文章编号：1000-8608(2013)05-0647-06

强化太阳池热性能实验研究

吴 丹， 刘宏升*， 孙文策

（大连理工大学 能源与动力学院，辽宁 大连 116024）

摘要：建立了两个表面尺寸2.4 m×2.4 m、深1.2 m结构相同的小型盐水太阳池，通过向太阳池底部添加多孔介质、在太阳池表面加透明塑料膜盖，以及将太阳池与太阳能集热器相结合的方法，探索强化太阳池热性能的途径.实验结果表明：多孔介质用于太阳池可以起到降浊、蓄热的双重功效、加透明塑料膜盖可以有效降低太阳池浊度，减少表面散热，并影响下对流层温度分布；辅加太阳能集热器可以明显增加太阳池下对流层温度，但对非对流层和上对流层影响较小.

关键词：太阳池；多孔介质；蓄热；下对流层；太阳集热器

中图分类号：TK512.4 **文献标志码**：A

0 引 言

太阳池是一种盐浓度呈梯度分布的盐水池，通过盐浓度由上而下逐渐增加的方法抑制池中的对流，从而将吸收的太阳辐射热封存在底层，作为热源对外供热.由于太阳池具有不消耗常规能源、无污染等优点，被认为是一种良好的低温热源[1].

近年来，人们在太阳池的太阳辐射投射率、稳定性、提热等热性能方面做了大量的研究工作. Jaefarzadeh[2]建立了小尺度太阳池数学模型，通过实验对比分析了方形太阳池侧墙阴影对太阳辐射热吸收的影响. Dahab 等[3]在实验室内建成了圆柱结构的人工模拟太阳池，研究了太阳池的温度和盐度的变化. Karima 等[4]通过微粒成像技术分析了太阳池的稳定性，提出在底层添加多孔介质来抑制太阳池的不稳定性. Dahab 等[5]通过一维模型预测了太阳池的温度、盐度变化规律，指出在梯度层提热可以增加太阳池的效率. Ramadan 等[6]研究了管束循环和开放式循环两种太阳池提热方式.我国对太阳池的研究始于20世纪80年代，要落后于其他国家，也仅限于基础研究. Li 等[7]从光学和热力学角度分析了太阳池的辐射透射率、温度及热效率.王华等[8]以卤水为池水，研究了考虑浊度及侧壁阴影时的太阳池热特性.孙文策等研究了多孔介质对太阳池热盐扩散的影响[9].

近年来，低温多效蒸发海水淡化装置的发展[10]，使以太阳池作为热源的海水淡化成为可能.但目前实际太阳池并不能完全满足海水淡化对温度的要求[11]，必须对太阳池的热性能加以强化，以提高池水最高温度.在这一背景下，本文在室外搭建了两个总体结构相同，但采取不同热强化方式的盐水太阳池，通过分阶段性对比实验，研究向池底添加多孔介质材料、在太阳池表面加透明塑料膜盖，以及辅助太阳能集热系统3种方式对太阳池温度特性以及浊度的影响，以期为探索强化太阳池热性能的新途径提供借鉴.

1 实验装置与内容

本文实验包括室内实验与室外实验两部分.室内实验主要研究多孔介质材料蓄热性能的差异，以此作为选取多孔材料的参考依据；室外实验研究不同强化措施对提升太阳池性能的影响.

室内蓄热实验在4个1 200 mL烧杯中进行，其中一个烧杯内不加多孔介质，另3个烧杯内分别装入氧化铝小球、锅炉渣和煤质吸附剂3种多孔材料.经预先测量，各多孔介质的孔隙率分别

收稿日期：2012-02-10； **修回日期**：2013-07-15.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(50906007).
作者简介：吴 丹(1978-)，女，博士生；刘宏升*(1978-)，男，博士，副教授，E-mail：lhsh@dlut.edu.cn.

是：锅炉渣0.547 2、自然堆积氧化铝小球0.516 4、煤质吸附剂0.469 3.多孔介质材料总体积为200 mL，平铺在烧杯底部，烧杯采用保温棉包裹，敞口不加盖.温度采用布置在多孔介质材料正中央E型热电偶测量，热电偶与V2000无纸记录仪相连，可每秒读取温度一次.实验中向各烧杯内加入同体积、同温度热水以保证加入热量相同，根据温度变化情况分析各多孔介质材料的蓄热效果.

