

# 家用淋浴污水源热泵热水器系统实验<sup>\*</sup>

哈尔滨工业大学 雷博<sup>☆</sup> 董建锴

中铁第一勘察设计院集团有限公司 沈德安

哈尔滨工业大学 姜益强<sup>△</sup>

**摘要** 为利用家庭淋浴过程中所排放废水的能量,提出了用于家庭的淋浴污水源热泵热水系统,设计了淋浴废水取热装置,并搭建了系统实验台。实验研究了淋浴过程中不同取热模式下的系统性能,分析了预热水环路对于系统特性的影响。实验结果表明,经过预热水环路后,出口水温提高了 8.3 °C,系统的平均 COP 由无预热水环路时的 2.19 提高到 3.21。

**关键词** 淋浴污水 污水源热泵 预热水 节能 实验研究

## Experimental study of domestic shower drain source heat pump water heaters

By Lei Bo<sup>★</sup>, Dong Jiankai, Shen Dean and Jiang Yiqiang

**Abstract** To utilize the energy of domestic shower drains, puts forward a water heater system using shower waste water source heat pump for family. Designs a shower waste water heat extraction device and sets up a system test platform. By means of experiment, discusses the system performance under different heat extraction modes during shower. Analyses the effect of pre-heated water loop on the system characteristics. The results show that the outlet water temperature is increased by 8.3 °C through the pre-heated water loop, and the corresponding average COP of the system is increased to 3.21 from 2.19 without the pre-heated water loop.

**Keywords** shower drains, sewage source heat pump, pre-heated water, energy saving, experimental study

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

### 0 引言

社会的发展使人民生活水平逐步提高,生活能源消费量随之增加,国人对于生活热水的需求量逐年加大。据估计,我国生活热水的年用能量将由现在的 1 550 万 t 标准煤提高到 5 400 万 t 标准煤<sup>[1]</sup>。特别是洗浴热水的用量,目前洗浴热水的能耗已经占城市民用建筑能耗的 20%<sup>[2]</sup>。

淋浴废水的温度较高,大量的余热随着淋浴废水而排走,淋浴废水水质较其他废水要好,而且热水的使用时间与废水的排放时间基本吻合。利用热泵回收淋浴水废热,能提高能源利用率。近年来,关于利用热泵回收污水废热的研究越来越多<sup>[3-4]</sup>,但研究多集中于小区、洗浴中心、酒店等大型集中式用户<sup>[5-6]</sup>,而对于适用于家庭的单独小型系统以及污水侧换热器的研究较少。在单户式家庭的排水热回收方面,Wong 等人在淋浴装置下方安装了一个逆流换热器用来预热冷水<sup>[7]</sup>;McNabola 等人开发了单户家庭水平

排水余热回收系统,该系统从水平排水中回收余热,系统的换热效率能达到 25% 左右<sup>[8]</sup>;这些系统形式上虽然较简单,但能量利用率低,不能及时有效地回收家用污水中的热量。因此,有必要结合家庭生活热水的排放特点及居住建筑中用户的使用习惯,开发设计适合于家用污水源热泵热水器使用的污水收集装置以及高效的污水侧换热器。

本文提出了一种适用于家庭使用的淋浴污水源热泵热水系统,可充分利用家庭淋浴过程中淋浴废水的热量。设计了淋浴污水侧取热换热器,同时增加了预热水环路;取消了水泵,利用自来水管网的压力作为动力来源,降低了能耗,提高了能量的利用率。

①☆ 雷博,男,1990 年 8 月生,在读硕士研究生

△ 姜益强(通信作者)

