

丽江市阳台壁挂式平板型 太阳能热水器水量配比特性研究^①

胡粉娥¹, 魏生贤²

1. 曲靖师范学院 化学与环境科学学院, 云南 曲靖 655011;

2. 曲靖师范学院 磁性材料及器件研究中心, 云南 曲靖 655011

摘要: 基于典型气象数据, 利用所建数学模型对丽江市阳台壁挂式平板型太阳能热水器的水量配比进行了计算。结果表明, 春、夏、秋、冬四季和全年的水量配比分别位于 28.1~43.5, 21.6~35.3, 35.1~45.4, 47.3~57.3 和 33.0~45.4 kg/m² 之间。为便于应用, 文中给出了正南向季均和年均水量配比 $(V_t/A_c)_n$ 与 β 间相关系数大于 0.99 的回归关系式。理论分析显示, 方位角 $\leq 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 时, 方位角对水量配比的影响约为 5%、10% 和 15%, 对应季均和年均水量配比的方位角因子分别位于 0.95~1.00, 0.91~1.00 和 0.85~0.99 之间。

关键词: 阳台壁挂式太阳能热水器; 水量配比; 平板型集热器; 方位角; 方位角因子

中图分类号: TK519

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2017)10-0094-06

太阳能热水器已广泛应用于我国城市和农村地区。2015 年底, 我国太阳能热水器的安装总量达到 2.5 亿 m², 预计 2020 年底达到 6.0 亿 m²^[1]。太阳能热水器的大规模应用, 对我国节能减排^[2-3]、实现国家发改委提出的“2020 年非化石能源的份额达到 15%”^[4] 的目标具有积极作用。

为保证太阳能热水器的高效运行和用户对水箱终温的需求, 世界各国对平板型太阳能热水器水箱水量与集热面积配比 V_t/A_c (tank-volume-to-collector-area ratio, 简称水量配比) 给出了不同的推荐值: 美国^[5] 与希腊^[6] 75 kg/m²、马来西亚^[7] 与土耳其^[8] 50~70 kg/m²、塞浦路斯^[9] 45~60 kg/m²、爱尔兰^[10] 50 kg/m²、中国^[11] ≤ 100 kg/m²。此外, 文献^[12] 考虑气候因素、系统投资的基础上对热水器水量配比进行了讨论; 文献^[5] 则认为 50~90 kg/m² 较为合适。昆明气候条件下平板型热水器水量配比为 60~100 kg/m² 较为合适^[13]。

我国地域辽阔, 气候复杂, 上述研究给出的水量配比范围较大, 不利于实际应用。其次, 我国大中城市居住建筑主要为高层建筑, 屋顶安装的太阳能热水器仅能满足顶层往下 6~8 层用户的热热水需求。阳台壁挂式太阳能热水器的应用将会解决太阳能热水器安装位置不够的问题, 可使每层居民都能使用太阳能提供的热水。但目前阳台壁挂式平板型热水器水量配比研究较为鲜见, 制约了太阳能热水器在高层建筑中的应用。为解决此问题, 本文依据平板太阳能集热器有用能量输出模型建立了平板型太阳能热水器的水量配比模型。前期研究显示, 模型计算值与实验值的相对百分误差小于 10%^[14]。本文以云南丽江市为例, 利用所建模型对阳台壁挂式平板型热水器水量配比进行了计算和分析。为便于应用, 文中给出了春、夏、秋、冬四季和全年使用南向阳台挂壁式太阳能热水器水量配比的取值范围, 并给出了季均、年均水量配比 $(V_t/A_c)_n$ 与 β 间相关系数大于 0.99 的数学关系式。为快速确定不同方位时的水量配比, 本文引入了“水量配比的方位角因子”, 利用模型进一步讨论了方位角对热水器水量配比的影响。

① 收稿日期: 2015-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(31760341); 云南省科技厅面上项目(2013FZ111)。

