

盐湖太阳能的利用—太阳池

李积才

(中国科学院盐湖研究所, 西宁 810008)

摘 要 详细综述了太阳池的一般原理、太阳池的用途、太阳池的建造和运行、太阳池的主要理论、特殊太阳池技术、及太阳池的国内外研究应用状况。

太阳池是兼有集热和蓄热两种功能的太阳能利用装置。它结构简单,操作方便,价格低廉,原料来源丰富,并且适用于大规模、长时期、跨季度使用。因此,太阳池被誉为近期内进行大规模太阳能利用中最有希望和最有前途的装置,具有广阔的发展前景。日益引起各国的重视,机理研究和实际应用都得到了十分迅速的发展。近年来,盐湖研究领域发展较快的内容之一就是太阳池研究。下面就太阳池的一般原理;太阳池的用途;太阳池的建造和运行;太阳池主要理论介绍;太阳池其它技术;国外太阳池研究和应用情况;我国太阳池的研究现状等内容介绍如下:

太阳池的一般原理^[1-3]

1902年,匈牙利科学家卡莱辛斯基(kalecsinsky)在作资源考察时,一个偶然的机会使他发现在某些天然盐湖中,水底温度比水面高。卡莱斯基通过理论分析和实验室证明,当存在盐的浓度梯度而没有对流时,依靠穿透到水中的太阳能是可将湖水加热到一定温度。于是,他首次提出了利用盐浓度梯度水池,作为太阳能集热器的概念。

一般来说,普通淡水和浓度均匀的盐水中无论太阳光如何照射,它总是上暖下凉,而且上下温差很小。道理很简单,静止水体在太阳光照射之下,一部分光辐射被反射回大气,其余的大部分被表层所吸收,也有一小部分光辐射能透过深水而向下传输。但当阳光辐射水温高于4℃时,水密度会随其温度增高而减少,即使太阳照射到水底层,使水温升高,但也会由于底层水体密度的减小而产生对流,很快将所获得的热能向周围散失。

太阳池不同于一般的淡水池和浓度均匀的盐水池,而是表层盐水浓度很低,越是往下,浓度越高,具有分层浓度分布的盐水池。太阳池的结构和溶液浓度如图1和图2所示,表面层称上对流层,很薄,浓度也很低,这一层起着保温和抗大气风力扰动的作用。中间层称为非对流层,浓度各不相同,上面低下面高,呈梯度变化,这一层是太阳池之所以具有独特性能的关键,它一方面使太阳辐射进入下层的“窗口”;另一方面又抑制了热向上对流,起到隔热和保温的作用,是太阳池的有效保温层。底层称下对流层,浓度较高,基本接近饱和,而且这一层中的浓度基本是均匀的。所以当上下对流层温度不均匀时,可以通过对流和传热达到平衡,它的作用是集热和蓄热,热能就从这里输出。

在有盐梯度的太阳池中,当阳光照射池中水体时,一部分光线被上对流层和非对流层吸收,而仍有一部分光线进入下对流层,被吸收转化为热能.下对流层被加热之后,它一方面向四周的池壁散失热量,另一方面向上的非对流层传递热量.如果池的四周用保温材料建成或池的面积远大于其周界,那么从池壁散失的热量是很小的.其热量主要是通过向上传递而外逸.然而,非对流层的盐浓度和水密度是呈梯度变化的,下高上低.因而在池下层水体被加热后,受热膨胀,并开始上升,但膨胀产生的浮力还不足以扰乱盐浓度梯度的稳定性,而产生上下对流的,即非对流层抑制了对流传热.所以,下对流层热量只能通过一般的传导才能转移到池的表面.而水的热阻是相当高的,计算表明,60℃时1米厚的水层的隔热作用相当于十几厘米的石棉.因此,太阳池中下对流层就成了一个热能的“封闭系统”,太阳光能源源不断地进来,而热能又不能散失出去,于是下对流层的水温就会不断地升高,从而形成了太阳池中所特有的温度特性,如图3所示.如美国新墨西哥大学的实验太阳池于1980年6月23日,池水沸腾,测到的最高温度为106.5℃(因为池的下部是近饱和盐水溶液,又加上上部的池水静压,因此沸点高于100℃);以色列所建的面积4万平方米的贝特·哈阿拉互5号大型太阳池,1982年6月向池内充盐液,到1983年4月,池底最高温度已达102℃.下层贮存收集到的太阳能通过一定的方式将热能输出利用,这就是太阳池的基本原理.可以看出,太阳池是用整个水面吸收阳光,因而可做到大规模利用太阳能.又由于池水的热容量很大,那么太阳池就会具有长时间的贮热能力.

