

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201604012



# 不同出水方式下电热水器出水时间与出水量的预测模型

冉茂宇

(华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 对电热水器 2 种出水方式的热过程进行解析, 导出在有无加热条件下壳体内水温随出流时间的变化关系. 在此基础上, 提出壳体内水温降至某一值时的出水时间与出水量的预测模型, 并通过实测值与计算值对比, 验证预测模型的有效性. 讨论水容积、加热功率和气温对单人淋浴使用热水器选择的影响, 以及气温对不同容量热水器加热设置温度的影响. 结果表明: 热水器选择宜以当地最低气温、最高设置温度及一次性用水量来确定; 对于单人淋浴使用的热水器, 为满足一次性加热和用水要求, 冬季气温较高和较低的地区宜分别选择较小和较大容量热水器; 为了实现节能, 热水器在加热过程中设置的温度应根据外气温进行调整.

**关键词:** 电热水器; 出水方式; 出水时间; 出水量; 预测模型

**中图分类号:** TM 925.32; TK 12      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)04-0451-05

## Prediction Model of Water Draining Time and Volume for Electric Water Heater in Different Water Draining Modes

RAN Maoyu

(College of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Through the analysis of thermal process of electric water heater in two water draining modes, the relationships between water temperature and water draining time are derived under heating and no-heating condition, the prediction models of water draining time and volume are put forward when the water temperature falls to certain value, and by comparing the measured values and calculated values, the validity of these prediction models is also verified. As the example of the prediction model application, the effects of water capacity, heating power and ambient temperature on the selection of water heater for single person shower are discussed, and the effect of ambient temperature on the set temperature for heating is also discussed for different capacity water heater. It shows that: the selection of water heater should be determined by the local lowest air temperature, the highest set temperature and one time used water volume; for the water heater of one person showering, in order to meet the requirement of one time heating, small water capacity should be chosen for high air temperature in winter, and vice-versa in order to achieve the energy saving, the set temperature should be adjusted according to the outside air temperature during the heating process of water heater.

**Keywords:** electric water heater; water draining mode; water draining time; water draining volume; prediction model

**收稿日期:** 2015-10-13  
**通信作者:** 冉茂宇(1967-), 男, 教授, 博士, 主要从事建筑热工与建筑节能、室内外热湿环境、绿色建筑与生态技术的研究. E-mail: ranmaoyu@hqu.edu.cn.  
**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51078156); 福建省自然科学基金资助项目(2010J01297); 福建省小发明、小创造专项基金资助项目(2009—2011 年度); 华侨大学基本科研业务费专项基金资助项目(JB-JC1006); 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室科研基金资助项目(2009KB13)

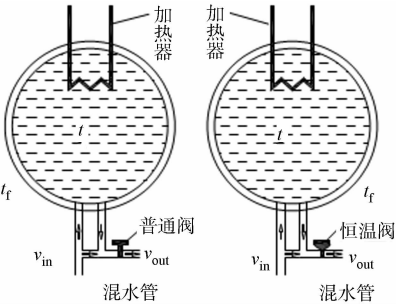
电热水器因其用能方便、技术成熟、安全可靠、性能稳定、易于维护等优点,得到了广泛地应用.电热水器在使用过程中需消耗大量电能.据报道,家用热水器和炊事用能至少占家庭总用能的 20% 以上,有的甚至达 60%.目前,关于电热水器节能方面的研究,多数关注的是电热水器本身的技术性节能<sup>[1-4]</sup>,以及可再生资源和廉价能源的利用<sup>[5-8]</sup>,较少从电热水器运行管理的角度研究其能效问题<sup>[9-12]</sup>.基于此,本文对热水器在使用过程中出水量和出水时间进行研究.

1 电热水器用水时段的出水方式

电热水器在用水时段的两种出水方式,如图 1 所示.1) 在混水管上装有普通阀,用混水管提供热水,在刚出水时,用阀门将出水温度调节到某值后,保持出水量不变进行用水.在这种情况下,因冷热水混合比例在用水过程中保持不变,而出水温度不断变化,称为恒流变温方式.2) 在混水管上装有恒温阀,用混水管提供热水.在这种情况下,用水期间因恒温阀有恒温功能,在保持出水流量不变的同时,也保持出水温度不变,称为恒流恒温方式.对于家用电热水器而言,在用水过程中,2 种出水方式有时同时存在.

