

# 浊盐水自由沉降与太阳池降浊增效实验研究

刘宏升\*, 吴丹, 姜霖松, 孙文策

(大连理工大学海洋能源利用与节能教育部重点实验室, 辽宁大连 116024)

**摘要:** 通过实验室内浊盐水自由沉降实验分析不同盐度、工质及温度下的浊度变化规律, 提出采用多孔介质吸附剂进行物理降浊的方法, 讨论了4种多孔介质材料的降浊效果; 建立2个表面积为 $2.4\text{ m} \times 2.4\text{ m}$ 、深 $1.2\text{ m}$ 的小型盐水太阳池, 进行了添加多孔介质的浊度对比实验; 通过对实验数据的非线性拟合构建了太阳辐射透射率混合回归模型. 结果表明: 盐水浊度去除率比卤水高10%左右; 盐度从0.2%增至20%时, 盐水浊度去除率降低了8%; 加入不同多孔介质后, 灰尘颗粒自由沉降速度加快, 浊度去除率可升高3%~13%; 在太阳池内添加多孔介质可有效降低池水浊度, 增加池内的太阳辐射透射率.

**关键词:** 太阳池; 浊度; 多孔介质; 辐射透射率

**中图分类号:** TK513.5      **文献标识码:** A      **doi:** 10.7511/dllgxb201403004

## 0 引言

太阳池是一种兼具集热、蓄热双重功能的太阳能低温热利用系统, 可利用水池内的盐浓度梯度, 将吸收的太阳热能储存在下对流层的盐水中, 具有不消耗常规能源、无污染等优点<sup>[1]</sup>.

多年来, 关于太阳池的研究涉及太阳辐射透射率、太阳池的稳定性、提热等热性能多个方面<sup>[2-4]</sup>. 大量研究表明, 浊度是影响太阳池性能的重要因素. Wang等<sup>[5]</sup>通过实验研究首次提出浊度是影响太阳辐射透射热流的重要因素, 建立了考虑浊度的太阳池辐射透射模型, 成为太阳池研究的一个重要里程碑. 随后其在此模型基础上, 将太阳池底部视为黑体, 对太阳池热性能进行了分析<sup>[6]</sup>. Husain等<sup>[7]</sup>在同时考虑池底反射率和浊度的情况下, 建立了太阳池辐射透射模型和热效率模型, 证明浊度的增大导致太阳池热性能下降. 由于太阳池在运行中也存在着藻类的繁衍和灰尘、碎屑的积累会降低池水透明度而影响池效率, 为了克服这些不利因素, 国内外学者相继展开了对太阳池降浊增效的研究<sup>[8-10]</sup>. 降浊的主要方法包括在太阳池灌注的初期使用明矾、无机高分子混凝剂聚合氯化铝(PAC)等进行降浊<sup>[8]</sup>, 化学降浊

与生物降浊相结合<sup>[9]</sup>, 使用新型化学药剂控制池内藻类与微生物降浊<sup>[10]</sup>等.

国内在太阳池浊度方面的研究相对较少, 主要是针对浊度对太阳池性能影响的研究. 王华等<sup>[11]</sup>以卤水和溶解粗盐的海水为工质, 进行了小型太阳池实验研究. 李楠等<sup>[12]</sup>模拟了不同浊度分布状况下太阳池储热层的温度及各层的热效率. 黄丽萍等<sup>[13]</sup>提出采用淀粉改性聚合铝盐絮凝剂(POA)降低太阳池卤水浊度的方法. 王禄等<sup>[14]</sup>采用化学、物理方法分别对盐田废弃卤水进行净化.

本文针对太阳池降浊问题, 进行一系列浊盐水中灰尘自由沉降机理性实验, 提出在太阳池中加入多孔介质(PM)吸附剂进行物理吸附降浊的方法, 分析几种常用PM材料对浊度变化的影响; 在中试基础上, 进行PM材料在太阳池中的降浊对比实验; 此外用实验方法确定浊度与太阳辐射透射率之间的关系, 并通过数据拟合建立小型盐水太阳池的太阳辐射透射率混合回归模型.

