

文章编号: 1671-6612 (2022) 05-726-07

# 基于 TRNSYS 的高校浴室 燃气锅炉+污水源热泵供热水耦合系统的优化分析

史晨曦 狄育慧 蒋 婧

(西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048)

**【摘要】** 能源是人类社会生存和发展的物质基础, 随着我国社会经济快速的发展, 能源短缺问题已经成为我国所面临的首要问题。洗浴用水作为人们日常主要用水之一, 其废水具有温度高、流量大、水温稳定的特点, 因此, 对于洗浴废水的余热回收对于解决我国现在所面临的能源短缺问题具有很大的意义。以西安市某高校学生浴室为研究对象, 利用 TRNSYS 仿真模拟平台针对该高校学生浴室供热水系统分别建立了燃气锅炉供热水、以及燃气锅炉+污水源热泵的耦合系统, 通过模拟两种系统运行一年的结果从温度、产热量、系统能耗三方面对比研究了两种系统。结果发现: 该高校浴室洗浴废水温度稳定且水温较高满足污水源热泵机组的热量需求, 另外浴室供热系统采用燃气锅炉+污水源热泵的耦合系统相较于燃气锅炉供热年运行能耗降低 46%, 节能效果显著, 且耦合后系统运行稳定。

**【关键词】** 浴室废水; 污水源热泵; 余热回收; TRNSYS 模拟; 系统耦合

中图分类号 TK11+5 文献标识码 A

## Optimization Analysis of Coupled Heating and Water System of Gas Boiler+sewage source Heat Pump in University Bathroom Based on TRNSYS

Shi Chenxi Di Yuhui Jiang Jing

(School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048)

**【Abstract】** Energy is the material basis for the survival and development of human society. With the rapid development of China's social economy, the problem of energy shortage has become the primary problem facing our country. Bath water is one of the main daily water, and its wastewater has the characteristics of high temperature, large flow and stable water temperature. Therefore, the recovery of waste heat from bath wastewater is of great significance to solve the problem of energy shortage facing our country now. This paper takes the bathroom of a university student in Xi'an city as the research object, using the TRNSYS simulation platform, the coupling system of gas boiler hot water and gas boiler + sewage source heat pump was established for the bathroom heating system of the students of the university, and the two systems were compared and studied from the three aspects of temperature, heat production and system energy consumption by simulating the results of the operation of the two systems for one year. The results show that the bath wastewater temperature of the university bathroom is stable and high enough to meet the heat demand of the sewage source heat pump unit. In addition, compared with the gas boiler, the annual energy consumption of the

基金项目: 西安工程大学(柯桥)研究生学院产学研协同创新重点项目(19KQZD05); 西安工程大学博士科研启动基金(107020419); 西安工程大学教学改革重点项目(21JGZD11)

作者(通讯作者)简介: 史晨曦(1996-), 男, 在读研究生, E-mail: 1271521169@qq.com

收稿日期: 2022-03-08

bathroom heating system coupled with the sewage source heat pump system is reduced by 46%, and the energy saving effect is significant, and the system runs stably after coupling.

**【Keywords】** Bathroom wastewater; Sewage source heat pump; Waste heat recovery; TRNSYS simulation; The system coupling

## 0 引言

随着我国社会的迅速发展,人民生活水平的不断提高,能源、环保等问题正成为制约我国经济和社会发展面临的重大难题<sup>[1,2]</sup>。因此,开发可再生能源和提高能源利用率解决能源问题的基本途径。高校浴室的热水用能占据着浴室能耗的60%<sup>[3]</sup>,然而根据现有的数据调查发现,我国绝大多数的高校学生浴室没有设计安装余热回收系统,这样就导致了洗浴废水中的大部分热量随洗浴废水的排放而流失,造成了能源的严重浪费<sup>[4,5]</sup>。因此,发展节能环保的高校浴室供热水系统对于提高能源利用率至关重要,污水源热泵系统作为消耗较少的高品位能源,把污水中的低品位热能转化为高品位热能的系统得到社会越来越多的认可与关注<sup>[6-8]</sup>。用污水源热泵系统供热水代替传统的燃气锅炉空气源热泵可以有效的降低大气污染和节约能源。