2 恒流变温出水时间与出水量的预测

记热水器加热功率为  $P$ ,壳体内初始水温为  $t_0$ ,环境气温为  $t_f$ ,混合冷水流量和温度分别为  $v_0, t_{in}$ ,混合热水流量和温度分别为  $v_{in}, t$ ,出水流量和温度分别为  $v_{out}, t_{out}$ ,出水初始水温为  $t_{ou}$ .



(a) 恒流变温 (b) 恒流恒温  
图 1 电热水器 2 种出水方式

Fig. 1 Two water draining modes of electric water heater

忽略水的密度  $\rho$  和比热  $C_p$  因水温不同造成的变化,根据质量守恒定律和能量守恒定律,有

$$v_{out}\rho = v_{in}\rho + v_0\rho,$$
$$v_{out}\rho C_p t_{ou} = v_{in}\rho C_p t + v_0\rho C_p t_{in},$$
$$v_{out}\rho C_p t_{out} = v_{in}\rho C_p t + v_0\rho C_p t_{in}.$$

(1)  
(2)  
(3)

由式(1),(2)可得混合热水流量为

$$v_{in} = \frac{v_{out}(t_{ou} - t_{in})}{t_0 - t_{in}}.$$

(4)

由于恒流变温方式出水情况下  $v_{out}$  为定值,由式(4)可知,混合热水流量  $v_{in}$  也为定值.忽略管道热损失,则混合热水温度与壳体内水温均为  $t$ .假设壳体内水温分布均匀,热水器壳体的蓄热作用不计,则壳体内水的热平衡方程为

$$V\rho C_p \frac{dt}{d\tau} = P - v_{in}\rho C_p (t - t_{in}) - KF(t - t_f).$$

(5)

由于壳体保温层热阻远大于内外对流换热热阻,可认为在出水过程中壳体平均传热系数  $K$  变化不大.将式(4)代入式(5)整理,可得

$$\frac{dt}{d\tau} + \frac{v_{out}\rho C_p (t_{ou} - t_{in}) + KF(t_0 - t_{in})}{V\rho C_p (t_0 - t_{in})} t = \frac{v_{out}\rho C_p (t_{ou} - t_{in}) t_{in} + (P + KFt_f)(t_0 - t_{in})}{V\rho C_p (t_0 - t_{in})},$$
$$t = \frac{(P + KFt_f)(t_0 - t_{in}) + v_{out}\rho C_p t_{in}(t_{ou} - t_{in})}{v_{out}\rho C_p (t_{ou} - t_{in}) + KF(t_0 - t_{in})} + C \cdot \exp(-\frac{v_{out}\rho C_p (t_{ou} - t_{in}) + KF(t_0 - t_{in})}{V\rho C_p (t_0 - t_{in})}\tau).$$

(6)  
(7)

式(7)中: $C$  为积分常数.将  $\tau=0, t=t_0$  代入式(7),可得恒流变温方式下,既出水又加热时壳体内水温为

$$t = \frac{(P + KFt_f)(t_0 - t_{in}) + v_{out}\rho C_p t_{in}(t_{ou} - t_{in})}{v_{out}\rho C_p (t_{ou} - t_{in}) + KF(t_0 - t_{in})} +$$
$$\left[ t_0 - \frac{(P + KFt_f)(t_0 - t_{in}) + v_{out}\rho C_p t_{in}(t_{ou} - t_{in})}{v_{out}\rho C_p (t_{ou} - t_{in}) + KF(t_0 - t_{in})} \right] \exp(-\frac{v_{out}\rho C_p (t_{ou} - t_{in}) + KF(t_0 - t_{in})}{V\rho C_p (t_0 - t_{in})}\tau).$$

(8)

如果在出水期间不加热,令  $P=0$ ,可得恒流变温方式下,只出水不加热的壳体内水温计算式.联立式(1),(3),可得出水温度  $t_{out}$  与壳体内水温的关系为

$$t_{out} = t_{in} + v_{in}(t - t_{in})/v_{out}.$$

(9)

