

小型海水太阳池实验及考虑浊度的温度分布模拟

王 华^{1,2}, 孙文策^{*1}, 潘洪坤³

(1. 大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024;
2. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000;
3. 大连职业技术学院 电气与电子工程技术系, 辽宁 大连 116035)

摘要: 建立了 $2.8\text{ m} \times 2.3\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 小型太阳池, 以卤水和溶解粗盐的海水灌注太阳池各层, 进行了持续的池内温度和地表太阳辐射强度的测量. 根据测定的气温和太阳辐射强度数据, 考虑侧壁阴影部分对散射辐射的吸收, 针对本太阳池进行了温度分布的逐时变化数值模拟. 实验和计算结果表明, 实验值和计算值吻合较好, 保温性能较好的小型海水太阳池升温较快, 适于在温度较高的月份用于供热.

关键词: 太阳池; 海水; 实验; 温度分布; 计算

中图分类号: TK512.4 **文献标志码:** A

0 引言

盐梯度太阳池底部为浓度较大的盐溶液, 在重力的作用下, 阻止了池水向上的对流, 从而将热量贮存下来. 由于太阳池不消耗常规能源而产生污染, 且不需要辅助的储热设备, 被认为是良好的低温热源. 一般认为, 太阳池的面积越大, 其效率越高. 20 世纪 80 年代印度建立了 $6\,000\text{ m}^2$ 的太阳池^[1]. 但是大型太阳池难以维护和控制, 且成本较高. 如果太阳池的侧壁和底面的保温性能较好, 小型太阳池更便于维护和实验研究, 也可作为小规模提热应用. Jaefarzadeh^[2] 和 Karakilcik 等^[3] 分别建立了 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 和 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1.1\text{ m}$ 的小型太阳池, 并进行了大量实验研究. 本文根据本地条件, 为考察小型海水太阳池的季节热性能, 在大连沿海地区(北纬 $39^\circ 28'$, 东经 $121^\circ 31'$)建造 $2.8\text{ m} \times 2.3\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 的小型太阳池, 以来源丰富的海水、粗盐和卤水灌注太阳池, 以降低成本. 虽然卤水的浊度较高, 但经处理后其浊度可以显著降低, 并且卤水的浊度几乎不再向上扩散^[4], 故本实验采用廉价且盐度较大的卤水灌注储热层.

Jaefarzadeh^[2] 的研究围绕小型太阳池的各层性能及温度的逐时变化, 其太阳池普遍采用清

水灌注, 故不考虑浊度的影响, 只给出太阳池 24 h 的温度变化, 没有涉及小型太阳池的较长期储热情况. 小型太阳池侧壁的阴影作用影响了太阳池对太阳辐射的吸收. 太阳总辐射包括直射辐射和来自天空的散射辐射. 实际上, 被侧壁遮住的阴影部分仍接受来自天空的散射辐射. 散射辐射受太阳高度角和大气透明度的影响, 中午时, 散射辐射占总辐射的 15% 左右, 日出和日落时约占 40%^[5]. 大多数小型太阳池的计算只考虑了接受到直射辐射的有效面积, 忽略了阴影部分对散射辐射的吸收^[6,7]. 本文考虑阴影部分对散射辐射的吸收. 本文的计算主要基于文献[6,7]提出的一维温度模型方程, 针对太阳池水体浊度较大且不均匀的情况, 考虑浊度的影响, 对辐射项作改变, 考虑墙壁阴影部分对来自天空散射辐射的吸收, 给出考虑浊度及侧壁阴影影响的小型太阳池温度分布模型.

在预测太阳池温度分布进行数值计算时, 已有的研究^[2,3,6,7] 大都采用当地的气象统计平均值作为已知条件输入计算, 其优点在于预测一年中任一天的温度分布不受测定气象条件的限制, 但缺点是对气象条件的预测往往与实际情况差别很大. 为给太阳池温度的预测提供更贴近实际的气象条件, 本文采用连续 6 d 实时测定的太阳辐射

收稿日期: 2006-11-08; 修回日期: 2008-08-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50676016).

作者简介: 王 华(1978-), 女, 博士生; 孙文策^{*}(1946-), 男, 教授, 博士生导师.

