

太阳池底部加设多孔介质实验与模拟研究

史玉凤^{1,2}, 孙文策¹, 刘宏升^{*1}, 刘红¹, 吴丹¹

(1. 大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024;

2. 中国矿业大学 电力工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 海边小型实验太阳池证明了多孔介质——卵石的加入能够提高太阳池下对流层(LCZ)温度和太阳池贮热量,并有利于保持补盐过程中池水的澄清.利用有限差分方法研究了多孔介质对LCZ温度、太阳池贮热量以及太阳池最大提热率的影响.计算结果表明一定的土壤条件下适当的多孔介质厚度可以提高太阳池的贮热量以及太阳池的最大提热率.还讨论了土壤导热系数对太阳池热性能的影响.当多孔介质骨架导热系数大于浓盐水导热系数时,太阳池LCZ的温度随着多孔介质孔隙率的增大而增大,否则情况相反.

关键词: 太阳池;多孔介质;贮热量;提热率;隔热保温

中图分类号: TK512.4 **文献标志码:** A

0 引言

盐梯度太阳池是一种具有一定盐浓度梯度的水池式太阳能收集和贮存系统^[1].太阳池向土壤损失热量的多少对太阳池系统的热效率有很重要的影响^[2].虽然有学者^[3]指出大面积太阳池在常年稳定状态下,向池底土壤的传热不会导致池中热量的损失,但是对于间歇运行的太阳池(如只用于冬季采暖的太阳池)或采光面积较小的太阳池,向土壤损失的热量很多,而且较难提取和利用.所以应该想方设法减少向池下土壤的传热,来提高池底温度和太阳池的贮热量.由于太阳能流密度低,建造太阳池需要占用大面积的土地.如今土地资源日益紧缺,适合建造太阳池的地方越来越少,且世界上有很多地方虽太阳光充足,但地下存在暗流或土壤的导热系数很大,在这类地方建造的太阳池会向地下损失很大比例的热量,降低其贮热量和热利用率.因此研究将太阳池建于恶劣地点的可行性,降低太阳池向池下土壤的传热有很重要的意义. Al-Juwayhel 等^[4]通过模拟计算指出把小石块等放到太阳池底形成石床可以提高

太阳池下对流层(LCZ)的温度.但该文未给出有多孔介质层太阳池提高LCZ温度所需要的土壤条件.本文在该文基础上研究廉价易得的多孔介质对太阳池LCZ温度、太阳池贮热量及提热率的影响,及土壤导热系数对太阳池内热量传递的影响;并在海边建造两个实验型太阳池,进行太阳池底是否添加多孔介质的对比实验,以验证多孔介质对太阳池性能的影响.

1 实验研究

在大连海边建立了两个结构尺寸相同的小型太阳池,一个有卵石,一个没有卵石,进行了对比实验.太阳池的表面采光面积为 $2.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}$,底面积为 $0.5\text{ m}\times 0.7\text{ m}$,池深 1.1 m ,上对流层(UCZ)、非对流层(NCZ)和下对流层(LCZ)厚度分别为 0.1 、 0.5 和 0.4 m .太阳池壳体采用混凝土结构,池子四壁及底部均进行了防水处理.四壁用 5 cm 厚挤塑板保温,池底不保温.卵石层厚度为 0.2 m ,所用卵石的平均直径为 25 mm .

1.1 卵石层对太阳池温度的影响

实验太阳池于6月25日灌注完毕,8月7日

太阳池的温度(t)如图 1 所示,图 1 中横坐标为以池底为原点,以向上为正方向的高度(H)。

从图 1 可以看出无卵石太阳池的最高温度为 45.2 ℃,有卵石的最高温度为 47.5 ℃,而且在各对应点都是有卵石池的温度高于无卵石池的温度,说明多孔介质层起到了隔热保温作用,有利于太阳池水温的提高。