150009 哈尔滨工业大学市政环境工程学院 1306

(0451) 86282123

E-mail:jyq7245@163.com

收稿日期:2013-11-05

修回日期:2013-12-27

## 1 家用淋浴污水源热泵热水系统设计

### 1.1 系统原理

家用淋浴污水源热泵热水系统主要由废水取热装置、压缩机、热水箱、速热热水装置、混水阀、节流机构等部件构成。系统原理如图1所示。

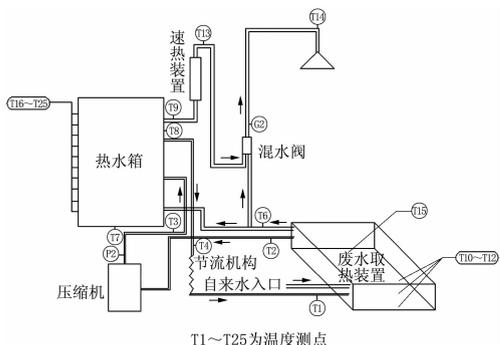


图1 家用淋浴污水源热泵热水系统原理图

废水取热装置位于淋浴喷头下方,用户在废水取热装置上方淋浴,废水取热装置将淋浴废水储存起来,用来预热自来水;同时,通过制冷剂循环,继续吸收废水中的热量,并在容积式热水箱中加热预热过的自来水,提高其温度。

淋浴开始时,自来水依次经过废水取热装置、热水箱、混水阀,然后从喷头喷出,供用户使用。系统通过制冷剂将淋浴废水中的热量提取到热水箱中,当容积式水箱中流出的热水温度不满足淋浴要求时,速热热水装置开启。废水取热装置带有溢水口,当淋浴废水量超过装置容量时,底部淋浴废水通过底部溢流管(位置见图2)流出。

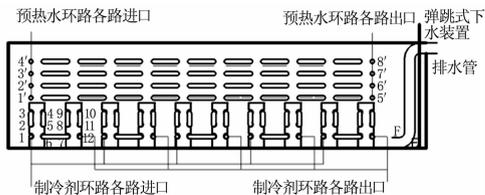


图2 废水取热装置示意图

淋浴结束时,装置中存有一定淋浴废水。热泵系统中的制冷剂继续从废水中取热,在废水装置和容积式水箱中设置温度传感器,当废水温度低于设定温度( $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )或容积式水箱内热水温度高于设定温度( $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ )时,系统停止运行。通过安装的弹跳式下水装置排出废水取热装置中存留的废水。

### 1.2 新型淋浴废水取热装置的设计

废水取热装置主要由4部分组成,包括预热水管、制冷剂管、溢流排水管和弹跳式下水装置。预热水管和制冷剂管布置在装置内部,制冷剂管位于废水取热装置的下方,预热水管位于废水取热装置的上方,具体布置如图2所示。制冷剂进入装置后,分5个环路进入废水取热装置内部进行换热,第1环路制冷剂的流程为1-2-3-4-5-6-7-

8-9-10-11-12,第2,3,4,5环路亦按第1环路的流动方式进行,每个环路换热后,再合流流出装置。预热水环路分为4个分路,装置通过溢流排水管F排出废水,溢流排水管F的下端位于装置的底部,溢流排水管的上端直通装置外部,废水从溢流排水管F的下端流入,通过溢流排水管F的上端流出,设置溢流排水管F的目的是保证废水在排出前与预热水管以及制冷剂管充分换热。按动弹跳式下水装置排出装置中的废水。

## 2 家用淋浴污水源热泵热水器实验台设计

### 2.1 实验台的设计选型

实验台中废水取热装置的尺寸为 $80\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 。其中预热水管共4个环路,采用 $\text{O}8\text{ mm}$ 紫铜管,每个环路的长度为 $900\text{ cm}$ ;制冷剂共5个环路,采用 $\text{O}8\text{ mm}$ 紫铜管,每个环路的长度为 $550\text{ cm}$ 。溢流排水管采用 $\text{O}15\text{ mm}$  PPR管制成。实验台中采用2台额定功率为 $385\text{ W}$ 的活塞式压缩机并联,制冷剂为R134a。水冷冷凝器采用 $60\text{ L}$ 的容积式热水箱。节流机构采用长度为 $3.5\text{ m}$ 的 $\text{O}5\text{ mm}$ 毛细管。速热热水装置的额定功率为 $3\text{ kW}$ 。