强度和大气温度作为已知条件输入计算,并与实验结果进行对比。

1 海水太阳池实验

1.1 太阳池的结构

为保证采光及海水的供应,减小地下水对池底温度的影响,选择高于海平面 15 m 的开阔处建造内部尺寸为 $2.8\text{ m} \times 2.3\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 的小型海水-卤水太阳池,文中简称海水太阳池。四壁主要由红砖砌成,为防止透风及漏水,墙外用水泥浆抹平。内部采用聚苯乙烯保温板绝热,为防止漏水,保温板内用耐热、耐腐蚀的盐场专用塑料衬托,四壁的保温板厚度为 0.06 m ,为加强底部的保温作用,底部采用厚度为 0.06 m 的挤塑聚苯乙烯保温板。为保证底面的稳固,底部的保温板下为 0.10 m 厚的钢筋混凝土。侧壁墙的总厚度为 0.20 m 。

1.2 太阳池的灌注及维护

储热层(下对流层 LCZ)厚度为 0.40 m ,由经过聚合氯化铝(PAC)絮凝降浊处理后的卤水灌注,具体降浊方法见文献[4],降浊后浊度小于 10 ntu 。卤水来自盐滩的制盐剩余卤水,盐度可达到 30% 。非对流层(NCZ)厚度 0.30 m ,由海水溶解不同量的粗盐形成从上而下逐渐增大的盐梯度层。选择海水澄清度较好(1.5 ntu 左右)的时候泵取海水。海水溶解粗盐后静置沉淀,待其中的尘土充分沉淀后,用扩散器逐层灌注非对流层。各层的浊度采用浊度仪测定。上对流层厚度 0.10 m ,为澄清的海水,灌注前浊度 1.2 ntu 。为防止池中藻类及其他微生物的滋生,灌注时在各层的水中添加一定量用于海水养殖中的市售杀藻剂和杀虫剂。实验证明,其不污染水体,且能有效杀灭水中的微生物,有效保持了池水的澄清。灌注后的太阳池如图 1 所示。在距太阳池底面 0.35 m 处设置换热管,以供换热实验之用,本文暂不涉及换热实验。

太阳池运行期间自表面起沿竖直方向实时测定温度的变化,测定点为 0.05 、 0.15 、 0.24 、 0.30 、 0.35 、 0.40 、 0.45 、 0.55 、 0.75 m (自池表面算起的深度)。测定地表面日照时间内的地表总太阳辐射强度。

杀藻剂和杀虫剂只可以控制水体自身微生物的滋生,对于风雨等带入池中的灰尘杂物也需及时处理。由于太阳池昼夜敞口放置,池表面难免会有灰尘落入,夏天的时候,还会有飞虫溺水,这些杂物若不及时处理会不断累积而悬浮在水表面,严重影响太阳光的入射。对于太阳池浊度的控制,

参考海水养殖的经验,采用细小的筛网每天从水表面过滤掉杂物,尽量不扰动下层水体,维持非对流层的盐梯度。另外,在没有太阳辐射的夜间,太阳池表面用塑料覆盖,这样既可以防止夜间池表面浊度增加,又起到保温作用。



图 1 灌注后海水太阳池

Fig. 1 The seawater solar pond after filled

温度和太阳辐射强度采用 TBQ-2 总辐射表和 PC-2 型太阳辐射记录仪测定,浊度采用 WGZ-1 数字式浊度仪测定,盐度的测定由 VR200 手持式盐度折射计完成。

2 数值计算

太阳池作为一种储热供热设施,其温度分布及其变化情况至关重要,对于太阳池温度的理论分析,人们已做了大量工作^[2,3,6,8,9],大都将本地区的气象数据(气温、风速、池下的土壤温度、地下水温度、降雨量等)或者是由经验总结出来的函数关系式作为已知的条件输入,模拟太阳池的运行情况。但对于小型太阳池的逐小时昼夜温度变化的研究很少,未见对于有浊度小型太阳池的昼夜逐时温度变化的研究报道。而对于长期敞口运行的太阳池来说,其浊度不变很难做到,尤其是表面层浊度极易增大。本文温度分布的计算,考虑了浊度的影响,使计算结果更接近实际。太阳池的热量来源于各层对太阳光的吸收,而热量的损失则与保温状况和周围环境温度相关。本文的数值计算部分中,与实验对比部分的气象数据(太阳辐射强度和气温变化)都来源于实测值。