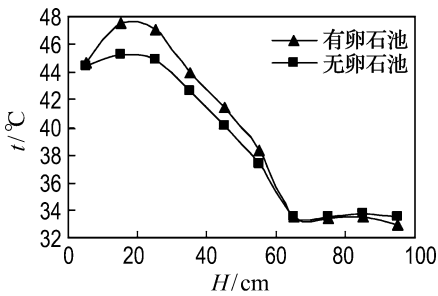


图 1 8 月 7 日实验太阳池温度分布

Fig. 1 The temperature profiles of experimental solar ponds on 7 August

1.2 卵石层对太阳池贮热量的影响

为了研究卵石层对太阳池贮热量的影响,本文计算了从灌池之初到 8 月 7 日这段时间有卵石池与无卵石池的贮热量,计算结果如表 1 所示。

表 1 有卵石池与无卵石池贮热量(q)比较
Tab.1 Heat storage quantities (q) of ponds with and without cobble

范围	q/J		
	有卵石池	无卵石池	比值
0~40 cm	28 935 141.2	27 630 275.7	1.047 2
20~40 cm	19 133 929.6	18 146 018.1	1.054 4
NCZ 与 LCZ	51 978 700.8	49 843 695.3	1.042 8

比较表 1 中贮热量的数据可知,无卵石池贮热量比有卵石池贮热量小,说明卵石层的存在可以提高太阳池的贮热量。

1.3 多孔介质层对太阳池浊度及藻类的影响

太阳池内的盐水存在梯度,底部的盐浓度比顶部的盐浓度大,所以太阳池 LCZ 的盐分会向 UCZ 扩散,导致太阳池盐梯度变小,不利于其稳定运行,所以太阳池需要定期向池底补充浓盐水。落入太阳池中的灰尘由于自然沉降,会在池底聚积。补盐操作一般是在 LCZ 进行,浓盐水以一定的速度射入到 LCZ,会对池底灰尘造成一定扰

动,进而导致 LCZ 的浊度增大,降低池水吸收太阳辐照的比例。

本文实验太阳池通过开有水平小孔的扩散器在池底补充浓盐水。有卵石池的扩散器在加设多孔介质时预先埋的多孔介质层底部以固定扩散器。由于多孔介质内部包含很多孔隙,其流道迂回曲折,浓盐水向上运动的速度很小,对池底及多孔介质内部的灰尘扰动也较小,不易引起太阳池池水浊度的增大。为了研究多孔介质对太阳池补盐过程中池水浊度的影响,测量了补盐前 1 d 和补盐后 2 d 的浊度数据,如表 2 所示。

表 2 补盐过程中太阳池的浊度
Tab.2 Turbidity of solar pond in the process of adding salt

高度/cm	浊度/NTU			
	有卵石池 补盐前	有卵石池 补盐后	无卵石池 补盐前	无卵石池 补盐后
35	5.6	3.5	4.6	7.7
75	3.8	2.8	3.7	6.4
95	4.3	3.5	3.8	6.1

比较表 2 中数据可知补盐后无卵石池各处的浊度大于补盐前各处的浊度,有卵石池补盐后各处浊度小于补盐前各处的浊度。这是因为有卵石池的扩散器埋在多孔介质内部,浓盐水通过多孔介质之间的孔隙慢慢流出,携带的灰尘较少,经过 2 d 后,在重力的作用下,有些灰尘降落到了多孔介质表面,这部分灰尘对池水的浊度没有影响,所以浊度不升反降。可见卵石层的存在可以避免补盐引起浊度的增大,有利于太阳池补盐的操作。

炉渣内部还有很多细小的孔隙,而且炉渣在水中浸泡可以浸出铝离子,炉渣有去除水中藻类的作用^[5],向太阳池补盐时,可以将要补充的浓盐水通过池外炉渣,在物理吸附的作用下去除池水中的藻类,达到池水降浊的目的。

2 模拟研究

本文对多孔介质——炉渣和卵石用来提高太阳池性能进行了模拟计算。

对于大面积太阳池或四壁保温良好(侧壁热损失可以忽略不计)的太阳池而言,可以忽略水平方向的传热,只考虑太阳池内竖直方向上的传热,

所以太阳池内的传热可以认为是一维、非定常、有内热源的导热问题,其传热方程为^[6]

$$\rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial t}{\partial x} \right) - H_s \frac{dh}{dx} - \frac{dq_{\text{ext}}}{dx} \quad (1)$$