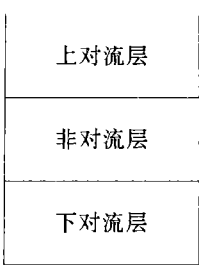


图1 太阳池结构示意图

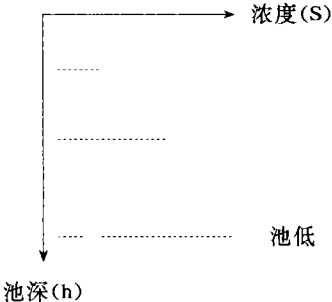


图2 太阳池中浓度分布

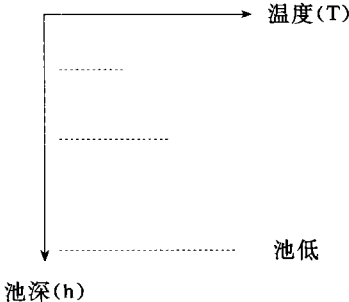


图3 太阳池中温度分布

太阳池的用途^[4-8]

太阳池发展至今,它的应用研究取得了令人鼓舞的成果,归纳起来有如下几个方面:

1 太阳池发电.

利用太阳池发电,是太阳池开发研究中最具诱惑力的方向之一.由于科学家们的多年努力,一种在低温下运行的朗肯(Rankine)循环发电机已经出现,这为用太阳池发电提供了可能性.1979年以色列第一座功率为150千瓦的实验性英·博克克(Ein-Boqek)太阳池发电正式运行,并对周围旅馆提供电力.1984年5月,以色列25万平方米的贝特·哈阿拉瓦(Beit-HaAraba)大型太阳池,用10兆瓦的朗肯循环发电机发了5兆瓦电,1984年7月正式并网供电.到2000年,靠太阳池以色列将生产200万千瓦电力,而目前以色列电力生产总计才270万千瓦,可见太阳池发电会对电力工业作出巨大的贡献.美国得克萨斯州UTEP太阳池也成功地发电,突尼斯利用sebkha mokmn盐湖建造的太阳池,每年可提供约6亿千瓦小时电能,美

国能源部计划到 2000 年太阳池用于发电将占当年美国计划电力生产总量的 7.2%。

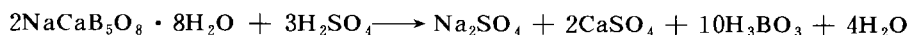
2 太阳池在盐生产中的利用.

2.1 制盐:利用太阳池为晒盐或制盐提供热量是最明显的优点,能大大提高盐田单位面积产量和质量.通常的盐生产是在开式的浅池中利用太阳能使水分蒸发而进行的.由于浅池内温度接近大气温度,当盐溶液很浓时,只有在气候很干燥的时候才能使水分继续蒸发,因此盐析出很慢,并受气候限制,使一年的产期缩短.如果采取太阳池和普通的开式池接合,便可利用太阳池底 70—100℃ 温度浓缩加热,然后在一个低压容器中脱水,从而使盐结晶析出.此方式可提高盐田单位面积产量二倍.如澳大利亚拉费顿,有 1000m² 的两个太阳池用于制盐工业.

2.2 生产氯化钾:钾是地壳中藏量最丰富的元素之一,98% 商业氯化钾产品是从原矿、天然盐湖、海水中提炼得到的.利用太阳池从卤水体系中制取 KCl 的工作已有应用实例.目前世界上 KCl 产品中约 3% 是利用太阳池生产出来的.例如,以色列将盐湖卤水简单地泵入太阳池蒸发,然后在控制条件下浓缩和沉淀生产 KCl.通过太阳池的应用来改进这一方案已在一项专利中作了介绍.

