

# 海水淡化剩余浓盐水灌注太阳池研究

李楠<sup>\*1,2</sup>, 孙文策<sup>1</sup>, 张财红<sup>2</sup>, 史玉凤<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024;

2. 燕山大学 车辆与能源学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 研究了利用海水淡化剩余的浓盐水经过进一步晒制浓缩来灌注太阳池的相关问题. 通过不同浓度盐水蒸发量的实验, 结合当地的气象条件, 利用彭曼-蒙特斯经验公式, 拟合出适合不同浓度盐水的蒸发量模型, 进而计算出浓缩不同盐度溶液所需海水淡化剩余浓盐水用量及时间. 提出应根据升温热稳定性要求采取多次补水的方法完成太阳池灌注, 提高了太阳池的蓄热性能.

**关键词:** 海水淡化剩余浓盐水; 太阳池; 蒸发量; 稳定性

**中图分类号:** TK512.4      **文献标志码:** A

## 0 引言

对于盐梯度太阳池来说, 非对流层的灌注需要大量不同浓度的盐溶液, 并且下对流层同样需要高浓度的盐溶液, 如果仅采用 NaCl 饱和溶液作为太阳池灌注液, 则所需盐的费用大概占构建太阳池总费用的 30% 以上<sup>[1]</sup>, 这就造成在经济性方面通过市场购买盐的方式来建造太阳池难以与常规能源相竞争<sup>[2]</sup>, 使得太阳池很难大规模应用与发展. 所以从太阳池的整体经济性来考虑, 如何降低高浓度盐溶液所需要的费用显得至关重要. 世界上长期运行并且效果较好的太阳池在降低盐成本方面都很重视, 一些国家则就地取材利用了当地的天然盐资源. 例如, 澳大利亚 Alice Springs Solar Pond 利用了当地盐度很高的地下水; 美国德克萨斯州的 El Paso Solar Pond 利用了地下盐矿; 而以色列国内的几座大型太阳池也都利用了高浓度的死海海水<sup>[3]</sup>. 海水中含盐量丰富, 利用制盐剩余的废弃卤液作为太阳池灌注液的研究取得了一定进展<sup>[4]</sup>. 但研究发现利用废弃卤液灌注的太阳池在运行过程中池水容易变浊<sup>[5]</sup>.

当前海水淡化技术, 加以利用的产品是分离出来的 50%~55% 的淡水, 而剩余 45%~50% 的

高浓度盐水则当作废弃物排放到大海中, 这种利用方式既造成对近海海域生态平衡的破坏, 同时也是一种能源的浪费. 海水淡化剩余浓盐水中不仅含有构成高浓度溶液所必须的大量盐类 (如 NaCl、MgCl<sub>2</sub>、MgSO<sub>4</sub> 等), 而且海水淡化厂处理原始海水非常严格, 所用到的杀菌除藻剂、絮凝剂、阻垢剂等药物, 以及在淡化中所包括的凝聚/絮凝、消毒等过程也是灌注太阳池水所不可缺少的. 利用海水淡化剩余的浓盐水不但可降低水处理的费用, 还能节省太阳池的盐成本. 因此本文把大连某海水淡化车间海水淡化剩余的浓盐水作为太阳池的灌注溶液, 计算浓缩不同盐度溶液所需海水淡化剩余浓盐水用量及时间, 并研究提高太阳池蓄热性能的方法.

## 1 盐水蒸发量的模拟计算

关于盐水蒸发量的计算, 国内外的做法都是通过盐水的比蒸发系数乘以淡水蒸发量来确定<sup>[6~9]</sup>, 对不同盐度盐水进行蒸发实验, 通过实验值来判断并最终得出该地区的盐水比蒸发系数.

### 1.1 用彭曼-蒙特斯公式对淡水蒸发量的计算

目前被全世界广泛应用于淡水蒸发量计算的

是彭曼-蒙特斯经验公式<sup>[7,8]</sup>:

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (1)$$

式中: $E$ 表示自由水面的蒸发量,即水面在单位时间由于水的蒸发下降的高度( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ); $R$ 为水面净辐射值( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ); $E_a$ 为空气干燥力( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ); $\Delta$ 为气温在 $t_a$ 时饱和水汽压曲线的斜率( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ ); $\gamma$ 为干湿表常数( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ ).