将式(4),(8)代入式(9)整理,得恒流变温方式下,既出水又加热时出水温度为

$$t_{\text{out}} = t_{\text{in}} + (t_{\text{ou}} - t_{\text{in}}) \left[ \frac{P + KF(t_{\text{f}} - t_{\text{in}})}{v_{\text{out}} \rho C_p (t_{\text{ou}} - t_{\text{in}}) + KF(t_0 - t_{\text{in}})} + \frac{KF(t_0 - t_{\text{f}}) - P + v_{\text{out}} \rho C_p (t_{\text{ou}} - t_{\text{in}})}{v_{\text{out}} \rho C_p (t_{\text{ou}} - t_{\text{in}}) + KF(t_0 - t_{\text{in}})} \cdot \exp\left(-\frac{v_{\text{out}} \rho C_p (t_{\text{ou}} - t_{\text{in}}) + KF(t_0 - t_{\text{in}})}{V \rho C_p (t_0 - t_{\text{in}})}\right) \right]. \tag{10}$$

若在出水期间不加热,令  $P=0$ . 恒流变温方式下,只出水不加热时出流水温是式(10)的特殊情况. 设壳体内水温从  $t_0$  降至某一温度  $t_c$  时,出水时间为  $\tau_c$ ,则可由式(8)推导出既出水又加热时出水时间为

$$\tau_c = -\frac{V \rho C_p (t_0 - t_{\text{in}})}{v_{\text{out}} \rho C_p (t_{\text{ou}} - t_{\text{in}}) + KF(t_0 - t_{\text{in}})} \times \ln \left[ \frac{v_{\text{out}} \rho C_p (t_c - t_{\text{in}})(t_{\text{ou}} - t_{\text{in}}) + [KF(t_c - t_{\text{f}}) - P](t_0 - t_{\text{in}})}{[v_{\text{out}} \rho C_p (t_{\text{ou}} - t_{\text{in}}) + KF(t_0 - t_{\text{f}}) - P](t_0 - t_{\text{in}})} \right]. \tag{11}$$

由于  $v_{\text{out}}$  不变,当壳体内水温降至  $t_c$  时,既出水又加热时出水量  $V_c$  为

$$V_c = -\frac{v_{\text{out}} V \rho C_p (t_0 - t_{\text{in}})}{v_{\text{out}} \rho C_p (t_{\text{ou}} - t_{\text{in}}) + KF(t_0 - t_{\text{in}})} \times \ln \left[ \frac{v_{\text{out}} \rho C_p (t_c - t_{\text{in}})(t_{\text{ou}} - t_{\text{in}}) + [KF(t_c - t_{\text{f}}) - P](t_0 - t_{\text{in}})}{[v_{\text{out}} \rho C_p (t_{\text{ou}} - t_{\text{in}}) + KF(t_0 - t_{\text{f}}) - P](t_0 - t_{\text{in}})} \right]. \tag{12}$$

若在出水期间不加热,令  $P=0$ ,可得恒流变温方式下,只出水不加热时出水时间和总量预计式.

### 3 恒流恒温出水时间与出水量的预测

$t_{\text{out}}, v_{\text{out}}$  在出水过程中均保持不变. 联立式(1),(3),可得

$$v_{\text{in}} = \frac{v_{\text{out}}(t_{\text{out}} - t_{\text{in}})}{t - t_{\text{in}}}. \tag{13}$$

由式(13)可知,在恒流恒温出水方式下, $v_{\text{in}}$  和  $v_0$  都不是定值,随壳体内水温  $t$  而变化. 将式(13)代入式(5)整理,可得恒流恒温出水方式下壳体内水的热平衡方程为

$$V \rho C_p \frac{dt}{d\tau} = P - v_{\text{out}} V \rho C_p (t_{\text{out}} - t_{\text{in}}) - KF(t - t_{\text{f}}). \tag{14}$$

由式(14)可得

$$\frac{dt}{d\tau} + \frac{KF}{V \rho C_p} t = \frac{P - v_{\text{out}} V \rho C_p (t_{\text{out}} - t_{\text{in}}) + KF t_{\text{f}}}{V \rho C_p}, \tag{15}$$

代入  $\tau=0, t=t_0$ ,解式(15),可得

$$t = \frac{P - v_{\text{out}} V \rho C_p (t_{\text{out}} - t_{\text{in}}) + KF t_{\text{f}}}{KF} + \left[ t_0 - t_{\text{f}} + \frac{v_{\text{out}} \rho C_p (t_{\text{out}} - t_{\text{in}}) - P}{KF} \right] \cdot \exp\left(-\frac{KF \tau}{V \rho C_p}\right). \tag{16}$$

