

多孔介质对太阳池热盐扩散影响实验研究

孙文策, 史玉凤*, 李楠, 卜一凡

(大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 研究在太阳池底部增设多孔介质水层对太阳池热盐扩散的影响及对水体的传热特性和温度分布的影响. 实验结果表明, 多孔介质水层可以起到隔热保温作用. 测量了石子水层和炉渣水层的热扩散率和导热系数, 验证了炉渣水层的隔热保温性比纯水强; 通过观测有多孔介质层与无多孔介质层以及不同材质、不同尺寸多孔介质等情况下的盐扩散规律, 发现多孔介质层明显抑制了盐的扩散, 有利于盐梯度的保持.

关键词: 多孔介质; 太阳池; 热扩散; 盐扩散

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. 太阳池不可避免地会向四壁和土壤散热. 在太阳池四壁加设保温层, 可以减小热量通过四壁散失的比例. 另外太阳池的面积越大, 热量通过四壁散失的比例越小. 虽然有学者指出, 太阳池向土壤散失热量, 在稳定工况下, 太阳池池下土壤对跨季度蓄热起相当大的作用^[1], 但对于中小型太阳池或非常年连续运行的太阳池, 传入太阳池底土壤中的热量是很难提取和利用的. 而在太阳池利用的初期, 中小型太阳池或非常年运行的太阳池是大量使用的. 因此研究减少向池底土壤的传热对于提高太阳池的热利用效率具有重要意义. 太阳池的稳定运行中, 盐梯度的保持十分重要. 为了保持太阳池的盐梯度需要大量的盐, 而盐的成本一般占太阳池造价的 $1/4 \sim 1/3$ ^[2]. 盐扩散过程损害盐梯度, 热扩散的存在使得损害更严重^[3], 因此研究减缓盐扩散的方法是必要的. 全饱和太阳池^[4]、隔膜分层太阳池^[5]、凝体太阳池^[6]都为解决盐扩散的问题而提出, 但由于各自的缺点而未被广泛采用. Safi^[7]用玻璃小球来研究多孔介质对太阳池稳定性的影

响, 其模拟实验表明玻璃小球的存在可以减缓盐扩散. 本文选用廉价易得的石子和炉渣作为多孔介质, 通过实验研究多孔介质水层对太阳池热盐扩散的影响规律.

1 多孔介质水层热量传递实验研究

1.1 温度分布实验

太阳池向池底土壤的传热主要是靠热传导. 一般太阳池的底部为下对流层(LCZ), 由于盐梯度小而存在对流运动, 根据传热的基本原理, 贴近池底通常存在一以导热为主的薄水层. 太阳池的下对流层温度较高, 其一部分热量通过非对流层向上传出水面, 另有部分热量通过以导热为主的薄水层向下传入池底的土壤. 为了研究在太阳池内底面上铺设多孔介质, 形成多孔介质水层对太阳池向池底传热的影响, 本文设计制造了如图1所示的模拟实验装置. 实验过程中, 容器内充满水, 在底层增设多孔介质, 形成多孔介质水层(对比实验则没有多孔介质), 热量由顶部加热板以恒定功率供给, 容器内壁用30 mm厚的挤塑板保温, 以防止热量沿容器壁向下传递. 另外在容器底部用冷却水带走向下传递的热量, 以加快热量向

收稿日期: 2007-11-09; 修回日期: 2009-12-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50676016).

作者简介: 孙文策(1946-), 男, 教授, 博士生导师; 史玉凤*(1982-), 女, 博士生, E-mail: shiyufeng11@163.com.

下传递的速度. 实验过程中冷却水的流速很慢且控制为恒定. 多孔介质层分别是海边的石子和工业废物炉渣. 在实验容器的不同深度安置 T 型热电偶, 测量不同时间不同深度的温度, 尽量保证热电偶测点不与多孔介质相接触, 使热电偶测量的是多孔介质水层中水的温度. 实验时间均为从早 8:00 到晚 8:00, 并保持室温为 17 °C.