式中: ρ 为密度, c_p 为比热容, t 为温度, τ 为时间, x 为水深, κ 为导热系数, H_s 为入射到池表面的太阳辐照度, h 为太阳池内的辐射透射率, q_{ext} 为提热量。

盐水的物性参数是温度(t)和盐度(S)的函数^[7]:

$$\kappa = 0.555\,3 - 0.000\,081\,3S + 0.000\,8(t - 20) \quad (2)$$

$$\rho = 998 + 0.65S - 0.4(t - 20) \quad (3)$$

$$c_p = 4\,180 - 4.396S + 0.004\,8S^2 \quad (4)$$

环境温度(t_a)与太阳辐照度按照北京地区经验公式计算^[8]:

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

$$H_s = 177.6 + 86.2\sin(2\pi d/365) \quad (6)$$

式中 d 为从春分日算起的天数。

池水不同深度处的辐射透射率按如下公式^[9]计算:

$$h(x) = p \times [a - b\ln(x/\cos \gamma)] \quad (7)$$

式中: p 为加权系数, $a = 0.36$, $b = 0.08$, γ 为太阳光在盐水中的折射角。

对于土壤层和多孔介质盐水层而言,由于土壤和多孔介质是固体而且是不透光的, h 取零;本文计算不考虑提热,所以 q_{ext} 也取零。 ρ 、 c_p 和 κ 选用黏土和多孔介质与盐水层混合物的物性参数。

Al-Juwayhel等^[4]利用简单组合法计算了多孔介质与浓盐水混合物的有效导热系数。简单组合法认为多孔介质的有效导热系数与各相体积比有关,此法只适用于大致估计多孔介质导热系数的范围,不适用于精确计算^[10]。所以本文构建了实验台,利用半无限大物体非稳态导热原理测量了多孔介质与浓盐水混合物的有效导热系数,实验装置与实验过程参考文献^[11]。

池下热沉的温度为大气温度的年平均值,即 $11.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

UCZ盐度为 30 kg/m^3 ,LCZ盐度为 250 kg/m^3 ,NCZ盐度呈线性分布,各层分界明显。模拟计算中太阳池的尺寸如图2所示。

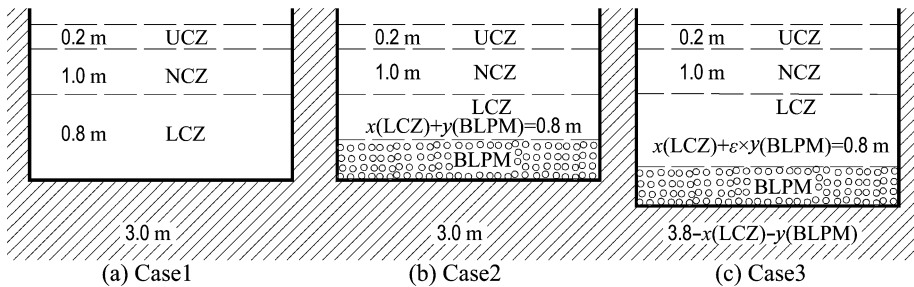


图 2 含有多孔介质的太阳池结构简图

Fig. 2 Structural sketch of solar pond with porous media

3 多孔介质对太阳池性能的影响

本文利用以上所述的模型模拟计算了加设多孔介质太阳池和普通太阳池内部的温度分布、贮热量以及提热率,并进行了比较。其中土壤导热系数取为 2.5 W/mK 。

3.1 炉渣对太阳池 LCZ 温度和贮热量的影响

太阳池内加设炉渣后,炉渣层厚度 D 对 LCZ 温度(t_{max})和贮热量(Q)的影响如图3所示,其中土壤导热系数为 2.5 W/mK 。当炉渣层厚度为0

时,代表没有加设炉渣,即普通太阳池,对应 Case1。Case1 的贮热量为 LCZ 的贮热量,Case2 和 Case3 中太阳池的贮热量包含 LCZ 贮存的热量和多孔介质层贮存的热量。