目前,很多学者对污水源热泵系统进行了多方面的研究,推动了污水源热泵技术的进一步发展。在国外,Backl<sup>[9]</sup>等研究以桑拿废水为低温热源的压缩式热泵,利用峰谷电差蓄热,为桑拿中心供热水。并利用TRNSYS搭建了仿真平台对整个系统进行模拟。对于国内,大连理工大学郑晓琴<sup>[10]</sup>建立了以洗浴废水为低温热源的污水源热泵模型,并模拟了该系统的运行情况,得出系统运行COP可达5.2。清华大学安青松<sup>[11]</sup>研究了污水源热泵在集中浴室废水余热利用,分析对比洗浴废水与城市二级水,表明利用热泵回收浴室废水余热的可行性;沈阳建筑大学的王健<sup>[12]</sup>分析了高校洗浴废水回收利用潜力,如果对洗浴污水中余热的回收,1年可以回收热量为 $4.5 \times 10^4 \text{kJ}$ 。相当于节约标准煤(热值为 $29270 \text{kJ/kg}$ )150t。由此可见对于污水中的余热回收是必要的。

虽然很多学者对污水源热泵进行了多方面的研究,但大部分都是单一的对污水源热泵系统进行研究,未考虑到将污水源泵系统与原有浴室供热水系统进行耦合结合进行研究,这样会造成将原有系统进行彻底弃用的结果,造成另一种资源浪费。因此,本文通过TRNSYS平台对燃气锅炉供热水以及燃气锅炉+污水源热泵的耦合系统分别进行建模,并建立完整的环路系统,包括对系统各个部件的选型,最终通过对温度统计、产热量统计、以及系统能耗统计等数据的分析,分析燃气锅炉+污水源热泵耦合系统的可行性以及节能性。

## 1 建筑概况

本文西安市某高校学生浴室污水源热泵系统进行研究,该校学生浴池冬季热水来源由学校南锅炉房供给,将加热后蒸汽送至锅炉房二楼与自来水进行换热,使水温升高至 $60^\circ\text{C}$ ,然后通过供水管道将热水输送至学生浴室,由学生通过调节末端阀门进行冷热水调节,其他季节均采用空气源热泵加热的方式来制取热水。学生浴池目前未设置洗浴污水余热回收系统,洗浴废水直接通过学校污水管网排出。学生浴池分为上下两层且构造相同,二楼为女生浴池,一楼为男生浴池。共有浴头数量308个,其中包括218个单人洗浴和90个开放洗浴。冬夏季开放时间均为10:00-22:00,日供水时间为12个小时,年平均运行时间280天。

