

# 真空管热水器的非稳态效率方程与参数

胡文旭

(陕西师范大学 陕西省物理研究所, 陕西 西安 710062)

**摘要:**导出了真空管太阳能热水器的非稳态效率方程,讨论了真空集热管的物性参数、热水器的结构、反射板对非稳态效率方程的影响,给出了有效透过吸收积计算表达式,根据所讨论的结果模拟了在不同环境温度下散热系数随工质平均温度与环境温度差的变化,最终模拟了一种虹吸式真空管太阳能热水器的非稳态效率方程,与实验得出的非稳态效率方程基本吻合。

**关键词:**非稳态效率方程;热转移因子;太阳能;真空集热管;热水器

**中图分类号:**TK511 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-274X(2001)03-0195-04

在设计真空管太阳能热水器时,根据所选集热管的物性参数和对热水器结构用某种方式模拟出热水器的非稳态效率方程,就能分析出在不同的运行状态、不同的环境和不同的运行温度下的热性能,以便按使用要求对热水器进行优化设计,减少中间试验环节,提高设计效率,避免浪费。针对这些问题,通过理论分析和计算机数据模拟,得出了真空管热水器非稳态效率方程的表达式和模拟方法。

## 1 能量平衡方程

真空管太阳能热水器,任意时刻的能量平衡方程<sup>[1-3]</sup>为

$$(mc)_w \frac{dt_m}{d\tau} = A_c I (\tau\alpha)_e - \bar{\omega} A_c U_{LG} (t_{mG1} - t_{mG2}) - A_X U_{LX} (t_{mX1} - t_{mX2}) - (mc)_m \frac{dt_m}{d\tau} \quad (1)$$

取  $A_G = k_1 A_c$ ,  $A_X = k_2 A_c$ , 通过分析计算和测量验证,  $t_{mG1} \approx t_{mG}$ ,  $t_{mG2} \approx t_a$ ,  $t_{mX1} \approx t_{mX}$ ,  $t_{mX2} \approx t_a$ , 代入式(1)后并改写为

$$\left[ \frac{(mc)_w + (mc)_m}{(mc)_w} \right] (mc)_w \frac{dt_m}{d\tau} = A_c I (\tau\alpha)_e - \bar{\omega} k_1 A_c U_{LG} (t_{mG} - t_a) - k_2 A_c U_{LX} (t_{mX} - t_a) \quad (2)$$

式(1,2)中,  $(mc)_w$  为热水器有效工质的热容;  $A_c$  为热水器的采光面积(以反射板面积计);  $I$  为太

阳辐照度;  $(\tau\alpha)_e$  为热水器的有效透过吸收积;  $t_m$  为热水器工质的平均温度;  $A_G$  为暴露在水箱以外全部真空集热管内管的面积和;  $U_{LG}$  为集热管的散热系数;  $t_{mG1}$  为集热管内管外壁的平均温度;  $t_{mG2}$  为集热管外管内壁的平均温度;  $t_{mG}$  为集热管中工质的平均温度;  $t_a$  为环境温度;  $A_X$  为水箱的散热面积(以内胆面积计);  $U_{LX}$  为水箱的散热系数;  $t_{mX1}$  为水箱内胆内壁的平均温度;  $t_{mX2}$  为水箱外胆外壁的平均温度;  $t_{mX}$  为水箱中工质的平均温度;  $(mc)_m$  为无效工质和有直接热转移材料的等效热容;  $\bar{\omega}$  为真空集热管的有效散热面积系数。

$$\text{令 } F_C = \frac{(mc)_w}{(mc)_w + (mc)_m} \quad (3)$$

$F_C$  应定义为真空管太阳能热水器的热转移因子,它是工质的有效热容与总热容之比,显示了太阳能热水器把实际得热量转换成有效得热量的能力。

## 2 非稳态效率方程

$(mc)_w \frac{dt_m}{d\tau}$  为有用工质的有效得热量,它与太阳总辐射  $A_c I$  的比值即为太阳能热水器的瞬时效率  $\eta$ ,

$$\text{即 } \eta = (mc)_w \frac{dt_m}{d\tau} / A_c I \quad (4)$$

将式(2,3)代入式(4)得

收稿日期:2000-06-23

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(96YK06)