从图3可以看出,与 Case1 相比,无论是 Case2 还是 Case3,炉渣的加入都有利于增大太阳池 LCZ 的温度,而且炉渣层越厚,LCZ 的温度越高。

从图3(a)可以看出随着炉渣层厚度的增大,

太阳池总贮热量呈现先增大后减小的抛物线状,而且存在一个最佳炉渣层厚度,使得太阳池的总贮热量达到最大值.与相变热贮存有关的因素包括温差还有贮热物质的比热容^[12].在 Case2 中,太阳池内加设炉渣,提高了 LCZ 的温度,这一点有利于太阳池的贮热量增大.而炉渣浸在浓盐水中,所以与传统太阳池相比,炉渣代替了部分浓盐水.根据炉渣与浓盐水的物性参数可知,炉渣的单位体积热容($\rho \times c_p$)小于浓盐水的,这点不利于太阳池贮热量的增大.所以由于以上两方面的综合影响,在 Case2 中存在一个最佳炉渣层厚度,使得太阳池的总贮热量达到最大值.因此为了太阳池的性能,在 Case2 中选择炉渣层厚度的时候应该考虑太阳池的总贮热量和 LCZ 的最高温度这两个方面.从图 3(b)可以看出 Case3 中炉渣层越厚,太阳池贮热量和 LCZ 温度越高.这是因为在 Case3 中贮热物质比普通太阳池的多(炉渣是增加的贮热物质),炉渣层的存在有利于提高太阳池 LCZ 的温度,这一点也有利于太阳池的贮热,所以 Case3 中太阳池的贮热量增大.

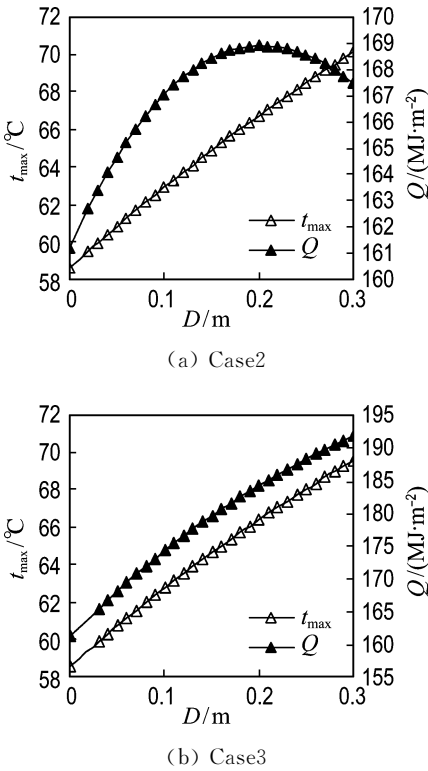


图 3 炉渣对太阳池 LCZ 温度和贮热量的影响
Fig. 3 The effect of slag on temperature of LCZ and heat storage quantity

3.2 多孔介质对太阳池提热率的影响

太阳池是集太阳能收集和贮存于一体的太阳能利用装置,其收集的太阳能提取出来供采暖、海水淡化、制盐、化工工程等使用.从太阳池中提热的效率定义如下:

提热率 $\eta_m = \frac{\text{提取的热量}}{\text{透射到太阳池表面的太阳辐射度}}$

图 4 为 Case2 中不同多孔介质层厚度情况下的提热率.可以看出多孔介质的加入可以大幅度提高太阳池的提热率.在太阳池底加设多孔介质后,由于多孔介质的隔热保温作用,太阳池的贮热量比不加设多孔介质的多.当从太阳池 LCZ 提热时,LCZ 温度会逐渐降低,温度较高的多孔介质层会向 LCZ 传热,可以提取的热量增加,进而提高太阳池的提热率,而且多孔介质层厚度越大,其隔热保温效果越好,太阳池的提热率越大.