室外实验在大连建立了两个同样结构的盐水太阳池.在两池搭建、保温、灌注、维护等方面条件完全相同的情况下，进行对比实验.太阳池位于北纬39°55′，东经121°31′，该地气温适宜，太阳辐射充足，具有适于太阳池运行的天气条件，太阳池结构示意图如图1所示.

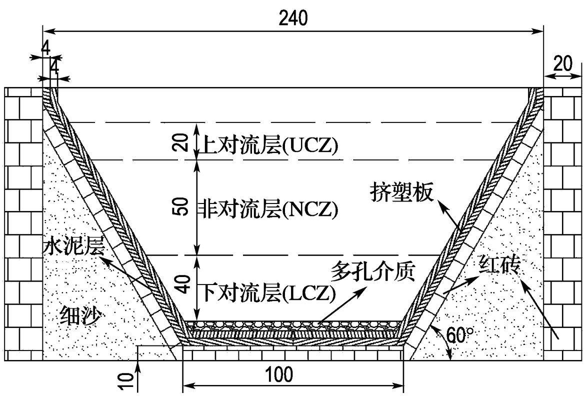

图1 太阳池结构示意图(单位:cm)

Fig.1 Schematic diagram of solar pond (unit:cm)

如图2所示，太阳池外侧墙采用两层红砖中间夹一层3 cm厚挤塑板(压缩苯板)结构，以保证侧墙的承载能力和保温效果，内墙为单层红砖铺成、坡度60°的倾斜面，红砖外面用水泥抹平并做防水处理.为保证良好的蓄热效果，水泥层上面铺两层挤塑板作为保温层，每层挤塑板厚3 cm，用胶带固定.保温层上铺设12 μm厚盐滩专用耐腐蚀黑色塑料，既可防止水池漏水，又可降低壁面反射率，增强太阳池对太阳辐射的吸收.

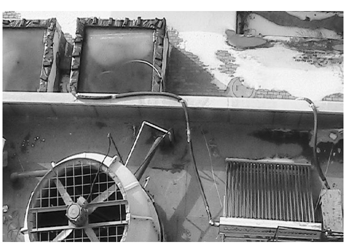

图2 集热器与太阳池联合实验装置图

Fig.2 View of combined experimental device of the solar pond with solar collector

为了进行对比实验，在一水池池底平铺了5 cm厚的多孔介质(锅炉渣).经测量锅炉渣平均直径约为1 cm，其孔隙率约为0.55，体密度约为0.6 g/mL.在另一水池池底铺设管径28 mm的集热器换热管，管外接流量计、阀门，循环泵与集热器水箱的进出口相连.集热器池内的换热管总长度约为34 m，管内为淡水，蓄水量接近15 L.池外换热管路用保温材料包裹以防止散热，且保温层内布置电加热带，可以在冬季为冻结的管道解冻.集热器安装在实验室二楼楼顶平台，由20根真空管构成，管外径47 mm、内径37 mm、长1 200 mm；集热器水箱为内径50 mm钢管，长1.5 m，外包保温材料，因水箱水容量很小，集热器吸收的热量绝大部分通过循环泵进入太阳池下对流层底部.在集热器循环泵工作情况下，可研究集热器对太阳池的影响；当循环泵不工作时，关闭换热管阀门，池内换热管封闭，管内温度与太阳池内温度保持相同，太阳池温度分布规律与无强化措施的普通太阳池基本相同，可作为实验对比太阳池.太阳池表面所加的透明塑料膜盖由木框架支撑，根据实验研究内容需要，分阶段加透明塑料膜盖(加盖)在有集热器的水池上，分析加盖前后池水温度、浊度的变化.

太阳池温度测量仪器是PC-2型太阳辐射记录仪，该记录仪具有太阳总辐射测定通道以及20个温度测定通道，外接传感器，可全天候记录地表太阳总辐射量和测点温度值，显示精度为太阳辐射精度1 W，温度精度0.1 ℃.温度传感器置于方形太阳池中心，竖直方向距底面5、15、30、45、60、75、90、105 cm深处.浊度测量采用WGZ-1型数字式浊度仪，具有20、100 ntu两个量程，显示精度分别为0.1、1 ntu，实验采用引流管提取不同深度的水样进行浊度测量.