作者简介:胡文旭(1960-),男,陕西乾县人,陕西师范大学讲师,从事太阳能利用和光热转换材料的研究。

$$\eta = F_c(\tau\alpha)_e - \frac{\bar{\omega}k_1F_cU_{LG}(t_{mG} - t_a)}{I} - \frac{k_2F_cU_{LX}(t_{mX} - t_a)}{I} \quad (5)$$

在对真空管太阳能热水器的反复实验中发现,在全天中,  $0 \leq t_{mG} - t_{mX} \leq 1.5 \text{ C}$ , 所以, 取  $t_{mG} \approx t_{mX} \approx t_m$ , 则式(5)可转换为

$$\eta = F_c(\tau\alpha)_e - F_c(\bar{\omega}k_1U_{LG} + k_2U_{LX}) \frac{t_m - t_a}{I} \quad (6)$$

令  $U_L = \bar{\omega}k_1U_{LG} + k_2U_{LX}$ , 则效率方程最后形式为

$$\eta = F_c(\tau\alpha)_e - F_cU_L \frac{t_m - t_a}{I} \quad (7)$$

由此可见, 真空管热水器与平板热水器的非稳态效率方程<sup>[4]</sup>有完全相同的形式。

### 3 $U_L$ 与集热管参数及热水器结构

#### 3.1 $U_{LG}$ 与集热管物理参数的关系

在讨论真空管的散热时, 根据真空管热水器的热性能试验数据做如下假设:

1) 假设集热管内管外壁的平均温度等于集热管中工质的平均温度, 通过计算和实验结果显示, 在热水器日运行时间内, 集热管内管外壁的温度比管中工质的平均温度高  $0.2 \sim 0.7 \text{ C}$ ;

2) 假设集热管内管除了沿其径向的热传导和热辐射外, 再无其他热损;

3) 外管内壁的平均温度等于环境温度。

在不考虑聚光反射板或漫反射板对集热管整体的散热的影晌时, 单管的辐射热损<sup>[3]</sup>为

$$q_r = \epsilon\sigma(t_m^2 - t_a^2)A_{CS} \quad (8)$$

$$\epsilon = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_h} - \frac{d_2}{d_1}(1 - \frac{1}{\epsilon_2})} \quad (9)$$

由于玻璃外管的发射率  $\epsilon_2 \approx 1$ , 所以取  $\epsilon = \epsilon_h$ 。

单管的传导热损为

$$q_c = \frac{t_m - t_a}{\frac{1}{2\pi K_h} \ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot \frac{A_{CS}}{\pi d_1} \quad (10)$$

分子流状态下管间气体导热系数<sup>[6]</sup>为

$$K_h = 4.5(1 + \frac{3}{4}\beta) \frac{\alpha_0}{\sqrt{M_0}} \sqrt{\frac{273}{t_0}} pl \quad (11)$$

单管的总热损  $q_z$  为  $q_z = q_r + q_c$ , (11)

把式(9,10)代入式(11), 得

$$q_z = \left[ \frac{2d_1K_h}{\ln(d_2/d_1)} + \epsilon_h\sigma(t_m^2 + t_a^2) \right] (t_m + t_a) (t_m - t_a) A_{CS} \quad (12)$$

令  $A_C = nA_{CS} = k_1A_C$ , 考虑到反射板对全部集热管散热的影晌, 推出修正系数  $\bar{\omega}$  表达式为

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2\pi} (\pi + 2\arctan \sqrt{\left[\frac{s}{d}\right]^2 - 1}) \quad (13)$$

式(13)中,  $s$  为两管之间的中心距,  $d$  为外玻璃管的外径, 则全部集热管的总散热量为

$$Q_z = \bar{\omega}k_1 \left[ \frac{2d_1K_h}{\ln(d_2/d_1)} + \epsilon_h\sigma(t_m^2 + t_a^2) \right] (t_m + t_a) (t_m - t_a) A_C \quad (14)$$