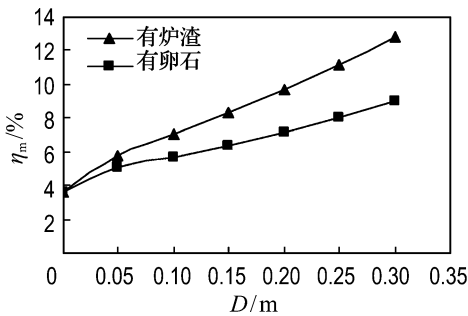


图 4 多孔介质对太阳池提热率的影响
Fig. 4 The effect of porous media on thermal extraction efficiency of solar pond

3.3 多孔介质孔隙率对太阳池性能的影响

不同孔隙率下多孔介质盐水层的有效导热系数可以利用分形孔道网络模型或二维圆柱模型模拟计算,限于篇幅,模拟计算的详细内容在另文中给出.计算得到的有效导热系数,用于研究多孔介质孔隙率对太阳池性能的影响,如图 5 所示,从图中可以看出当多孔介质是炉渣时,LCZ 最高温度随着炉渣孔隙率的增大而减小,原因在于 $\kappa_{slag} < \kappa_{brine}$,炉渣孔隙率越大,炉渣孔隙内填充的浓盐水量越多,炉渣与盐水混合物的有效导热系数越大,隔热保温作用降低.当多孔介质是卵石时,情况与多孔介质是炉渣时的相反,LCZ 最高温度随着卵石孔隙率的减小而降低.原因在于 $\kappa_{cobble} > \kappa_{brine}$,卵石孔隙率越大,卵石盐水层的有效导热系数越小,

隔热保温作用越强,所以研究多孔介质孔隙率对太阳池 LCZ 最高温度的影响时要综合考虑多孔介质骨架导热系数与浓盐水导热系数的大小关系.

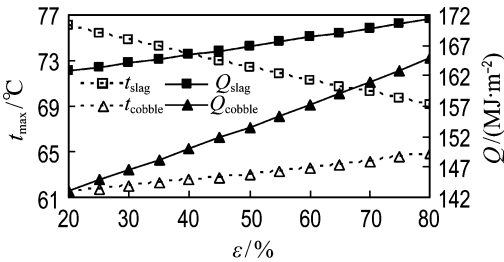


图 5 多孔介质孔隙率对太阳池性能的影响
(以 Case2 为例)

Fig. 5 The effect of porosity on performance of solar pond (in Case2)

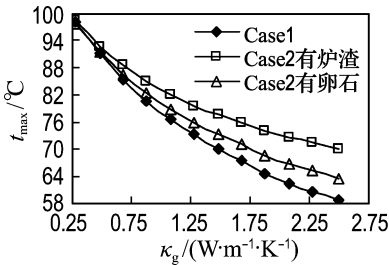
加设多孔介质太阳池的贮热量都随着多孔介质孔隙率的增大而增大. 因为本文选用的多孔介质的 $\rho \times c_p$ 都比浓盐水的低,随着多孔介质孔隙率的增大,多孔介质盐水层的单位体积热容增大,有利于太阳池贮热量的增大. 所以多孔介质孔隙率越大,太阳池的贮热量也越大.

4 土壤导热系数对太阳池 LCZ 温度和贮热量的影响

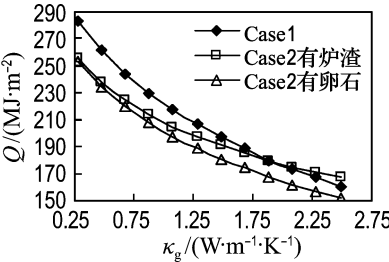
对于太阳池而言,LCZ 的温度最高,所以池下土壤的性质严重影响太阳池的性能. 设计实验研究土壤对太阳池性能的影响,不仅耗时耗资,而且有些实验条件不易达到,所以本文采用数值模拟的方法. 土壤的导热系数 κ_g 在 $0.28 \sim 2.50 \text{ W/mK}^{[13]}$,在传热模型中改变土壤的导热系数即可模拟研究不同土壤条件下,多孔介质层对太阳池 LCZ 温度及总贮热量的影响. 计算了不同土壤导热系数条件下加设 0.3 m 炉渣、卵石和普通太阳池的最高温度和总贮热量,结果如图 6 和 7 所示.