### 2.2 测点布置与测试仪器

温度测点主要布置在废水取热装置进出口、废水取热装置内部、容积式热水箱进出口、压缩机吸排气口等,采用Pt1000温度传感器,其精度为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。压力测点布置在压缩机吸排气口,采用压力传感器,精度为1级。实验机功耗采用EDA9133A综合电力监控模块测量,精度为1级。水流量测点布置在混水阀热水入口端与混水阀出口端,采用涡轮流量计进行测量,测量范围为 $0.2\sim 1.2\text{ m}^3/\text{h}$ ,精度为0.5级。具体测点布置见图1。

### 2.3 实验方法

实验过程中,通过调节混水阀,使得喷头出水温度为 $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,喷头流量为 $6\text{ kg}/\text{min}$ ,淋浴时间设定为 $15\text{ min}$ 。当水箱中所测水温达到 $49\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,手动开启喷头,开始实验。淋浴进行 $1\text{ min}$ 后,压缩机开始运行。淋浴完成后,喷头关闭,压缩机继续运行,当水箱中所测水温达到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,关闭压缩机,实验结束。实验过程中,当混水阀热水端的温度低于 $44\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,速热装置开启,用来提高热水端的进水温度,保证实验的正常进行。

为了对比预热水环路对系统性能的影响,分别进行了以下3组实验:

1) 方案1:进入混水阀的冷水直接来自自来水,没有经过废水取热装置预热;进入混水阀的热水没有经过废水取热装置的预热直接经过热水箱换热。

2) 方案2:进入混水阀的冷水直接来自自来水,没有经过废水取热装置的预热;进入混水阀的热水先后经过废水取热装置的预热以及热水箱换热。

3) 方案3:进入混水阀的冷水经过废水取热装置的预热;进入混水阀的热水先后经过废水取热装置的预热以及

热水箱换热。

### 3 实验结果与讨论

实验结果表明,3种方案下压缩机的运行时间分别为32.3、30.6、29.4 min。

容积式热水箱热水的平均温度随时间的变化如图3所示。方案1中,容积式热水箱中水的温度由最初时刻的

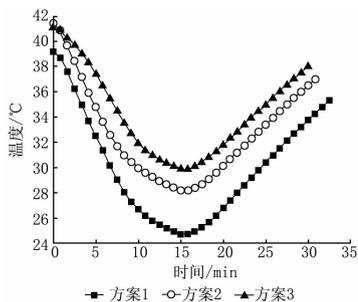


图3 容积式热水箱中水的平均温度随时间的变化

39 °C下降到15 min时的24.5 °C,再于32 min时上升到35 °C;方案2,3的曲线变化趋势与方案1一致。其中,方案1的下降幅度最大,达到了14.5 °C;方案3的下降幅度最小,为11.5 °C。由于预热水环路的存在提高了容积式热水箱进水的温度,在同一时刻,方案3中热水箱平均水温最高。

热水箱进出口水温差(温度测点T9与T6的差值)随时间的变化如图4所示。方案1中,容积式热水箱进出口

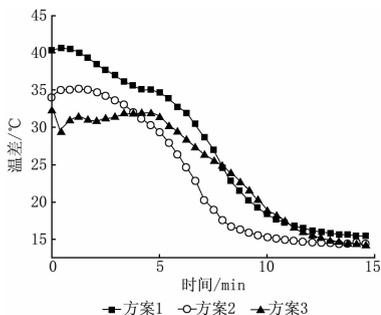


图4 热水箱进出口水温差随时间的变化

水温差由最初时刻的40 °C逐级下降到15 min时的16 °C。方案2,3的曲线变化趋势与方案1一致。由于预热水环路提高了容积式热水箱的进水温度,降低了进出口水温差,在同一时刻,方案3中容积式热水箱进出口水温差最小。

压缩机功耗随时间变化的曲线如图5所示。方案1中,压缩机耗电率在淋浴过程中逐级升高到15 min时的1 500 W,淋浴结束后,消耗的电功率逐渐降低,在32 min时降低到1 250 W。方案2,3的曲线变化趋势与方案1一致。方案3中,压缩机运行耗电量最少,为0.675 kW·h。