## 2 物理及数学模型

### 2.1 优化系统简介

优化系统相较于现有只采用燃气锅炉供热水的系统增加了污水源热泵供热水系统,系统优化前后对比如图1、图2所示。

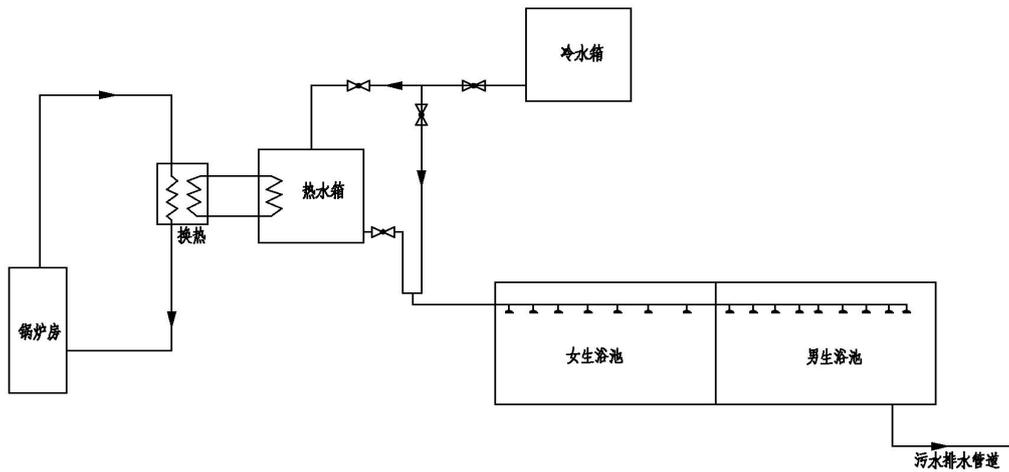


图 1 现有浴室系统流程图

Fig.1 Flow chart of the bathroom system

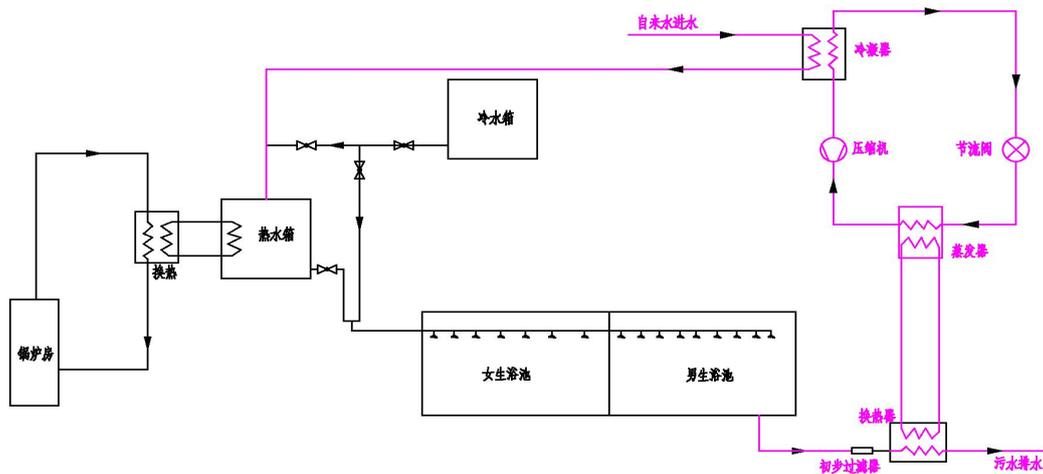


图 2 改造后浴室系统图

Fig.2 Bath system diagram after renovation

### 2.2 TRNSYS 模拟

论文采用 TRNSYS 模拟仿真软件构建燃气锅炉及燃气锅炉+污水源热泵供热水系统模型。TRNSYS 的全称为 Transient System Simulation Program，即瞬时系统模拟程序。该系统的最大的特色在于其模块化的分析方式。所谓模块分析，即认为所有热传输系统均由若干个细小的系统（即模块）组成，一个模块实现一种特定的功能，如热水器模块，单温度场分析模块、太阳辐射分析模块、输出模块等。因此，只要调用实现这些特定功能的模块，给定输入条件，这些模块程序就可以对某种特定热传输现象进行模拟，最后汇总就可对整个系统进行瞬时模拟分析<sup>[13]</sup>。本文系统由 3 部分组成，分别是气象参数部分、冷热源部分以及控制系统部

分。整个系统的搭建思路如图 3 所示。

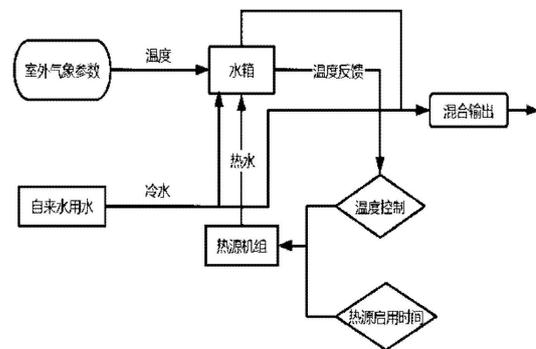


图 3 浴室供热系统仿真模拟示意图

Fig.3 Schematic diagram of simulation of a bathroom heating system

### 2.2.1 气象参数模型

气象参数采用西安市典型气象数据, 气象文件来源 Meteonorm 软件, 将气象参数文件导入 Type15-2 模块, 其可以将温度、湿度及太阳辐射量进行逐时输出。

### 2.2.2 热源设备模型

热源系统包括燃气锅炉、污水源热泵、水管以及水泵等部件, 根据需求在 TRNSYS 中选择相应的模块进行设置, 其中污水源热泵机组运行的平均 COP=5.0, 燃气锅炉的额定容量为 386kW, 水泵数量为 3 台, 分别为污水泵、热泵机组水泵以及锅炉泵。污水泵的最大流量为 33160kg/hr, 热泵机组水泵的最大流量为 11050kg/hr, 锅炉泵的最大流量为 33160kg/hr。