由图 6(a)可见,在土壤导热系数变化范围内,多孔介质层的存在总体上提高了太阳池 LCZ 最高温度. 但在土壤导热系数较小时 LCZ 最高温度提高的幅度较小,而在土壤导热系数较大时 LCZ 最高温度提高的幅度较大. 从图 6(b)可见,Case2 中加设多孔介质的太阳池的总贮热量都比

普通太阳池的小,主要原因是本文所选用的多孔



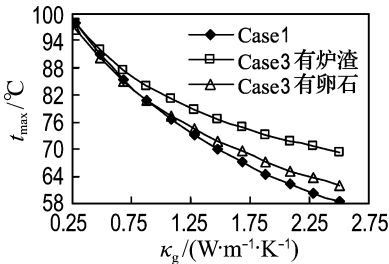
(a) 最高温度



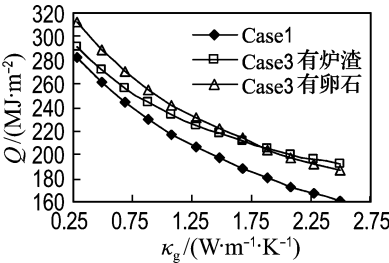
(b) 总贮热量

图 6 Case1 与 Case2 中土壤导热系数对太阳池最高温度和总贮热量的影响

Fig. 6 The effect of ground thermal conductivity on maximum temperature and total heat storage quantity of solar pond in Case1 and Case2



(a) 最高温度



(b) 总贮热量

图 7 Case1 与 Case3 中土壤导热系数对太阳池最高温度和总贮热量的影响

Fig. 7 The effect of ground thermal conductivity on maximum temperature and total heat storage quantity of solar pond in Case1 and Case3

介质物性参数(密度、比热容等)不利于太阳池的总贮热量的增加. 虽然多孔介质的加入有助于提高太阳池 LCZ 的温度, 而温度提高有利于太阳池的总贮热量的增加, 但是当土壤导热系数较小时, 土壤层是很好的保温层, 多孔介质层引起的温升较小, 温升对贮热量正面的影响较小, 不足以抵消多孔介质的物性参数对贮热量负面的影响, 所以加设多孔介质层的太阳池的总贮热量比无多孔介质池的小, 仅仅当土壤导热系数较大时, 有炉渣层太阳池的总贮热量才大于无多孔介质池的. 以上分析表明在 Case2 中, 在土壤导热系数变化范围内, 多孔介质层都可以提高 LCZ 的最高温度, 但是除了土壤导热系数较大的情况以外, 大多数情况下, 并不能提高太阳池的总贮热量.

由图 7(a)可见, 在土壤导热系数较小时, 与普通太阳池相比, 加设多孔介质的太阳池的 LCZ 最高温度低于普通太阳池的 LCZ 最高温度. 这是因为 Case3 是以水量相等为基准的, 由于多孔介质是新增加的, 太阳池的总深度比普通太阳池大; 但是地下水位不变, 所以土壤层厚度相应减小. 当土壤导热系数较小时, 土壤的保温效果比多孔介质层好, 所以这种情况下多孔介质的加入不利于提高太阳池的 LCZ 温度. 从图 7(b)可以看出, Case3 中加设多孔介质层的太阳池的总贮热量普遍高于普通太阳池的, 这是因为在 Case3 中加设多孔介质太阳池 LCZ 的水量与 Case1 中 LCZ 的水量相等, 多孔介质是多增加的贮热物质, 所以在 Case3 中, 无论用何种多孔介质, 都有利于太阳池的贮热. 以上分析表明土壤导热系数较大时, 在 Case3 中多孔介质层不但有助于增大 LCZ 的温度, 还有利于提高太阳池的贮热量.

比较图 6(a)和图 7(a)可知, 加设炉渣太阳池的 LCZ 温度比加设卵石层的太阳池的 LCZ 温度高. 但比较图 6(b)和图 7(b)可知, 是加设炉渣层还是加设卵石层更有助于提高太阳池贮热量, 与土壤导热系数和多孔介质层的设置情况(Case2 或 Case3)有关.

5 结 论

(1)实验与模拟计算均表明当土壤导热系数

较大时, 多孔介质的加入有利于提高太阳池 LCZ 的温度、贮热量和提热率. 炉渣层的隔热保温作用大于卵石层的.

(2)Case2 情况下, 由于 LCZ 温度的提高及多孔介质物性参数两个相反的影响因素, 存在一个最佳炉渣层厚度使得加设炉渣的太阳池的 LCZ 温度有大幅度增大, 而且太阳池的总贮热量达到最大值, 所以应同时考虑炉渣层对贮热量和 LCZ 的最高温度两个方面的影响来选择炉渣层厚度.