速热热水装置消耗的电功率随时间变化的曲线如图6所示。在3个方案中,方案3速热热水装置在8 min时启

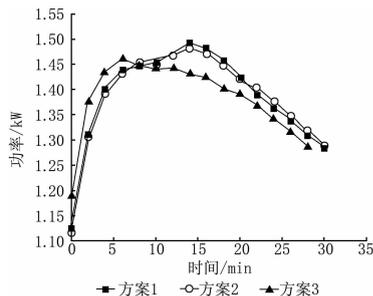


图5 压缩机功耗随时间的变化

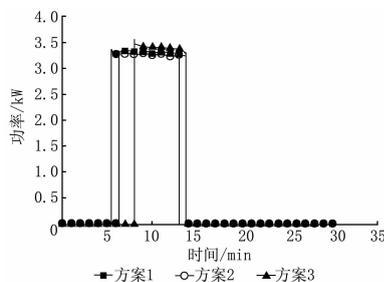


图6 速热热水装置消耗的电功率随时间的变化

动,启动时间最晚;运行时间为5 min,运行时间最短。方案3中速热热水装置耗电量为0.283 kW·h,小于方案1的0.415 kW·h以及方案2的0.451 kW·h。预热水环路的存在提高了容积式水箱出水口的温度,延缓了速热热水装置启动的时间。

根据热水箱热水的平均温度、热水箱体积、热水箱进出口水流量、热水箱进出口水温差可以计算得到系统运行过程中产生的能量;根据系统的电功率可以得到系统消耗的电能。由此可以得到系统运行过程中的COP。计算结果见图7。

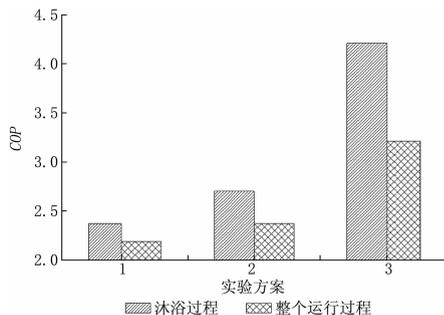


图7 系统运行时 COP

方案3的系统平均COP最高,达到了3.21,较方案1的2.19提高了46.6%,较方案2的2.37提高了35.4%;方案3淋浴过程中平均COP最高,达到了4.21,较方案1的2.37提高了77.6%,较方案2的2.70提高了55.9%。

方案2,3中,淋浴用水在经过废水取热装置中的预热水环路后温度得以提高。经过预热水环路后淋浴水进出口温差见图8。可以看出,方案2进出口温差的极大值能达

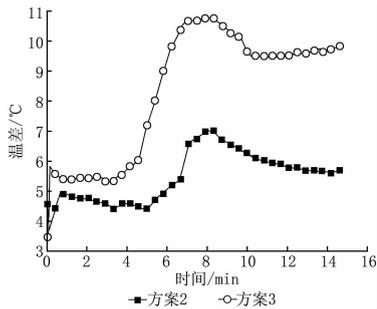


图8 淋浴水经过预热水环路后进出口温差的变化

到  $7.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 平均温差达到  $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 方案3 进出口温差的最大值能达到  $10.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 平均温差达到  $8.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3种方案下, 废水取热装置最底端污水温度随时间的变化见图9。方案1中, 废水取热装置最底端污水温度由

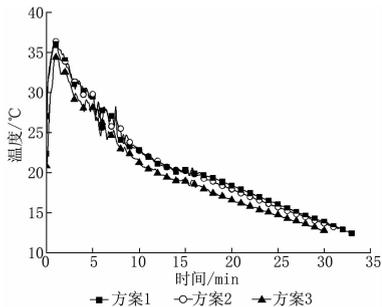


图9 废水取热装置最底端污水温度随时间的变化

$1\text{ min}$  时的  $36\text{ }^{\circ}\text{C}$  逐渐降低至  $32\text{ min}$  时的  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 方案2, 3的曲线变化趋势与方案1一致。这是由于随着制冷循环的进行, 制冷剂不断从废水中提取热量, 导致温度降低。同一时刻, 方案3中最底端污水温度最低, 这是由于预热水环路的存在, 部分热量已经由预热水环路传递进入热水箱中。