2.1 浊度较大时太阳辐射透射率的逐步回归

水中的太阳辐射透射率受到深度、测定时间、气象条件、水体的浊度等多种因素的影响。已有的研究表明^[4,10],盐度对太阳辐射透射率的影响很小,而水的清澈程度——浊度,直接影响着太阳辐射透射率的大小。Wang 等^[10]在浊度为 5 ntu 以下,通过大量实验数据,采用逐步回归的方法,先后总结了不同深度的均匀浊度以及非均匀浊度水体中的辐射透射率随深度和浊度变化的函数关系

式. 本文采用对不同浊度的水样中太阳辐射透射率 hI 随深度 x 变化的实验数据(如图2所示)逐步回归出浊度范围在 4.5~10.5 ntu 的辐射透射率最佳回归模型.

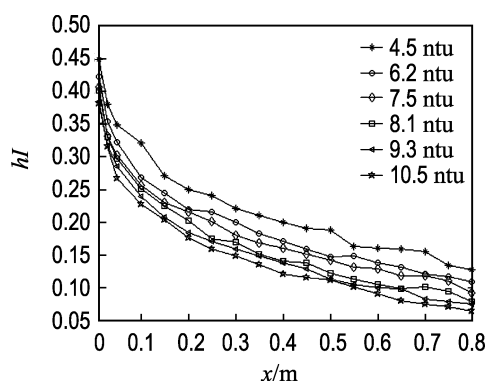


图2 浊度在 4.5~10.5 ntu 的辐射透射率测定值
Fig. 2 Experimental transmission with turbidity of 4.5-10.5 ntu

由于辐射透射率随深度的变化曲线具有明显的对数曲线特点, 运用 MATLAB 中的 Regress 软件包, 推出卤水在均匀浊度 4.5~10.5 ntu 时的辐射透射率最佳回归模型.

设浊度为 Z 的水体在水深 x 处的辐射透射率为 $hI(Z, x)$. 只需根据实验数据回归出函数 $hI(Z, x)$ 的表达式即可. 根据图2中的实验数据, 在一定显著水平 $\alpha = 0.95$ 的情况下, 最佳回归模型为

$$hI(Z, x) = 0.3889 - 0.1958x - 0.2509xZ + 0.0562xZ \ln 100x - 0.1636x^2 \quad (1)$$

由式(1)可以计算出均匀浊度(4.5~10.5 ntu)情况下, 0.01~0.80 m 的辐射透射率. 对于非均匀浊度水体中的辐射透射率函数, 参考文献[10]的方法, 逐层递归, 得出非均匀浊度的辐射透射率模型

$$hI(f(Z_i), x) = \sum_{j=1}^i hI(Z_j, \sum_{k=1}^j l_k) - \sum_{j=1}^{i-1} hI(Z_{j+1}, \sum_{k=1}^j l_k) \quad (2)$$

$$x = \sum_{j=1}^i l_j (0.01 \leq x \leq 0.80, 4.5 \leq Z \leq 10.5)$$

其中 $f(Z_i)$ 表示从池表面到第 i 层的综合浊度. 在已知各层浊度的情况下, 利用模型方程(1)、(2)可以计算浊度在 4.5~10.5 ntu, 水下任意深度 ($0.01 \text{ m} \leq x \leq 0.80 \text{ m}$) 的辐射透射率.

2.2 各层的能量平衡方程

给定结构条件下, 池水内部的温度取决于到

达池表面的太阳辐射量、当地的气象条件、太阳池的运行时间等因素. 在侧壁保温较好的情况下将池水内部看成一维的情况. 如图3所示, 沿竖直方向将太阳池划分为 nx 层, 每一层的能量平衡方程可以写成

$$Q_{i, K+1} = Q_{\text{solar}} + Q_{i+1, K} - Q_{i-1, K} - Q_s \quad (3)$$

式中: $Q_{i, K+1}$ 为 $K+1$ 时刻第 i 层吸收的总热量; Q_{solar} 为该层在该时刻吸收的太阳辐射量; $Q_{i+1, K}$ 为来自第 $i+1$ 层的热量; $Q_{i-1, K}$ 为从第 i 层向第 $i-1$ 层的热损失量; Q_s 为该层通过墙壁或底部或上表面的总热损失量.