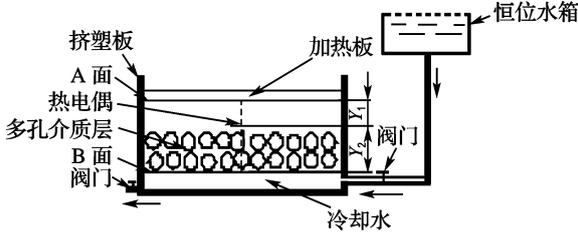


图 1 温度分布实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental facility for the temperature distribution

多孔介质为炉渣的对比实验如下: 无炉渣层时水深为 115 mm, 有炉渣层时水深为 135 mm, 两个实验用水量相等. 任意位置距 A 面的距离记为 Y_1 , 距 B 面的距离记为 Y_2 . 炉渣表面距加热板, 即距 A 面的距离 (Y_1) 为 72 mm; 炉渣厚度, 即炉渣表面距 B 面的距离 (Y_2) 为 63 mm.

有炉渣层和无炉渣层情况下不同时间、不同位置水的温度 T 随时间 t 和距离 x 的分布如图 2、3 所示. 图 2 以底部为基准, 即以 B 面为原点, 垂直向上为正方向; 图 3 以加热板底面为基准, 即以 A 面为原点, 垂直向下为正方向.

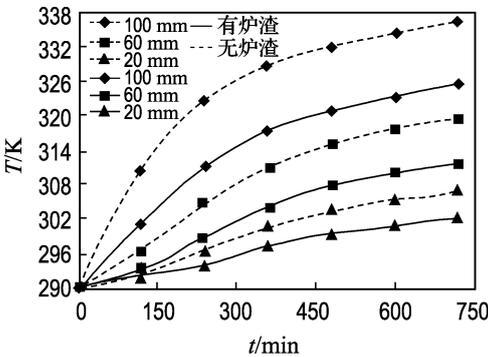


图 2 有炉渣层和无炉渣层情况下水的温度分布(以底部为基准)

Fig. 2 Temperature distribution of water with and without slag layer based on the bottom

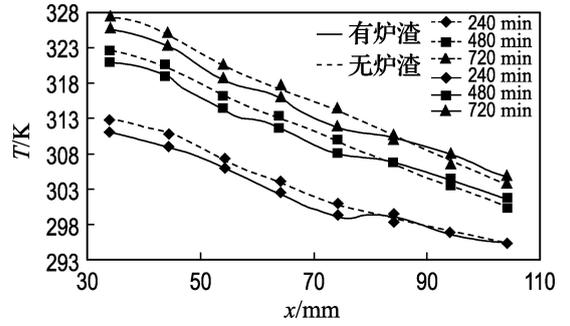


图 3 有炉渣层和无炉渣层情况下水的温度分布(以加热板底面为基准)

Fig. 3 Temperature distribution of water with and without slag layer based on heating plate bottom

图 2、3 中虚线代表无炉渣的情况, 实线代表有炉渣的情况. 由图 2 可知 Y_2 相同时有炉渣的温度明显低于无炉渣的. 如果在真正的太阳池底层投加多孔介质炉渣, 就可以使太阳池底层接近土壤部分的温度比不投加炉渣时的温度低, 减少其向池底土壤传递的热量.

由图 3 可见距离加热板较近处(即 Y_1 较小时)无炉渣层的温度较有炉渣层的温度高, 但是进入炉渣层一定深度后(即 Y_1 较大时)有炉渣层的温度就比无炉渣层的温度高. 这表明炉渣水层的隔热保温作用比纯水的好.

多孔介质为石子的实验结果与多孔介质为炉渣的结果类似. 图 4 为多孔介质为石子和炉渣情况下多孔介质层内的温度 T 随时间 t 的变化.