比较式(14)和式(1), 得

$$U_{LG} = \frac{2d_1K_h}{\ln(d_2/d_1)} + \epsilon_h\sigma(t_m^2 + t_a^2) (t_m + t_a) \quad (15)$$

#### 3.2 $U_{LX}$ 与水箱结构及材料的关系

真空管热水器的全年使用, 考虑到北方地区冬季比较寒冷, 所以水箱的保温层一般选用聚氨酯整体发泡工艺制作, 聚氨酯材料的导热系数为  $0.022 \text{ W/m} \cdot \text{C}$ , 且厚度一般在  $50 \text{ mm}$  左右, 即使这样, 水箱的散热仍然接近真空管的散热。所以, 可以做如下假设:

1) 水箱内外胆的热阻与聚氨酯保温材料热阻相比, 可以忽略。

2) 水箱外胆温度等于环境温度  $t_a$ , 则

$$Q_x = A_x K_d (t_m - t_a) / \delta \quad (16)$$

用  $A_x = k_2 A_C$  代入式(16)得

$$Q_x = A_C k_2 K_d (t_m - t_a) / \delta \quad (17)$$

比较式(17), (1) 得

$$U_{LX} = K_d / \delta \quad (18)$$

#### 3.3 $U_{LG}$ 与 $U_L$ 的计算机模拟

在非稳态效率方程中, 由  $U_{LG}$  的表达式可以看出它既非常数, 也非线性, 对非稳态效率方程的影响较大, 为了观察  $U_{LG}$  在一定环境温度范围和运行温差范围内的变化, 以清华阳光公司的晒乐牌全玻璃真空集热管的物理参数为依据, 用计算机对其进行了模拟, 图1为模拟结果。可以看出, 环境温度  $t_a$  在  $5 \sim 30 \text{ C}$ , 集热管工质与环境温差在  $5 \sim 75 \text{ C}$  范围内,  $U_{LG}$  的变化小于  $0.005$ , 这对了解集热管在一年中的效率变化很有意义。图2是陕西省物理研究所研制的虹吸式高效真空管太阳能热水器  $U_L$  的模拟结果。其变化趋势与  $U_{LG}$  基本一致,  $U_L$  的非线性主要是由于集热管的辐射散热和分子流导热系数  $K_h$  的非线性引起的, 这就引起了非稳态效率方程的非线性。由图2知, 环境温度  $t_a$  在  $5 \sim 30 \text{ C}$ , 热水器工质与环境温差在  $5 \sim 75 \text{ C}$  范围内,  $U_L$  的变化小于  $0.06$ , 这对于分析太阳能真空管热水器在一年中的