#### (1) 热泵机组模型

热泵机组模块依据机组负荷侧和源侧的进口温度, 并结合机组制冷或制热的性能文件, 利用插值计算方法得出热泵机组耗功。计算原理如下<sup>[14]</sup>。

热泵机组采暖季的性能系数:

$$COP = Cap_{heating} / P_{heating} \quad (1)$$

式中:  $Cap_{heating}$  为当前工况下机组的制热量, kJ/h;  $P_{heating}$  为当前工况下机组的耗功率, kJ/h。

循环液体从污水中吸收的热量为:

$$Q_{absorbed} = Cap_{heating} - P_{heating} \quad (2)$$

循环液体负荷侧、源侧出口温度分别为:

$$T_{load,out} = T_{load,in} + \frac{Cap_{heating}}{m_{load} Cp_{load}} \quad (3)$$

$$T_{source,out} = T_{source,in} - \frac{Q_{absorbed}}{m_{source} Cp_{source}} \quad (4)$$

式中:  $m_{load}$  为负荷侧循环液体的质量流量, kg/h;  $m_{source}$  为源循环液体的质量流量, kg/h;  $Cp_{load}$  为负荷侧循环液体的比热, kJ/(kg·K);  $Cp_{source}$  为源侧循环液体的比热, kJ/(kg·K)。

#### (2) 燃气锅炉模型

燃气锅炉采用效率模型, 加热流体所需的能量为<sup>[15]</sup>:

$$Q_{need} = m_{fluid} C_{pfluid} (T_{out} - T_{in}) \quad (5)$$

锅炉所需的燃料燃烧的能量为:

$$Q_{fuel} = \frac{Q_{fluid}}{\eta_{boiler}} \quad (6)$$

式中:  $Q_{need}$  为加热流体所需能量, W;  $m_{fluid}$  为流体质量流量, kg/hr;  $C_{pfluid}$  为流体比定压热容, J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>;  $T_{out}$ 、 $T_{in}$  分别为出口流体温度、进口流体温度, °C;  $Q_{fuel}$  为所需燃料燃烧的能量, kW;  $\eta_{boiler}$  为锅炉总效率。

### 2.2.3 控制系统模块

控制系统模块包括热源启动时间模块和温度控制模块。热源启动时间主要根据季节因素和每日浴室开放时间来控制热泵机组和燃气锅炉的启停, 热泵机组和燃气锅炉的运行时间如表 1 所示。温度控制模块利用软件中的计算器模块来实现机组的无级控制功能, 主要有 3 个参数, 分别是设定温度、死区温度以及监控温度。设定温度根据季节因素夏季为 26°C, 冬季为 20°C。监控温度是对水箱温度进行监测, 当水箱不满足设定温度时会产生一个反馈信号传递给热泵机组和燃气锅炉, 控制机组的启停。控制器控制信号先输出到燃气锅炉以满足正常洗浴水温要求, 经过洗浴废水的产生然后开启污水源热泵机组来满足洗浴热水供应, 此时燃气锅炉关闭将做为备用热源存在当水箱温度不满足 45°C 时开启。死区温度是为了防止温度控制器在监控温度和设定温度接近时连续快速打开和关闭设备, 本文死区温度设定为 19°C, 使设定温度由一个温度值变为在设定温度+0.5°C 的区间。

表 1 机组运行时间表

| Table 1 Operating schedule of the unit |             |
|--|-------------|
| 机组组类型                                  | 运行时间        |
| 燃气锅炉                                   | 10:00~22:00 |
| 污水源热泵机组                                | 11:00~22:00 |

## 3 系统仿真性能对比

### 3.1 系统建立

根据第 2 节介绍内容, 将各个模块在 TRNSYS 中连接分别搭建燃气锅炉供热水系统如图 4 所示和燃气锅炉+污水源热泵供热水系统如图 5 所示。模拟运行时间为 8760 小时。