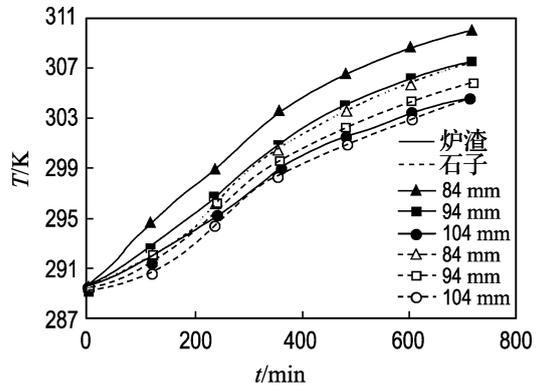


图 4 有石子层和有炉渣层水的温度比较

Fig. 4 Temperature comparison of water with slag layer and with cobble layer

图 4 与图 3 相同, 也以加热板底面为基准, 即

以 A 面为原点,垂直向下为正方向.多孔介质为石子时,热电偶与加热板底面的距离超过 79 mm 后进入石子水层;多孔介质为炉渣时,热电偶与加热板底面的距离超过 72 mm 后进入炉渣水层,即图 4 中的 6 条曲线均为多孔介质水层内的温度曲线.实线表示多孔介质为炉渣的情况,虚线表示多孔介质为石子的情况.两次实验中水的初始温度和周围环境状态都相同.从图中可以发现多孔介质为炉渣时的温度比多孔介质为石子时的高,说明炉渣水层的隔热保温效果比石子水层的好,炉渣和水的混合物的热扩散率比石子和水的小.

炉渣在向太阳池中投加之前应该进行适当的清洗.实验证明不管先将炉渣置于池底再加入浓盐水,还是先加入浓盐水再向水中投加炉渣,炉渣都不会漂起来,而且炉渣的加入也不会引起池水浊度的增加.

测量进出口冷却水的温度和流量,就可以计算出冷却水带走的热量.有炉渣层和无炉渣层冷却水带走的热流量 q 随时间 t 的变化如图 5 所示.

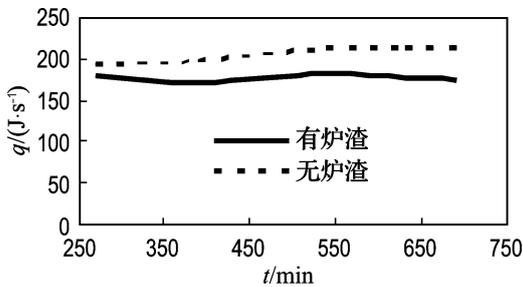


图 5 有炉渣层和无炉渣层冷却水带走热量的比较

Fig. 5 Comparison of heat carried away by cooling water with and without slag layer

由图 5 可见有炉渣层冷却水带走的热量比无炉渣层冷却水带走的热量小得多,说明炉渣层的存在起到了一定的隔热保温作用.由图 2 知有炉渣层时池底的温度低于无炉渣时池底的温度,而下面冷却水的温度基本保持不变,有炉渣层的传热温差小于无炉渣层的传热温差,所以有炉渣层的传热量小于无炉渣层的.

1.2 多孔介质水层导热系数的测量

导热系数是材料导热能力的标志.现有的导热系数测量仪^[8]都不能测量本文多孔介质水层的

导热系数.为此本文根据半无限大物体导热原理设计了如下实验装置,近似测量了多孔介质水层的热扩散率和导热系数.实验装置示意图如图 6 所示.水槽和托盘的面积较大,测点距加热托盘的底面较近,实验中要保持托盘与多孔介质水层相接触.

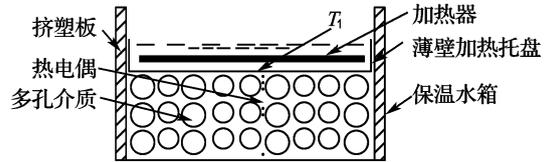


图 6 导热系数实验装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of experimental facility for the thermal conductivity

实验开始时向带有加热器的托盘中倒入沸腾的水,同时加热器开始工作以保持托盘中的水一直沸腾,从而使托盘上表面温度 T_1 维持恒定.半无限大物体的不稳定导热公式如下:

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_i}{T_1 - T_i} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) \quad (1)$$

式中: θ 为过余温度; θ_i 为初始时刻的过余温度; T 为半无限大物体任一点不同时刻的温度; T_i 为半无限大物体的初始温度; T_1 为恒温热源的温度; x 为距恒温热源面的距离; a 为热扩散率; τ 为加热时间.把加热托盘向多孔介质内的传热过程在一段时间和一段距离内近似看成是半无限大物体的不稳定导热计算.已知测点到薄壁托盘下表面的距离、测量测点的温度和记录加热时间就可以计算出多孔介质的热扩散率.在测量多孔介质水层的参数之前先测量纯水的参数来校核实验系统.本实验中加热托盘的底面积为 0.15 m^2 ,托盘壁厚为 0.6 mm ,测点到加热托盘底面的距离为 $20 \sim 33 \text{ mm}$,加热时间为 $800 \sim 1\,300 \text{ s}$.纯水热扩散率的测量值与参考文献值的误差均小于 5% ,说明该系统可以用来近似测量多孔介质水层的热扩散率.

