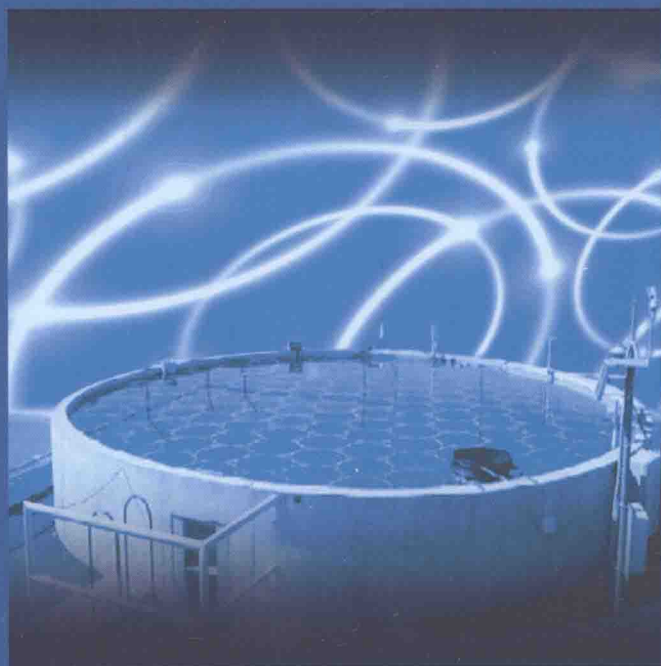


 博士文库

# 盐梯度太阳池热性能与梯度层稳定性

王 华 著



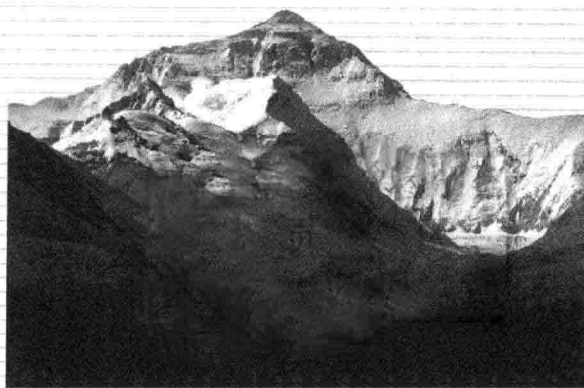
 西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



博士文库

# 盐梯度太阳池热性能与梯度层稳定性

王 华 著



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

## 内容简介

本书从实验和理论两个方面介绍了盐梯度太阳池的研究现状。实验方面,建立了小型盐梯度实验太阳池,在室内和室外进行了一系列小规模模拟实验,分别研究卤水在降浊处理后和降雨后的浊度变化。为增加太阳池储热层温度,提出了在太阳池储热层底部添加多孔介质床的方法,并采用小塑料槽模拟太阳池进行了一系列室外实验。理论方面,在考虑侧墙阴影作用情况下,对太阳池内的温度和盐度扩散进行了一维和二维数值模拟,并对盐梯度层的稳定性进行了线性和非线性稳定性分析。

本书对从事太阳能研究领域的科研人员有一定的参考价值,同时,还可供高等学校能源等专业从事相关研究的师生参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

盐梯度太阳池热性能与梯度层稳定性/王华著. —西安:  
西安交通大学出版社,2013.12  
ISBN 978-7-5605-5882-0

I. ①盐… II. ①王… III. ①太阳能-能量储存-  
研究 IV. ①TK512

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 301067 号

---

书 名 盐梯度太阳池热性能与梯度层稳定性  
著 者 王 华  
责任编辑 任振国 季苏平

---

出版发行 西安交通大学出版社  
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtupress.com>  
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)  
(029)82668315 82669096(总编办)

传 真 (029)82668280  
印 刷 北京京华虎彩印刷有限公司

---

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 10.75 字数 201 千字  
版次 2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5605-5882-0/TK·113  
定 价 30.00 元

---

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82668133

读者信箱:xj\_rwjg@126.com

版权所有 侵权必究

# 前 言

随着人口的激增和工业的迅速发展,能源短缺问题日益严重,太阳能是最理想的能源之一。盐梯度太阳池作为太阳能利用的一种形式,兼有对太阳辐射能的吸收和储存作用,不仅是当今传统能源的重要补充,更是未来太阳能应用的重要形式。

本书从实验和理论两个方面介绍了盐梯度太阳池的研究现状。各部分主要内容及重要研究结论如下:

建立了表面积  $2.8\text{m} \times 2.3\text{m}$ 、深  $0.8\text{m}$  的实验太阳池,结合室内和室外小型实验,对实验太阳池的温度、盐度发展以及浊度分布进行了实验测定。第一次实验于 2006 年 8 月开始,在运行后第 17 天达到最高温度  $45.7^{\circ}\text{C}$ 。与同类实验研究结果比较,本实验太阳池具有较好的升温效果。卤水的透光性较差,直接影响太阳池对太阳辐射的吸收。从两方面研究了卤水灌注太阳池的浊度变化:一方面研究卤水降浊处理后,卤水中藻类的再滋生情况;另一方面比较了雨水分别降落到卤水和盐水太阳池中后池内浊度的变化。实验表明,絮凝降浊对苦卤中藻类的生长有一定的抑制作用,雨水在卤水中的沉降速度明显低于在盐水中的沉降速度。