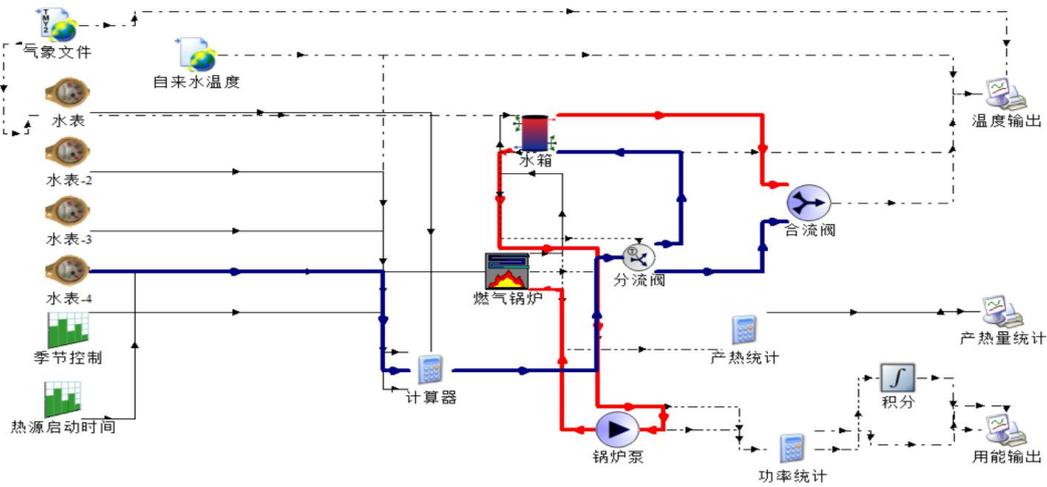


图 4 燃气锅炉供热仿真模拟系统

Fig.4 Gas boiler heating simulation system

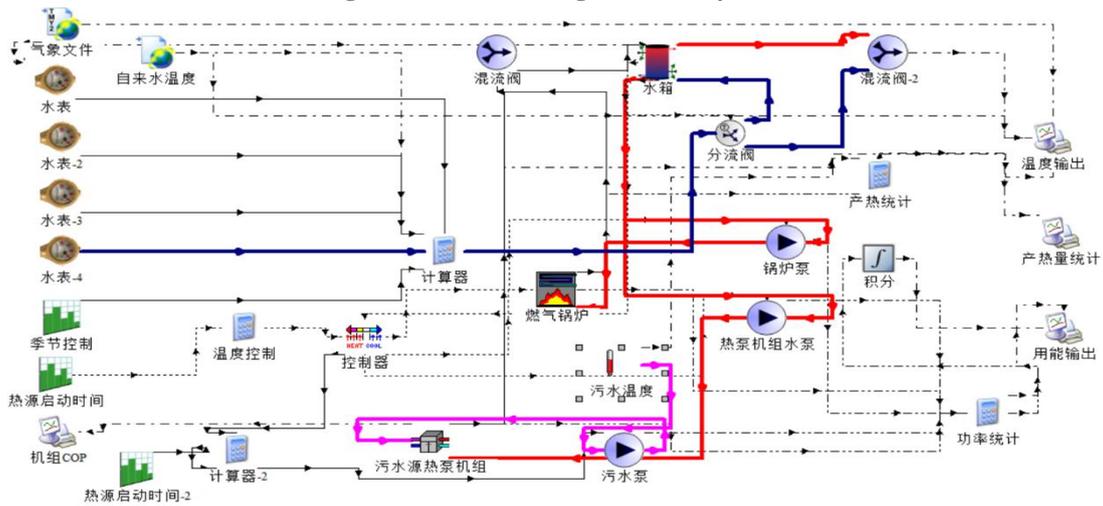


图 5 燃气锅炉+污水源热泵仿真模拟系统

Fig.5 Simulation system of gas boiler + sewage source heat pump

### 3.2 数据分析

根据模拟运行输出温度统计图，如图 6 所示。

#### 3.2.1 温度运行结果

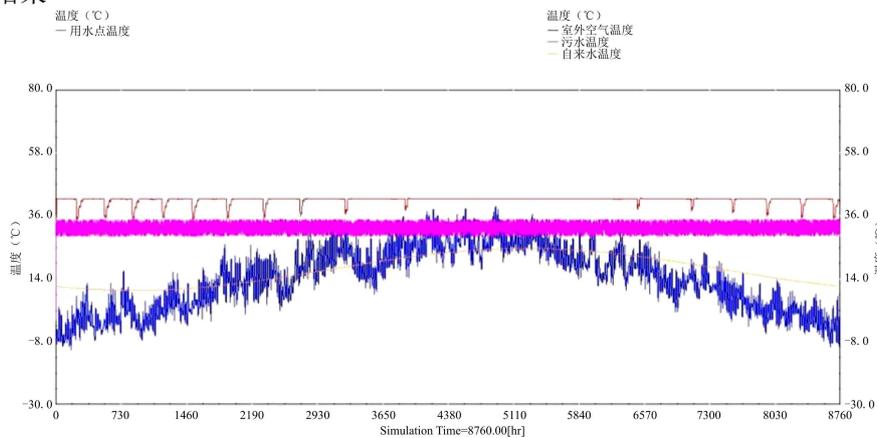


图 6 温度统计图

Fig.6 Temperature statistics chart

图中包括四项数据其中左轴为用水点温度, 右轴分别为室外空气温度、污水温度以及自来水温度。