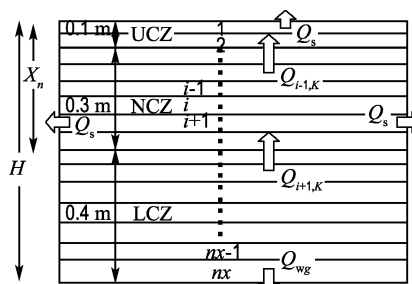


图3 太阳池计算模型示意图

Fig. 3 Schematics of solar pond under calculation

对于直壁太阳池, 竖直的侧壁必然挡掉部分太阳直接辐射, 而阴影部分接受少量来自天空的散射辐射, 设 K 时刻第 i 层接受直接照射的面积为 A_i .

$$A_i = l_w [l_i - (i-1)\Delta x] \tan \alpha_r \quad (4)$$

其中 l_w 、 l_i 分别为太阳池的宽和长; Δx 是每层的厚度; α_r 为折射角. 该层接受天空散射辐射的面积 $A_{\text{sh}} = A - A_i$, A 为池的上表面积 (m^2).

将方程(3)写成偏微分方程形式为

$$\rho c A \Delta x \frac{\partial \theta}{\partial t} = \beta (A_i I_t + A_{\text{sh}} I_{\text{dif}}) [R(hI(x) - hI(x + \Delta x))] + kA \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=x_{i+1}} - kA \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=x_{i-1}} - A_0 U_s (\theta_{i, K} - \theta_a) \quad (5)$$

式中: θ 为 t 时刻的温度 ($^{\circ}\text{C}$); x 为距池表面的距离 (m); ρ 、 c 分别是池水的密度 (kg/m^3) 和比热容 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); β 是实际进入太阳池的辐射量占总射量的比例; I_t 是 K 时刻的太阳总辐射强度 ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); I_{dif} 为散射辐射强度; A_i 和 A_{sh} 分别为该层接受太阳总辐射(直接照射)和散射辐射(阴影部分)的面积 (m^2); R 是被池表面层吸收后剩余的部分; $hI(x)$ 是 x 处的辐射透射率; A_0 是围绕每层的侧壁表面积 (m^2); U_s 是池水通过侧墙向外界环境的热损系数 ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

$\cdot \text{h}^{-1}$); θ_a 为 K 时刻的环境温度($^{\circ}\text{C}$).

设 $E_t = A_t I_t + A_{sh} I_{dif}$, 将方程(5)写成差分形式为

$$\begin{aligned} \theta_{i,K+1} = & \theta_{i,K} + \frac{\Delta t}{\rho c A \Delta x} \left\{ \beta E_t R [hI(x) - \right. \\ & hI(x + \Delta x)] + \frac{kA}{\Delta x} (\theta_{i+1,K} - \theta_{i,K}) - \\ & \left. \frac{kA}{\Delta x} (\theta_{i,K} - \theta_{i-1,K}) - A_0 U_s (\theta_{i,K} - \theta_a) \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

对各层计算的具体说明:

(1) 对于第 1 层, 用 $U_{wa} A(\theta_{i,K} - \theta_a)$ 代替方程(6)中的 $(kA/\Delta x)(\theta_{i,K} - \theta_{i-1,K})$. 其中 U_{wa} 为上表面与空气之间的对流换热系数($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$).

(2) 对于最下层(第 n_x 层), 用 $U_{ww}(\theta_{i,K} - \theta_g)$ 代替方程(6)中 $(kA/\Delta x)(\theta_{i+1,K} - \theta_{i,K})$. 其中 U_{ww} 为下对流层与土壤之间的传热系数($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), θ_g 为土壤温度.

(3) 假设到达下对流层的太阳辐射量完全被吸收, 则对于下对流层, 用 $\beta E_t R [hI(X_n)]/m_i$ 代替方程(6)中的 $\beta E_t R [hI(x) - hI(x + \Delta x)]$. 其中 X_n 为下对流层上边界的深度(m), m_i 为下对流层划分的层数.

(4) 本实验中, 在储热层的上部设置了 30 m 长、外径为 0.032 m 的换热管, 用于换热实验, 换热管投下的阴影必然影响其下水体对太阳光的吸收, 故在下对流层辐射项的吸收面积里减去换热管的投影面积 $A_{ht}(\text{m}^2)$.

