

太阳能蒸馏器

李宗楠 吴青*

(中国科学院广州能源研究所)

摘 要

本文简要地介绍了蜈蚣洲岛 385 米²、日产淡水 1 吨及中建岛 50 米²、日产淡水 0.2 吨的海水淡化装置。论述了在我国南海地区推广利用太阳能海水淡化是有前途的。讨论了计算蒸馏器热效率的方法, 提出用蒸馏器性能曲线评价蒸馏器的热工性能。通过对两个热惯量小的蒸馏器的实验, 认为盛水盆材料及水层深度是影响蒸馏器热惯量的主要设计因素; 而密封度、风速及盛水盆的保温是影响蒸馏器热损失的主要因素, 并用实验数据说明了这些因素影响的程度。

前 言

世界上第一个利用太阳能淡化海水的装置于一百一十年前首先在智利建成。但是, 太阳能海水淡化的发展却很缓慢。截至 1974 年, 世界上大型的顶棚式太阳能海水淡化装置只有 25 座⁽¹⁾。

我国南海岛屿资源丰富却严重缺乏淡水, 随着国民经济的发展、海岛的开发和国防建设的需要, 人员逐年增加, 饮用水供需的矛盾非常突出。目前西沙饮用水主要靠船长途运输解决, 淡水成本极高。对于那些人数不多、用水量不大、从地理位置上十分分散而又运水困难的某些小岛, 使用顶棚式蒸馏器, 利用太阳能生产淡水却是合适的, 在经济上也可以与其他淡化方式相竞争。

1976 年我们在海南蜈蚣洲岛建成了一座蒸发面积为 385 米²、日产淡水 1 吨的实验性玻璃顶棚式海水淡化装置; 1979 年在西沙中建岛建成了一座蒸发面积为 50 米²、日产淡水 0.2 吨的海水淡化装置, 为海岛军民提供了饮用淡水。

根据在蜈蚣洲岛建设实验性装置的初次实践表明, 所产淡水的价格主要取决于装置的使用年限。对西沙地区来说, 淡化水价远低于用水船运输的价格。

太阳能海水淡化的研究方向应该是降低淡水的成本。主要措施有三, 即: 降低建造装置的投资; 延长装置的使用寿命和提高蒸馏器单位面积的产水量。三者是互相联系又互相制约的。要达到降低淡水成本的目的, 必须综合考虑, 并首先对太阳能蒸馏器热特性要有充分的理解。

太阳能蒸馏过程

图 1 所表示的是顶棚式浅盆太阳能蒸馏器的示意图。它的基础是一个黑色的浅盆, 称为盛水盆 1, 盆内盛浅层咸水 2, 覆盖于其上的是一倾斜的玻璃顶棚 3, 顶棚斜边下面是收集

* 本课题是太阳能海水淡化组集体研究的。

凝结水的淡水槽 4。蒸馏器运行时, 太阳辐射透过玻璃顶棚入射到水中, 被水及黑色盆底(或衬里)所吸收, 使水受热蒸发。由于玻璃顶棚所吸收的太阳能是很少的, 顶棚温度比水面温度低, 因此在蒸馏器内部空间中产生对流, 使湿空气与顶棚冷凝面接触, 水蒸气在顶棚内表面冷凝并顺着倾斜面流入淡水槽中, 最后用管子引导到需用的地方。