## 1 浊盐水自由沉降实验

本文实验中浊度测量采用WGZ-1型数字式浊度仪, 该浊度仪具有20 ntu和100 ntu两个量

程,显示精度分别为 0.1 ntu 和 1 ntu.

### 1.1 不同盐度下的自由沉降实验

取 4 个容积为 5 000 mL 的烧杯,在相同的室温下灌注盐度分别为 0.2% (淡水)、5.0%、15.0%、20.0%,高度为 25 cm 的 NaCl 溶液,4 种试剂的浊度都调整约为 50 ntu,将 4 种水样静置观察,并定时从淹深 8 cm 位置抽取水样、测量浊度值,分析浊度随时间的变化规律.

### 1.2 不同工质下的自由沉降实验

取 3 个容积为 5 000 mL 的烧杯,在相同的室温下分别灌注盐度为 15% 的 NaCl 水溶液、经降盐降浊处理的卤水(盐度 15%,浊度 5 ntu)、未处理的老卤水(盐度 22%,浊度 9.2 ntu),灌注高度为 25 cm,在各液面缓慢注入盐度相等、浊度为 60 ntu 的浊液 1 250 mL,静置观察,定时从淹深 8 cm 的位置抽取水样、测量浊度值,分析不同工质中自由沉降规律.

### 1.3 不同温度下的自由沉降实验

取 3 个容积为 5 000 mL 的烧杯,配制盐度为 15%、高度为 25 cm 的 NaCl 水溶液,浊度都调整约为 50 ntu,将 3 个烧杯分别置于温度为 15、30、50 °C 的恒温水浴中,保持温度不变静置观察,定时从淹深 8 cm 的位置抽取水样、测量浊度值,分析温度对灰尘自由沉降的影响.

## 2 多孔介质降浊实验

多孔介质降浊实验分为室内实验与室外实验两部分.室内实验主要研究不同 PM 材料在降浊方面的差异,室外实验为 PM 材料对太阳池浊度影响的对比实验.

### 2.1 不同多孔介质的降浊中试研究

取 4 个容积为 5 000 mL 的烧杯,底部分别平铺厚度为 20 mm 的 PM 材料,PM 材料分别为活性炭、锅炉渣、碳化硅泡沫陶瓷及氧化铝堆积小球(如图 1 所示).在常温下向各烧杯内加入初始浊度为 33 ntu、高度为 20 cm 的盐水,盐水的盐度

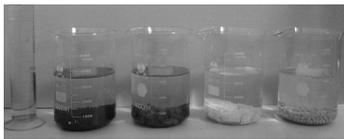


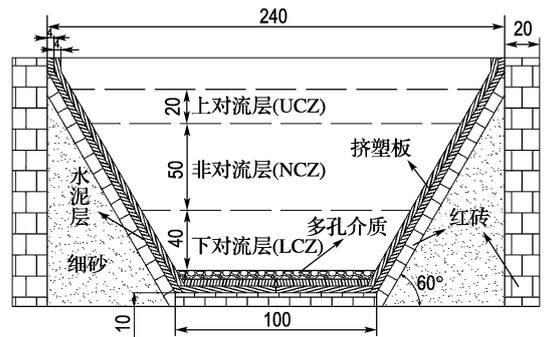
图 1 不同降浊用多孔介质材料

Fig. 1 Different porous mediums used for turbidity restraint

为 15% (接近太阳池下对流层盐度).为防止 PM 材料内原有灰尘影响实验效果,PM 材料在实验前已经过多次清洗,在加盐水时从侧壁缓慢加入,实验中定时从淹深 8 cm 的位置抽取水样、测量浊度值,分析不同 PM 材料对浊度变化的影响.