太阳池于8月底开始灌注，历时2 d完成.各层采用自来水溶解不同比例的无碘NaCl进行灌注.其中储热层(LCZ)厚40 cm，初始盐度14.6%；NCZ厚度50 cm，自下而上水的盐度从14.2%降低至1%；UCZ厚度20 cm，由淡水灌注.太阳池建成运行一段时间后，周期性向池表面

补入淡水并清理，以维持太阳池内的盐梯度与透明性. 测量实验连续进行了 45 d，此后太阳池继续运行，根据天气情况不定期测量太阳池温度与浊度变化.

2　实验结果

2.1　多孔介质的蓄热效果

图 3 给出加入热量相同的情况下，多孔介质材料对水温的影响. 图中温度曲线越平缓，表明该多孔介质材料的蓄热能力越强. 可以看出蓄热能力由强到弱的顺序是：煤质吸附剂最好，自然堆积氧化铝小球次之，锅炉渣相对弱一些，但三者差别不是很大，温度都高于没有多孔介质时 2 ℃以上. 为了保证充足的预热时间，加入热水时分两次进行，所以图中加热初期出现两次温度突跃，没有多孔介质的烧杯初始温度最高，含煤质吸附剂的温度最低，这说明相同体积下煤质吸附剂的整体热容最大，随热量消耗多孔介质烧杯的最终温度明显低于没有多孔介质的温度，说明采用多孔介质材料，可以达到很好的蓄热效果.

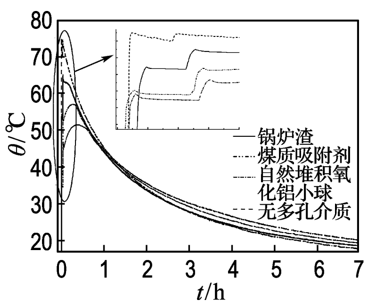

图 3　不同多孔介质的蓄热特性

Fig. 3　The characteristic of heat storage for different PM

2.2　环境温度与太阳辐射

图 4 给出了太阳池所在位置日平均环境温度与太阳辐射之间的关系，太阳辐射对环境温度有很大的影响，除了个别特殊天气，从整体来看太阳辐射透射量由 480 W/m^2 降到 230 W/m^2 左右，呈下降趋势，环境温度也随之由 27 ℃降至 15 ℃左右，这主要由于测量时间为秋季，北半球太阳辐射透射量日渐减少、气温下降所致.

2.3　多孔介质材料对太阳池性能的综合影响

考虑到太阳池的经济性，实验采用蓄热效果较弱但价格最低的锅炉渣作为多孔介质材料，锅炉渣铺设在太阳池底部，厚度为 5 cm. 图 5、6 给出了添加多孔介质对太阳池温度、浊度的影响，其中角标 npm 表示没有多孔介质；pm 表示有多孔介质；数字代表时间，单位 d.

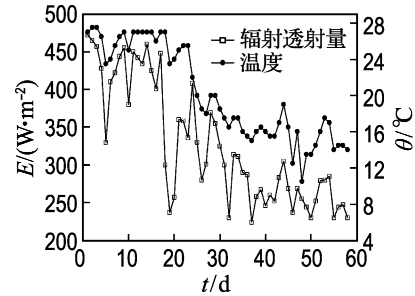

图 4　环境温度与太阳辐射

Fig. 4　The ambient temperatures and solar radiation

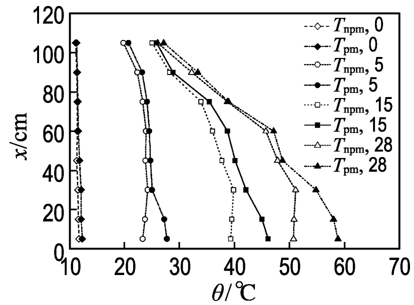

图 5　多孔介质对太阳池温度的影响

Fig. 5　The influence of PM on the temperature of solar pond

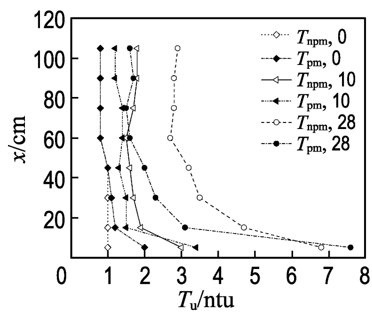

图 6　多孔介质对太阳池浊度的影响

Fig. 6　The influence of PM on the turbidity of solar pond

图 5 给出多孔介质对太阳池温度的影响，其中横坐标为温度，纵坐标为太阳池垂直高度，池水温度为每日最高温度（下午 14 时左右测量）. 如图所示，两池灌注时的初始温度基本相同，在水池灌注完成后的一个月内，随时间增加池水温度明显升高. 由图 5 可以看出，池底铺设多孔介质的太阳