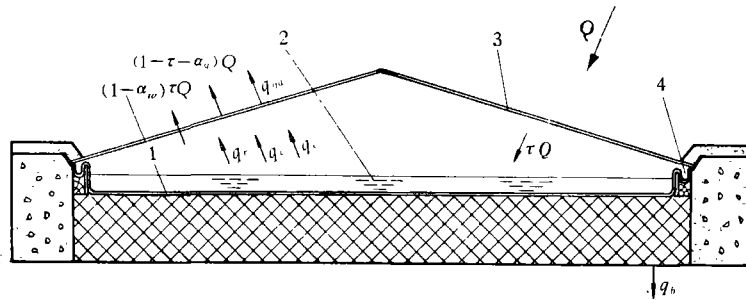


图 1 顶棚式太阳能蒸馏器

图 1 箭头表示蒸馏器的能量传递方向。太阳投射到顶棚上的能量为 Q 。设顶棚玻璃的透过率为 τ 、对太阳辐射能的吸收率为 α_g , 则透过顶棚的能量为 τQ , 被顶棚所吸收的能量为 $\alpha_g Q$, 而被顶棚反射回空间的能量为 $(1-\tau-\alpha_g)Q$ 。设咸水对太阳辐射能的吸收率为 α_w , 则咸水所吸收的能量为 $\alpha_w \tau Q$, 被水面所反射的能量为 $(1-\alpha_w) \tau Q$, 咸水吸收太阳能后温度升高, 同时部分能量 q_e 用于蒸发, 并通过蒸气冷凝传给顶棚, 其余能量以对流及热辐射的方式传给顶棚, 还有一小部分能量 q_b 通过盘底及周边传到外界而损失掉。

根据以上能量传递的分析, 假定在稳定状态条件下, 可以建立一组热平衡方程式, 通过迭代方法求解单位时间的淡水产量^(1,2)。但是气象条件是随时在变化的, 自然因素及人为的设计因素对生产量影响很显著, 使理论计算和实际情况往往出入很大。但理论分析的价值在于为设计高产量的蒸馏器指出方向。

由于水面与顶棚之间存在着温差, 蒸馏器空间存在着湿空气及其特定的几何形状等条件, 使自然对流十分激烈。表征自然对流程度的 G_r 准数处于指数 $n = \frac{1}{3}$ 规律的湍流范围内, 几何尺度自动模化。盛水盆水表面和蒸馏器顶棚之间的对流、蒸发和辐射传热近似于两块无限长平板间的传热, 对对流传热量 q_c 、蒸发传热量 q_e 及辐射传热量 q_r 的计算, Dunkle 推导出下列计算公式⁽²⁾:

$$q_c = 8.84 \times 10^{-4} \left[(T_w - T_{g_i}) + \left(\frac{P_w - P_g}{268.9 \times 10^3 - P_w} \right) T_w \right]^{1/3} (T_w - T_{g_i}) \quad (1)$$

$$q_e = 1.6276 \times 10^{-3} q_c \left(\frac{P_w - P_g}{T_w - T_{g_i}} \right) \quad (2)$$

$$q_r = 0.9 \sigma (T_w^4 - T_{g_i}^4) \quad (3)$$

式中 T_w —— 咸水表面温度, K;
 T_{g_i} —— 顶棚内表面温度, K;
 P_w —— 对应于温度为 T_w 时的蒸气分压力 [牛顿/米²];
 P_g —— 温度为 T_{g_i} 时的蒸气分压力 [牛顿/米²].

式(1)~(3)均是 $(T_w - T_{gi})$ 及 T_w 的函数,式(1)、(2)、(3)相加可求得总能量的绝对值。在不同的 $(T_w - T_{gi})$ 及 T_w 下计算出 q_c 、 q_e 及 q_r 的数值,并表示成总能量的百分数列于图2中⁽³⁾。从图2可以看出,当水温 T_w 增加时,用于蒸发的能量份额增加,即产淡水量增加,对流及辐射热损失相对减少, $(T_w - T_{gi})$ 不同只影响能量份额数值的大小,不影响变化规律。根据物质的动力学理论,表面蒸发是由液体分子的热运动引起的,可以在任何温度下进行,但是对蒸馏器的具体情况来说,只有水面温度超过 40°C 时,才发现有显著的蒸发及收集到有实用意义的淡水。在太阳辐射量为 3990 [大卡/米²·日]、平均气温为 22.6°C 时,实验结果表明,水温低于 40°C 时的产水量只占全天产水量的 12% 。