### 2.2 多孔介质用于太阳池降浊的对比实验

在实验室原理性实验基础上,课题组搭建了两个结构相同的小型盐水太阳池,进行 PM 材料应用于太阳池的室外对比实验,太阳池示意图如图 2 所示.太阳池外墙采用两层红砖修建,内墙采用单层红砖铺成,坡度为 60°,表面做防水处理,铺两层挤塑板(压缩苯板)作为保温层,其上铺设厚 12 μm 的盐滩专用耐腐蚀黑色塑料,既能防止漏水又可增强太阳池对太阳辐射的吸收.



(a) 太阳池结构图(单位:cm)



(b) 太阳池照片

图 2 太阳池示意图

Fig. 2 Schematic diagram of solar pond

两太阳池在其他参数相同的情况下,在一太阳池池底平铺了孔隙率约为 0.55、厚 5 cm、每块平均直径约为 1 cm 的锅炉渣,平铺面积约为 1 m<sup>2</sup>.两太阳池各层采用自来水溶解不同比例的无碘 NaCl 进行灌注,其中下对流层(LCZ)厚度 40 cm,初始盐度 14.6%;非对流层(NCZ)厚度 50 cm,自下而上水的盐度从 14.2%降低至 1%;上对流层(UCZ)厚度 20 cm,用淡水灌注.太阳池测量于 9 月 1 日开始,根据天气情况进行不定期测量太阳池内部垂直方向上不同深度的温度与浊度值.本文主要通过对比实验分析以锅炉渣为代表的 PM 材料对太阳池浊度的影响.需要说明的

是: 太阳池浊度产生的原因主要包括池内微生物、盐水中析出的盐类、灰尘等杂质; 本文实验运行周期相对较短, 并未发生微生物繁殖现象; 盐水中析出盐颗粒主要集中在池底, 不予考虑, 因此研究结果仅针对由灰尘导致的浊度。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 盐度对浊度变化的影响

实验中引入浊度去除率作为浊盐水自由沉降效果的标志, 可反映浊度降低的水平, 其定义为

浊度去除率  $R = (\text{初始浊度} - \text{最后浊度}) / \text{初始浊度}$

图3给出了盐度对浊度变化的影响, 各溶液实验初始浊度为 50 ntu。从图3中可以看出: 在实验初期浊度下降速度快而且均匀, 在 60 h 后浊度基本稳定, 没有太大波动。盐度为 0.2% (淡水) 和 5.0% 的试样在 30 h 附近浊度去除率达到了 80% 左右。在 60 h 后, 淡水的浊度去除率要比 20.0% 试样高 8% 左右, 表明盐度越低自由沉降效果越好, 也就是说低盐度溶液更有利于灰尘等自由沉降。对太阳池而言, LCZ 层的盐度最高, 导致其自由沉降能力相对最弱, 这在一定程度上增大了太阳池 LCZ 层降浊处理的难度。

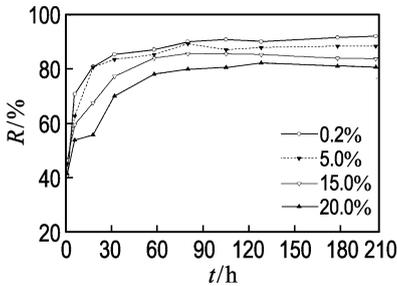


图3 盐度对浊度变化的影响

Fig. 3 Effect of salinity on turbidity

图3中淡水试样达到浊度去除率 80% 时的时间约为 24 h 左右, 而盐度 15.0% 的试样达到相同浊度去除率所需时间约为 60 h, 说明低盐度溶液的浊度下降速度要比高盐度溶液快。这是由于盐度较大的溶液其密度相对较大, 浊液中的杂质在水中沉降过程中所受浮力较大, 会阻碍灰尘下沉甚至使其悬浮于液体中。根据太阳池盐度分布规律可知: UCZ 层的盐水密度最小, LCZ 层的盐水密度最大, 于是在 LCZ 层中灰尘的沉降速度要低于在 NCZ 层和 UCZ 层中的沉降速度。在太阳池长时间运行时, 如果外界灰尘不间断地持续进