$$R = (1 - \alpha)R_a(a + bn/N) - 2.45 \times 10^{-9} t_a^4 (0.34 - 0.14 \sqrt{e_d}) (0.1 + 0.9n/N) \quad (2)$$

$$E_a = K(e_a - e_d)(1 + 0.536u_2) \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 为水面反射率,对于自由水面, $\alpha = 0.07 \sim 0.10$ ;  $a$ 、 $b$ 分别为经验系数,对于大连地区分别取0.16和0.67; $R_a$ 为理论辐射值( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $n/N$ 为实际日照时数和最大可能日照时数相比的日照百分率; $u_2$ 为蒸发面上空2 m处的风速( $\text{m/s}$ ); $e_a$ 为饱和水汽压( $\text{kPa}$ ); $e_d$ 为实际空气水汽压( $\text{kPa}$ ); $K = 0.35$ ,为常数.

上式中各气象参数取自气象站公布的大连地区气象资料平均值: $\Delta = 0.067 \text{ kPa}/^\circ\text{C}$ ,  $\gamma = 0.092 \text{ kPa}/^\circ\text{C}$ ,  $n/N = 0.856$ ,  $u_2 = 4 \text{ m/s}$ ,  $e_a = 1.78 \text{ kPa}$ ,  $e_d = 1.36 \text{ kPa}$ .

近年来大连地区太阳辐射和气温的拟合表达式分别为<sup>[10]</sup>

$$R_a = 177.6 + 86.2 \sin(2\pi D/365) \quad (4)$$

$$t_a = 11.6 + 15.4 \sin(2\pi(D - 27)/365) \quad (5)$$

其中 $D$ 为自春分日(3月21日)算起的天数.

## 1.2 盐水比蒸发系数的确定

比蒸发系数是根据相同条件下不同浓度的盐水溶液蒸发量与淡水溶液蒸发量的比值来确定的<sup>[9]</sup>.如果外界某种因素对盐溶液蒸发量产生的影响与此种因素对淡水蒸发量产生的影响有差异时,则说此种因素对比蒸发系数有影响.实验表明,虽然气温、风力、相对湿度等环境因素对蒸发量有一定的影响,但对比蒸发系数的影响不是很明显,而只是影响盐水或淡水蒸发量绝对值的大小,因此计算过程中忽略这些因素对比蒸发系数的影响是合理的.而影响比蒸发系数的决定性因素是溶液盐度,根据表1中关于溶液盐度的实测数据分析可得,随着盐度的增加,比蒸发系数呈对

数规律减小.

表1 不同盐度下比蒸发系数拟合与实测值

Tab. 1 Fitted and metrical value of evaporation ratio in different salinity

序号	盐度/%	拟合比蒸发系数	实测比蒸发系数
1	3.80	0.832 5	0.823 5
2	4.05	0.802 4	0.705 9
3	4.10	0.796 6	0.714 3
4	4.25	0.779 6	0.842 1
5	4.35	0.768 6	0.727 3
6	4.50	0.752 6	0.800 0
7	4.60	0.742 2	0.800 0
8	4.70	0.732 0	0.666 7
9	4.95	0.707 5	0.818 2
10	5.55	0.653 4	0.800 0
11	6.05	0.612 6	0.563 6
12	7.25	0.527 0	0.526 8
13	8.70	0.440 7	0.375 0
14	10.70	0.342 9	0.361 7
15	14.10	0.212 4	0.220 8
16	16.40	0.140 9	0.200 1

通过回归分析,在一定的盐度范围内,拟合出在不同盐度下,比蒸发系数 $F$ 与盐度 $S$ 之间的最佳回归方程:

$$F = -0.473 \ln S + 1.464 \quad (6)$$

因此,可以得到不同浓度下盐水蒸发量模型的实际计算方程:

$$E_s = \left\{ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} [(1 - \alpha)R_a(a + bn/N) - 2.45 \times 10^{-9} t_a^4 (0.34 - 0.14 \sqrt{e_d}) \times (0.1 + 0.9n/N)] + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} [K(e_a - e_d)(1 + 0.536u_2)] \right\} \times (-0.473 \ln S + 1.464) \quad (7)$$

利用此模型可以计算在初始为海水或是海水淡化剩余浓盐水的情况下,晒制太阳池各层不同盐度溶液所需的时间及用量.

