

太阳能吸附式空气取水器和太阳能制冷结露法空气取水器的热性能分析比较

乔力 刘震炎 孟 华 葛新石

(中国科学技术大学热科学和能源工程系)

摘要 文中对吸附式空气取水器和制冷结露法空气取水器进行了热性能分析,得出取水率表达式,并以此为依据作了两者之间的取水率比较。

关键词 空气取水 吸附式制冷 制冷结露法 取水率

分类号 TK519

0 引言

人类对淡水的需求越来越多。全球“缺水”情况日益加剧。特别是在沙漠和海洋中如何有效地获取淡水,成了人类共同关心而又尚需解决的难题。

从空气中主动地获取淡水,目前有两种方法:一是传统的利用太阳能吸附式热泵的制冷结露法;二是笔者提出的太阳能吸附式加热脱附冷凝法。本文注重于对这两种方法进行热性能分析和取水率比较。

1 太阳能制冷结露法空气取水器的热性能分析和取水率表达式

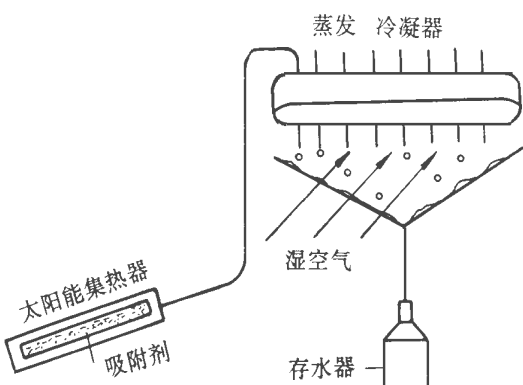


图 1 法国科学家 Y. Jannot 的利用太阳能吸附式热泵的制冷结露法空气取水器原理示意图

1994年底法国科学家 Y. Jannot 在文献 [1]中提出了如图 1所示的利用太阳能吸附式热泵的制冷结露法空气取水器。它的原理是利用太阳能聚光罩加热吸附式热泵的吸附床,此时吸附床先被升温加热,然后开始脱附,脱附出来的水蒸气在蒸发冷凝器中冷凝;脱附完毕后,再将吸附床从焦平面移开,并用环境空气冷却。当温度降至常温时,吸附床开始吸附,此时蒸发冷凝器产生冷量,当环境中的湿空气流经其表面时,便被降温至露点温度,空气中的水蒸气在其表面结露,在重力作用下落入下方集水盘中并汇集至存水器中贮存。

1.1 结露过程能量平衡分析

结露过程中的冷量平衡方程如式 (1)所示:

$$H_t = H_c + H_{c-c} + H_{b-c} \quad (1)$$

式中: H_t —蒸发冷凝器产冷量, H_c —至周围空气的对流降温冷量, H_{c-c} —至集水盘的辐射冷量损耗, H_{b-c} —至环境的辐射冷量损耗。至周围空气的对流降温冷量可表达为

$$H_c = h_a S_p (T_a - T_p) \quad (2)$$

式中: h_a —蒸发冷凝器表面至空气对流换热系数, S_p —蒸发冷凝器表面积, T_a —空气温度, T_p —蒸发冷凝器的表面温度。至集水盘的辐射冷量损耗可表达为