2.3 参数的确定

前面通过大量的实验数据提出了卤水在 4.5 ~ 10.5 ntu 情况下太阳辐射透射率的回归模型, 本实验太阳池主要是采用海水溶解粗盐以及卤水灌注, 浊度较大(大于 5 ntu), 辐射透射率的计算采用本文提出的回归模型, 即方程(1)、(2).

太阳辐射量和空气温度对太阳池的温度变化起决定性作用, 一年中的空气温度和太阳辐射强度都是逐日、逐年周期性变化的. 平面上接受的太阳辐射强度包括直接辐射和天空散射辐射^[11]:

$$I_t = I_d + I_{dif} \quad (7)$$

其中直接辐射强度 $I_d = I_0 P^m \cos i$, 散射辐射强度

$$I_{dif} = 0.5 \cdot I_0 \sin h \cdot (1 - P^m) \times \cos^2(\alpha/2)/(1 - 1.4 \ln P) \quad (8)$$

太阳常数 $I_0 = 1\,353 \text{ W/m}^2$, P 为大气透明度, m 为大气质量, h 为太阳高度角, α 为平面与水平面的夹角.

一天中 t (h) 时刻的太阳辐射强度^[12]

$$I_t = I_{\max} \sin(t - 6) \cdot \pi/12 \quad (9)$$

$I_{\max}$ 为该天的最大辐射强度. 既然考虑昼夜的温度逐时变化, 日出时间 h_s 和日照时长 L_d 就必不可少^[2]:

$$\begin{aligned} h_s &= 6 + (12/\pi) \arcsin(-\tan \varphi \cdot \tan \delta); \\ L_d &= (24/\pi) \arccos(-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: φ 为当地纬度; δ 为赤纬角, 其计算公式为

$$\delta = 23.34 \cdot \sin[360 \cdot (284 + n)/365.25] \quad (11)$$

n 为一年中以日期为序的天数. t 时刻的大气温度 θ_a 按下式计算:

$$\begin{aligned} \theta_a(t) = & \theta_{ave} + 0.489 \Delta \theta \cos \frac{\pi}{12} (t - 15.05) + \\ & 0.062 \Delta \theta \cdot \cos \frac{\pi}{6} (t - 1.17) \end{aligned} \quad (12)$$

θ_{ave} 为日平均气温. 若天气预报测量日的最高和最低气温分别为 $\theta_{\max}$ 和 $\theta_{\min}$, 则日较差为 $\Delta \theta = \theta_{\max} - \theta_{\min}$.

盐水的导热系数 k 和比热容 c 随着盐浓度和温度的变化而改变, 本文采用以下公式计算各层的导热系数 $k_i(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$ 和比热容 $c_i(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$ ^[10]:

$$k_i = 0.555\,3 - 0.000\,813\,3 \cdot S_i + 0.000\,8(\theta_i - 20) \quad (13)$$

$$c_i = 4\,180 - 4.396 S_i \rho_i + 0.004\,8 S_i^2 \rho_i^2 \quad (14)$$

其中 S_i 为第 i 层的盐度(%), ρ_i 为第 i 层的密度(kg/m^3).

根据以上模型方程, 若已知太阳池的初始温度分布, 计算期间的每天最高和最低气温以及最大辐射强度, 理论上可以模拟太阳池温度分布的逐时变化情况.

3 结果与分析

实验期间每天记录空气温度的逐时变化. 从 09-06 至 09-11 每天 6:00 至 18:00 记录每分钟地表的太阳辐射强度, 然后取每小时的平均值作为太阳辐射强度的已知条件输入计算. 实验期间气温和辐射强度逐时变化见表 1 和 2.

沿竖直方向将太阳池划分为 40 层, 每层厚度 0.02 m, 时间步长为 1 h, 采用 MATLAB 6.5 编写程序, 完成计算.

图 4 给出了太阳池运行 48、96 和 120 h 后的池内温度计算值和测定值. 可见即使在温度较低的 9 月份, 经过一周蓄热, 该太阳池仍能够达到较高温度, 120 h 的储热层最高温度测定结果为 47.5°C .