(3)当 $\kappa_{\text{frame}} > \kappa_{\text{brine}}$ 时, 太阳池 LCZ 的温度随着多孔介质孔隙率的增大而增大, 当 $\kappa_{\text{frame}} < \kappa_{\text{brine}}$ 时情况相反; 但两种情况下太阳池总贮热量都随着多孔介质孔隙率的增大而增大.

(4)实验表明多孔介质的加入有利于保持补盐过程中太阳池池水的澄清.

参考文献:

- [1] DAH M M O, OUNI M, GUIZANI A, *et al.* The influence of the heat extraction mode on the performance and stability of a mini solar pond [J]. **Applied Energy**, 2010, **87**(10):3005-3010
- [2] SAXENA A K, SUGANDHI S, HUSAIN M. Significant depth of ground water table for thermal performance of salt gradient solar pond [J]. **Renewable Energy**, 2009, **34**(3):790-793
- [3] VELMURUGAN V, SRITHAR K. Prospects and scopes of solar pond: A detailed review [J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2008, **12**(8):2253-2263
- [4] AL-JUWAYHEL F, EL-REFAEE M M. Thermal performance of a combined packed bed-solar pond system — a numerical study [J]. **Applied Thermal Engineering**, 1998, **18**(12):1207-1223
- [5] 刘 生. 炉渣去除养鱼水中藻类的研究[J]. 山西建筑, 2004, **30**(19):128-129
- [6] MANSOUR R B, TAM C. Transient heat and mass transfer and long-term stability of a salt-gradient solar pond [J]. **Mechanics Research Communications**, 2006, **33**(2):233-249

- [7] GREEN D W, PERRY R H. **Perry's Chemical Engineers' Handbook** [M]. 8th ed. New York: McGraw Hill, 2008
- [8] XIE Mao-zhao, GE Shao-cheng, SUN Wen-ce. Numerical simulation of double-diffusive dynamical model of a solar pond considering the effect of turbidity and wind [J]. **Journal of Thermal Science**, 2006, **15**(2):168-174
- [9] KARAKILCIK M, DINCER I. Exergetic performance analysis of a solar pond [J]. **International Journal of Thermal Sciences**, 2008, **47**(1):93-102
- [10] 刘 伟,范爱武,黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2006
- [11] 孙文策,史玉凤. 多孔介质对太阳池热盐扩散影响实验研究[J]. 大连理工大学学报, 2010, **50**(1):46-51
- (SUN Wen-ce, SHI Yu-feng. Experimental research on effect of thermal and salt diffusion by installing porous media in solar pond [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2010, **50**(1):46-51)
- [12] MOONKI J, LIU Rong-hou. Experimental study on the thermal characteristics of gravel layer in a solar thermal energy conversion system for house heating [J]. **Transactions of the CSAE**, 2005, **21**(12):121-126
- [13] 任泽霁,蔡睿贤. 热工手册 [M]. 北京:机械工业出版社, 2002

Experimental and simulated study of adding porous media at bottom of solar pond

SHI Yu-feng^{1,2}, SUN Wen-ce¹, LIU Hong-sheng^{*1}, LIU Hong¹, WU Dan¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Electric Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The experimental results prove that cobble can improve temperature of lower convective zone (LCZ) and heat storage quantity of solar pond based on small solar ponds constructed on the seaside, and can avoid augmentation of brine's turbidity in the process of adding brine. The effects of porous media on temperature of LCZ, heat storage quantity and maximum thermal extraction efficiency of solar pond are researched based on a finite difference scheme. Computational results show that proper depth of porous media in some soil conditions can significantly increase heat storage quantity and maximum thermal extraction efficiency of solar pond. The effects of ground thermal conductivity on thermal performance of solar pond are also researched. If thermal conductivity of porous media frame is bigger than that of concentrated brine, temperature of LCZ of solar pond increases with increasing porosity of porous media. However, the situation is reverse if thermal conductivity of porous media frame is smaller than that of concentrated brine.

Key words: solar pond; porous media; heat storage quantity; thermal extraction efficiency; heat insulation