作者简介: 胡粉娥(1977-), 女, 云南沾益人, 副教授, 硕士, 主要从事化学工程与太阳能热利用的研究。

1 模型建立

1.1 平板型集热器能量输出模型

单位倾斜面上时均接收的太阳总辐射强度 I_β 为^[15]

$$I_\beta = K_b I_b \cos\theta + \frac{1}{3} K_d I_d (2 + \cos\beta) + \frac{1}{2} \rho_g K_g I_h (1 - \cos\beta) \quad (1)$$

式中, I_b, I_d 和 I_h 分别为时均太阳直射、地面散射辐射和总辐射强度. θ 为太阳直射光对斜面的入射角, β 为集热器倾角, ρ_g 为地面反射率. I_b, I_d 和 I_h 可由水平面上月平均日太阳总辐射量折算得出^[14].

倾斜面上直射、散射和地面反射辐射强度的入射角修正因子 K_b, K_d 和 K_g 由式(2) 确定^[16].

$$\begin{cases} K_b = 1 + b_0 (1/\cos\theta - 1) \\ K_d = 1 + b_0 (1/\cos\theta_d - 1) \\ K_g = 1 + b_0 (1/\cos\theta_g - 1) \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} \theta_d = 59.68 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \\ \theta_g = 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2 \end{cases} \quad (3)$$

太阳直射辐射强度对斜面的入射角

$$\cos\theta = \sin\delta(\sin\lambda\cos\beta - \cos\lambda\sin\beta\cos\gamma) + \cos\delta\cos\omega(\cos\lambda\cos\beta + \sin\lambda\sin\beta\cos\gamma) + \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega \quad (4)$$

式中, λ 为地理纬度, δ 为太阳赤纬, γ 为集热器方位角, ω 为时角, θ_d, θ_g 为倾斜面上散射和地面反射等效入射角. 对于单层透明盖板, 比例系数 $b_0 = 0.1$.

稳态工况下, t_1 至 t_2 时间内平板型集热器有用能量输出 Q_u 为

$$Q_u = A_c \int_{t_1}^{t_2} [(\tau\alpha) I_\beta - U_{Lf} (T_{abs} - T_{air})] dt \quad (5)$$

热损失系数可表示为

$$U_{Lf} = U_{top} + U_{bot} + U_{edg} \quad (6)$$

式中, A_c 为采光面积, $(\tau\alpha)$ 为透射—吸收积, U_{Lf} 为平板集热器热损失系数, T_{abs} 与 T_{air} 为吸热板与环境空气平均温度, $U_{top}, U_{bot}, U_{edg}$ 分别为集热器顶部、底部与边缘热损系数^[17].

1.2 水箱容水量与集热面积配比

用户的热热水热负荷 Q_{Load} 由式(7) 确定

$$Q_{Load} = MC_p (T_{hot} - T_w) \quad (7)$$

式中, M 为水箱容水量, C_p 为水的比热, T_{hot} 为水箱终温, T_w 为自来水温度.

当 $Q_u = Q_{Load}$ 时, 集热器输出能量即可满足热水热负荷. 此时, t_1, t_2 分别代表日出和日落时刻. 则水箱容水量与集热面积比 V_t/A_c 为

$$\frac{V_t}{A_c} = \frac{M}{A_c} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} [(\tau\alpha) I_\beta - U_{Lf} (T_{abs} - T_{air})] dt}{C_p (T_{hot} - T_w)} \quad (8)$$

式中, V_t 为水箱容水量. V_t/A_c 的单位为 L/m^2 或者 kg/m^2 . 本文取 kg/m^2 , 这样才可导出式(8) $V_t/A_c = M/A_c$.