为提高太阳池储热层温度,在一系列模拟实验结果的基础上,提出在太阳池底部添加锅炉渣的方法。从三个方面进行研究:在模拟的小型太阳池中的一系列实验研究结果表明,底部添加材料的多孔性有利于太阳池储热层温度升高,与鹅卵石等石材相比,锅炉渣的升温 and 保温作用更好,后来在实验太阳池内的实验也证明了这一点;采用一维模型模拟大面积太阳池添加锅炉渣床的温度发展,考虑多孔介质层的孔隙率和厚度对热性能的影响,结果表明孔隙率减小或厚度增加有利于储热层温度增高;最后在实验太阳池内进行了为期近一个月的实验。

从太阳池提取热量并加以应用是建立太阳池的最终目的。本书利用实验太阳池加热淡水,进行了短期换热实验。在实验太阳池底部添加锅炉渣的基础上,于 2007 年 8 月进行了提热实验。对一个容积为  $56\text{L}$  的淡水桶中的淡水加热,连续两天的提热实验结果表明,第一天水桶中的水温度最高达到  $38.4^{\circ}\text{C}$ 。理论方面,对于客观条件一定的太阳池给出最佳水箱容积的计算方法。

盐梯度层是太阳池最重要的组成部分,太阳池的热性能主要取决于该层的稳

定性。本书最后主要对梯度层的稳定性进行了分析。在线性稳定性分析的基础上,采用数值方法,得出梯度层的非线性动力稳定性的数值解。分析了太阳辐射吸收和提热量对于稳定性的影响以及二者的综合影响:当梯度层的盐水比较清澈时,提热量的大小对于临界稳定性  $Ra^c$  的大小影响较大;而池水比较浑浊时,提热量的大小对于稳定性的影响较小。盐梯度层的非线性稳定性问题不能够采用分析的方法求解,根据变步长四阶 Runge-Kutta-Merson 方法进行非线性稳定性分析,二维温度、盐度和速度场表明线性分析得到的临界稳定性瑞利数( $Ra^c$ )能够很好地界定系统的渐进稳定性状态。根据 Nusselt 数确定的临界稳定性瑞利数  $Ra^N$  略大于线性稳定性分析得到的临界瑞利数  $Ra^c$ ,当盐瑞利数  $Rs$  在  $10^5$  和  $10^6$  数量级上,  $Ra^N$  与  $Ra^c$  的差距仅为 1%左右。

著 者

2013 年 10 月

# 目 录

<b>第1章 绪论</b> .....	(1)
1.1 盐梯度太阳池的研究意义 .....	(1)
1.2 太阳池的分类 .....	(2)
1.3 盐梯度太阳池 .....	(3)
1.3.1 太阳池的三层结构 .....	(3)
1.3.2 太阳池的特点 .....	(5)
1.3.3 太阳池的应用 .....	(5)
1.4 盐梯度太阳池实验研究进展 .....	(6)
1.4.1 实验研究 .....	(6)
1.4.2 旨在提高太阳池储热层温度的研究 .....	(7)
1.4.3 从太阳池提取热量的研究 .....	(8)
1.5 理论研究 .....	(9)
1.5.1 温度和盐度扩散的预测 .....	(9)
1.5.2 盐梯度太阳池梯度层的动力稳定性研究 .....	(12)
1.6 本书的主要内容 .....	(15)
<b>第2章 太阳池实验</b> .....	(17)
2.1 太阳池的建造和结构 .....	(19)
2.2 太阳池的灌注 .....	(22)
2.3 实验过程及方法 .....	(22)
2.3.1 测定仪器 .....	(22)
2.3.2 实验方法及日常维护 .....	(23)
2.4 温度实验结果 .....	(24)
2.4.1 LCZ 温度的长期发展 .....	(24)
2.4.2 温度的昼夜变化 .....	(25)
2.4.3 沿深度方向的温度分布 .....	(26)
2.5 太阳池内浊度的控制及发展 .....	(28)