## 2 太阳池不同盐度梯度时最大温差

在太阳池的集热和蓄热过程中,必须使非对流层中盐度梯度引起的密度梯度同温度差所造成的密度梯度相抵消,避免非对流层产生对流,保证太阳池的稳定性.因此在计算中引入了太阳池热稳定性条件.一方面,热稳定性条件是保证太阳池

集热和蓄热性能不被破坏的前提;另一方面,太阳池稳定运行所必须保证的最小盐度梯度可以通过热稳定性条件确定,从而估算出实际太阳池灌注过程中的海水淡化剩余浓盐水或海水需求量,对太阳池的初始灌注及长期实验运行都有着实际的指导意义。

文献[11]给出了常规盐梯度太阳池热稳定性条件的表达式:

$$(\nu + k_T) \frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + (\nu + k_S) \frac{\partial \rho}{\partial S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \geq 0 \quad (8)$$

式(8)考虑了盐梯度太阳池在自然条件下受外界多种因素的扰动。式中  $k_T$  为热扩散率;  $k_S$  为盐扩散率;  $\nu$  为溶液的黏滞系数;  $\rho$  为溶液密度,是盐度和温度的函数。

令  $G_S = \frac{\partial S}{\partial x}$  为盐度梯度;  $G_T = \frac{\partial T}{\partial x}$  为温度梯度,得到

$$\frac{G_S}{G_T} \geq -\frac{\nu + k_T}{\nu + k_S} \times \frac{(\partial \rho / \partial T)_S}{(\partial \rho / \partial S)_T} \quad (9)$$

取  $Pr = \frac{\nu}{k_T}$  为溶液的普朗特常数;  $\epsilon = \frac{k_S}{k_T}$  为盐度

与温度的扩散比;  $\gamma_1 = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_S$  为溶液的热膨胀系数;

$\gamma_2 = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial S} \right)_T$  为溶液密度随盐度的变化系数,则式(9)可以写成如下形式:

$$\frac{G_S}{G_T} \geq -\frac{Pr + 1}{Pr + \epsilon} \times \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \quad (10)$$

称  $\left( -\frac{Pr + 1}{Pr + \epsilon} \times \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \right)$  为太阳池的热稳定性系数,用  $\lambda$  表示,最终得到

$$G_T \leq \frac{G_S}{\lambda} \quad (11)$$

根据盐溶液的热物性,  $\rho$  和  $\frac{Pr + 1}{Pr + \epsilon}$  分别可以用下式表示<sup>[12]</sup>:

$$\rho(S, T) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 A_{ij} S^{i-1} T^{j-1} \quad (12)$$

$$\frac{Pr + 1}{Pr + \epsilon} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 B_{ij} S^{i-1} T^{j-1} \quad (13)$$

式(12)和(13)中的系数  $A_{ij}$  和  $B_{ij}$  可以通过文献[12]中所给的值来确定。把密度  $\rho$  分别对  $S$  和  $T$  求导,得到

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=2}^4 (j-1) A_{ij} S^{i-1} T^{j-2}}{\sum_{i=2}^4 \sum_{j=1}^4 (i-1) A_{ij} S^{i-2} T^{j-1}} \quad (14)$$

在给定的盐度梯度范围内,利用迭代法通过上述式子可以得出,当太阳池保持热稳定时不同盐度梯度下所允许的最大温差,如图1所示。图1中的横坐标指的是太阳池在灌注到非对流层某一深度处,此深度位置距离上对流层下表面的厚度( $d$ )。