2 模型的验证

主要测试仪器: TBQ-2 型太阳总辐射表、精度为 2%, PTWD-2A 型精密温度传感器、精度为 $\pm 0.1^\circ C$, PTS-3 型环境温湿度传感器(含防辐射罩)、精度为 $\pm 0.1^\circ C$, EC-9S(X) 型数字风速传感器、精度为 $\pm (0.3 + 0.03 V)m/s$. 实测地点为昆明, 实测时间为 2010 年 1~5 月的晴天, 8:00~18:00, 每 10 min 记录一次数

据. 水平面上日均太阳总辐射为 $17\sim 20\text{ MJ/m}^2$, 环境温度为 $15\sim 28\text{ }^\circ\text{C}$ 、风速 $0\sim 2.5\text{ m/s}$. 实验测试实物图如图 1 所示. 测试期间, 集热器南向布置, 倾角可调. 水量配比的理论计算值与实测值及其相对误差如图 2 所示: 图 2(a)是倾角为 $52^\circ, 63^\circ, 42^\circ, 35^\circ, 25^\circ$ 时系统水量配比计算值与实测值的差异; 为进一步验证模型对大倾角 ($\geq 60^\circ$) 的适应性, 图 2(b)给出了倾角为 90° 时系统水量配比计算值与实测值的关系. 图 2 的数据显示, 模型计算值稍大于实测值, 但两者的相对误差位于 $5.4\%\sim 9.7\%$.

3 计算与分析

计算过程中, 集热器倾角取 $60\sim 90^\circ$, 方位角取值为 $0\sim 90^\circ$. 水箱终温为 $60\text{ }^\circ\text{C}$, 透射-吸收积 $(\tau\alpha)$ 为 0.81 , 地面反射率 $\rho_g=0.2$, 水的比热 $C_p=4.187\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$.



图 1 实验测试实物图

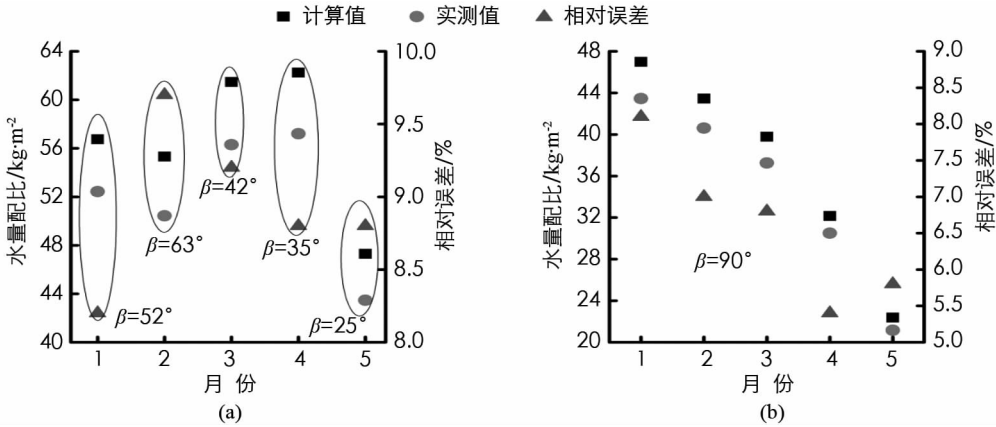


图 2 水量配比的理论计算值与实验测量值

3.1 丽江市的月平均气温与月平均日太阳总辐射量

丽江市月平均户外空气温度和南向不同倾角下月平均日单位面积接收的太阳总辐射量如图 3 所示. 图 3 显示, 丽江市最低和最高月平均空气温度分别出现在冬季和夏季, 最低和最高温度约为 $6.9\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $18.2\text{ }^\circ\text{C}$. 南向各月日均单位面积接收的太阳辐射量随倾角的增大而逐渐减小. 冬季天气晴朗, 单位面积接收的太阳辐射量最大, 达 $21.7\text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 夏季雨水较多, 单位面积接收的太阳辐射量最小, 约为 $8.5\text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$.