2.6	卤水太阳池水浊度的实验研究	(30)
2.6.1	卤水的降浊处理及降浊后卤水中浮游藻类的再滋生	(30)
2.6.2	雨水在卤水和盐水中的沉降	(32)
2.7	本章小结	(33)
<b>第3章</b>	<b>考虑侧墙阴影影响的瞬态热性能预测</b>	<b>(34)</b>
3.1	太阳辐射强度计算	(34)
3.2	侧墙阴影的影响	(36)
3.3	一维数值模拟	(40)
3.3.1	边界条件	(41)
3.3.2	控制方程及其离散	(43)
3.3.3	其他物理参数表达式	(44)
3.3.4	稳定性	(45)
3.3.5	算例	(45)
3.4	二维数值模拟	(50)
3.4.1	控制方程及其离散求解	(50)
3.4.2	算例	(51)
3.5	二维计算结果与实验结果的比较	(54)
3.5.1	盐度发展	(54)
3.5.2	温度发展	(55)
3.6	本章小结	(57)
<b>第4章</b>	<b>盐梯度太阳池的改造以及无盐太阳池</b>	<b>(58)</b>
4.1	浅太阳池	(58)
4.2	其他复合结构的盐梯度太阳池	(65)
<b>第5章</b>	<b>底面添加锅炉渣床对增加太阳池储热层温度的作用</b>	<b>(67)</b>
5.1	小型模拟实验	(68)
5.1.1	实验方法	(68)
5.1.2	底面处理方式的影响	(69)
5.1.3	不同材料的实验结果	(70)
5.1.4	锅炉渣作为添加材料的较长期实验	(71)
5.2	多孔介质对储热层传热传质和太阳辐射吸收的影响	(74)
5.2.1	多孔介质层的有效导热系数	(74)
5.2.2	多孔介质对传质的影响	(74)

5.2.3	太阳辐射在多孔介质层中的衰减	(75)
5.3	太阳池内的一维温度发展预测	(77)
5.3.1	各层能量平衡方程	(78)
5.3.2	模拟结果与小型实验结果的对比	(80)
5.3.3	算例	(83)
5.4	在太阳池中的实验	(88)
5.4.1	实验方法	(88)
5.4.2	结果与讨论	(89)
5.5	本章小结	(92)
<b>第6章</b>	<b>太阳池热量利用</b>	(94)
6.1	太阳池热量提取的方式	(94)
6.1.1	太阳池热提取的两种主要方式	(94)
6.1.2	内置换热器热提取方式	(96)
6.2	实验	(100)
6.2.1	实验装置及实验过程描述	(100)
6.2.2	实验结果	(101)
6.3	换热过程的理论分析	(102)
6.3.1	换热器性能	(102)
6.3.2	太阳池温度计算	(103)
6.3.3	水箱温度和容积的估计	(104)
6.3.4	热效率	(105)
6.3.5	算例	(105)
6.4	本章小结	(109)
<b>第7章</b>	<b>太阳池盐梯度层的流体动力稳定性分析</b>	(110)
7.1	控制方程的无量纲化及其弱解形式	(110)
7.1.1	方程的无量纲化	(111)
7.1.2	根据 Galerkin 方法求方程的弱解形式	(113)
7.2	根据特征值判断的临界条件	(115)
7.2.1	稳定性的临界条件	(115)
7.2.2	振荡解	(118)
7.3	消光系数 $\mu$ 和提热量 $f$ 对 $Ra^\circ$ 的影响	(120)
7.3.1	消光系数 $\mu$ 对 $Ra^\circ$ 的影响	(120)
7.3.2	辐射吸收对 $Ra^\circ$ 的影响	(123)



7.3.3	消光系数 $\mu$ 与提热量 $f$ 对 $Ra^c$ 的综合影响 .....	(125)
7.4	非线性方程的数值解 .....	(126)
7.4.1	数值求解方法 .....	(126)
7.4.2	$a_1 a_2$ 和 $c_1$ 在各区内的相轨迹图 .....	(127)
7.4.3	在 $Ra^c$ 附近的温度、盐度和速度场分布 .....	(129)
7.4.4	努塞尔数的计算 .....	(134)
7.5	本章小结 .....	(137)
<b>结 论</b>	.....	(138)
<b>附录</b>	.....	(141)
附录 A	Galerkin 方法求偏微分方程的弱解形式 .....	(141)
附录 B	Routh-Hurwitz 法则判断常微分方程组零解的渐进稳定性 .....	(143)
附录 C	ADI(交替方向隐式)线迭代法计算五点通用对流扩散格式 .....	(144)
附录 D	主要符号说明 .....	(150)
<b>参考文献</b>	.....	(152)
<b>后记</b>	.....	(163)

# 第 1 章 绪 论

盐梯度太阳池是能够大面积吸收并储存太阳能的盐水池。匈牙利物理学家 Von Kalecsinsky 于 1902 年发现了自然界中自然形成的太阳池现象<sup>[1]</sup>。Kalecsinsky 发现位于特兰西瓦尼亚的 Medve 湖水表面以下几英尺处的温度明显高于水表面的温度,而这种温度随深度的变化,正是由于水中沿深度方向的盐度分布不同而造成的。Kalecsinsky 的这次发现激励后来的科学家建造并研究盐梯度太阳池。