池温度要更高一些，尤其在下对流层(LCZ)温差更明显，最大温差接近8 ℃左右，而两池非对流层(NCZ)和上对流层(UCZ)的温度比较接近，温差仅在1～3 ℃，说明多孔介质的蓄热效果主要体现在下对流层. 对于没有多孔介质的水池，LCZ温度随高度增加略有提高，全池的最高温度出现在LCZ与非对流层的交界处附近，而有多孔介质的水池最高温度出现在底层，即在LCZ内温度随高度增加略有下降，这是由于LCZ内的池水盐度基本相同，多孔介质对蓄热的影响与水的热对流同时存在，多孔介质使热量集中在池底所致，这也表明对有多孔介质的太阳池而言，最佳的提热位置在LCZ的下半部. 根据室内实验结果分析，如果改用蓄热效果更好的多孔介质材料，太阳池温度会得到进一步提升.

图6给出多孔介质对太阳池浊度的影响. 图中列出了自太阳池完成灌注当天及此后第10、28 d池内温度分布情况. 由图6可知，在太阳池运行初期的一个月内，浊度随时间略有增加，但两池各层浊度都比较低(小于8 ntu)，浊度的分布规律是池底浊度最大，随高度增加浊度逐渐降低，LCZ的浊度变化较明显，NCZ与UCZ的浊度相对均匀且较低，说明进入池中的灰尘经沉淀主要集中在池底部. 加入多孔介质之后，池底附近浊度有所增加，但随高度增大有多孔介质水池的浊度急剧降低，池内的平均浊度也更低一些，这是由于多孔介质的吸附作用有利于池内灰尘的沉淀，使其绝大部分沉淀在池底，导致池底浊度增大、池内浊度降低. 这说明多孔介质的吸附性虽然增大了池底浊度，但能有效降低池内浊度，保持池水的透明性.

2.4 加盖对太阳池性能的综合影响

加盖实验在太阳池运行36 d时进行，此阶段池水温度已趋于稳定，在没有特殊天气状况下，温度基本没有变化，这利于进行对比实验研究. 为了避免加盖和多孔介质对池水的影响发生干扰，实验仅对没有多孔介质的水池加盖，加盖8 d后，与加盖前温度、浊度对比，其中角标nc表示不加盖太阳池；c表示加盖太阳池；数字代表时间，单位d.

图7给出加盖对太阳池温度的影响，图中列出了自太阳池运行后第10、28、36 d以及加盖运行8 d(第44 d)后池内温度分布情况. 由图可知，太阳池运行至28 d前后温度逐渐趋于稳定，第36 d与28 d的温度分布基本相同，说明太阳池基本达到热量平衡，进入相对稳定运行阶段. 自第36 d起，对太阳池连续加盖8 d，取第44 d温度与加盖前温度对比，发现加盖太阳池的整体温度要明显高于不加盖太阳池，说明加盖能有效减少表面的对流换热，对太阳池起到很好的保温作用. 如图7所示，不加盖的太阳池LCZ温度分布较均匀，温度由下至上略有增加，池内其他两层温度随高度增加单调降低，最低温度出现在UCZ接近自由液面处；而对加盖太阳池，可明显看出LCZ内的温度梯度较大，LCZ温度随高度升高显著增大，最高温度出现在LCZ顶部，这是由于加盖抑制了环境对太阳池的影响，LCZ内的自然对流相对明显，在相同盐度下高温盐水向上扩散，这一结果表明如果对加盖太阳池进行提热，其最佳提热位置在LCZ上半部. 由图7可以看出加盖后UCZ温度随高度增加而增大，全池最低温度出现在UCZ底部，这是因为太阳池加盖以后，在薄膜盖与自由液面之间有约10 cm的空间，形成了一个微型的温室，这一空间的温度要高于UCZ温度，致使自由液面温度升高，UCZ的温度随高度增大而升高. 实验中发现塑料薄膜内表面上出现大量池水蒸发、凝结后产生的液滴，在清晨尤为明显，这证明利用太阳池是可以实现盐水的蒸发、冷凝产生淡水的.