式(16)为恒流恒温出水方式下,既出水又加热时壳体内水温计算式. 令  $P=0$ ,可得恒流恒温出水方式下只出水不加热时壳体内水温的计算式. 当壳体内水温从  $t_0$  降至  $t_c$  时,对应的出水时间  $\tau_c$  为

$$\tau_c = -\frac{V \rho C_p}{KF} \ln \left[ \frac{KF(t_c - t_{\text{f}}) - P + v_{\text{out}} \rho C_p (t_{\text{out}} - t_{\text{in}})}{KF(t_0 - t_{\text{f}}) - P + v_{\text{out}} \rho C_p (t_{\text{out}} - t_{\text{in}})} \right]. \tag{17}$$

由于  $v_{\text{out}}$  不变,当壳体内水温降至  $t_c$  时,既出水又加热时出水量  $V_c$  为

$$V_c = -\frac{v_{\text{out}} V \rho C_p}{KF} \ln \left[ \frac{KF(t_c - t_{\text{f}}) - P + v_{\text{out}} \rho C_p (t_{\text{out}} - t_{\text{in}})}{KF(t_0 - t_{\text{f}}) - P + v_{\text{out}} \rho C_p (t_{\text{out}} - t_{\text{in}})} \right]. \tag{18}$$

若出水期间不加热,令  $P=0$ ,可得恒流恒温方式下,只出水不加热时出水时间和出水量的预计式.

### 4 预测模型实验验证

在恒流变温出水测试中,先将水温加热到 55,65,75 ℃,在断电情况下,将出水初始水温调到 40 ℃进行测试. 当壳体内水温降至 40 ℃时,出水量实测结果,以及利用式(12)得到的  $V_c$  计算值,如表 1 所示. 由表 1 可知:计算值与测试值的相对误差不超过 4%,这说明预测模型(式(12))具有较好的可靠性.

在恒流恒温出水方式下,由于需要保持  $t_{\text{out}}$  和  $v_{\text{out}}$  在整个出水过程中不变,而现有最好的恒温阀也只是在 37~43 ℃范围内具有相对的恒温作用. 因此,对式(17),(18)进行直接实验验证相当困难. 因式

(17),(18)是由式(16)直接导出,故验证式(16)即可验证式(17),(18). 式(14)中  $P-v_{\text{out}}\rho C_p(t_{\text{out}}-t_{\text{in}})$  不变,故可令  $p'=P-v_{\text{out}}\rho C_p(t_{\text{out}}-t_{\text{in}})$  为等效加热功率,则式(14),(16)分别为

$$V\rho C_p\frac{\text{d}t}{\text{d}\tau}=P'-KF(t-t_f),$$

(19)

$$t=\frac{P'+KFt_f}{KF}+[t_0-t_f-\frac{P'}{KF}]\cdot\exp(-KF\tau/(V\rho C_p)).$$

(20)

表 1 出水量计算值与实测值对比

Tab. 1 Comparison between the calculation results and measured results of water draining volume

$t_0/\text{℃}$	$V/\text{m}^3$	$KF/\text{W}\cdot\text{℃}^{-1}$	$t_f/\text{℃}$	$t_{\text{in}}/\text{℃}$	$v_{\text{out}}/\times 10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_c/\text{m}^3$		
						实测值 <sup>[10]</sup>	计算值	$\eta/\%$
55	0.06	1.581	24	23	6.667	0.070 6	0.070 709	0.15
65	0.06	1.581	24	23	6.667	0.128 0	0.132 270	3.34
75	0.06	1.581	24	23	6.667	0.205 6	0.201 769	-1.86

由此可知:式(19)是热水器加热功率为  $p'$ ,不出水时壳体内水的热平衡方程式;式(20)是对应条件下壳体内水温变化的计算式. 因此,可将  $P$  和  $v_{\text{out}}\rho C_p(t_{\text{out}}-t_{\text{in}})$  对式(16)的影响转化为  $P'$  对式(20)的影响,从而通过验证式(20)的有效性验证式(16)的有效性.

为了验证式(20)的有效性,利用某品牌 40 L 热水器进行加热升温 and 自然降温测试. 该热水器的保温性能为 1 级,其  $KF=0.773\text{ W}\cdot\text{℃}^{-1}$ . 加热升温期间,  $t_0=31\text{ ℃}$ ,  $P'=5\,000\text{ W}$ ,  $t_f=26.5\text{ ℃}$ . 加热升温实测值和相同条件下式(20)的计算值,如图 2 所示. 自然降温期间,  $t_0=72\text{ ℃}$ ,  $P'=0$ ,  $t_f=24\text{ ℃}$ , 测试结果与式(20)的计算结果,如图 3 所示. 由图 2,3 可知:计算值与实测值吻合较好,说明预测模型有效.