利用该系统测量多孔介质水层的热扩散率,得炉渣水层的热扩散率为 $17.02 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$,石子水层的热扩散率为 $34.75 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$,而纯水的(查参考文献)热扩散率为 $14.3 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

热扩散率与导热系数之间有如下关系:

$$a = \lambda / \rho c \quad (2)$$

式中: λ 为导热系数; a 为热扩散率; ρ 为密度; c 为比热容.石子水层以及炉渣水层的平均密度均由实验测得,其比热容由下式计算:

$$c = \frac{c_1 \times m_1 + c_2 \times m_2}{m_1 + m_2} \quad (3)$$

式中: c 为混合物的比热容; c_1 、 m_1 为组分一的比热容和质量; c_2 、 m_2 为组分二的比热容和质量.利用上式计算得石子水层和炉渣水层的导热系数分别为 $1.06 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $0.551 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.而纯水的导热系数为 $0.599 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.炉渣水层的导热系数比纯水的导热系数小,说明炉渣水层起到了比纯水更有效的隔热保温作用.虽然石子水层的导热系数比纯水的导热系数大,但是也能起到一定的隔热保温作用,因石子的加入导致整体热阻的增加.

2 多孔介质水层对盐扩散影响的实验

本文进行了底部有多孔介质层和无多孔介质层的盐扩散的对比实验研究.在实验容器中模拟真正太阳池灌注3层不同盐度的水.顶层为淡水,22 mm厚,盐度为0;中间是盐度为11.3%的盐水,44 mm厚;底层是盐度为25%的浓盐水.进行多孔介质实验时,加入多孔介质后,多孔介质层表面与底层浓盐水液面齐平.由于各种多孔介质的孔隙率不同,底层高度不同.实际太阳池中多孔介质层只能占底部浓盐水层的一部分,本实验初始让各种多孔介质层表面与底层浓盐水液面齐平是为了更容易区别不同多孔介质对盐分向上扩散速度的影响.上述盐水静置一段时间,测量不同深度的盐度.实验容器表面密封,以避免蒸发使表面盐度增大.盐度测量仪器为WZ-212ATC型手持式折射仪.取样装置为普通医用注射器下接吸管,把吸管底部密封,在底部偏上2 mm处开一圈小孔,以使取得水样在同一水平面上.

2.1 不同材质多孔介质的情况

本实验中使用的多孔介质有海边的石子(平均直径25 mm、孔隙率40.7%)、工业废物炉渣(平均直径25 mm、孔隙率64.3%)、陶瓷球(外形球形、直径10 mm、孔隙率56.7%).

不同材质的多孔介质底层高度如下:含石子

177 mm,含炉渣112 mm,含陶瓷球127 mm,没有多孔介质72 mm,4种情况的浓盐水量相等.

以水面为原点,垂直向下为正方向,有陶瓷球与无陶瓷球在22、56和126 mm处的盐度 S 随时间 t 的变化如图7所示.

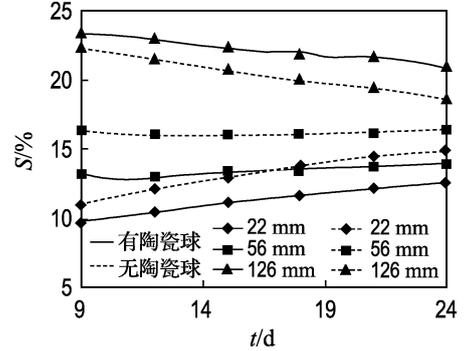


图7 有陶瓷球与无陶瓷球情况下的盐度变化

Fig. 7 Salinity variety of water with and without ceramic balls

图7中虚线表示无陶瓷球的情况,实线表示有陶瓷球的情况.从图7可以看出随着静置时间的加长有无陶瓷球的盐度都是趋于均匀化的,但是无陶瓷球的较有陶瓷球的盐度趋于均匀化的速度更快.多孔介质为石子和炉渣时,盐度变化也类似.