表 1 09-06 至 09-11 的气温变化
Tab.1 Ambient temperature from 09-06 to 09-11

时间/h	温度/℃					
	09-06	09-07	09-08	09-09	09-10	09-11
1	14.5	14.3	12.7	14.1	14.2	13.2
2	14.2	14.2	12.5	14.0	14.1	13.1
3	13.1	13.5	12.2	14.4	14.0	13.0
4	13.5	13.8	12.9	14.8	14.4	13.1
5	14.2	14.1	13.5	15.1	14.8	13.4
6	14.9	14.4	15.5	15.5	15.4	13.5
7	15.8	14.7	16.5	16.5	15.8	15.6
8	16.6	15.9	18.4	17.7	16.4	17.2
9	18.1	16.8	19.4	18.8	19.1	17.5
10	21.5	20.7	19.9	19.4	20.4	19.2
11	24.4	22.5	20.4	20.5	21.0	20.7
12	25.7	25.1	22.5	21.6	21.3	23.5
13	27.0	27.4	23.8	21.9	21.0	23.6
14	27.8	27.6	23.5	22.5	21.9	23.8
15	27.5	26.4	23.1	22.0	22.2	22.5
16	26.7	26.0	22.0	21.9	21.9	22.7
17	25.5	24.0	20.8	21.2	21.2	21.3
18	24.3	23.1	19.5	19.5	19.8	19.6
19	20.6	19.6	19.4	18.0	18.0	18.8
20	19.4	17.2	18.0	16.2	17.4	17.5
21	17.2	16.5	17.5	14.5	15.9	15.5
22	16.1	15.1	15.1	14.1	15.2	14.2
23	14.8	13.4	14.8	13.2	14.9	13.5
24	14.7	13.0	14.2	13.1	14.2	13.0

表 2 09-06 至 09-11 的辐射强度变化
Tab.2 Radiation intensity from 09-06 to 09-11

时间	每小时辐射强度平均值/(W·m ⁻²)					
	09-06	09-07	09-08	09-09	09-10	09-11
6:00~7:00	145.3	169.8	109.6	53.7	278.9	115.4
7:00~8:00	278.2	367.2	380.9	95.4	464.1	216.7
8:00~9:00	445.0	577.5	508.8	149.8	654.7	277.9
9:00~10:00	581.7	747.9	633.3	208.2	760.4	456.0
10:00~11:00	810.7	869.0	654.7	297.2	833.9	539.4
11:00~12:00	971.7	946.0	739.9	343.1	859.0	854.6
12:00~13:00	874.7	960.3	749.6	378.1	763.9	440.0
13:00~14:00	876.7	919.4	620.3	287.0	657.6	319.2
14:00~15:00	724.0	823.4	400.8	104.2	534.2	315.9
15:00~16:00	639.4	648.0	562.5	118.7	312.2	510.2
16:00~17:00	321.0	372.4	367.0	294.0	143.1	308.7
17:00~18:00	126.2	136.9	186.2	175.0	54.0	217.0

由图 4 可见,48 h 的测定值与计算值具有相同的趋势,吻合度最好,但随着时间的推移,由于各层浊度都有增大趋势,而计算时认为浊度不变,仍采用初始浊度计算,96 和 120 h 的测定值和计算值的偏差略有增大,但仍具有相同的趋势. 48、96 和 120 h 的计算值和测定值的平均差分别为 0.7、1.6 和 1.8 ℃,最大温差分别为 1.2、2.2 和 2.6 ℃. 对于 24 h 敞口运行,夜间或大风时不采取覆盖措施的太阳池来说,保持浊度不变是不现

实的. 随着时间的推移,表面浊度增大,细小的灰尘难以除去而悬浮在池表面上,使水体的浊度(尤其是表层附近)有所增大,影响了对太阳辐射的吸收,这种影响累积增加,必然影响温度的发展. 这种负面作用阻碍了太阳光线向下层的入射,最终使储热层温度较计算值低,太阳池自上而下具有不同的密度,导致各层不同的浮升力,而使落入太阳池的灰尘悬浮在不同的深度. 所以对于长期运行的太阳池,应采取更有效的方法降低池水的浊度.