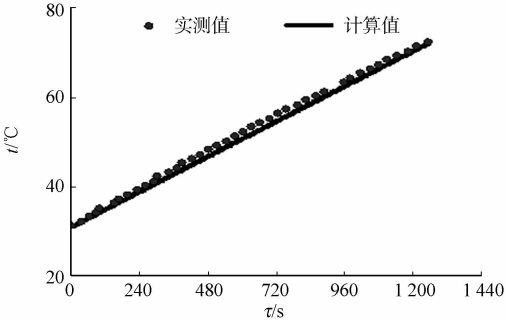


图 2 加热期间水温实测值与计算值对比  
Fig. 2 Comparison between the calculation results and measured results of water temperature during heating period

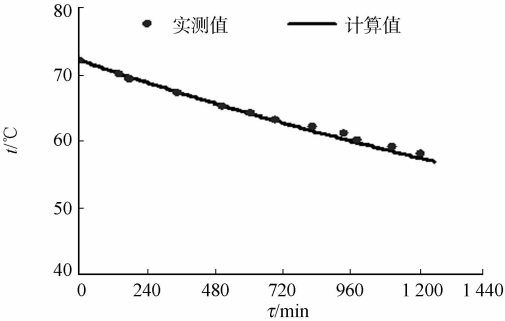


图 3 降温期间水温实测值与计算值对比  
Fig. 3 Comparison between the calculation results and measured results of water temperature during cooling period

5 预测模型的应用示例

预测模型可用于指导热水器选型. 在  $v_{\text{out}}, t_{\text{out}}, t_c$  为额定条件下,利用式(17),(18)考察各种参数对  $\tau_c$  和  $V_c$  的影响. 结论表明:  $\tau_c, V_c$  随  $V, P, t_0$  增加而明显增加,随  $t_f$  降低和  $KF$  增加而稍有减小,随  $t_{\text{in}}$  降低而显著降低. 由于冷水温度  $t_{\text{in}}$  与环境气温  $t_f$  相近,热水器加热设定温度一般为  $35\sim75\text{ ℃}$ . 因此,在选购热水器时,宜以所在地最低气温  $t_f$  和最高设定温度  $75\text{ ℃}$  选择热水器  $V$  和  $P$ .

以单人淋浴为例,淋浴时,  $t_{\text{out}}=40\text{ ℃}$ , 1 次淋浴用水,  $V_c\approx0.07\text{ m}^3$ ,  $\tau_c\approx20\times60\text{ s}$ . 在式(18)中代入  $V_c=0.07\text{ m}^3$ ,  $v_{\text{out}}=5.833\times10^{-5}\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $t_0=75\text{ ℃}$ ,  $t_{\text{out}}=40\text{ ℃}$ , 计算 40, 50, 60, 70, 80 L (保温均为 1 级)热水器在不同气温  $t_f=t_{\text{in}}$  下的  $P$  值,结果如图 4 所示. 由图 4 可知:对于气温不低于  $20\text{ ℃}$  的地区,选择 40 L 热水器,在初始水温设定为  $75\text{ ℃}$  时,能满足 1 人 1 次淋浴期间不加热的要求;对于气温最低值为  $10\text{ ℃}$  的地区,选择 60 L 热水器,在初始水温为  $75\text{ ℃}$  时,能满足 1 人 1 次淋浴期间不加热的要求;但选择 40 L 和 50 L 热水器,尽管初始水温设定为  $75\text{ ℃}$ ,淋浴期间必须加热才能满足要求;对于 40 L 热水器,加热功率至少需要  $2\,443\text{ W}$ ,对于 50 L 热水器加热功率至少需要  $1\,244\text{ W}$ .

预测模型的另一应用是指导热水器在使用过程中加热温度的设定. 显然,按最低气温值和最高设定

值选购的热水器,在使用过程中,随着气温和冷水温度升高,初始水温设定应相应降低才能在使用过程中节能.仍以单个人淋浴期间不加热为例.在式(18)中代入  $V_c=0.07\text{ m}^3$ ,  $v_{\text{out}}=5.833\times10^{-5}\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $P=0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_c=t_{\text{out}}=40\text{ }^\circ\text{C}$ , 计算 40,50,60,70,80 L 热水器在不同气温  $t_i=t_{\text{in}}$  下的  $t_0$ , 结果如图 5 所示.由图 5 可知:对于气温不低于为  $20\text{ }^\circ\text{C}$  的地区,选择 40 L 热水器,当气温升至  $26\text{ }^\circ\text{C}$  时,初始水温设定为  $65\text{ }^\circ\text{C}$  即可满足 1 人次淋浴期间不加热要求.