## 1.1 盐梯度太阳池的研究意义

随着全球人口的急剧增长,经济的发展,能源的短缺,环境问题日益严重。当电力、煤炭、石油等不可再生能源频频告急,国际油价持续走高,能源问题日益成为制约国际社会经济发展的瓶颈时,越来越多的国家开始实行“阳光计划”,开发太阳能资源,寻求经济发展新动力。此外,最近一段时间,新能源板块持续活跃,管理层的高度重视,政策上的大力扶持,为新能源产业未来的高速发展奠定了坚实的基础。环境问题成为可再生能源开发消费的重要因素。根据政府间气候变化委员会报告,如不尽快采取实质行动,未来 100 年,全球平均气温将上升 3~6℃,海平面上升 15~35m,导致近一半的生物物种灭绝,并造成巨大的社会损失。

照射在地球上的太阳能是非常巨大的,理论上认为在地球上大约 40min 的太阳辐射,便足以供全球人类一年的能量使用。毫无疑问,太阳能是取之不尽、用之不竭的能源,且太阳能利用绝对干净,不会产生任何污染,所以太阳能被誉为最理想的能源之一。

中国太阳能资源丰富,应用前景广泛。考虑地理环境因素,我国是太阳能资源相当丰富的国家,绝大多数地区年平均日辐射量在  $4\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$  以上。宁夏北部、甘肃北部、新疆东部、青海西部和西藏西部等地年太阳辐射总量为  $6680\sim 8400\text{MJ}/\text{m}^2$ ,是我国太阳能资源最丰富的地区。表 1.1 给出我国太阳

## 盐梯度太阳池热性能与梯度层稳定性

能资源的地区分布状况。可见除了四川和贵州的日照时间和总辐射量较小,为 3350~4200MJ/m<sup>2</sup>,其他大部分地区太阳能资源都处于中等水平。

表 1.1 中国的太阳能资源分布状况

地区	年平均日照小时 h	年太阳辐射量 MJ·m <sup>-2</sup>	等级
西藏、甘肃和青海西部,新疆东南部	2800~3300	6680~8400	丰富
西藏东南部,新疆和宁夏南部、青海东部, 甘肃中部,内蒙古,山西北部,河北西北部	3000~3200	5850~6680	
新疆和山西北部,甘肃和河北东南部,山东, 河南,吉林,辽宁,云南,广东、山西和福建南部, 江苏和安徽北部	2200~3000	5000~5850	中等
湖南,广西,江西,浙江,湖北,福建和广东 北部,陕西、安徽和江苏南部,黑龙江	1400~2200	4200~5000	
四川,贵州	1000~1400	3350~4200	较差

## 1.2 太阳池的分类

太阳池的基本类型主要有以下几种。

### 1. 传统的盐梯度太阳池 (Salt Gradient Solar Pond)

传统盐梯度太阳池是一个盐度自上而下逐渐增大的盐水池,到达太阳池底部的太阳辐射能被池水吸收并储存下来。这也是本书所要介绍的主要太阳池类型。

盐梯度太阳池的应用遇到的主要问题包括:为了保持盐梯度太阳池的整体流体动力稳定性,需要将吸收和储存的热量合理的利用。

### 2. 膜分层太阳池 (Membrane Solar Pond)

膜分层太阳池是一种盐梯度太阳池,但与传统的盐梯度太阳池不同的是,为了避免因为温度升高而引起的太阳池内部的热对流和不稳定性,膜分层太阳池将各层之间用透明薄膜分开。一般采用聚四氟乙烯塑料作为膜材料。

### 3. 凝胶太阳池 (Gel Solar Pond)

凝胶太阳池是在传统的盐梯度太阳池基础上发展起来的。在这种太阳池中,传统的盐梯度太阳池中的非对流层由具有良好透光和热绝缘性质的凝胶聚合物 (Polymer Gels) 组成,或者将凝胶聚合物层覆盖于非对流层顶部。这种太阳池中

一定要加盐,以便保证这种隔离物漂浮在盐水上面,并隔离非对流层和上对流层。

以上这些在传统盐梯度太阳池基础上增加外物隔离的方式有效地隔离了非对流层与上对流层,但是也有一些显著的缺点:第一,这些外物的采用增加了投资成本,尤其是对于大面积应用的商业化太阳池。第二,当面积稍大时,这种隔离膜就会发生下凹,而无法保持水平,这将在膜上下层引起不规则空间和角度,并且导致太阳池某些部分发生对流。第三,膜的存在以及膜的压力产生气泡都会引起光衰。第四,附加的膜暴露于大气环境中,外界的风雨影响也使膜表面不洁净,需要周期性清理。