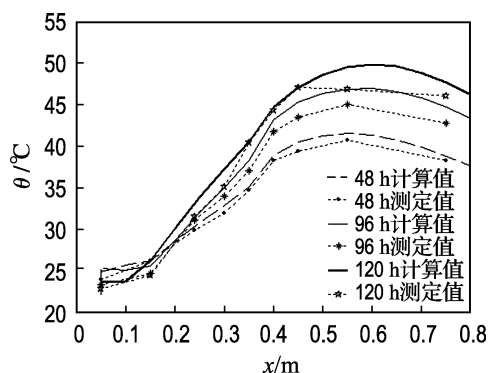


图4 太阳池运行48、96和120 h后的池内温度计算值和测定值

Fig. 4 Experimental and theoretical temperature distributions of 48 h, 96 h and 120 h

图5是模拟条件下09-06~09-11的全池温度发展. 实际情况也与此类似, 在初始温度相同的条件下, 经过第1天的太阳照射, 各层温度都明显升高, 尤其是储热层温度升到30℃左右, 第2天辐射强度也较强, 到午后储热层各层温度达到40℃左右, 与前一天相比最高温升达10.1℃. 可见各层温度虽然在晚间都会有所降低, 但总体随时间呈升高趋势. 09-09辐射强度较低, 储热层温度都有所下降, 这也是浅太阳池的一大缺点, 遇连续阴雨天的蓄热能力较差.

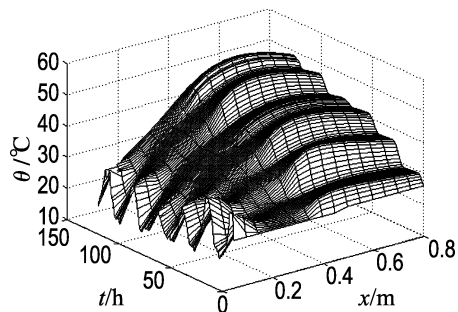


图5 太阳池各层温度随运行时间变化的计算值

Fig. 5 Variation of the theoretical temperature distribution in the pond with running time

在夜间没有太阳的照射, 气温也比较低, 所以太阳池在夜间温度的变化是对其蓄热能力的考验. 图6给出了48~72 h, 池表面以下0.55和0.75 m处的温度变化情况. 计算值和测定值具有相同的变化趋势, 不过测定值变化曲线要比计算值的变化幅度更小些, 曲线更趋缓和. 总体上说, 计算值比测定值要大, 二者最大差异产生在温度的最高点, 0.55和0.75 m处的最大温差值分别为2.2和1.5℃. 测定时间内0.55 m处的温度幅

度变化较小, 而0.75 m处变化幅度稍大, 夜间温度散失也比0.55 m处明显, 这与靠近底面处在夜间通过地面的热损失相对增大有关.

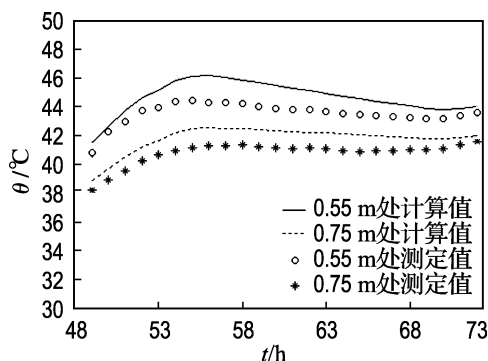


图6 距池表面0.55和0.75 m处48~72 h温度计算值和测定值

Fig. 6 Experimental and theoretical temperature development during 48~72 h of the 0.55 and 0.75 m points

给定每天的最大辐射强度, 则每小时的辐射强度由方程(9)计算得出, 这里取每月份的平均最大辐射强度. 分别模拟出该太阳池在07-01、03-01和05-01运行10 d后池内的温度分布情况, 计算结果见图7. 太阳池的蓄热能力很重要, 可以推测, 在太阳辐射较强、气温较高的7月份, 经过持续几天的蓄热, 本太阳池的储热层也会具有较高的温度. 虽然该小型太阳池较浅, 储热层的温度在晚间也会略有降低, 但储热层温度总体还是保持上升状态. 由于该太阳池较浅, 保温得当, 可以在短时间内升到较高的温度, 理论上, 7月份可以达到近70℃. 当然模拟条件下无法考虑降雨大风等特殊天气的影响, 所以计算值可能较实测值偏大.