效率变化很有意义。

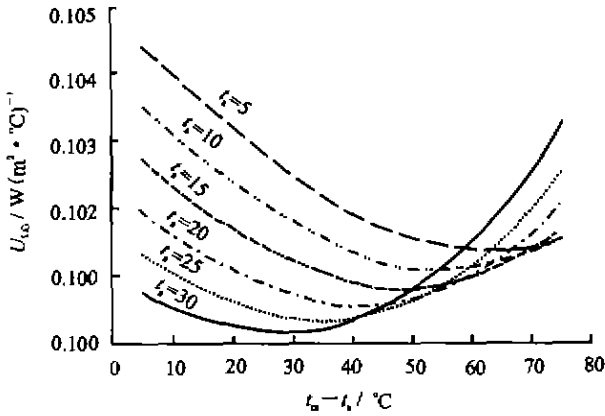


图 1 不同  $t_a$  下的  $U_{IG}$  随  $(t_m - t_a)$  的变化

Fig. 1 Variation of  $U_{IG}$  with  $(t_m - t_a)$  in different  $t_a$

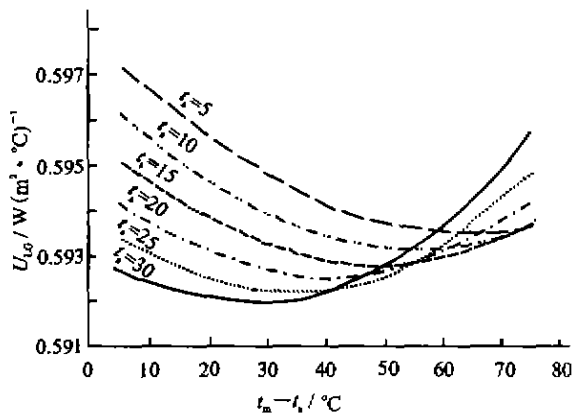


图 2 不同  $t_a$  下的  $U_L$  随  $(t_m - t_a)$  的变化

Fig. 2 Variation of  $U_L$  with  $(t_m - t_a)$  in different  $t_a$

#### 4 热转移因子对非稳态效率的影响

当  $F_C = 1$  时,式(7)变为

$$\eta = (\tau\alpha)_e - U_L \frac{t_m - t_a}{I} \quad (19)$$

式(19)称为全转移方程。其物理意义为:真空管太阳能热水器吸收的热量除了损失到环境的热量以外,全部变为有用热量。因此,在热水器中尽量减少无用工质和材料的热容。

$$(mc)_w = \sum_{i=1}^n m_i c_i, \text{ 表示无效工质与有直接热转移材料的} \text{热容的代数和。}$$

表 1 给出了热水器的有用工质的变化对热转移因子的影响。图 3 中给出了同一结构热水器不同的有用热容量即不同的热转移因子时测出的非稳态效率曲线与求出热转移因子后得到的非稳态效率曲线的对比。曲线 1 是虹吸结构的真空管热水器非稳态效率实测曲线,曲线 2 是非虹

吸结构的非稳态实测曲线,曲线 3 是由  $F_C$  导出的非虹吸结构的非稳态效率曲线,曲线 3 与曲线 2 趋于重合,说明用  $F_C$  表达非稳态效率方程是合理的。

表 1 有用工质对  $F_C$  的影响

Tab. 1 Effect available working fluid on  $F_C$

类型	水容量/L	
	虹吸结构	非虹吸结构
总水容量	114.5	114.5
水箱有效容量	98.0	98.0
集热管总容量	16.5	16.5
总用水量	114.5	98.0

注:由表中参数根据式(3)求得  $F_{C1}/F_{C2}=0.85$

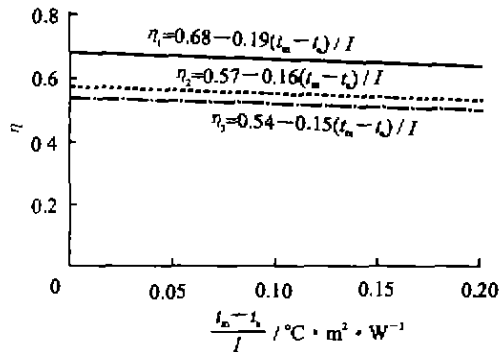


图 3  $F_C$  对非稳态效率方程的影响

Fig. 3 Effect of  $F_C$  on non-steady state efficiency equation

#### 5 非稳态效率方程的检验

以虹吸式高效真空管太阳能热水器为对象,对非稳态效率方程进行了计算机模拟,并与实验测出的非稳态效率方程进行比较。

##### 5.1 有效透过吸收积的计算

设全玻璃集热管的吸收率为  $\alpha$ ,外管的透过率为  $\tau$ , $d_1$  为集热管内管的外径, $z$  为聚光反射板单条的弧长, $\rho$  为反射板的反射率, $P_m$  为太阳直接辐射与总辐射的比,且反射板的结构能够使投射到其表面的光线全部以反射率  $\rho$  反射到集热管上,可推出

$$(\tau\alpha)_e = \alpha\tau \frac{d_1 + \rho(z - d_1)P_m}{z} \quad (20)$$

根据有关资料,取  $\alpha = 0.89$ , $\tau = 0.90$ , $\rho = 0.68$ , $d_1 = 37 \text{ mm}$ , $P_m = 0.90$ ,聚光反射板单条的弧长  $z = 83 \text{ mm}$ ,求得  $(\tau\alpha)_e = 0.628$ 。且求得  $F_C = 0.98$ 。