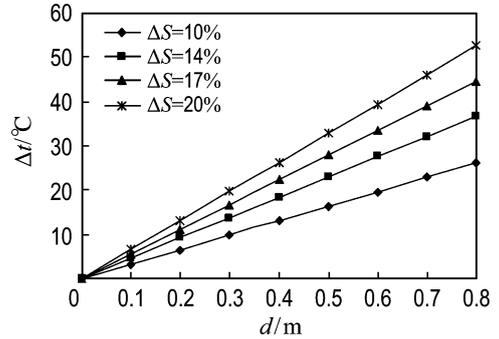


图1 不同盐度梯度下的最大温差值

Fig. 1 Maximum difference of temperature with different salinity gradient

从图1中可以看出,非对流层某一深度与上对流层下表面之间所允许的最大温差值随着盐度梯度的增加而逐步增大,因此太阳池的温度梯度呈上升趋势。所以在实际的太阳池实验中,可以根据太阳池储热层温度的不断升高,通过对下对流层补充高浓度盐溶液来逐步完成太阳池的最终灌注,而不必一开始就直接把太阳池灌注到设计的盐度梯度。用这种方法可使太阳池的初始深度较小,池底的浓盐溶液可以更加容易地接收到太阳辐射能,从而加速太阳池底层的升温<sup>[13]</sup>。图2所示的是某太阳池温度分布随深度的变化曲线。从图2可以看出,太阳池升温初期下对流层下部升温很小,达不到储热的作用。因此对于实验太阳池来说,当底部温度升高到盐度梯度难以维持非对流层热稳定性时,把浓缩好的高浓度溶液补充到太阳池底层。经过反复多次操作,直至太阳池的盐度梯度和总体深度达到设计要求为止。另外,利用此种方法可以在太阳池蓄热的同时进一步浓缩高盐度溶液,为太阳池的后续补充灌注提供浓盐溶液。

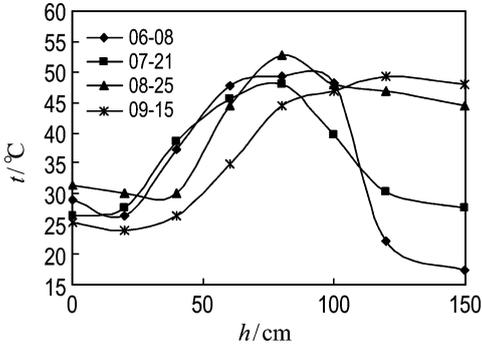


图2 不同深度处太阳池的温度分布

Fig. 2 Temperature profiles of solar pond with different depth

### 3 利用海水淡化剩余浓盐水灌注太阳池的优越性

以海水为盐资源的盐梯度太阳池溶液的获取主要有3种途径:利用海水直接浓缩、利用海水淡化剩余的浓盐水进一步浓缩和利用制盐剩余的苦卤溶液。苦卤溶液具有高浓度、高浊度的特点,虽然无需浓缩即可直接灌注太阳池底层,但灌注太阳池非对流层时,即使经过淡水稀释也具有较高的浊度,在很大程度上阻碍太阳辐射向储热层的透过。目前国内外均采用絮凝剂来降低苦卤的浊度,但始终未达到令人满意的程度。图3给出了海水、苦卤水及海水淡化剩余浓盐水3种溶液在户外自然条件下放置45 d的浊度( $T$ )变化情况。由图可见海水淡化剩余浓盐水始终具有很低的浊度。

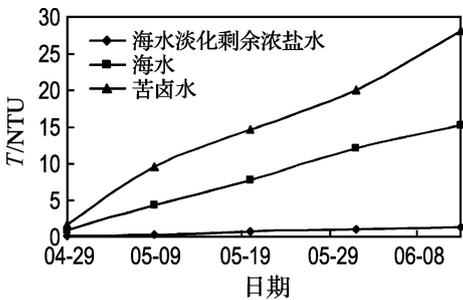


图3 3种溶液浊度变化

Fig. 3 Turbidity profiles of 3 kinds of solution

下面给出一个相同条件下浓缩海水淡化剩余浓盐水和海水所需时间及面积的对比,以便于更好地了解海水淡化剩余浓盐水在浓缩过程中的优势。

有一个面积为  $100 \text{ m}^2$  的直壁方形太阳池,下对流层厚度为  $0.6 \text{ m}$ 、非对流层厚度为  $0.8 \text{ m}$ 、上对流层厚度为  $0.3 \text{ m}$ ;其中上对流层为淡水,下对流层溶液盐度为  $15\%$ ,非对流层的盐度自上而下逐渐增加,呈线性分布。海水和海水淡化剩余浓盐水的盐度分别为  $3.2\%$  和  $5.6\%$ ,从4月20日开始计算。令  $S_m$  为第  $m$  天时溶液的盐度,则有

$$S_m = S_0 \times \frac{H_0}{H_0 - \sum_{i=1}^m E_{s,i}} \quad (15)$$

式中: $E_{s,i}$  为第  $i$  天的浓盐水蒸发量,由式(7)来确定; $H_0$  为被浓缩溶液的初始厚度; $S_0$  为溶液初始盐度。当浓缩池面积为  $1000 \text{ m}^2$  时,利用式(15)根据以上所给条件可以估算出浓缩足量的浓盐水溶液所需的时间:用海水完成浓缩所需时间为  $85 \text{ d}$ ,而用海水淡化剩余浓盐水完成浓缩所需时间仅为  $47 \text{ d}$ ,节省了近一半的时间。如果相同时间内浓缩等量的浓盐溶液,那么浓缩海水所需要的蒸发面积远远高于海水淡化剩余浓盐水所需面积。足以看出海水淡化剩余浓盐水在浓缩方面具有明显的优势。