#### 4. 蜂窝式太阳池 (Honeycomb Solar Pond)

不同于上面的太阳池,在蜂窝式太阳池中,一般采用淡水灌注整个太阳池,采用薄层石蜡油和蜂窝状装置覆盖表面,以抑制自然对流的热损失。详细的介绍见本书第4章。

#### 5. 无盐浅太阳池 (Saltless Shallow Solar Pond)

浅太阳池一般用淡水来灌注,因此避免了许多传统盐梯度太阳池的缺点。浅太阳池实际上是一个平板型太阳能集热器。浅太阳池造价比较低,它的思想近似于太阳能蒸发器。浅太阳池的应用并不限于家庭应用,也可用于工业过程以及产生动力。浅太阳池的设计可以是小型便携式的,也可以是大型的。

下面介绍传统的盐梯度太阳池。

## 1.3 盐梯度太阳池

### 1.3.1 太阳池的三层结构

盐梯度太阳池(简称太阳池)是一个盐度由上而下逐渐增加的盐水池。如图1.1所示,太阳池一般由三层组成:表面是温度和盐度都较低的上对流层(Upper Convective Layer, UCZ),这层的温度接近于大气温度,一般为淡水或者浓度很小的盐水,UCZ层很薄,一般在 $0.15\sim 0.3\text{m}$ 。太阳池最底层称为下对流层(Lower Convective Layer, LCZ)或者叫做储热层,该层温度和盐度最高,是接近饱和的浓盐水,温度可以达到 $70\sim 100^{\circ}\text{C}$ ,厚度一般在 $1\sim 2\text{m}$ 。两个对流层UCZ和LCZ具有各自均一的盐浓度,所以这两层中的温度也较均一。UCZ和LCZ中间被盐梯度层,或者叫做非对流层(Non-Convective Layer, NCZ)分开,NCZ是盐梯度太阳池的重要组成部分,该层盐度和温度都随着深度逐渐增加,非对流层好像储热层的一个盖子一样,其密度梯度抑制了对流的发生,非对流层厚度一般在 $1\sim 1.5\text{m}$ <sup>[2]</sup>。

# 盐梯度太阳池热性能与梯度层稳定性

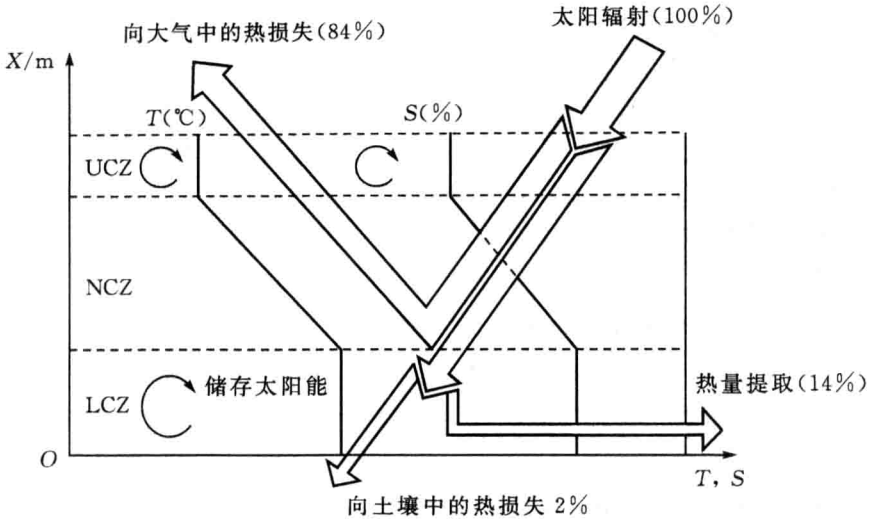


图 1.1 盐梯度太阳池能量平衡示意图

从太阳池典型的三层结构来看,太阳池的运行原理比较简单。水或者空气这样的流体被加热后变轻并向高处流动,热量以对流的方式散失到周围环境中,最终整个体系的温度接近环境温度,而在太阳池中,下对流层中高浓度的盐溶液在重力的作用下,阻止了这个过程,所以热量不能够以对流的方式散失到表面大气中,只能以热传导的方式通过较厚的盐梯度层传递到水表面,而导热过程是相对缓慢的,所以到达下对流层的太阳辐射被储存下来。建立太阳池所需的条件:对于土地的要求,一般只需要是开阔的土地资源,贫瘠荒芜的土地对于太阳池的建立没有影响;还需要具有充足的太阳能资源;最后就是需要有较廉价的盐资源或者卤水资源,这种盐资源已经不局限于单纯的  $NaCl$ 。比如,Kurt 等人<sup>[3]</sup>采用  $Na_2CO_3$  溶液灌注太阳池,并从实验上验证了该盐溶液用于灌注太阳池的良好效果。Lodhi<sup>[4]</sup>提出利用盐碱湖和油井盐水建立盐梯度太阳池的方法。参考文献[5]通过对氯化镁和氯化钙水溶液的密度、黏滞系数、比热容和导热系数、盐扩散系数的测定,得到了以该两种溶液为工质的太阳池的稳定性系数。我国幅员辽阔,有许多有利于建立太阳池的条件,比如柴达木盆地位于青海省西北部,多咸水湖和盐土沼泽,盐矿极其丰富,且长年干燥少雨,年日照时数在 3000h 以上。陈慧玲<sup>[6]</sup>从气候、淡水资源、盐资源方面分析了在我国的柴达木盆地利用盐湖建立太阳池的可行性,根据该地情况,认为可以将太阳池应用于发电、采暖、农业生活用热以及为沼气池加热和工业生产等需要。