$$H_{c-c} = 0.5 \epsilon_p X_p S_p (T_c^4 - T_p^4) \quad (3)$$

式中: X_p —所论辐射换热系统的有效发射率, T_c —集水盘表面温度(在实验过程中,一般情况下有: $T_c =$

收稿日期 1995-08-29 修改定稿 1997-03-25

本文联系人 丑乔力 男 1963年生 博士 230026 合肥

$T_a - 12K$) 至环境的辐射冷量损耗可表达为

$$H_{rb} = 0.5 \epsilon_p^* S_p (T_a^4 - T_p^4) \quad (4)$$

蒸发冷凝器的制冷结露效率表达式为

$$Z_c = \frac{H_c}{H_T} = \frac{H_c}{H_c + H_{rc} + H_{rb}} \quad (5)$$

1.2 取水率分析

一个取水循环中用于对流降温周围空气的冷量为

$$Q_u = COP_{tot} Z_c E \quad (6)$$

式中: COP_{tot} —集热器与吸附式热泵的联合系统 COP 值, E —太阳辐射能流, 集热器与热泵的联合系统 COP_{tot} 值可进一步表达为

$$COP_{tot} = Z_{\alpha} COP \quad (7)$$

式中: Z_{α} —集热器的集热效率, COP —吸附式热泵的热力学 COP 值, 一般情况下 $COP_{tot} = 4\%$ 。

一个取水循环的产水量

$$M = \frac{Q_u}{h - h_1} \times (X - X_1) \quad (8)$$

式中: h —环境温度下湿空气焓, h_1 —露点温度下湿空气焓, X —环境温度下空气绝对湿度, X_1 —露点温度下空气绝对湿度。其中湿空气焓的表达式为

$$h(\theta, I) = (C_{pa} + X \cdot C_{pw})\theta + X \cdot L_0 \quad (9)$$

式中: c_{pa} —干空气定压比热, c_{pw} —水蒸气定压比热, θ —湿空气与 0°C 间的温差, L_0 — 0°C 时水的汽化潜热。空气绝对湿度的表达式为

$$X = 0.622 P_s(\theta) / (P_a - P_s(\theta)) \quad (10)$$

式中: P_a —大气压力, $P_s(\theta)$ — θ 温差下水蒸气饱和压力。

由上述结露过程和取水循环的能量平衡分析可定义太阳能制冷结露法空气取水器的取水率表达式为

$$\begin{aligned} Z_w &= \frac{M}{E} = \frac{Q_u}{E} \times \frac{X - X_1}{h - h_1} \\ &= COP_{tot} Z_c \frac{X - X_1}{h - h_1} \\ &= Z_{\alpha} COP Z_c \frac{X - X_1}{h - h_1} \end{aligned} \quad (11)$$

2 太阳能吸附式(加热脱附冷凝法)空气取水器的热性能分析和取水率表达式

笔者在文献 [2] 中首次提出一种高效太阳能吸附式(加热脱附冷凝法)空气取水器方案, 并在文献

[3] 中完成其初步的理论分析和原理性实验验证, 其原理简述如后。

太阳能吸附式空气取水器如图 2 所示。它包括取水装置和太阳能聚光罩, 取水装置放在太阳能聚光罩上面的支架上。如图 3 所示, 取水装置由透光罩、附有吸附剂的吸附床、存水器和取水管路等构成。

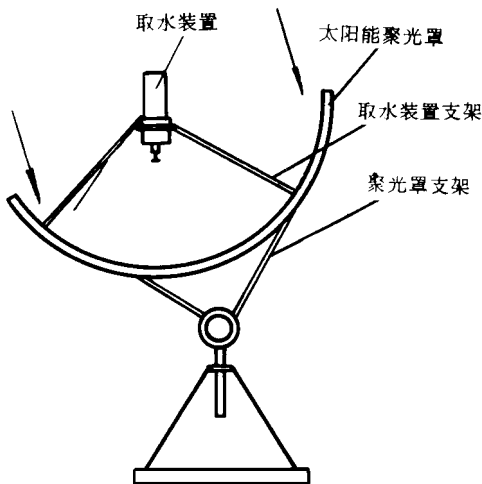


图 2 太阳能吸附式空气取水器示意图

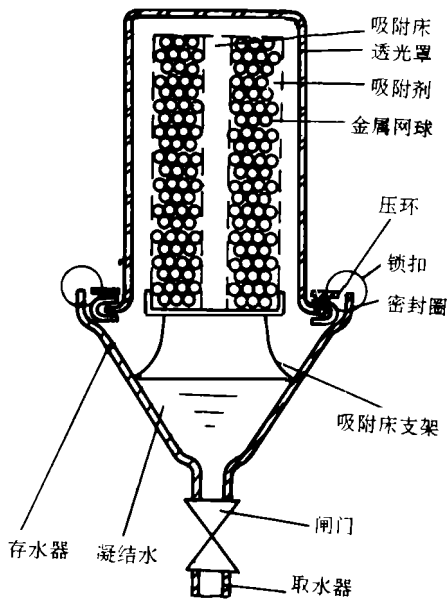


图 3 图 2 中取水装置示意图

它利用吸附剂在沙漠夜晚的低温、流动空气中敞开吸附水蒸气,白天则将其密封在玻璃容器中,利用太阳光聚焦加热使其脱附;利用环境空气冷却玻璃壁面,从而使容器中的水蒸气又在其内表面凝结、汇集,最终实现从空气中取水的技术过程。