入池内, 会导致 LCZ 层内的悬浮灰尘颗粒的浓度增大, 从而使太阳辐射能透射到 LCZ 层内的比率会变小。因此有效抑制太阳池 LCZ 层浊度对保证良好的太阳辐射透射率具有重要意义。

#### 3.2 工质对浊度变化的影响

图4给出了盐水、降盐降浊后的卤水和未处理的卤水原液 3 种工质中灰尘自由沉降的对比。结果表明, 加入浊液后 3 个容器内的浊度都在短时间内急剧增大, 而后逐渐降低。由图4可知, 盐水浊度趋于稳定所需的时间约为 60 h, 而处理后卤水和卤水原液分别需 130 h 和 200 h, 说明盐水中灰尘自由沉降速度最快, 而卤水中沉降缓慢。从降浊效果来看, 盐水的浊度去除率在 80% 左右, 远高于卤水, 而卤水原液的浊度去除率仅为 70% 左右, 自由沉降效果最差。这表明在太阳池的工质选择方面, 无论是从自由沉降速度还是最终的降浊效果上, 盐水都要优于卤水, 更容易达到澄清状态。从太阳池降浊角度考虑, 采用盐水要优于卤水, 如果采用卤水作为太阳池工质, 则必须进行降盐降浊处理。

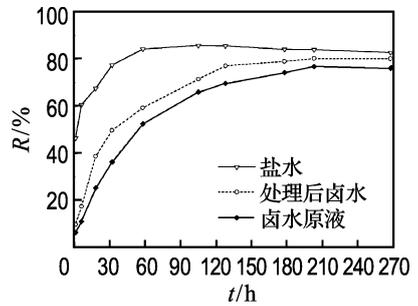


图4 工质对浊度变化的影响

Fig. 4 Effect of working medium on turbidity

#### 3.3 温度对浊度变化的影响

图5给出了温度对浊度变化的影响。从图中可以看出, 温度对浊度的影响主要体现在实验初期, 浊度达到稳定的时间间隔随温度升高而缩短, 表明温度越高灰尘颗粒沉降越快。浊度相对稳定后, 高温溶液自由沉降效果要好于低温溶液, 但差别不是很明显, 且出现一定浊度波动, 这是由于温度升高, 分子运动加剧, 传质扩散增强所致。图5中所取最高温度与太阳池运行期间 LCZ 层整体温度相接近, 在一定程度上能反映太阳池内的温度对浊度的影响。

#### 3.4 多孔介质对浊度变化的影响

图6给出了多孔介质对浊度变化的影响, 从

图中可以看出,含 PM 材料的盐溶液在 24 h 左右降浊开始趋于稳定,相比之下没有 PM 材料的溶液达到稳定的时间接近 60 h,说明多孔介质能够起到吸附作用,加快浊盐水的自由沉降速度。