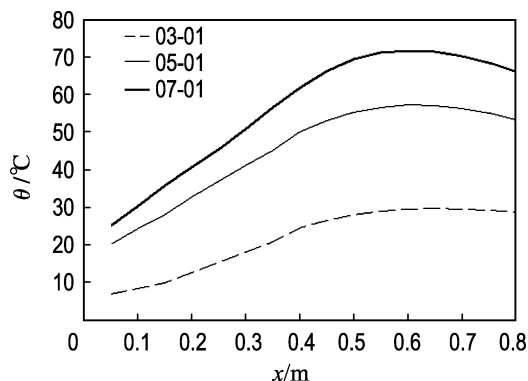


图7 模拟一年中不同月份里运行10 d后的温度分布

Fig. 7 Temperature distributions after developing 10 d since selected days of a year

但温度发展的总趋势是一致的. 总之, 可以推测该太阳池在太阳辐射较强、温度较高的季节里短期内可达到较高温度, 所以从太阳池提热的实验研究正是本文下一步要做的.

4 结 论

本文建造了保温性能较好的海水-卤水-粗盐综合利用的小型太阳池, 进行了池内温度分布和太阳辐射强度的持续测定. 针对本实验太阳池, 建立了考虑浊度的简单的一维瞬时温度分布模型, 并与实验结果进行了比较, 结果表明二者具有较好的一致性. 考虑浊度的温度发展模型使太阳池温度分布的计算结果比较接近实际测定结果, 实验结果证明, 该小型太阳池升温较快, 夜间温度有所降低.

参考文献:

- [1] KUMAR A, KISHORE V V N. Construction and operational experience of a 6 000 m² solar pond at Kutch India [J]. *Solar Energy*, 1999, **65**(4):237-249
- [2] JAEFARZADEH M R. Thermal behavior of a small salinity-gradient solar pond with wall shading effect [J]. *Solar Energy*, 2004, **77**(3):281-290
- [3] KARAKILCIK M, DINCER I, ROSEN M A. Performance investigation of a solar pond [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, **26**(7):727-735
- [4] SUN Wen-ce, XIE Mao-zhao, GE Shao-cheng. On the turbidity of a solar pond filled up with bittern and seawater [C] // *Proceeding of 2005 International Solar Conference*. Orlando:[s n], 2005
- [5] RUBIN H, BENEDICT B A, BACHU S. Modeling the performance of a solar pond as a source of thermal energy [J]. *Solar Energy*, 1984, **32**:771-778
- [6] KARAKILCIK M, KIYMAC K, DINCER I. Experimental and theoretical temperature distributions in a solar pond [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2006, **49**:825-835
- [7] KAYALI R, BOZDEMIR S, KIYMAC K. A rectangular solar pond model incorporating empirical functions for air and soil temperatures [J]. *Solar Energy*, 1998, **63**(6):345-353
- [8] HULL J R. Computer simulation of solar pond thermal behavior [J]. *Solar Energy*, 1980, **25**:33-40
- [9] AL-JAMAL K, KHASHAN S. Effect of energy extraction on solar pond performance [J]. *Solar Energy*, 1998, **39**(7):559-566
- [10] WANG J, SEYED-YAGOOBI J. Effect of water turbidity on thermal performance of a salt-gradient solar pond [J]. *Solar Energy*, 1995, **54**(5):301-308
- [11] 彦启森, 赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998
- [12] WANG J. Experimental studies of radiation transmission in water and numerical simulation of dynamic behavior of a salt-gradient solar pond [D]. Texas: Texas A&M University, 1993

Experiment in a small seawater solar pond and simulation of numerical temperature distribution considering turbidity

WANG Hua^{1,2}, SUN Wen-ce^{*1}, PAN Hong-kun³

- (1. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
 2. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
 3. Department of Electrical and Electronic Engineering, Dalian Vocational Technical College, Dalian 116035, China)

Abstract: A small seawater solar pond with a dimension of 2.8 m × 2.3 m × 0.8 m was constructed. The pond was filled with bittern and the solution of coarse salt in water. The temperature in the pond and the radiation intensity during experimental period were measured. Based on the experimental data and the diffusive radiation absorbed by wall shadow, the temperature distribution in the pond with a one-dimension transient model considering the turbidity of the solar pond water was simulated. There is a better agreement on the experimental data and the simulating temperature distributions. Both the results suggest that temperature in the small solar pond with probably insulated rose up in short time, so it is better to extract heat in warm seasons.

Key words: solar pond; seawater; experiment; temperature distribution; computation