2.3 生产硫酸钠:许多富含硫酸钠的矿床和湖泊,其典型成分是十水硫酸钠、氯化钠、泥土和其它不溶物质.为得到氯化物含量低于 1% 的工业纯硫酸盐,通常采用分馏结晶法.太阳池可直接用作沥滤的热池.在池底铺一层矿料,其上覆盖一层水,通过机械搅拌在环境温度下形成溶液.这种溶液可用来建立起太阳池的梯度.当太阳辐射加热池底,并接近十水硫酸钠相变的起始温度 32.4℃ 时,便生成很浓的溶液和无水盐.将这些浓溶液抽送到结晶器中,制得硫酸钠.阿根廷西北部 1980 年已建成一座太阳池总面积为 4000 米² 的小型工厂,成功地运行至今.

2.4 生产硼酸钠和硼酸:将主要成分为硼砂和泥土的矿石粉碎后,溶解与热循环溶液流出溶解器经筛滤后送到稠化器中,然后进行硼酸钠结晶,经干燥或脱水即得到最终产品.在这种情况下,太阳池的利用与前述生产硫酸钠的方法类似.在高于 60.8℃ 的温度下十水硼酸钠经脱水成为五水硼酸钠.在阿根廷,生产硼酸是利用钠硼解石与硫酸在水状介质中反应获得的,反应方程如下:



将太阳池应用到该生产工艺中获得成功.

3 太阳池在化工生产、其它工业中的应用

例如生产 KNO₃(化肥)和 NaHCO₃,它的反应物和反应方程分别是:



这两种反应都需要在 50—70℃ 之间进行.太阳池中正好达到这样的温度,待反应完后,再利用环境或夜间的低温将 KNO₃ 和 NaHCO₃ 析出.

太阳池用于 KNO₃ 无机肥化工生产的实验性研究已在西班牙获得成功.西班牙建立了一个太阳池.太阳池池底由固态盐混合贮热层和混合盐溶液的梯度层构成,采用 Zangrand 技术建立梯度.用该太阳池首先从硝石中获得 NaNO₃,再将 NaNO₃ 与 KCl 混合,并溶于水,用太阳池制得 KNO₃,实验获得成功.太阳池还可应用于湿法冶金生产中,如间接生产供热,太阳池作为矿物溶解池,太阳池作为化学反应器等均有报道.

4 太阳池供热

太阳池以较低的成本提供大量热能,又具有较长时间的贮热能力.因此,如把太阳池收集到的热能用于房屋的供暖,既合理又经济.因为既使遇几天甚至几周的阴雨天气都不至于影响

太阳池的供热能力,这是其它太阳能供热系统很难做到的.若加大下对流层的厚度,太阳池可具备跨季节性贮热能力,即可把夏秋季收集到的能量留至冬季使用,这更是其它太阳能供热系统不可能实现的.由于房屋供暖所需的能耗是十分可观的,所以太阳池的这一应用尤为值得重视.1975年,美国科学家拉伯尔和尼尔森曾作了太阳池用于建筑采暖的经济研究,表明是可行的.例如,美国迈阿密斯堡 2000 米²的太阳池用于给游泳池加热,Miamisbury 太阳池是向一个游泳池和一个旅游楼供热;Wooster 太阳池是向一个温室供热;Albuquerque 太阳池向一个农舍供热;Flagstaff 太阳池向一个 1500 米²的仓库供热.美国的俄亥俄州,依阿华州,伊利诺斯州等地方都已将太阳池用于温室供热.

5 太阳池在农业生产上的应用

太阳池对于满足农业上的低温热能需求是一种理想的方案,用来给温室农业加热在国外已有大量报道.除此之外,太阳池在农业上的应用大致有以下几个方面 (1)谷物干燥:在农业地区,谷物收获后,为避免谷物霉变,几乎要进行连续不断的干燥.在多哥已建具有这种用途的太阳池.(2)棚舍加热:棚舍采暖是太阳池的又一种应用,美国伊利诺伊大学最近建造的 2000 米²的太阳池,为一幢密闭式猪舍加热.印度班加罗建造一个太阳池为一座鸡蛋孵化定供热.(3)生产工艺加热:太阳池可为农产品加工提供热水.例如,在得克萨斯州埃尔帕索运行的太阳池,为邻近的粮食加工厂提供加工用热.太阳池还可用于农业有机肥,沼气等的生产中.可见太阳池极有希望应用于农业系统的许多方面.