### 4 结论

(1)用海水淡化剩余浓盐水,通过进一步的浓缩后灌注太阳池,一方面节约了能源,减少了海水淡化剩余浓盐水的排放,另一方面海水淡化中的给水预处理很严格,淡化剩余浓盐水具有浊度小的优点,利用它灌注太阳池可以提高太阳池的储热能力,并降低水处理成本。

(2)在实验的基础上,结合当地的气象条件,拟合出不同浓度下浓盐水蒸发量模型,当太阳池下对流层灌注盐度为  $15\%$  时,浓缩海水淡化剩余浓盐水在时间相同的情况下所需要的蒸发面积比直接浓缩海水节约  $45\%$ 。利用此模型还可以得出灌注太阳池所需的海水淡化剩余浓盐水量及浓缩时间。

(3)利用太阳池稳定性模型计算出不同盐度梯度下非对流层的最大温度梯度,根据温度梯度的临界值,在满足非对流层热稳定性要求的前提下,采取多次补水的方法完成太阳池灌注,可以提高太阳池的蓄热性能。

## 参考文献:

- [1] 李申生. 太阳池[J]. 太阳能学报, 1999(特刊):57-62
- [2] TABOR H. Solar ponds — a review [J]. *Solar Energy*, 1981, **27**(3):181-195
- [3] SERGIO F. Seawater as salt and water source for solar ponds [J]. *Solar Energy*, 1991, **46**(6):343-351
- [4] 孙文策, 周永平, 解茂昭, 等. 盐田太阳池实验研究[J]. 大连理工大学学报, 2003, **43**(2):176-180  
(SUN Wen-ce, ZHOU Yong-ping, XIE Mao-zhao, *et al.* Study of salt-pan solar pond [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2003, **43**(2):176-180)
- [5] SUN Wen-ce, XIE Mao-zhao, PAN Hong-kun. On the turbidity of a solar pond filled-up with bittern and seawater [C] // **2005 Solar World Congress**. Florida: [s n], 2005
- [6] AKRIDGE D G. Methods for calculating brine evaporation rates during salt production [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2008, **35**(6):1453-1462
- [7] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1948, **193**(1032):120-146
- [8] 洪嘉琦, 卢瑞芝. 我国北方四大盐海区卤水蒸发计算及其分布[J]. 地理研究, 1988, **7**(2):17-27
- [9] 张 军, 刘铸唐. 卤水比蒸发系数的数学模型——石盐析出阶段和光卤石析出阶段[J]. 盐湖研究, 1993, **1**(2):23-27
- [10] 葛少成. 太阳池辐射透射及热盐双扩散特性的实验和数值模拟研究[D]. 大连:大连理工大学, 2005
- [11] WEINBERGER H. The physics of the solar pond [J]. *Solar Energy*, 1964, **8**(2):45-56
- [12] 徐 河, NIELSEN C E. 盐梯度太阳池内部稳定性的实用判据和监测方法[J]. 太阳能学报, 1990, **11**(1):79-88
- [13] 张 曦, 孙文策, 解茂昭, 等. 盐水的辐射透射率对太阳池性能的影响[J]. 太阳能学报, 2002, **23**(6):705-710

## Research on filling solar pond with residual brine after desalination

LI Nan<sup>\*1,2</sup>, SUN Wen-ce<sup>1</sup>, ZHANG Cai-hong<sup>2</sup>, SHI Yu-feng<sup>1</sup>

( 1. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. College of Vehicles and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China )

**Abstract:** The effect of filling the solar pond with the residual brine after desalination which is further concentrated is studied. Evaporation model of brine in different salinity is fitted through experimental results of brine evaporation, combining local meteorological conditions and using Penman-Monteith formula. Then, the consumption of residual brine after desalination and concentrating time for different salinity needed are calculated. According to the requirements of stability caused by temperature rising, a new method is proposed in which the whole filling process of solar pond can be finished through replenishing water to the pond for several times. Heat performance of the solar pond is improved by this method.

**Key words:** residual brine after desalination; solar pond; evaporation; stability