通过图中数据趋势分析可得自来水温度随室外天气温度变化趋势一致, 对于用水点温度经过温度反馈到混流阀, 驱使混流阀输出信号控制控制自来水和从水箱流出的热水的比例使用用水点温度基本稳定在 40℃ 左右的位置。浴室污水温度水温稳定受室外空气温度影响较小且温度较高因此可作为污水源热泵优质热源。因此对于耦合系统中污水源热泵机组的建立是可行的。

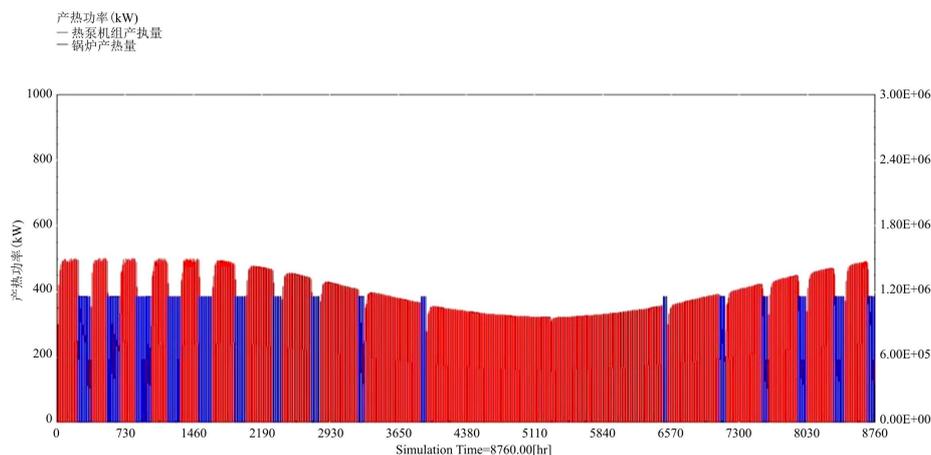


图 7 产热量统计图

Fig.7 Statistical chart of calorific production

### 3.2.3 系统能耗对比

通过 TRNSYS 分别建立燃气锅炉供热系统以及污水源热泵+燃气锅炉的耦合系统, 并通过模拟一年产生的一次能源系统逐月消耗量对比图, 如图 8 所示。对于两种耦合系统中的能耗主要来自与锅炉泵、污水泵、热泵机组水泵、以及污水源热泵机组消耗的电能和燃气锅炉消耗的燃气, 本文为了方便计算, 根据《综合能耗计算准则》<sup>[16]</sup>A.1.11 能源换算系数表中规定将电能消耗量和燃气消耗量均换算为一次能源进行计算。