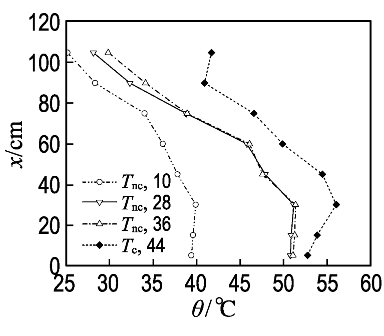

图7 加盖对太阳池温度的影响

Fig. 7 The influence of covering on the temperature of solar pond

图8给出了加盖前后太阳池浊度变化的对比情况. 由图可知，在不加盖情况下太阳池浊度从第10 d到第28 d仅是略有增加，而太阳池运行约一个月开始，池底浊度由原来的7 ntu左右增至20

ntu 左右，池水表面的浊度因表面浮灰也有所增大，池内浊度明显增大，并呈整体增长态势. 这主要是因为随天气逐渐进入秋季，风沙天增多，导致太阳池浊度急剧增大，在此情况下于第 36 d 对太阳池做加盖处理，连续加盖 8 d 后测量池水浊度并与加盖前浊度对比. 如图 8 所示，对比发现加盖以后，太阳池浊度不仅没有继续增大反而明显降低，虽然池底的浊度有所增加，但池内各层的浊度要低于加盖前，而且从池底到自由液面，浊度呈单调下降趋势，表明自由液面并没有灰尘漂浮，已完全沉淀到池底. 这说明加盖太阳池整体浊度低，且不受自然天气的影响，对于长期运行的太阳池而言，加盖是非常有必要的.

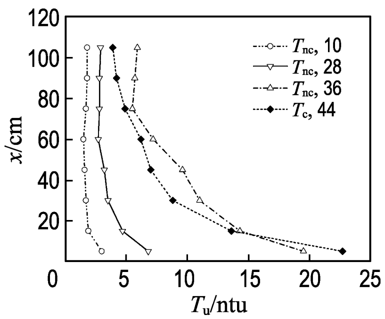

图 8　加盖对太阳池浊度的影响

Fig. 8　The influence of covering on the turbidity of solar pond

2.5　太阳能集热器对太阳池热性能的影响

图 9 给出加入集热器前后太阳池最高温度对比情况，加入集热器的实验在太阳池运行 50 d 左右时进行，集热器对太阳池温度的影响主要体现在 LCZ，加集热器后太阳池最高温度出现在池底，池底温度升高约 8 ℃，而集热器对 NCZ 和 UCZ 的温度几乎没有影响，理论分析可知该温升程度与集热器面积有关，如果想通过集热器提高太阳池的整体温度需要增大集热管面积. 此外，实验中集热器内的温度在循环之前为 93 ℃，随循环进行集热器换热管回流的温度急剧降到与太阳池底部的温度基本相同(约 56 ℃)；在达到温度平衡后，随时间增长温度整体略有升高，但升高幅度不大，表明集热器吸收的热量绝大部分用来向太阳池底部供热，达到温度平衡. 从热量平衡的角度分析，如果集热器的集热面积增加，集热效果会更好，太阳池升温幅度会更大，若想达到最佳效果，集热器面积与太阳池尺寸之间有一个最优的组合方式，这与太阳池的容积与初温、真空管的尺寸、太阳辐射强度等参数有关，可以通过热量平衡加以估算，本文不做详细分析.

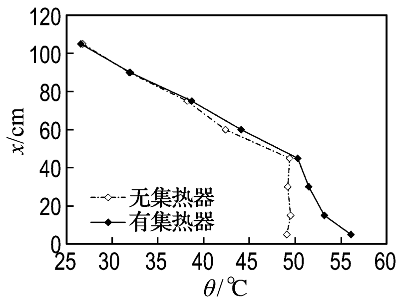

图 9　加太阳能集热器前后太阳池温度对比

Fig. 9　Temperatures comparison of solar pond with or without solar collector

需要说明的是本实验为了更明确地区分多孔介质蓄热作用与集热器加热作用的各自特性，在两个太阳池内各采用一种方式，并没有进行这两种强化方式同时作用下太阳池温度测量，但从独立实验结果分析，对于本实验中的太阳池结构及集热器面积而言，在两者同时作用下，太阳池 LCZ 温度升高幅度预计在 15 ℃左右.