为了对比家用淋浴系统污水源热泵热水器与传统电加热热水器的节能效益, 在容积式热水箱中添加电加热装置进行对比实验。实验过程中, 调节混水阀, 使得喷头出水温度为  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 喷头流量为  $6\text{ kg/min}$ , 淋浴时间设定为  $15\text{ min}$ 。当水箱中所测水温达到  $49\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 手动开启喷头, 开启电加热装置, 开始实验。淋浴完成后, 喷头关闭, 电加热装置继续运行, 当水箱中所测水温达到  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 关闭电加热装置, 实验结束。实验过程中, 当混水阀热水端的温度低于  $44\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 速热装置开启, 用来提高热水端的进水温度, 保证实验的正常进行。

系统运行消耗的电功率随时间的变化如图10所示。系统在运行过程中消耗的总电量为  $2.769\text{ kW}\cdot\text{h}$ , 相比于家用淋浴污水源热泵热水器所消耗的  $0.958\text{ kW}\cdot\text{h}$ , 增加了  $1.811\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

该家用淋浴污水源热泵热水器的市场价格大约为  $2500$  元, 而市场上出售的同等容积的家用电热水器的平

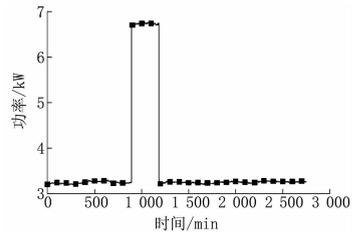


图10 电加热系统消耗的电功率随时间的变化

均价格约为  $1500$  元。实验工况下单次洗澡能节省的电能大约为  $1.811\text{ kW}\cdot\text{h}$ , 电价为  $0.51\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ , 单次洗澡节约的费用为  $0.92$  元。按照人均家庭每人每3天洗1次澡, 一个三口之家一年可节省  $336$  元, 大约  $2.97$  年即可回收成本。

#### 4 结论

本文针对家用淋浴废水的排放特性, 提出了适用于家庭单户使用的淋浴污水源热泵热水器系统, 设计了新型淋浴废水取热装置, 完成了家用淋浴污水源热泵热水器实验台的设计。通过测量相关实验数据, 分析了预热水环路对于系统特性的影响。

经过预热水环路后, 出口水温提高了  $8.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 淋浴污水源热泵热水器系统的平均  $COP$  由无预热水环路运行时的  $2.19$  增加至  $3.21$ 。相比于无预热水环路的系统, 容积式热水箱内水的平均温度提高, 容积式热水箱进出口水温差降低, 压缩机运行能耗降低, 速热热水装置运行时间缩短, 废水取热装置最底端污水温度降低。

#### 参考文献:

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2013[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 3
- [2] 罗清海, 汤广发, 龚光彩, 等. 建筑热水节能途径分析[J]. 煤气与热力, 2004, 24(6): 353-357
- [3] Shen C, Jiang Y Q, Yao Y, et al. Experimental performance evaluation of a novel dry-expansion evaporator with defouling function in a wastewater source heat pump [J]. Applied Energy, 2012, 95(7): 202-209
- [4] 孔祥雷, 周根明, 陈育平. 一种回收排水热的新型热泵式热水器的设计[J]. 江苏科技大学学报: 自然科学版, 2009, 23(5): 407-410
- [5] 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
- [6] 黄春松, 郑久军, 刘胜君. 洗浴废热回收利用工程的技术与经济性分析[J]. 节能, 2010, 29(2): 69-71
- [7] Wong L T, Mui K W, Guan Y. Shower water heat recovery in high-rise residential buildings of Hong Kong [J]. Applied Energy, 2010, 87(2): 703-709
- [8] McNabola A, Shields K. Efficient drain water heat recovery in horizontal domestic shower drains [J]. Energy and Buildings, 2012, 59(4): 44-49