以水面为原点,垂直向下为正方向,有多孔介质和无多孔介质经过27 d后,在同一时间不同深度 x 情况下盐度 S 分布如图8所示.

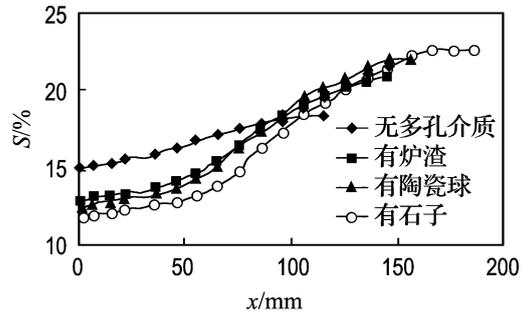


图8 静置27 d后有多孔介质和无多孔介质的盐度分布

Fig. 8 Salinity distribution of water with and without porous media after stewing 27 d

由图8可以看出水面以下66 mm厚范围内盐度都有不同程度的增加,其中无多孔介质(只

有水)的盐度增加得最多,说明盐分向上扩散最快;有炉渣的次之;有石子的增加得最少,说明盐分向上扩散最慢.实验结果表明以上 3 种多孔介质都有效地抑制了盐分向上的扩散,其中,石子最佳,陶瓷球次之,即孔隙率越小,多孔介质越厚,抑制盐扩散的效果越好.一般太阳池都是从下对流层的下部补充盐分的,当盐分从多孔介质下部补充时,由于多孔介质抑制了盐分向上扩散,节省了盐分的消耗.

经计算得出各层的平均盐梯度如表 1 所示.

表 1 不同多孔介质情况下各层的盐梯度

Tab. 1 Salt-gradient of layers with different porous media %/mm

范围	只有水	有炉渣	有陶瓷球	有石子
顶层	0.025	0.025	0.025	0.020
中间层	0.036	0.048	0.050	0.040
底层	0.026	0.070	0.085	0.087

由上表可以看出在中间层和底层有多孔介质情况下的盐梯度都明显大于无多孔介质情况下的盐梯度,说明施加多孔介质层可以抑制盐分的扩散,有利于中间层保持足够大的盐梯度.

2.2 相同材质不同粒度多孔介质的情况

本实验中使用的多孔介质有大粒径陶瓷球(直径 10 mm,孔隙率 56.7%)和小粒径陶瓷球(直径 5 mm,孔隙率 53.7%).不同多孔介质底层高度如下:含大粒径陶瓷球 51 mm,含小粒径陶瓷球 54 mm,无多孔介质 29 mm.两种陶瓷球的孔隙率相差不大.

以水面为原点,垂直向下为正方向,多孔介质材料相同、粒径不同情况下同一时间不同深度 x 处的盐浓度 S 分布如图 9 所示.

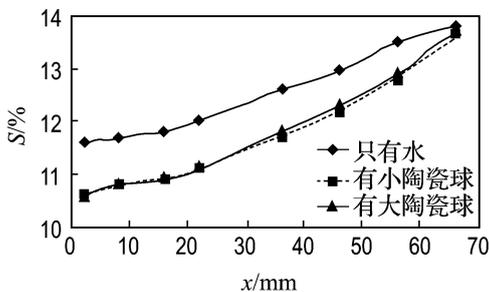


图 9 静置 15 d 后不同深度盐度分布

Fig. 9 Salinity distribution of water in different depths after stewing 15 d

从图 9 可以看出多孔介质层明显地抑制了盐扩散;也可以看出孔隙率较小的陶瓷球抑制盐扩散的效果较好,但两条曲线很接近.两种多孔介质颗粒大小相差悬殊,孔隙率相差不大,而盐度曲线相接近,说明颗粒度对盐扩散的影响较小.另外用海边的大石子(平均直径 25 mm,孔隙率 40.7%)和小石子(平均直径 10 mm,孔隙率 38%)所做的上述实验得出的规律相同.

3 有多孔介质层的太阳池传热传质特点

太阳池增加多孔介质层以后,传统的 3 层模型^[9](上对流层、非对流层和下对流层)已不再适用,应该用增加了多孔介质层的 4 层模型(上对流层、非对流层、下对流层和非对流多孔介质层)来代替原来的模型.