3　结　论

在孔隙率接近的情况下，煤质吸附剂的蓄热效果最好，锅炉渣和氧化铝小球较弱；将多孔介质材料添加到太阳池池底，既可以增加 LCZ 的蓄热能力，同时也可以改善池水浊度，这种影响在 LCZ 体现得更突出；池表面增设透明塑料薄膜盖可以起到减少热量损失、提升太阳池温度并降低池水浊度的作用，但加盖后太阳池内最高温度出现在 LCZ 的上半部，最低温度出现在 UCZ 的底部；太阳能集热器与太阳池相结合，相当于在太阳池底部增设了一个热源，可提高太阳池 LCZ 的温度，但对其他两层的影响很小；对于加盖太阳池而言，提热的最佳位置在 LCZ 的上半部，而对于底部铺设多孔介质或太阳能集热管的太阳池而言，池内最高温度出现在池底附近，提热的最佳位置在 LCZ 的下半部.

参考文献：

[1]　Velmurugana V，Srithar K. Prospects and scopes of solar pond：A detailed review [J]. **Renewable and**

Sustainable Energy Reviews, 2008, **12**(3): 2253-2263.

[2] Jaefarzadeh M R. Thermal behavior of a small salinity-gradient solar pond with wall shading effect [J]. **Solar Energy**, 2004, **77**(5):281-290.

[3] Dahab M M O, Ouni M, Guizani A, *et al*. Study of temperature and salinity profiles development of solar pond in laboratory [J]. **Desalination**, 2005, **183**(3):179-185.

[4] Karima C, Slima Z, Kais C, *et al*. Experimental study of the salt gradient solar pond stability [J]. **Solar Energy**, 2010, **84**(1):24-31.

[5] Dahab 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**(2):3005-3010.

[6] Ramadan M R I, Sebaii A, Enein S, *et al*. Experimental testing of a shallow solar pond with continuous heat extraction [J]. **Energy and Buildings**, 2004, **36**(3):955-964.

[7] LI Nan, YIN Fang, SUN Wen-ce. Turbidity study of solar ponds utilizing seawater as salt source [J]. **Solar Energy**, 2010, **84**(2):289-295.

[8] 王 华,孙文策,潘洪坤. 小型海水太阳池实验及考虑浊度的温度分布模拟[J]. 大连理工大学学报, 2008, **48**(6):804-809.
WANG Hua, SUN Wen-ce, PAN Hong-kun. Experiment in a small seawater solar pond and simulation of numerical temperature distribution considering turbidity [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2008, **48**(6):804-809. (in Chinese)

[9] 孙文策,史玉凤,李 楠,等. 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, LI Nan, *et al*. 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. (in Chinese)

[10] 郝冬青,沙作良,王彦飞,等. 低温多效海水淡化系统的 Aspen Plus 模拟[J]. 天津科技大学学报, 2011, **26**(1):47-50.
HAO Dong-qing, SHA Zuo-liang, WANG Yan-fei, *et al*. Simulation of low temperature multi-effect distillation seawater desalination with Aspen Plus [J]. **Journal of Tianjin University of Science & Technology**, 2011, **26**(1):47-50. (in Chinese)

[11] 缪仁杰,谭永璐,李淑兰,等. 太阳池热能利用技术[J]. 可再生能源, 2008, **26**(2):6-9.
MIAO Ren-jie, TAN Yong-lu, LI Shu-lan, *et al*. Thermal energy using technology of solar pond [J]. **Renewable Energy Resources**, 2008, **26**(2):6-9. (in Chinese)

Experimental study of thermal characteristics for enhanced solar pond

WU Dan, LIU Hong-sheng*, SUN Wen-ce

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

Abstract: Two mini-solar ponds with surface dimensions of 2.4 m×2.4 m and depth of 1.2 m were constructed. Several methods are experimentally investigated with the aim of enhancing the thermal characteristics of solar ponds, which include putting porous medium to the bottom of the solar pond, covering the solar pond with a transparent plastic film, and combining solar collector with the solar pond. The experimental results show that the porous medium can save heat and reduce turbidity of solar pond, covering of plastic film can reduce turbidity and surface heat loss, and affect the temperature distribution of the lower convective zone, the introduction of solar collector enhances the temperature of the lower convective zone greatly, but has little effect on non-convective zone and upper convective zone.

Key words: solar pond; porous medium; heat storage; lower convective zone; solar collector