3.2 正南向阳台壁挂式太阳能热水器的水量配比

正南向阳台壁挂式太阳能热水器季均和年均水量配比与集热器倾角的关系如图 4 所示. 由图 4 可知: ①春、夏、秋、冬四季和全年的平均水量配比随倾角的增大而减小. ②同一倾角下, 冬季的水量配比最大, 夏季的水量配比最小, 春秋季节和全年的水量配比处于二者之间. ③同一倾角下, 年均水量配比与秋季的水量配比差异较小, 最大相差 2.1 kg/m^2 . ④春、夏、秋、冬四季和全年的水量配比分别位于 $28.1\sim 43.5$, $21.6\sim 35.3$, $35.1\sim 45.4$, $47.3\sim 57.3$ 和 $33.0\sim 45.4\text{ kg/m}^2$ 之间.

为便于应用, 本文将季均和年均水量配比 $(V_t/A_c)_n$ 与倾角 β 进行回归分析, 结果如下:

$$(V_t/A_c)_n = 59.565\text{ }0 - 0.102\text{ }10\beta - 0.002\text{ }75\beta^2 \text{ (春季, } R^2 = 0.999\text{ }9) \tag{9}$$

$$(V_t/A_c)_n = 55.912\text{ }5 - 0.266\text{ }25\beta - 0.001\text{ }27\beta^2 \text{ (夏季, } R^2 = 0.999\text{ }9) \tag{10}$$

$$(V_t/A_c)_n = 43.980\text{ }0 + 0.266\text{ }10\beta - 0.004\text{ }05\beta^2 \text{ (秋季, } R^2 = 0.999\text{ }9) \tag{11}$$

$$(V_t/A_c)_n = 43.190\text{ }0 + 0.612\text{ }40\beta - 0.006\text{ }30\beta^2 \text{ (冬季, } R^2 = 0.999\text{ }9) \tag{12}$$

$$(V_t/A_c)_n = 50.620\text{ }0 + 0.128\text{ }60\beta - 0.003\text{ }60\beta^2 \text{ (全年, } R^2 = 0.999\text{ }9) \tag{13}$$

式中, R^2 为相关系数, β 的取值范围为 $60\sim 90^\circ$.

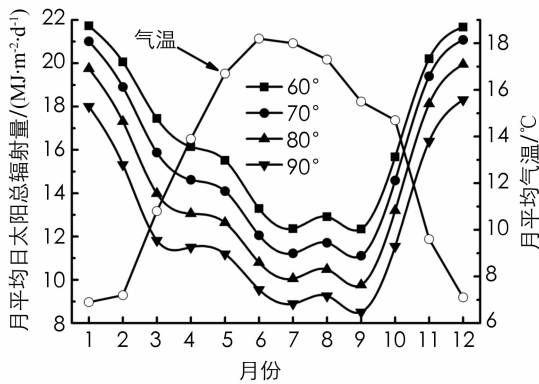


图 3 月平均气温与日均太阳总辐射量

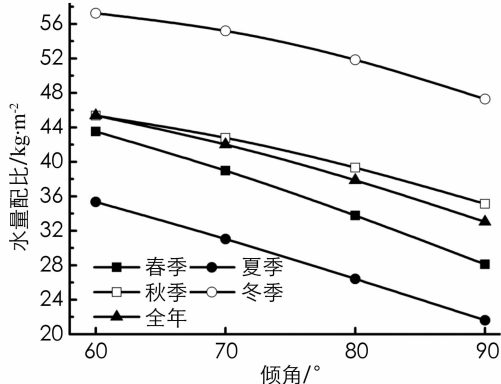


图 4 不同倾角下各季节和全年的水量配比

3.3 非正南向阳台壁挂式太阳能热水器的水量配比

为便于确定不同方位安装集热器时的水量配比, 此处引入水量配比的方位角因子, 记为 k_γ . 此因子定义为相同倾角下不同方位角安装集热器时的水量配比与正南向安装集热器时的水量配比的比值. 因此, 非正南向阳台壁挂式太阳能热水器的水量配比可由式(14) 确定