2.1 加热冷凝过程能量平衡分析

如图 4 所示,加热脱附与冷凝时的取水装置是一个密闭的温室。环柱状金属丝网吸附床中装满颗粒状吸附剂,透光罩用玻璃制作。太阳光穿过透光罩以后,大部分被吸附床吸收,从而使吸附床中吸附剂的温度升高,达到脱附温度后开始脱附。因透光罩吸收的太阳辐射很少,且直接向大气散热,故透光罩的温度低于吸附床中吸附剂的温度。于是,由吸附剂脱附出来的水蒸气会在透光罩的内表面凝结。只要透光罩有一定的倾角,凝结水滴就会顺透光罩流下,汇集在存水器中。

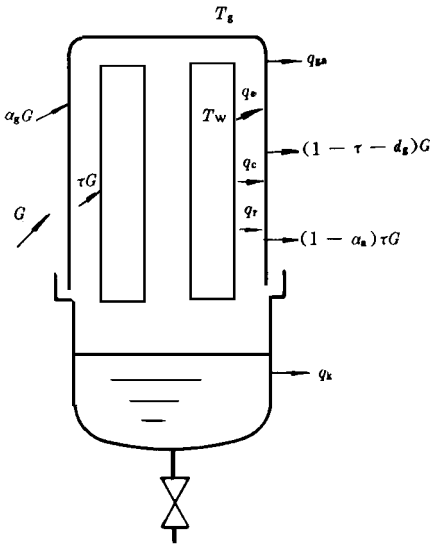


图 4 取水装置能量平衡示意图

在吸附床升温达到脱附温度后的稳定状态下取水装置的热平衡方程为

$$\alpha_g \cdot G + T_g f G = H_{ga} + H_k \quad (12)$$

式中: G —太阳辐射能流, T_g —透光罩对阳光的吸收率, f —透光罩对阳光的透过率, H_{ga} —透光罩向环境的散热, H_k —经过存水器散失至环境的热量。

吸附床经存水器向四周的散热损失不容易确定,因为其当量换热系数是随工作条件而变化的。另

外存水的温度通常也是未知的,作为一种近似的计算方法,可以这样表示

$$H_k = h_k S_k (T_w - T_a) \quad (13)$$

式中: h_k —吸附床至环境空气的当量换热系数, S_k —存水器表面积, T_w —吸附床温度, T_a —空气温度。显然,这个公式在形式上十分简单,但实际上却把所有的复杂因素都包括在换热系数 h_k 中,必须根据取水装置的结构和工作条件来决定 h_k 的值。

透光罩向环境的散热包括辐射和对流两项。辐射是在透光罩和天空之间进行的,即

$$H_{ga,r} = X_g^e S_{ga} (T_g^4 - T_s^4) \quad (14)$$

式中: X_g^e —透光罩的发射率, S_{ga} —透光罩表面积, T_g —透光罩温度, T_s —天空温度。透光罩向外的对流换热系数 $h_{ga,c}$ 与风速 v 有关,也可用一近似公式计算

$$h_{ga,c} = 5.7 + 3.8v \quad (15)$$

综合这些关系可以得到

$$\begin{aligned} H_{ga} &= H_{ga,r} + H_{ga,c} \\ &= X_g^e S_{ga} (T_g^4 - T_s^4) \\ &\quad + (5.7 + 3.8v) S_{ga} (T_g - T_a) \end{aligned} \quad (16)$$