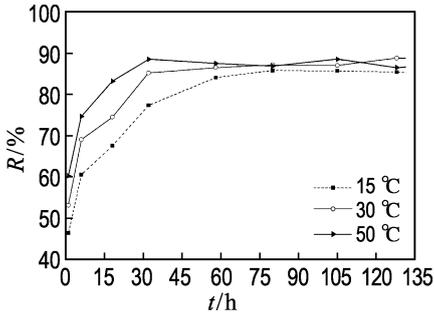


图 5 温度对浊度变化的影响

Fig. 5 Effect of temperature on turbidity

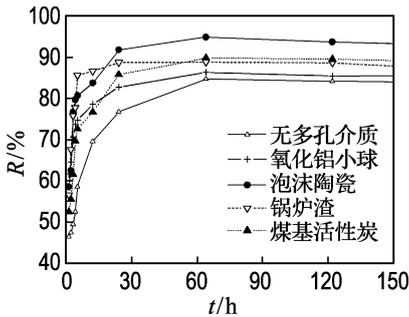


图 6 多孔介质对浊度变化的影响

Fig. 6 Effect of porous medium on turbidity

从降浊效果来看,活性炭在实验初始时刻降浊效果较差,主要是因为本实验中所用活性炭为煤基活性炭,其内部附着的煤灰影响了溶液整体浊度,大约在 24 h 后,煤灰沉淀,活性炭优良的降浊效果开始体现;锅炉渣在初期降浊效果比较显著,但实验过程中其溶液的浊度出现波动,表明锅炉渣降浊的稳定性稍显不足;氧化铝小球的降浊效果略优于无多孔介质,但浊度去除率仅提升 3% 左右;泡沫陶瓷降浊可在 5 h 内达到 80% 左右的浊度去除率,而且稳定后浊度去除率可高达 93% 左右,表明泡沫陶瓷无论从自由沉降速度还是降浊效果上都优于其他多孔介质,是降浊的首选材料。但由于成本较高,对于大面积使用的太阳池而言,泡沫陶瓷经济性差。从降浊效果和从经济性成本两个角度综合考虑,本文采用锅炉渣作为 PM 材料在太阳池内进行对比实验研究。

### 3.5 多孔介质对长期运行太阳池降浊的影响

图 7 给出多孔介质对太阳池降浊的影响,图中列出了自太阳池完成灌注当天及此后 10、30、

60 d 的池内浊度分布情况。实验采用引流管提取不同深度的水样进行浊度测量。由图 7 可知,在太阳池运行的一个月內浊度变化并不明显,随时间略有增加,加入锅炉渣以后,太阳池池底附近的浊度明显增大,而池内其他各层的浊度明显低于没有锅炉渣的水池,这说明在太阳池内多孔介质能够有效发挥其吸附作用,池内的灰尘绝大部分沉淀在池底多孔介质区内,由于太阳池底层的浊度并不向上扩散<sup>[13]</sup>,多孔介质对太阳池整体具有降浊作用。

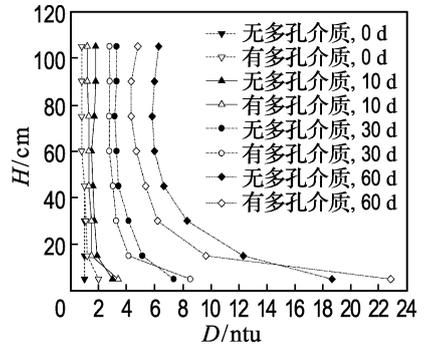


图 7 多孔介质降浊曲线

Fig. 7 Turbidity sedimentation curve with and without porous medium

太阳池运行约 30 d 以后,太阳池浊度增幅变大,池内悬浮灰尘颗粒增多,这主要是由于进入秋季后,植物干枯、风沙天气增多,每天进入太阳池的灰尘骤增,导致太阳池的浊度急剧增大。池底浊度由 8 ntu 左右增至 20 ntu 左右,此时有锅炉渣太阳池的整体浊度要明显低于无锅炉渣的水池,而且随时间增加,两池的平均浊度差增大,说明多孔介质对长期运行太阳池的降浊效果更明显。

## 4 太阳辐射透射率的混合回归模型

对太阳池而言,太阳辐射在水中的透射率是影响太阳池热性能的重要因素,学者们一般用辐射透射率(池中某一位置上的太阳辐射能与到达水面的太阳辐射能的比值)表示太阳池接收太阳辐射的能力,辐射透射率越高,太阳池吸收太阳辐射的能力越强、热性能越好。研究表明,影响太阳池辐射透射率的主要因素是池水浊度<sup>[5]</sup>。关于太阳池辐射透射率的计算,目前使用较多的是 W-S 模型<sup>[6]</sup>,其主要适用于浊度  $\leq 4.5$  ntu 的情况;而大量太阳池实验研究表明,在运行一段时间后太阳池池内浊度往往要大于这个临界值。如图 7 所

示,本文实验中的太阳池在运行一个月后,池内整体浊度高于 4 ntu,如果忽略太阳池底部浊度对太阳池辐射透射率的影响,太阳池平均浊度为 4~9 ntu,因此建立该范围下的太阳辐射透射率模型对于太阳池的理论研究具有重要意义。