### 1.3.2 太阳池的特点

盐梯度太阳池能够提供低温热源,尽管到达地球表面的太阳辐射断断续续,很大程度上依赖于天气状况,但大面积盐梯度太阳池能够吸收并储存太阳能,即使是在连续的阴雨天气里,储热层也不会有大幅度的降温。通过合理设计和运行的太阳池能够在温暖季节里储存太阳能,供冬季使用<sup>[7]</sup>。

太阳池作为太阳能的一种利用形式,具有许多优点。像生物质能、风能等其他许多可再生能源一样,应用太阳池不会产生环境问题,不消耗不可再生资源,只要适当处理,可以反复使用。太阳池对于环境有以下几个特点:太阳池能够提供热源却不需要使用任何燃料,所以不会向周围环境中释放任何污染气体;太阳池靠浓盐水收集和储存太阳辐射能,而不需要消耗任何传统能源材料,从而节约了传统能源;太阳池的建造成本很低,主要是盐资源,盐成本占初始总投资的  $1/3 \sim 1/2$ <sup>[8]</sup>;太阳池易于建造和维护;太阳池不但不给环境带来污染,根据太阳池的运行原理,它本身还是污染物的容器,比如采用卤水灌注太阳池,制盐剩余的卤水主要成分为  $\text{NaCl}$ 、 $\text{MgCl}_2$  和  $\text{MgSO}_4$  等,经常免费提供给化工厂用于生产氯化镁。将未经处理的苦卤排回大海,既污染了近海海域又造成资源的浪费,并影响盐滩后继生产盐的质量;而采用卤水灌注太阳池,既利用了可能对环境造成污染的废弃物——卤水,又提供了热能,可谓一举两得。太阳池与其他淡化系统相结合,还能够从海水中得到淡水资源,增加系统的效率。

### 1.3.3 太阳池的应用

盐梯度太阳池可以提供热源,比如温室的加热,各种过程热应用,海水淡化以及发电应用。A. L. Hawaj 和 Darwish<sup>[8]</sup>将太阳池与多效淡化系统结合。Ahmed 等人<sup>[9]</sup>利用海水淡化后的剩余液体灌注太阳池并应用于发电和淡化以及盐的生产。Badran 和 Hamdan<sup>[10]</sup>比较了太阳能集热器和太阳池作为室内地热的效果,认为太阳能集热器比太阳池系统的效率高 7%,但太阳池在初始投资方面更具有优势。Taga 等人<sup>[11]</sup>将太阳池储热层的热热水作为热泵驱动的汽轮机的热源为温室供热。Muthy 和 Pandey<sup>[12]</sup>研究了太阳池在农业上的可能应用。Szacsnyay 等人<sup>[13]</sup>研究了将太阳池与一个自动闪速多阶段淡化系统结合应用。Caruso 和 Naviglio<sup>[14]</sup>采用钛淡化器与太阳池结合,以避免盐水对淡化器的化学腐蚀。Huanmin<sup>[15]</sup>等人提出了一个与太阳池结合的多效多阶段闪速蒸馏和海水浓缩回收系统(BCRS),用于淡化水。Badran 等人<sup>[16]</sup>从数值上提出了太阳池盐梯度层用于加热温室系统的模型。Velmurugan 等人<sup>[17]</sup>设计了一个单独的蒸馏器与一个迷你太阳池结合,从而增加淡水产率,通过实验证明与迷你太阳池结合使蒸馏水产率增加 59%。

盐梯度太阳池与多种应用系统相结合,提高了总利用效率。我国郑锦平院士

提出了盐梯度太阳池提锂法。他们采取了一个非常简单但很有效的方法,在卤水被太阳晒到一定程度、锂盐快要沉淀的时候,加淡水进去。淡水逐渐分层下渗,下部含锂卤水越来越热,使碳酸锂在底部充分沉淀。该方法将提锂的成本至少减少了50%,同时因为采用太阳能,完全是环保绿色产业。

### 1.4 盐梯度太阳池实验研究进展

1954年,以色列科学家 Bloch 和 Tabor 最早开始了人工盐梯度太阳池的研究<sup>[18]</sup>,并于1959年建立了第一个盐梯度实验太阳池。后来的许多研究者,如 Weinberger<sup>[19]</sup>, Tybout<sup>[20]</sup>等人开始从物理和工程等角度研究太阳池。从1967—1972年,由于传统能源的低价位,关于太阳池的研究几乎停滞。1973年,太阳池的研究重新获得生机<sup>[1]</sup>。近些年来,由于盐梯度太阳池良好的吸收和储存太阳能的特点,越来越引起关注,相关的实验和理论研究也是络绎不绝。