在脱附过程时的稳定状态下,吸附床的热平衡方程为

$$\alpha_a f G = H_c + H_{c,c} + H_{tr} + H_k \quad (17)$$

式中: H_c 、 $H_{c,c}$ 、 H_{tr} 分别为吸附床通过脱附、对流和辐射传递给透光罩的热量。其中 H_{tr} 可简化为

$$H_{tr} = 0.9 e S_{ad} (T_w^4 - T_g^4) \quad (18)$$

式中: S_{ad} —吸附床的外表面积, $H_{c,c}$ 可表达为

$$H_{c,c} = h_c S_{ad} (T_w - T_g) \quad (19)$$

对流换热系数 h_c 的确定较为复杂,涉及的是封闭空间内热圆柱面在内,冷圆柱面在外的自然对流,换热系数靠由实验得到的经验公式计算。

脱附传热项 H_k 的理论计算由于迁涉到的因素很多,故而较复杂,通常由实验来决定,即

$$H_k = M h_{kg} \Delta t \quad (20)$$

式中, M —实验中收集到的淡水质量, h_{kg} —水的脱附热, Δt —取水的时间间隔。

取水装置的加热脱附、冷凝效率表达式为

$$Z_{al} = H_k / G \quad (21)$$

2.2 取水率分析

一个取水循环中用于加热脱附的能量为

$$Q_c = Z_p Z_{al} E \quad (22)$$

式中: Q_c —用于加热脱附的热量, η_{op} —聚光器的光学效率, E —太阳辐射能量。

一个取水循环的产水量

$$M = H_c \Delta t / h_{fg} = Q_c \times (1/h_{fg}) \quad (23)$$

由上述加热脱附过程和取水循环的能量平衡分析可定义太阳能吸附式空气取水器的取水率表达式为

$$\begin{aligned} Z_w &= M/E = Q_c/(E \times h_{fg}) \\ &= Z_{op} Z_{ad} (1/h_{fg}) \end{aligned} \quad (24)$$

3 两种太阳能空气取水器的取水率比较

对太阳能制冷结露法空气取水器而言,参考文献[4][5]得出比较接近实际的效率取值分别为 $\eta_{ta} = 20\%$ 、 $COP = 35\%$ 、 $Z_c = 20\%$, 设空气温度 $T_a = 40^\circ\text{C}$, 相对湿度 $\varphi = 50\%$, 空气压力为 $101\,325\text{ Pa}$, 并设空气被冷却至 25°C ; 则由空气的焓湿图可查得 $X = 24\text{ g/kg}$, $X_1 = 19.8\text{ g/kg}$, $h = 101.6\text{ kJ/kg}$, $h_1 = 75.24\text{ kJ/kg}$ 因此其取水率

$$\begin{aligned} Z_w &= Z_{ta} COP Z_c \frac{X - X_1}{h - h_1} \\ &= 0.002\,233\text{ g/kJ} \end{aligned}$$

对太阳能吸附式空气取水器而言,参考文献[4]中得出比较接近实际的效率取值为 $Z_{ot} = Z_{op} Z_{ad} = 40\%$, 在脱附温度 $t_w = 150^\circ\text{C}$ 时, 水的脱附热 $h_{fg} = 2114\text{ kJ/kg}$ 因此其取水率

$$\begin{aligned} \eta_w &= \eta_{ta} \times 1/h_{fg} \\ &= 0.0946\text{ g/kJ} \end{aligned}$$

由上述计算可见, 太阳能吸附式空气取水器的取水率要比太阳能制冷结露法空气取水器高出 42 倍。

4 结语

综上所述, 太阳能制冷结露法空气取水器由于达到取水目的所需的能量转换环节太多; 集热 (Z_{ot}), 热泵 (COP), 输冷 (Z_c), 结露 ($\frac{X - X_1}{h - h_1}$), 可用能

损失较大, 累积起来的取水率 Z_w 太低, 如果再考虑到集水盘中凝结水在风和阳光作用下的二次蒸发 (定义由此引起的附加修正效率为 Z_c), 则法国科学家 Y. Jannot 在文献 [1] 中所作的实验宣布: 利用这种方法从空气中取水是不实际的。

而相比之下, 太阳能吸附式空气取水器为达到取水目的所需的能量转换环节仅为集热 ($Z_{ot} = Z_{op} Z_{ad}$) 和冷凝 ($1/h_{fg}$), 可用能损失大为减少, 累积起来的取水率 Z_w 比前者大为提高, 此外由于脱附、冷凝过程是在取水装置密封时进行的, 因此这种方法没有凝结水的二次蒸发损失。

假设一个太阳能吸附式空气取水器的聚光罩接光面积 S 为 1 m^2 , 在平均太阳辐射强度 I 为 0.8 kW/m^2 的日照下连续工作 (Δt 为) 6 小时, 其取水量显然为

$$\begin{aligned} M &= Z_w I S \Delta t \\ &= 0.0946\text{ (g/kJ)} \times 0.6\text{ (kW/m}^2) \times 1\text{ (m}^2) \\ &\quad \times 5 \times 3600\text{ (s)} \\ &= 1021.8\text{ g} \end{aligned}$$

由此可见太阳能吸附式空气取水器每 m^2 面积可日产 1.0218 kg 水, 相当于一大瓶可口可乐的水量。而法国科学家的太阳能制冷结露法空气取水器每 m^2 只能日产 0.024 kg 水。