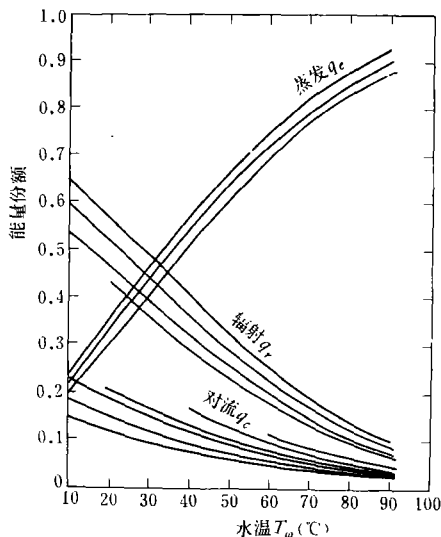


图2 蒸发、辐射和对流的能量份额

评价蒸馏器热工性能的指标

较多作者引入蒸馏器热效率的概念,但对蒸馏器效率的计算方法却不完全相同⁽³⁻⁵⁾,实验证明,这些计算是不够严格的。考虑到灌水带进蒸馏器中去的显热——此热量甚至高达日辐射总量数值的 10% ——以及被剩水带走的余热,蒸馏器效率应为液体蒸发所需的热量(即生产淡水所需的热量)与给予蒸馏器的热量(即投射到蒸馏器上的太阳能量和灌水带进的热量)之比,即:

$$\eta = \frac{\Sigma G_i (i_i'' - C_w \cdot t_{w1})}{\Sigma Q_i + DC_w (t_{w1} - t_{w2})} \quad (4)$$

式中 G_i ——按单位时间测量的蒸气凝结量[公斤/米²·小时];

i_i'' ——对应于测量水温 t_{w1} 的蒸气的焓[大卡/公斤];

C_w ——咸水的比热[大卡/公斤·°C];

ΣQ_i ——太阳辐射日总量[大卡/米²·日];

D ——蒸馏器单位蒸发面积的灌水量[公斤/米²];

t_{w1} ——咸水初温[°C];

t_{w2} ——蒸发24小时后的咸水温度[°C]。

蒸馏器效率是指蒸馏器运行一天的平均效率。太阳辐射强度、咸水温度及蒸馏器产水量随时间是变化的,但三者的峰值并非同时出现,水温与产水量的峰值比太阳辐射峰值滞后的时间取决于蒸馏器的热惯量。当太阳辐射从最高值下降到零时,蒸馏器仍然产水,因此,瞬时效率对太阳能蒸馏器来说是毫无意义的。

利用式(4)计算蒸馏器的效率有两种情况:(1)当盛水盆水层深度足够浅时, $t_{w1} > t_{w2}$,说明咸水带进盘中的热量 $DC_w(t_{w1} - t_{w2})$ 被利用于液体的蒸发,式(4)的计算是正确的;(2)当盛水盆水层深度足够深时, $t_{w1} < t_{w2}$,说明液体蒸发不但没有利用咸水带进来的热量,相反却

有一部分太阳辐射能以显热的形式贮存或损失于剩余咸水中没被利用,或在第二天换水时随剩余水被排走。因此当 $t_{w1} < t_{w2}$ 时,蒸馏器效率按下式计算:

$$\eta = \frac{\sum G_i (i_i'' - C_w \cdot t_{w1})}{\sum Q_i} \quad (5)$$

但是,对同一座蒸馏器进行实验的结果(见表1)表明,太阳辐射量不但影响产水量的数值,而且也影响效率的数值,只不过比影响产水量的程度较轻而已。所以单纯用效率来表征蒸馏器的性能同单纯用产水量一样,也是不够完善的。

表1 水层深度为11毫米时蒸馏器的实验结果

项 目 日 期	平均气温 (°C)	平均风速 (米/秒)	太阳辐射能 (大卡/ 米 ² ·日)	GZ-1 型			GZ-2 型		
				平均水温 (°C)	产水量 (公斤/ 米 ² ·日)	效 率 (%)	平均水温 (°C)	产水量 (公斤/ 米 ² ·日)	效 率 (%)
79年11月8日	24	0.63	3610	39.3	3.155	51.9			
12月8日	20.8	0.44	2700	30.8	2.059	42.5	31.8	1.840	39.8
12月9日	21.2	0.59	3000	33.5	2.452	48.4	34.7	2.232	44.0
12月13日	15.1	0.91	3490	30.4	2.790	46.4			
12月14日	15.8	0.77	3460	29.0	2.825	47.4			
12月15日	16.7	0.84	3360	29.3	2.769	48.3	30.62	2.364	41.1
12月16日	17.2	0.69	3370	30.9	2.629	45.7			
12月26日	14.9	1.60	3430	28.7	2.725	46.3	30.1	2.518	42.8
12月27日	15.9	0.90	3470	30.3	2.775	46.7	31.4	2.539	42.7
12月28日	16.8	1.00	3320	30.7	2.649	46.9	31.6	2.411	42.7
12月29日	17.8	0.50	2630	29.3	1.846	41.4	31.0	1.691	38.0
12月30日	18.5	0.80	2930	30.5	2.168	43.7	31.9	1.985	42.0
80年1月4日	13.4	2.00	1700	22.0	0.964	31.7	23.1	0.891	29.3
1月15日	13.3	0.60	1630	23.3	1.021	37.7	23.7	0.970	35.9
1月20日	15.1	1.60	2760	27.5	2.060	44.3			
1月21日	11.7	1.13	910	17.0	0.37	22.7			
1月23日	16.7	1.02	3560	30.5	2.718	44.8			
1月27日	18.0	1.43	1230				23.3	0.599	28.9