太阳池内非对流层的传热过程可以看做一维、非定常、有内热源的导热问题,传热方程如下:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = q + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4)$$

式中: q 是单位时间单位体积产生的热量,当太阳池底层有多孔介质层时,在多孔介质层中 q 的值为零; λ 是多孔介质水层的导热系数; z 为太阳池池深.

太阳池内的传质方程^[10] 可表示为

$$\frac{\partial c_s}{\partial \tau} = -\nabla \cdot \mathbf{J} = -\nabla \cdot (\mathbf{v} c_s - D \nabla c_s) \quad (5)$$

式中: \mathbf{J} 是质量流量; \mathbf{v} 是速率; c_s 是溶液浓度; D 是扩散系数.在多孔介质层内,当有浓盐水加入时,速度 \mathbf{v} 与浓盐水的喷入速度和多孔介质的几何特性有关,根据具体情况可以得出其表达式.在没有浓盐水加入时,速度 \mathbf{v} 为零,液体密度变化仅取决于分子扩散.由于多孔介质表面的吸附作用阻碍了盐的扩散,有多孔介质层的太阳池内盐的浓度变化较慢.在多孔介质中的传质过程比较复杂,扩散系数 D 目前只能用实验和经验公式确定.

4 结 论

(1) 多孔介质水层可以削弱热量向池下土壤的传递;炉渣水层的导热系数比纯水的导热系数更小,可以起到很好的隔热保温作用.

(2) 多孔介质水层对盐扩散有抑制作用,延长了盐分扩散均匀的时间. 在太阳池内增加多孔介质层可以降低太阳池的耗盐量,减少太阳池的运行成本.

(3) 多孔介质颗粒大小对盐扩散影响不大,多孔介质的孔隙率对盐扩散有重要影响;从抑制盐扩散的角度看,石子水层比炉渣水层效果更好.

(4) 太阳池增加多孔介质层以后,传统的3层模型已不再适用,代之应为增加了多孔介质层的4层模型.

参考文献:

[1] 马文麒,李申生. 太阳池和池下土壤的跨季度蓄热[J]. 太阳能学报, 1984, **5**(4):358-367

[2] 李申生. 我国太阳池的研究与应用[J]. 太阳能, 1995(4):14-15

[3] ANGELI C, LEONARDI E, MACIOCCO L. A computational study of salt diffusion and heat extraction in solar pond plants [J]. *Solar Energy*, 2006, **80**(11):1498-1508

[4] MEHTA G D. Performance of present-day ion-exchange membranes for power generation using a saturated solar pond [J]. *Journal of Membrane Science*, 1982, **11**(1):107-120

[5] HULL J R. Membrane stratified solar ponds [J]. *Solar Energy*, 1980, **25**(4):317-325

[6] WILKINS E S, LEE T K. Development of the gel pond technology [J]. *Solar Energy*, 1987, **39**(1):33-51

[7] SAFI M J. Using porous media to improve solar pond stability [C] // *Solar World Congress*. Orlando: ISES, 2005

[8] 付海明,张吉光. 实验技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007:119-126

[9] 李申生. 全饱和型太阳池的热稳定性条件[J]. 太阳能学报,1995, **16**(4):333-339

[10] ANGELI C, LEONARDI E. A one-dimensional numerical study of the salt diffusion in a salinity-gradient solar pond [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, **47**(1):1-10

Experimental research on effect of thermal and salt diffusion by installing porous media in solar pond

SUN Wen-ce, SHI Yu-feng*, LI Nan, BU Yi-fan

(School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The effect of adding porous media layer with water at the bottom of solar pond on the heat-salt diffusion, heat transfer character and temperature distribution of solar pond is researched. Experimental results show that the porous media layer with water can act as heat insulator and preserver. The thermal conductivity and thermal diffusivity of cobble layer with water and slag layer with water are measured, through which the experiment indicates that the thermal insulation performance of slag layer with water is better than that of water. Salt diffusion law with or without porous media layer or with porous media of different materials is discovered. The results show that porous media restrains salt diffusion obviously and is beneficial to keeping salt-gradient.

Key words: porous media; solar pond; heat diffusion; salt diffusion