因此, 太阳能吸附式空气取水器是目前世界上已知的唯一有可能只利用太阳能而从空气当中取水的装置; 值得进一步将研究从原理性实验阶段 [3] 推进到中试阶段。

参 考 文 献

- 1 Jannot Y. Production d'eau par condensation de l'humidité atmosphérique. Revue Générale de Thermique, décembre, 1993, 46(6): 705-709
- 2 丑乔力等. 空气取水器的可行性分析报告. 第六届全国热力分析会议, 1992
- 3 丑乔力等. 太阳能吸附式空气取水器的技术方案及其理论和实验研究. 太阳能学报, 1994, 15(4): 335-340
- 4 丑乔力等. 管簇结构腔体式吸收器热性能的数值分析. 太阳能学报, 1995, 16(1): 21-28
- 5 丑乔力等. 连续稳定循环的三效吸附式热泵单元—三效冷环的设计和原理分析. 太阳能学报, 1994, 15(2):

chanical Industry. **Key words** surge, anti-surge control system

太阳能吸附式空气取水器和太阳能制冷结露法空气取水器的热性能分析比较 = **An Analytical Comparison of Thermodynamic Performance of Solar-energy Adsorption-based Water Collector from Air and Solar Energy Refrigeration Dewfall-based Water collector from Air** [刊, 中] / Chou Qiaoli, Liu Zongyan, et al. (China National University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 253- 256

A thermodynamic performance is conducted of an adsorption type water collector from air and a refrigeration dewfall based water collector from air with a water collection expression being given. On the basis of the said expression a comparison has been made of the water collection rate of the above-cited two methods. **Key words** water collector from air, adsorption refrigeration, refrigeration dewfall method, water collection rate

泥炭燃烧的研究 = **A Study on Peat Combustion** [刊, 中] / Zhang Jingbo, Li Xueheng et al (Northeast Electrical Engineering Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 257- 260
On the basis of peat basic combustion tests and the development and operation practice of a 1 t/h peat-fired fluidized boiler this paper proposes a method of firing peat by utilizing fluidized bed combustion technology. A detailed description is given of the peat combustion characteristics with some key issues in the design of such boilers being pinpointed. **Key words** boiler, fluidized bed, peat, combustion

煤粉粒子的发射率 = **The Emissivity of Pulverized-Coal Particles** [刊, 中] / Liu Linhua, Yu Qizheng, Tan Heping (Harbin Institute of Technology), Xu Wanli (Harbin University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 261- 266

On the basis of the classical Lorentz-Mie electromagnetic theory for isotropic and homogeneous spherical particles and by utilizing the experimentally measured complex refractive indices of pulverized-coal particles determined are the emissivity of pulverized-coal particles of twenty kinds of Chinese coals for power generation. The results of calculation show that the full wave-length emissivity of pulverized-coal particles is dependent on particle diameter, particle temperature and coal type and within a wide range of particle diameters radically deviates from the assumed value of 0.8 often given in technical literature. It has also been found that within a particle diameter range of 1- 20 μ m the emissivity of the pulverized-coal particles is often greater than 1.0. The reason why some pulverized-coal particles have an emissivity greater than 1.0 is given with an explanation of its physical meaning. For engineering calculation purposes the curves showing the variation of emissivity with particle diameter and temperature are given for twenty kinds of typical Chinese coals. **Key words** emissivity, particles, coal, electromagnetic theory

一类不可逆卡诺热机最佳效率和功率间的关系 = **Relationship between the Optimum Efficiency and Output Power of a Kind of Irreversible Carnot Heat Engine** [刊, 中] / Lu Ying, Tian Xinquan (Luoyang Teachers College) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 267- 269

Through the use of an irreversible Carnot heat engine model of Dulong-Petit nonlinear heat transfer rate and heat leakage derived is its basic optimization relation with the issue of the heat engine efficiency during its maximum output power being also discussed. **Key words** finite-time thermodynamics, Carnot engine, thermal resistance, heat leakage, basis optimization relation, optimum efficiency

斜齿圆柱齿轮瞬时啮合刚度及齿廓修形的研究 = **A Study on the Momentary Meshing Rigidity and Tooth Profile Modification of Helical Cylindrical Gears** [刊, 中] / Chand Shan, Xu Zhenzhong, Huo Zhaobo (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 270- 274

The paper presents a high-efficiency gear calculation model with gear basic effects being taken into ac-