#### 1.4.1 实验研究

在过去的几十年里,世界上许多地方都建造了实验太阳池,并进行了实验研究<sup>[21,22]</sup>。这些研究主要针对太阳池的瞬态或长期热性能,温度场以及风雨等客观条件对太阳池热效率的影响。实验太阳池按大小可以分为大型实验太阳池和小型实验太阳池,下面主要从建筑结构和规模上做一下总结。

小型太阳池主要采用比较廉价的保温材料在室内或室外进行太阳池的模拟实验。比如,Jaefarzadeh<sup>[23]</sup>在伊朗建立了表面积 $4\text{m}^2$ 、深 $1.018\text{m}$ 的盐梯度太阳池,该小型太阳池侧壁和底部采用 $12\text{cm}$ 厚聚苯乙烯保温板保温,并进行了240天温度和盐度发展测定。Dah<sup>[2]</sup>在实验室内利用直径 $0.9\text{m}$ 、深 $1\text{m}$ 的圆塑料桶模拟太阳池,桶壁用 $150\text{mm}$ 厚聚氨酯泡沫保温,采用 $2000\text{W}$ 探照灯模拟太阳辐射,照射模拟的小太阳池。Jayaparkash<sup>[24]</sup>建立了表面积 $5.712\text{m}^2$ 、深 $0.9\text{m}$ 的小型太阳池,底部用黏土、沙子和木屑以及低密度苯板保温,侧壁采用砖和水泥浆建筑,作者分析了该小型太阳池盐通量随深度和温度的变化,夜间的温度降以及表面水分蒸发损失量等。Kurt<sup>[3]</sup>等人在实验室内建立了表面积 $0.6\text{m}\times 0.5\text{m}$ 、深 $0.6\text{m}$ 的小型太阳池,采用 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液灌注,并进行了实验和理论上温度和盐度发展的研究比较,该小型太阳池采用 $1.5\text{mm}$ 厚镀锌铁板外面包裹 $20\text{mm}$ 厚玻璃毛毡和 $30\text{mm}$ 厚的聚苯乙烯泡沫塑料以降低热损失,小池内部漆黑以增加对辐射能的吸收,采用 $2000\text{W}$ 卤素灯模拟太阳辐射。Hassairi<sup>[25]</sup>等人采用天然海水灌注表面积为 $4\text{m}^2$ 、深 $1\text{m}$ 的小型太阳池,该小型太阳池内部采用 $5\text{mm}$ 厚的防水材料衬托,在9月份达到了最高温度 $47^\circ\text{C}$ 。Tahat 等人<sup>[26]</sup>采用 $1.44\text{mm}$ 白钢板制成表面积 $1\text{m}^2$ 、深 $0.5\text{m}$ 的圆形表面积的锅形便携性太阳池,并进行了相应的热性能研究。

小型太阳池运行周期短,造价低,适合于短期的实验研究。但是,太阳池只有在表面积较大的情况下,才会获得更高的效率。对于条件允许的情况下,显然大型太阳池能够为研究和应用提供更多的信息。由于毗邻死海,得天独厚的地理条件使以色列在这方面走在前列。1958年,以色列在 Tabor 教授的领导下,建立了两个实验太阳池,并于 1979 年建立了第一个先导性的太阳池。该太阳池位于死海附近的 Ein Boqueq, 表面积为  $7500\text{m}^2$ ,但是在当时该太阳池仅能在夏季提供  $35\text{kW}$  (冬季  $15\text{kW}$ ) 的连续供热量,总的热效率仅为  $1\%$ 。后来,随着科技的发展,在以色列能源部的支持下,Ormat 公司建造了  $250000\text{m}^2$  太阳池。

美国得克萨斯州的 El Paso 建立了  $3240\text{m}^2$  的盐梯度太阳池,该太阳池于 1986 年夏季开始产出热量,系统操作温度达到  $86^\circ\text{C}$ ,并可以提供  $300\text{kW}$  的热能;后来,相继对该太阳池进行了发电以及海水淡化的研究,结果表明,该太阳池可以每天提供淡化后的水  $16000\text{L}$ <sup>[27]</sup>。印度<sup>[28]</sup>先后在 1985 年和 1987 年建立了  $5000\text{m}^2$  和  $6000\text{m}^2$  的大型盐梯度太阳池,并于 1992 年将提取的热量用于提供奶牛场的热需求。

墨尔本理工大学的 Akbarzadeh<sup>[29-33]</sup>在太阳池的实验和理论研究方面都做出了重要贡献。他领导的科研小组,在 Pyramid Hill 盐场建立了  $3000\text{m}^2$  的太阳池,最高温度达到  $80^\circ\text{C}$ ,还有实验规模的  $50\text{m}^2$  太阳池,近些年来将太阳池与海水淡化等方向相结合,取得了重要成果。当然,世界上建立的实验太阳池及其研究还远远不止这些,这里不能一一列举。