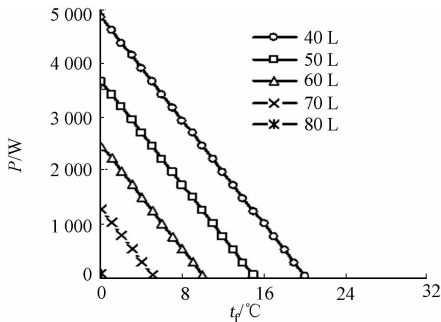


图 4  $t_i$ ,  $P$  和  $V$  对单人淋浴热水器选择的影响  
Fig. 4 Effect of  $t_i$ ,  $P$  and  $V$  on selection of water heater for one person shower

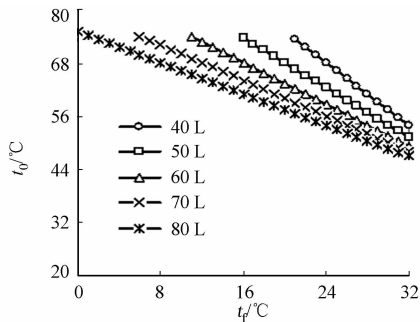


图 5 设置温度与气温的关系  
Fig. 5 Relationship between set temperature and ambient temperature

## 6 结论

电热水器在恒流变温出水方式下,壳体中水温随时间的变化可用式(8),(16)进行计算;当壳体中水温降至某一温度值时,出水时间可用式(10),(17)进行预测;出水量可分别用式(11),(18)进行预测.

对于热水器的选择型,建议按一次用水期间不再加热来选择,首先,确定一次用(出)水量  $V_c$  和用(出)水时间  $\tau_c$ . 然后,根据提出的预测模型,计算最高设定温度和最低气(冷水)温下水容量  $V$  和加热功率  $P$  的关系,按  $V$  和  $P$  的关系选择相应的水容量和加热功率.

对于热水器的使用,建议设定温度的设置应根据气温或冷水温度的变化进行调整,设定温度与气温或冷水温度之间的关系可用文中提出的模型进行预计.此外,当壳体内水温度加热到设定温度后,应立即停止加热并用水,可保证能源有效利用.

## 参考文献:

[1] 郑金玲,胡小芳,黄焕文. 储水式电热水器的有限元能效分析[J]. 化工机械,2011,38(3):309-312.  
[2] 杨文强,刘树聃. 基于 HT46R23 单片机控制的太阳能热水器节能供水系统设计[J]. 安徽农业科学,2012,40(6):3776-3778.  
[3] 刘虎,化莉,孙汉忠. 智能型太阳能热水器水位水温测控系统的研制[J]. 淮阴工学院学报,2002,11(5):23-25  
[4] 李彩霞,刘洋,孙强,等. 组合加热方式在电热水器上的研究及应用[J]. 家电科技,2014(11):80-83.  
[5] 梁宏博. 太阳能热水器回收年限与节能简要分析[J]. 太阳能,2012(15):10-12.  
[6] 胡韩莹,巨小平,林州强,等. 外盘管空气源热泵热水器不同工况下的试验研究[J]. 流体机械,2012,40(12):58-61.  
[7] 李建新,王永川,陈光明. 相变储热预热式热泵热水器系统性能研究[J]. 太阳能学报,2008,29(10):1230-1234.  
[8] 陈观生,李凡. 家用热水器节能垫的试验研究[J]. 广东工业大学学报,2002,19(2):46-47.  
[9] 牛纪德,周遵凯,杨先亮. 电热水器运行方式与能耗的理论分析[J]. 山西建筑,2012,38(26):213-214.  
[10] 孙园,陈天翔,张辑,等. 家用电热水器节能使用方式的探讨[J]. 电力需求与管理,2013,15(3):25-28.  
[11] 中国工程建设标准化协会组织. 建筑给排水设计规范: GB 50015-2003[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009:7-10.  
[12] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会,中国家用电器研究院. 储水式电热水器: GB/T 20289-2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006:2-10.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)