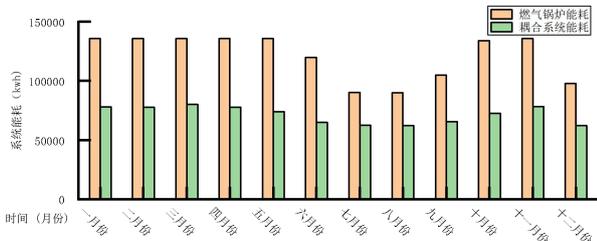


图 8 系统逐月能耗对比图

Fig.8 Comparison of monthly energy consumption of the system

### 3.2.2 系统产热量结果分析

产热量统计图如图 7 所示, 图中左轴数据为产热功率, 单位为 kW, 其中包括两项参数分别为热泵机组产热量和锅炉产热量, 通过模拟系统运行一年的结果得到热泵机组的总产热量为 1507282.05kW, 锅炉的总产热量为 319607.98kW, 同时通过 TRNSYS 导出的数据图可看到热泵机组产热量基本全部覆盖锅炉产热量, 因此可得出污水源热泵机组能够满足浴室热水需求, 燃气锅炉将作为辅助热源为浴室供热水。

图中包括两项数据分别为燃气锅炉的逐月能耗和耦合系统的逐月能耗, 对比发现耦合后系统大大的降低了一次能源消耗量, 原因在于通过系统增加了污水源热泵机组之后, 系统对于燃气锅炉的开启时长减少, 从而降低了燃气的消耗量。加热水箱的热量大多来自洗浴废水中的低品位热量通过污水源热泵机组消耗少量电能产生的高品位热量。通过到处模拟数据计算可得耦合系统一年耗能为 777218.28kWh, 燃气锅炉一年能耗为 1451887.58kWh, 耦合系统相较于燃气锅炉系统节省能耗 46.5%, 节能效果显著。

## 4 结论

本文针对高校浴室洗浴废水余热浪费严重的问题提出相较于传统燃气锅炉供热的燃气锅炉+污水源热泵耦合供热系统, 并通过 TRNSYS 模拟软件模拟两种系统一年的运行结果, 得出以下结论。

(1) 洗浴废水作为污水源热泵的优质热源, 其水温高且温度稳定, 通过模拟结果发现该高校浴

室废水温度一年内基本维持在 32℃, 因此对于其热能的利用势在必行。

(2) 燃气锅炉+污水源热泵的耦合供热系统能耗小于传统的燃气锅炉供热系统, 节约能耗 46%, 节能效果显著。且耦合后系统运行稳定, 污水源热泵机组基本能维持该高校浴室一年的热水供应量, 燃气锅炉只作为备用热源在一天内开启小部分时间以满足污水源热泵机组的洗浴废水热量需求。

#### 参考文献:

- [1] 汤民. 绿色建筑能源环境监管平台的创新与应用[J]. 建设科技, 2017, (23): 27-30.
- [2] 张文新. 中国能源环境效率及复杂网络下的空间特征研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [3] 何伟轩, 孙昊, 关莹. 高校洗浴废水余热回收利用调研分析[J]. 西部皮革, 2017, 39(6): 216.
- [4] 李爱征, 何晓岷, 岳伟民, 等. 家用洗浴废热回收装置设计[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(1): 124-128.
- [5] 朱一安, 高鹏, 王宁, 等. 洗浴废水与污水源热泵结合利用的节能分析[J]. 山西建筑, 2021, 47(15): 163-164, 169.
- [6] 王侃宏, 赵东雪, 罗景辉, 等. 基于田口方法的太阳能耦合污水源热泵热水系统优化的研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(11): 1463-1469.
- [7] 张金梦. 污水源热泵为城市零碳清洁供暖“开药方”[N]. 中国能源报, 2021-09-27(027).
- [8] 张群力, 杨一雄, 王宝忠, 等. 高效城市污水源热泵利用系统开发与示例[J]. 暖通空调, 2021, 51(S1): 302-306.
- [9] NC Baek, UC Shin, JH Yoon. 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 王健, 王岳人. 高校洗浴废水回收利用潜力分析[J]. 节能, 2017, 36(7): 56-58.
- [13] 彭新东. 基于 TRNSYS 的遵义某高校地源热泵系统运行模拟分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2015: 23-25.
- [14] Mitchell J, Braun J. Design Analysis and Control of Space Conditioning Equipment and Systems[J]. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 1997: 111-123.
- [15] 彭冬根, 李寅蒂. 基于 TRNSYS 的增加辅助冷却设备的地源热泵系统优化[J]. 南昌大学学报(工科版), 2021, 43(2): 128-136.
- [16] GB/T 2589-2008, 综合能耗计算通则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.