整理实验数据的结果表明,在水层深度一定时,蒸馏器产水量和太阳辐射量之间存在着线性关系:

$$G = mQ - b \quad (6)$$

式中常数 m 及 b 与太阳辐射能量大小无关,蒸馏器的型式不同则有不同的数值。

因此不同蒸馏器的实验结果, 都可以整理成式(6)的形式, 见图 3。比较不同蒸馏器的性能曲线 $G=f(Q)$, 在相同的太阳辐射日总量下, 淡水产量越大, 蒸馏器的设计亦就越好。

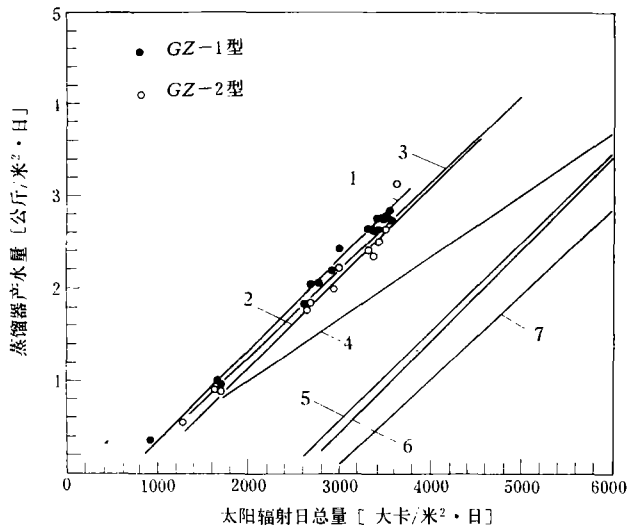


图 3 蒸馏器产水量与太阳辐射量的关系

1. GZ-1 蒸馏器 2. GZ-2 蒸馏器 3. 智利 USM-5 蒸馏器 4. 智利 USM-4 蒸馏器 5. 蜈蚣洲岛蒸馏器 6. 中建岛隔板蒸馏器 (平均风速 5.5 米/秒) 7. 中建岛普通盆蒸馏器 (平均风速 5.5 米/秒)

还必须指出, 式(6)对风速小于 2 米/秒、大气平均温度小于 10°C 的情况吻合较好。当风速增加、大气平均温度变化过大时, 实验点偏离曲线较远。

蒸馏器型式的改进

蜈蚣洲岛海水淡化装置的蒸馏器采用平板玻璃顶棚、普通碳钢框架结构、水泥预制件边墙, 盛水盆吸热材料分别为水磨石板、钢丝网水泥及陶片三种, 其底部绝热材料分别为木炭末、海砂、矿渣和椰绒的不同混合, 用胶乳水泥为密封剂。由于热惯性大, 水温峰值比太阳辐射峰值滞后 2—6 小时。性能曲线见图 3, 夏天当太阳辐射量为 5572 [大卡/米²·日] 时, 平均日产水量为 3.45 [公斤/米²·日]。

西沙中建岛海水淡化装置用隔板式蒸馏器, 采用平板钢化玻璃顶棚、不锈钢框架、水泥预制件边墙、聚氯乙烯塑料盛水盆、聚丙烯塑料隔板、胶乳水泥及硅橡胶密封剂。为克服大型蒸馏器水层深热惯量大的缺点, 在水层中间装一块铺满小乌石的隔板, 使咸水分隔成两层, 见图 4。