$$V_t/A_c = k_\gamma (V_t/A_c)_n \tag{14}$$

图 5 为丽江市阳台壁挂式太阳能热水器季均和年均水量配比的方位角因子与方位角的变化关系. 计算表明, 水量配比的方位角因子随方位角的变化以正南向呈对称分布, 故图 5 仅给出的方位角为正的情况. 图 5 显示: ①季均和年均水量配比的方位角因子随方位角的增大而逐渐减小, 随着倾角的增大, 方位角因子的波动幅度也略有增大. ②倾角为 $60^\circ \sim 90^\circ$ 、方位角为 $10^\circ \sim 90^\circ$ 时, 春季、夏季、秋季、冬季和全年水量配比的方位角因子分别位于 $0.77 \sim 1.00$, $0.74 \sim 1.00$, $0.55 \sim 0.99$ 和 $0.69 \sim 1.00$ 之间. ③方位角 $\leq 20^\circ$ 时, 季均和年均水量配比的方位角因子位于 $0.95 \sim 1.00$ 之间, 方位角对水量配比的影响约为 5%. ④方位角 $\leq 30^\circ$ 时, 季均和年均水量配比的方位角因子位于 $0.91 \sim 1.00$ 之间, 方位角对水量配比的影响约为 10%. 方位角 $\leq 40^\circ$ 时, 春、夏、秋三季和年均水量配比的方位角因子在 $0.91 \sim 1.00$ 之间, 冬季对应的方位角因子位于 $0.85 \sim 0.99$ 之间. 这意味着, 方位角对春、夏、秋三季和年均水量配比的影响仍小于 10%, 但对冬季水量配比的影响达到了 15% 左右.