对于平面漫反射板结构,设  $P_m$  为漫反射板的反射率, $s$  为两管中心距的长度,可推出

$$(\tau\alpha)_r = \alpha\tau \frac{d_1 + P_m(s - d_1)}{s} \quad (21)$$

### 5.2 非稳态效率方程的计算机模拟

将以上参数代入非稳态效率方程中,就得到了虹吸式真空管热水器的非稳态效率方程的表达式

$$\eta = (\tau\alpha)_r - 0.98U_L \frac{t_m - t_a}{I}$$

用 1999 年 12 月 8 日的每一组测试数据  $t_m, t_a$  及中间结果  $\frac{t_m - t_a}{I}$  的值作参数,模拟出  $\eta$  与  $\frac{t_m - t_a}{I}$  相对应的曲线,并与测出的曲线一起绘制在图 4 中。采用精密测量方法确保数据的可靠性<sup>[7]</sup>。两条曲线基本吻合。

## 6 结 论

真空管太阳能热水器的非稳态效率方程与平板太阳能热水器具有相同的形式。分析真空管太阳能热水器非稳态效率方程的假设和方法是合理的,这一点也通过实验结果得到验证。在分析设计真空管

### 参考文献:

- [1] WILLIAMS J R. Design and Installation of Solar Heating and Hot Water Systems[M]. Kent: Ann Arbor Science Publishers, 1983.
- [2] HE Zi-nian, GE Hong-chuan, JIANG Fu-lin, et al. A comparison of optical performance between evacuated collector tuber flat and semicylindric[J]. Solar Energy, 1997, 60(2):109-117.
- [3] 高元运. 太阳能热水器非稳态效率试验方法的进展[J]. 新能源, 1999, (12):33-36.
- [4] GB/T 129-91, 家用太阳能热水器热性能试验方法[B]. 15-91.
- [5] 吴家庆. 全玻璃真空集热管的热损[J]. 太阳能学报, 1995, 16(1):59-67.
- [6] 殷志强. 全玻璃真空集热管[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [7] 胡文旭. 铂电阻精密测温研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2000, 28(4):59-62.

(编 辑 曹大刚)

## Non-steady state efficient equation and the calorifics parameter of evacuated-tube solar water heater

HU Wen-xu

(Physics Institution of Province, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

**Abstract:** The non-steady state efficiency equation of evacuated-tube solar water heater is derived. The effects of the physics parameters of evacuated-tube, the structure of the water heater and the reflector board on non-steady state efficiency equation are discussed. Expression for the product of effective transmittivity and absorptivity is presented. The variations of heat loss coefficient are simulated along with difference in working fluid mean temperature and ambience temperature under differential ambience temperature. At last the non-steady state efficiency equation of the evacuated-tube solar water heater are simulated. The equation can inoculate the equation gained by experiment.

**Key words:** non-steady state efficiency equation; heat removal factor; solar energy; evacuated-tuber; solar water heater

热水器时用这种方法根据所选集热管的物理参数和

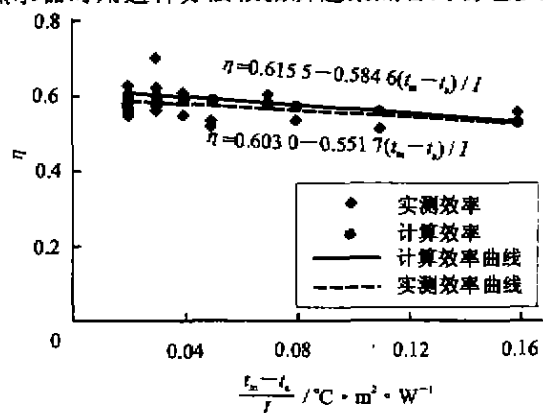


图 4 模拟与实测效率曲线的比较

Fig. 4 Comparison of analog efficiency curve with survey efficiency curve. The structure of the water heater through computer can be simulated easily, and then the non-steady state efficiency curve of the water heater can be simulated, and then the daily efficiency can be simulated. The test of the thermal performance parameters of the vacuum tube solar water heater in the range of 5~30°C ambient temperature can be ignored, and the change of the thermal efficiency in the four seasons is not large. Therefore, as long as the water heater is designed reasonably, the thermal efficiency and the use of the water heater are not affected.