本文利用课题组原有实验系统,以盐度为 10% 的盐水为介质,测量了不同浊度、不同深度的太阳辐射透射量,从而确定浊度与太阳辐射透射率之间的关系。实验在一个长、宽、高分别为 1.4、0.98、1.5 m 的铁制长方体容器内进行,内壁漆成黑色以减少反射,容器迎光面一侧焊有一自上而下的滑槽,滑槽内安装可上下移动的托盘,用以托举辐射接收仪,以测量各水层中的太阳辐射透射量。在实验数据基础上,利用 MATLAB 中 REGRESSION 软件包<sup>[15]</sup>,采用对数和多项式相结合的混合回归模型对实验数据进行了模拟计算,得出在显著性水平等于 0.95 时的回归模型:

$$h(D, x) = 0.6956 - 0.1672x + 0.0321x^2 - 0.0669\ln(100x) - 0.0395D + 0.0016D^2 \quad (1)$$

其中: $x$  为水面以下水的深度(m), $0.05 \text{ m} \leq x \leq 1.4 \text{ m}$ ;  $D$  为水的浊度(ntu), $4 \text{ ntu} < D \leq 9 \text{ ntu}$ 。

图 8 给出了由数据回归模型计算得到的太阳辐射透射率与实验值的对比。可以看出,当浊度大于 4.0 ntu 以后,随着浊度的增加,某一深度下太阳辐射透射率明显减小;相同浊度下,水深增大则太阳辐射透射率急剧下降;当水深超过 1.2 m 以后,太阳辐射透射率在 8% 以下,甚至几乎为零。通过模拟值与实验值的对比可以看出,回归模型与实验值在测试范围内可以较好地吻合,本模型可为盐水太阳池非均匀浊度下太阳辐射透射率模型的建立奠定基础。

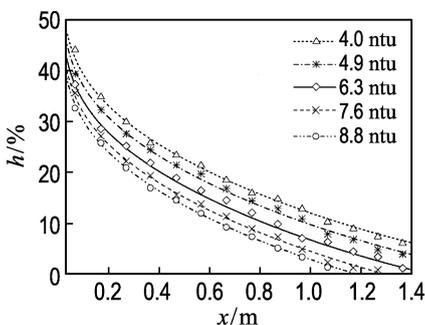


图 8 浊度对太阳辐射透射率的影响

Fig. 8 Effect of turbidity on solar radiation transmittance

## 5 结 论

(1) 在无外界干扰情况下,浊盐水自由沉降过程主要发生在最初的 24 h 之内;随盐度增加,自由沉降效果减弱,盐水自由沉降能力要优于卤水,温度升高可促进自由沉降。

(2) 多孔介质具有吸附性,对降浊具有积极作用,泡沫陶瓷的降浊效果最好,煤基活性炭与锅炉渣效果相近,氧化铝小球最差。

(3) 太阳池内的浊度在下对流层相对较大,当池底铺设多孔介质以后,灰尘沉降效果明显,尽管池底浊度有所增加,但池内整体浊度明显降低,因此多孔介质可以有效控制太阳池池内浊度,保证良好的太阳辐射透射率。

(4) 浊度对太阳池内的太阳辐射透射率有重要影响,太阳辐射透射率随着浊度与深度的增加而明显减小,直至为零。

## 参考文献:

- [1] Velmurugan V, Srithar K. Prospects and scopes of solar pond: A detailed review [J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2008, **12**(8): 2253-2263.
- [2] Karim C, Slim Z, Kais C, *et al.* Experimental study of the salt gradient solar pond stability [J]. **Solar Energy**, 2010, **84**(1): 24-31.
- [3] Ramadan M R I, El-Sebaï A A, Aboul-Enein S, *et al.* Experimental testing of a shallow solar pond with continuous heat extraction [J]. **Energy and Buildings**, 2004, **36**(9): 955-964.
- [4] Dah 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**(1-3): 179-185.
- [5] Wang J, Seyed-Yagoobi J. Effects of water turbidity and salt concentration levels on penetration of solar radiation under water [J]. **Solar Energy**, 1994, **52**(5): 429-438.
- [6] 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.
- [7] Husain M, Patil P S, Patil S R, *et al.* Combined effect of bottom reflectivity and water turbidity on steady state thermal efficiency of salt gradient solar pond [J]. **Energy Conversion and Management**, 2004, **45**(1): 73-81.