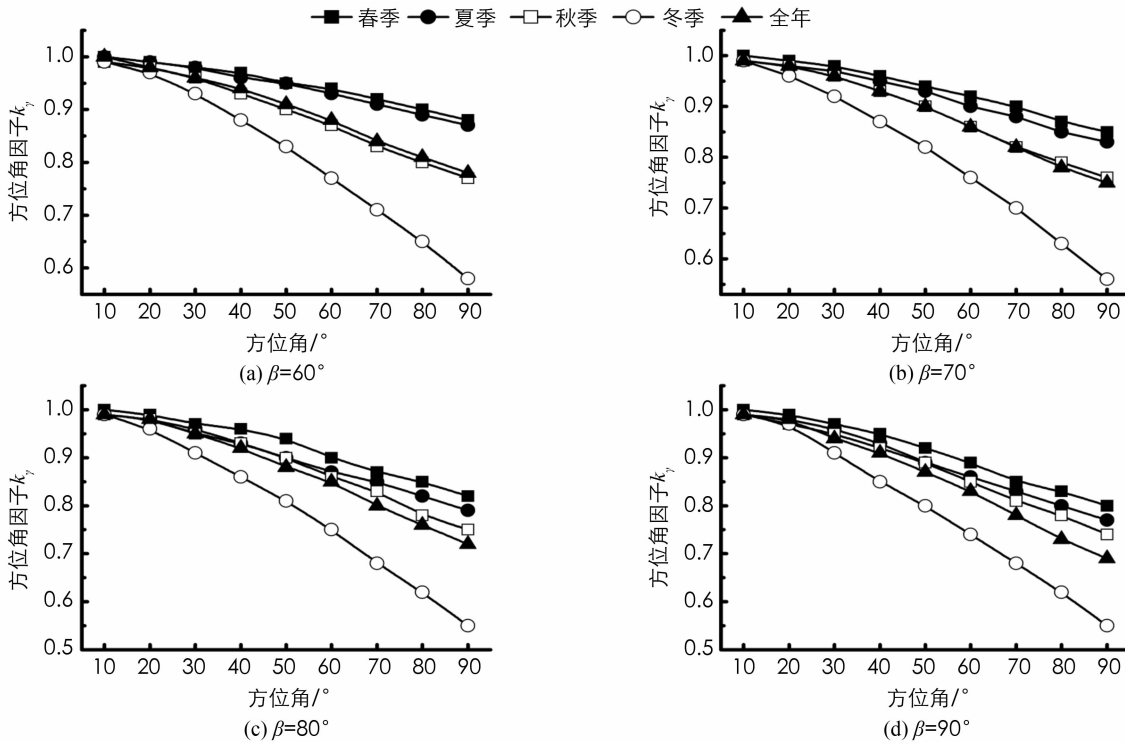


图 5 阳台壁挂式太阳能热水器季均和年均水量配比的方位角因子与方位角的关系

在阳台壁挂式平板型太阳能热水器的设计过程中,可利用本文所建模型确定热水器的水量配比.对于气候条件与丽江类似的地区,依据不同的供热目的和供热季节,可直接利用本文的关系式(9)–(13)确定南向热水器的水量配比,再结合图 5 和公式(14)确定不同方位下的水量配比.

4 结束语

1) 丽江市正南向阳台壁挂式太阳能热水器季均和年均水量配比随倾角增大而逐渐减小.集热器南向布置且倾角为 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 时,春、夏、秋、冬四季和全年的水量配比分别位于 $28.1\sim 43.5, 21.6\sim 35.3, 35.1\sim 45.4, 47.3\sim 57.3$ 和 $33.0\sim 45.4\text{ kg/m}^2$ 之间.

2) 为便于应用,文中给出了丽江市正南向季均和年均水量配比 $(V_i/A_c)_n$ 与倾角 β 的回归关系式,相关系数均大于 0.99.

3) 季均和年均水量配比的方位角因子随方位角的增大而逐渐减小.倾角为 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 且方位角为 $10^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 时,春、夏、秋、冬四季和全年水量配比的方位角因子分别位于 $0.77\sim 1.00, 0.74\sim 1.00, 0.55\sim 0.99$ 和 $0.69\sim 1.00$ 之间.方位角小于或等于 20° 和 30° 时,方位角对水量配比的影响约为 5% 和 10%,季均和年均水量配比的方位角因子位于 $0.95\sim 1.00$ 与 $0.91\sim 1.00$ 之间.

4) 方位角小于或等于 40° 时,冬季水量配比的方位角因子在 $0.85\sim 0.99$ 之间,方位角对水量配比的影响约为 15%;其余三季和年均水量配比的方位角因子在 $0.91\sim 1.00$ 之间,方位角对水量配比的影响小于 10%.

参考文献:

- [1] YUAN Jia-hai, XU Yan, ZHANG Xing-ping, et al. China's 2020 Clean Energy Target: Consistency, Pathways and Policy Implications [J]. Energy Policy, 2014, 65: 692–700.
- [2] 陈 勇, 黄 波. 中小企业减排技术协同创新策略研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(8): 97–104.
- [3] 胡秀芝, 鲍安红, 曹树星, 等. 基于 PKPM 的重庆三峡库区农村建筑节能改造——以丰都县某村委会楼为例 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2013, 38(10): 161–164.
- [4] HONG L, ZHOU N, FRIDLEY D, et al. Assessment of China's Renewable Energy Contribution During the 12th Five Year Plan [J]. Energy Policy, 2013, 62: 1533–1543.
- [5] 宋爱国. 真空管式太阳热水器的水量配比及日平均效率的修正 [J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2002, 23(4): 40–43.
- [6] PRAPAS D E. Improving the Actual Performance of Thermosiphon Solar Water Heaters [J]. Renewable Energy, 1995, 6(4): 399–406.
- [7] ZAHEDI H R, ADAM N M, SAPUAN S M, et al. Effect of Storage Tank Geometry on Performance of Solar Water Heater [J]. Journal of Scientific & Industrial Research, 2007, 66 (2): 146–151.
- [8] KEMAL ÇOMAKL, UGUR ÇAKLIR, MEHMET KAYA, et al. The Relation of Collector and Storage Tank Size in Solar Heating Systems [J]. Energy Conversion and Management, 2012, 63: 112–117.
- [9] SOTERIS KALOGIROU. Thermal Performance, Economic and Environmental Life Cycle Analysis of Thermosiphon Solar Water Heaters [J]. Solar Energy, 2009, 83(1): 39–48.
- [10] AYOMPE L M, DUFFY A, KEEVER M M, et al. Comparative Field Performance Study of Flat Plate and Heat Pipe Evacuated Tube Collectors (ETCs) for Domestic Water Heating Systems in a Temperate Climate [J]. Energy, 2011, 36(5): 3370–3378.
- [11] 中华人民共和国农业部. 家用太阳热水器技术条件: NY/T 343–1998 [S/OL]. 1998 [2016–12–26]. <http://bbs.biaozhuns.com/thread-111999-1-1.html>.
- [12] 王少杰, 涂光备, 郑宗和, 等. 太阳热水器水箱容积与集热面积的合理配比的探讨 [J]. 太阳能学报, 2003, 24(5): 629–632.
- [13] 谌学先, 高文峰. 家用太阳热水器水量配比与平均日效率关系 [J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2000, 20(2): 24–28.
- [14] 魏生贤, 李明, 林文贤, 等. 高层住宅建筑南立面太阳能热水系统水量配比特性研究 [J]. 太阳能学报, 2012,

33(4): 663—669.

[15] NOTTON G, CRISTOFARI C, POGGI P. Performance Evaluation of Various Hourly Slope Irradiation Models Using Mediterranean Experimental Data of Ajaccio [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47 (2): 147—173.

[16] CRISTOFARI C, NOTTON G, POGGI P, et al. Modelling and Performance of a Copolymer Solar Water Heating Collector [J]. Solar Energy, 2002, 72(2): 99—112.

[17] KHALED ZELZOULI, AMENALLAH GUIZANI, CHAKIB KERKENI. Numerical and Experimental Investigation of Thermosyphon Solar Water Heater [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 78: 913—922.

On Tank-Volume-to-Collector-Area Ratio for Balcony Wall-Mounted Solar Water Heater Used in Lijiang

HU Fen-e¹, WEI Sheng-xian²

1. College of Chemistry and Environmental Science, Qujing Normal University, Qujing Yunnan 655011, China;
2. Center for Magnetic Materials and Devices, Qujing Normal University, Qujing Yunnan 655011, China

Abstract: The tank-volume-to-collector-area ratio (the ratio is expressed as V_t/A_c) of the balcony wall-mounted flat-plate solar water heaters has been calculated by means of the established mathematical model and the typical meteorological data of Lijiang. The results show that the range of V_t/A_c for spring, summer, autumn and whole year is 28.1~43.5, 21.6~35.3, 35.1~45.4, 47.3~57.3 and 33.0~45.4 kg/m², respectively. For convenience of application, regression relations between seasonal and annual average $(V_t/A_c)_n$ and β for solar water heater with the south-facing solar collector are built and their correlation coefficient is more than 0.99. By theoretical analyses, it has been found that the azimuth angle has about 5%, 10% and 15% effect on the seasonal and annual average V_t/A_c when the azimuth angle is less than or equal to 20°, 30° and 40°. The corresponding azimuth angle factors of V_t/A_c are respectively in 0.95~1.00, 0.91~1.00 and 0.85~0.99.

Key words: balcony wall-mounted solar water heaters; tank-volume-to-collector-area ratio (V_t/A_c); flat-plate solar collector; azimuth angle; azimuth angle factor

责任编辑 汤振金