由于隔板起到抑制对流的作用, 它接受阳光后将热量大部分传给了上层海水。在水深为 5 厘米时, 液面最高温度比无隔板时高 2.2°C , 而盆底温度则比无隔板时低 7°C 。这样, 既提高了液体的蒸发速度, 又减少了底部热损失。在相同的水层深度和气象条件下, 隔板式蒸馏器的产水量较普通蒸馏器增加 15—20%。

通过蒸馏器顶棚的热损失是不可避免的, 而且份额最大。一个热惯量为零的理想蒸馏器

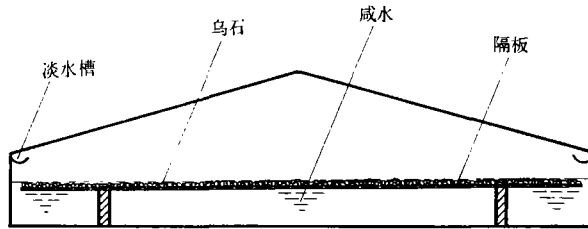


图 4 隔板式太阳能蒸馏器示意图

全天运行的效率极限值约为 60%⁽³⁾。因此从蜈蚣洲及中建岛的实践看来,提高蒸馏器的热利用率大有潜力。

从减小热惯量、提高运行水温的观点出发改进蒸馏器的设计,我们建造了两个实验蒸馏器 GZ-1 型及 GZ-2 型,其蒸发面积分别为 1.0179 米²及 0.6123 米²。玻璃顶棚均无支承框架,因此减少了遮阴面积。用硅橡胶密封,靠玻璃的自身强度支承。GZ-1 型为平板玻璃顶棚,倾角 $\alpha=12^\circ$; GZ-2 型为拱形玻璃顶棚,顶棚主体倾角为 15° 。淡水槽和盛水盆连成整体,用 2 毫米厚的玻璃钢制成,底部用蛭石粉保温。

水层深度为 11 毫米、太阳辐射量在 $1200[\text{大卡}/\text{米}^2 \cdot \text{日}] < Q < 3700[\text{大卡}/\text{米}^2 \cdot \text{日}]$ 范围内的实验结果示于表 1 及图 3 中。蒸馏器产水量与太阳辐射的关系可用下列经验公式表示:

对 GZ-1 型

$$G = 9.792 \times 10^{-4} Q - 0.6075 \quad (7)$$

对 GZ-2 型

$$G = 9.639 \times 10^{-4} Q - 0.7577 \quad (8)$$

图 3 还列出了部分同类蒸馏器的性能曲线以资比较。

影响蒸馏器性能的主要因素

太阳辐射能量的大小是影响蒸馏器淡水产量的最主要因素。但是用特性曲线 $G=f(Q)$ 来表征蒸馏器的性能时,日辐射量 Q 作为一个变量,其大小并不影响产水量随太阳辐射的变化规律。影响蒸馏器性能的主要因素可分两类:

一、影响蒸馏器热惯量的因素——设计条件

1. **盛水盆材料的影响** 盛水盆所用材料尺寸厚、热容大则咸水升温慢,温升小,产水量下降。我们对安装在西沙永兴岛的三个型式相同、盛水盆材料及厚度不同的拱形玻璃顶棚蒸馏器,把在相同气象条件下的实验结果列于表 2。

2. **水层深度的影响** 对一个已建成的太阳能蒸馏器来说,灌水深度对产水量的影响很大。从减小热惯量的观点出发,在保证足够的水量以供蒸发的前提下,水层应是越浅越好。但事实上并非如此,而是存在着一最佳的水层深度⁽⁷⁾,大于或小于这个深度,效率都下降。前者是热惯量增大,后者则由于浅水层蒸发以后,咸水浓度增大,水面上形成反射盐层,使入射的阳光反射增强,因此效率反而下降。

表 2

盆号	1	2	3
实验结果 项目	玻璃钢 (厚2毫米)	胶乳水泥 (厚25毫米)	钢丝网水泥 (厚35毫米)
日平均水温(°C)	45.9	42.9	41.5
单位面积产水量(公斤/米 ² ·日)	2.555	2.24	2.17
能量利用相对百分比	100	87	85

二、影响蒸馏器热损失的因素——蒸馏器结构及气象条件

1. 蒸馏器密封的影响 密封不良的蒸馏器由于蒸气漏泄,严重影响产水量。建议用

$$S = \frac{G}{D - D'} \times 100\%$$

来衡量蒸馏器密封的程度, S 称为蒸馏器的密封度。

式中: D ——单位面积灌水量[公斤/米²·日];