- [8] LI Nan, YIN Fang, SUN Wen-ce, *et al.* Turbidity study of solar ponds utilizing seawater as salt source [J]. *Solar Energy*, 2010, **84**(2):289-295.
- [9] Malik N, Date A, Leblanc J, *et al.* Monitoring and maintaining the water clarity of salinity gradient solar ponds [J]. *Solar Energy*, 2011, **85**(11):2987-2996.
- [10] Gasulla N, Yaakob Y, Leblanc J, *et al.* Brine clarity maintenance in salinity-gradient solar ponds [J]. *Solar Energy*, 2011, **85**(11):2894-2902.
- [11] 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):804-810.  
WANG Hua, SUN Wen-ce, PAN Hong-kun. Experiment in a small sea water solar pond and simulation of numerical temperature distribution considering turbidity [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2008, **48**(6):804-810. (in Chinese)
- [12] 李 楠, 孙文策, 张财红, 等. 不同浊度分布下太阳池热性能模拟[J]. 热科学与技术, 2010, **9**(2):119-125.  
LI Nan, SUN Wen-ce, ZHANG Cai-hong, *et al.* Thermal performance simulation of solar ponds with different turbidities distributing [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2010, **9**(2):119-125. (in Chinese)
- [13] 黄丽萍, 孙文策, 赵雅芝, 等. 一种降低太阳池老卤水浊度及叶绿素含量的方法[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(10):69-71.  
HUANG Li-ping, SUN Wen-ce, ZHAO Ya-zhi, *et al.* Reducing turbidity and chlorophyll of bittern in solar pond [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, **29**(10):69-71. (in Chinese)
- [14] 王 禄, 孙文策, 马 伟, 等. 太阳池灌注卤水净化实验与中试研究[J]. 海洋通报, 2005, **24**(5):79-84.  
WANG Lu, SUN Wen-ce, MA Wei, *et al.* Purifying experiment and pilot test on purification of brine for solar pond [J]. *Marine Science Bulletin*, 2005, **24**(5):79-84. (in Chinese)
- [15] 董大校. 基于 MATLAB 的多元非线性回归模型[J]. 云南师范大学学报, 2009, **29**(2):45-48.  
DONG Da-xiao. The multivariate nonlinear regression model based on MATLAB [J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 2009, **29**(2):45-48. (in Chinese)

## Experimental study of free subsidence of turbidity brine and efficiency-enhanced method in solar pond

LIU Hong-sheng\*, WU Dan, JIANG Lin-song, SUN Wen-ce

( Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** The free subsidence features of turbidity brine under different salinities, working mediums and temperatures were discussed by laboratory experiments. A new physical treatment method of turbidity reduction was applied to solar pond by introducing porous adsorbent, and the turbidity restraint effects of four types of porous mediums were investigated. Two mini-solar ponds with area of 2.4 m×2.4 m and depth of 1.2 m were built, and one of them was filled with porous medium at the bottom. A mixed regression model of solar radiation transmittance was put forward based on the nonlinear fitting of the experimental data. The experimental results show that the turbidity removal ratio of salt water is about 10% higher than that of brine. When the salinity increases from 0.2% to 20%, the turbidity removal ratio of salt water is reduced by 8%. The free subsidence speed of dust particles is enhanced and the turbidity removal ratio can be increased by 3%-13% after different porous mediums are filled in salt-gradient solar pond. Porous mediums can effectively reduce the water turbidity and increase the solar radiation transmittance in the solar pond.

**Key words:** solar pond; turbidity; porous medium; radiation transmittance