#### 1.4.2 旨在提高太阳池储热层温度的研究

在太阳池的实验研究中,还有另一个子方向,就是旨在提高太阳池储热层温度的研究。这不是指常规的提高保温条件的被动研究,而是指采取一定的方法和设施,从而提高太阳池储热层温度的方法,而这些研究多数都以实验的形式出现。这个方向大致有:一种是采用透明保温材料用于替代储热层或者减小表面的蒸发损失;另一种是在池表面增加反射镜,以增加有效太阳辐射面积的方法。

第一种方法主要是针对无盐太阳池进行研究。根据透明材料所放的位置不同,又可以分为两种:一种是将透明材料置于太阳池内部,另一种是将透明(或者不透明)的材料漂浮于太阳池表面。对于第一种方法,参考文献[34-38]提出采用塑料布或者是适当的管子来代替梯度层的方法;关于第二种方法,Ortabasi 等人<sup>[39-44]</sup>采用漂浮于水面的透明材料充满石蜡油,以降低从表面的热损失。Wilkins 和 Lee<sup>[45-47]</sup>等人采用不同的与水不溶的液体或者固体覆盖于太阳池表面,Zeddarn<sup>[48]</sup>则采用圆柱形真空玻璃漂浮物漂浮于太阳池表面。正像 Spyridonos<sup>[49]</sup>指出的那样,虽然第一种方法能够在一定程度上替代盐梯度层的作用,但是难以推广到大型太阳池的需要;而漂浮于水表面液体的方法,大规模太阳池受风、雨等的影响也更



## 盐梯度太阳池热性能与梯度层稳定性

明显和难以控制,使得表面漂浮液体难以保持。

Velmurugan 等人<sup>[50-51]</sup>在小型太阳池增加了一个反射镜,以增加太阳池接收的太阳辐射量。这种方法虽然简单有效,但是与上面的方法存在相同的弊端,就是难以应用于大型太阳池。

最近,Al-Juwayhel<sup>[52]</sup>从理论上提出了在太阳池底部盐水层中增加石床的方法,即采用热扩散率较小的材料比如电木、大理石、黏土等材料铺设于太阳池底部,形成一层浓盐水与这些材料的混合层,以达到蓄热和保温的作用。他比较了不同材料作为添加石床以及不同石床厚度的太阳池储热层温度发展,结果表明,当采用低热扩散系数的材料时,储热层温度明显增加;同时,当采用高热扩散系数的石材时,储热层温度显著降低。添加石床的厚度对于太阳池温度也有明显影响,厚的石床更有利于储热层温度的增加。

显然,Al-Juwayhel 等人提出这种想法,无论从技术角度还是经济角度,都很容易应用于大型太阳池。

### 1.4.3 从太阳池提取热量的研究

直接从太阳池提取热量主要有两种方式:一种是将热交换器置于下对流层中,换热介质将热量带到太阳池外,以提供适当的热应用。这种换热方式无需移动太阳池原本的热水,对太阳池整体的稳定性影响很小,但是该方法对换热材料的要求较高,因为换热管长期埋于下对流层中,其中的浓盐水很容易造成金属的腐蚀。另一种是将太阳池下对流层中的热盐水从太阳池中提取出来,经过热交换后,再将换热后的冷水从太阳池底部返回太阳池中。这种方法不会像前一种方法那样对内置换热管产生威胁,由于需要将热盐水泵出池外,所以,取而代之的缺点就是对太阳池的扰动相对增大,不利于太阳池的稳定性的保持,甚至降低了整个太阳池的热效率。如果在大型太阳池中采用这种提热方式,往往需要在太阳池附近建立另一个热水池,这就会对原有太阳池的温度分布产生影响,从而影响太阳池的稳定性。根据换热器所处的位置不同,也将前一种提热方式称为内置换热器方式,将第二种换热方式称为外置换热器方式。

关于第一种换热方式,2000m<sup>2</sup>的美国的迈阿密堡(Miamisburg)太阳池首先采用了这种换热方式,但是后来由于在运行中的严重腐蚀问题而停止使用了。实际上,即使是在无氧的情况下,电化学腐蚀也难以控制,比如在换热管的焊接处,以及同一金属处于不同浓度的电解质溶液中等情况下,都会发生电化学腐蚀效应<sup>[53]</sup>。关于第二种换热方式,1500m<sup>2</sup>的 Yavne 太阳池、7000m<sup>2</sup>的 Ein Bikek 太阳池以及 Mianisburg 太阳池的第二期运行阶段里,都采用了该方式提热。然而,这种提热方式也增加整个换热系统的成本,因为这种提热方式对位于外面的用于循环热水的水泵要求很高,比如耐腐蚀、耐热方面的需要。Mianisburg 太阳池采用的水