG Kunrong, LIU Shengxue, WANG Hanqing. Research on the heat pump system used for recycling and reusing waste heat in a college bathroom [J]. Energy technology, 2005, 26(1): 31 – 32.)
 - [14] 寇广孝, 王汉青, 王贤林. 电热泵用于浴室生产热水的理论热力循环分析[J]. 流体机械, 2003, 31(4): 49 – 50.
(KOU xiao, WANG Hanqing, WANG Xianlin. Analysis on the thermal circulation of electrical heat pump applied in the public bathing house [J]. Fluid machinery, 2003, 31(4): 49 – 50.)
 - [15] 寇广孝, 王汉青, 周湘江, 等. 热泵式电热水器的设计构思[J]. 南华大学学报(理工版), 2001, 15(3): 7 – 9, 25.
(KOU Guangxiao, WANG Hanqing, ZHOU Xiangjiang, et al. Design of heat pump type electric water heater [J]. Journal of central-south institute of technology, 2001, 15(3): 7 – 9, 25.)
 - [16] 寇广孝, 王汉青, 王贤林, 等. 以废热水为热源的浴室热泵热水器[J]. 暖通空调, 2004(6): 43 – 45.
(KOU Guangxiao, WANG Hanqing, WANG Xianlin, et al. Heat-pump water heater applied in bathroom [J]. HV-AC, 2004(6): 43 – 45.)
 - [17] KUNDU B. Analysis of thermal performance and optimization of concentric circular fins under dehumidifying conditions [J]. International journal of heat & mass transfer, 2009, 52(11): 2646 – 2659.
 - [18] JANG J Y, LIN C N. Two-dimensional fin efficiency of plate fin-tube heat exchangers under partially and fully wet conditions [J]. Journal of thermal science, 2002, 11(3): 249.
 - [19] XU G, ZHANG X, DENG S. A simulation study on the operating performance of a solar-air source heat pump water heater [J]. Applied thermal engineering, 2006, 26(11): 1257 – 1265.
 - [20] LUND J W. Design of closed loop geothermal heat exchangers in the US [J]. International course on geothermal heat pumps, 2002.