D' ——运行一天后单位面积剩余水量[公斤/米²·日];

G ——淡水产量[公斤/米²·日]。

蒸馏器的实际效率为无漏泄时的效率与密封度的乘积

$$\eta = \eta_t \cdot S$$

2. 风速的影响 文献[8]认为风速对蒸馏器产水量的影响很小。实践证明,此结论只适合于风速较小的情况,强风对产水量影响很大。西沙群岛经常处在五、六级风的情况下,蒸馏器产水量明显下降。实验证明,在密封度 $S = 93\%$ 的情况下,当平均风速为 4.5—6.5[米/秒]时,蒸馏器产水量为风速小于 2[米/秒]时产水量的 84—77%。

3. 盛水盆保温的影响 保温不良使热损失增加、水温下降。在太阳辐射较强,水温较高的情况下,水温稍有降低都会使产水量大幅度下降。对 GZ-2 型蒸馏器实验,当太阳辐射量为 3690[大卡/米²·日]、水层深度为 11 毫米时,无保温的蒸馏器比 10 厘米厚蛭石粉保温的蒸馏器的产水量降低 26.3%。

结 论

1. 玻璃顶棚式太阳能蒸馏器,结构简单,操作容易,造价较低,蒸馏过程又不消耗常规能源,在我国南海地区某些人数不多的孤岛上使用是合适的。

2. 蒸馏器产水量与太阳辐射日总量之间存在一线性关系。此关系式对不同的蒸馏器是不同的。因此利用特性曲线 $G = f(Q)$ 来比较不同蒸馏器的性能可避免单纯用产水量或热效率来评价所产生的片面性。

3. 盛水盆用材不当或水层过深都会增加热惯量,使水温降低,产水量下降。大型装置的水层较深,采用隔板式蒸馏器,抑制水的对流,既减少热损失,又使太阳能集中加热盆内上层咸水,表面温度提高,产水量比同等水深的普通蒸馏器可增加 15—20%。

4. 风速并不是一个可以忽略的因素, 海岛上的风速较大, 产水量比风势较弱的内陆地区减少, 在估计蒸馏器产量时必须加以考虑。

参 考 文 献

- [1] A.A.M. Sayigh, *Solar Energy Engineering*, ACADEMIC PRESS, INC. (London) (1977).
 [2] P. I. Cooper, *Solar Energy* Vol. 15 pp. 205—217 (1973).
 [3] 甘肃省会宁县城关公社鸡儿嘴大队、甘肃省会宁县农业科学研究所、中国科学院兰州化学物理研究所, 海水淡化, 总第 5 期, 第 57—65 页, 科学技术文献出版社(1977)。
 [4] J. A. Eibling, S. G. Talbert and G.O.G. Lof, *Solar Energy* Vol. 13, pp.263—276 (1971).
 [5] А.Б. Вардияшвили, Гелиотехника, 1966 № 2 стр. 50.
 [6] German Frick, Julio Hirschmann, *Solar Energy* Vol. 14 pp. 405—413 (1973).
 [7] П. М. Брлик, 太阳能蒸馏器的实验和计算, 太阳能利用论文集, 一卷, 科学出版社(1960).
 [8] P. I. Cooper, *Solar Energy* Vol. 14 pp.451—468 (1973).

SOLAR STILLS

Li Zong-nan Wu Ching

(Guangzhou Energy Research Institute Chinese Academy of Sciences)

Abstract

The 385m² solar still, which Produces fresh water 1 T/day in Wu Zhi Island, and the 50m² Solar still, which produces fresh water 0.2 T/day in Zhung Jian Island, are recommended in brief. The future development of using solar energy for sea water conversion in the region of South China Sea is described. A method for calculating the efficiency of solar still and a view of using performance curves for rating thermal performance of solar stills are presented. Through the experiments of two solar stills with low thermal inertia, it is considered that the material of basin and the depth of salt water are the main design factors which influence the thermal inertia of the still and that the degree of sealing, wind velocity and the insulation of the basin are the main factors which influence heat losses of solar still. The degrees of influence of these factors is explained in terms of experimental data.