太阳池的建造和运行^[9-12]

3.1 太阳池场地选择

太阳池稳定运行相关的自然因素较多,选择建造太阳池场地时,主要考虑影响较大的因素:(1)太阳能资源:太阳能资源的丰富与否取决于日照时间的长短以及太阳辐射的强弱.应选择年有效日照时间长,辐射强度大的区域.(2)盐资源:太阳池是具有一定浓度梯度的盐水池,池内的主要工质是盐,一般说,盐的费用约占建池总费用的 30%左右.因此,在产盐区建造太阳池是很为适宜的.(3)气候条件:太阳池是一种露天蓄热装置,它的运行状况易受外界气候条件的影响.首先是降水量过大会对太阳池表面的稳定性及对内部的浓度梯度产生影响;其次是风力达到一定程度,将会对大型太阳池的稳定性产生影响,使太阳池水表面产生波动甚至波浪,从而扰乱整个池水的稳定性,破坏太阳池的蓄热能力;再者气温如果偏低,达到冰冻条件,且持续时间较长,则会使太阳池表面结冰,造成透过率降低,从而减弱太阳池的蓄热能力.(4)地下水文地质状况:主要考虑地下含水层的情况,要求地下水位低,土壤力学性能好,不易渗漏的地域等.

显然,这些条件常常是相互矛盾的,只能综合考虑.我国太阳池研究者(如北京师范大学的李申生教授,广西大学的蒙沛南,深圳大学新能源研究所的王义方),通过综合考虑,相互比较,认为青海省有众多的盐湖和丰富的日照资源,雨季少,是我国建太阳池最理想的地域之一.而青海省内察尔汉又是建太阳池较理想的区域.

3.2 太阳池的结构

最简单的盐液池是用土围成或挖成.为了防止盐液渗漏,可以衬砌.一般来说,在美国,小池用土工薄膜防渗漏要比用粘土衬砌更适宜.如果是大池,尤其是建在不透水层上,或者是建在盐泡沼泽上的,因下层基本为盐水饱和,不必衬砌.如果渗漏量小,当地条件允许时也可以不

衬砌。但是,运行成功的太阳池大多都有衬垫,池底通常用黑色衬底,致使到达池底的太阳辐射全部被吸收。例如:(1)以色列 6250 米² 的英·博克克太阳池是用约 1 毫米厚的 EPDM(单分子乙烯丙基二烃)人造橡胶做衬垫材料(每平方米约 8 美元),衬垫需用封焊法焊接,整个焊缝区要仔细检查,不能有漏孔,铺设这种衬垫,地面需经精心地平整。(2)以色列贝特·哈阿拉瓦 25 万米² 的太阳池选用的是用聚乙烯塑料作成的三明治式衬垫。具体是在平整好的地面上铺设好第一层塑料,然后铺上约 10 厘米厚的土,夯实后再铺第二层塑料,上面再加上土并夯实,即作为太阳池的底面。接缝处留重叠部分的搭接方法。这是在四个 1600 米² 的太阳池中做实验选择出的最好方法。实践表明,这种衬垫效果很好。(3)美国墨西哥大学的一个半实验性规模的太阳池,池底铺上聚脂和泡沫隔热层,再装上厚 30 厘米的一层氯磺酰化乙烯合成橡胶衬里,运行良好。

太阳池的结构还要注意热能损失。造成热能损失的因素较多,但最主要的途径是地下水,此外,所谓的“边角效应”也是明显影响小太阳池吸收和储存太阳能效率的重要因素。为了防止地下水运动带走热量,可以采取工程措施,如池底加绝热层,或者盐价便宜可以增大池深,足以形成温度梯度稳定的绝热层。为了降低边角效应,小太阳池将围墙上半部做成垂直形。

3.3 太阳池梯度分层构造的建立和保持

太阳池所以能起到收集储存太阳能的作用,关键在于有一个稳定的盐密度梯度分层构造,尤其是起绝热作用的非对流层,一定要保持足够的动态稳定。建立稳定的分层构造,首先从充液开始,一般是分层充液。分层充液的方法也根据地域条件而定,可以是先充水,然后向里面倒盐,用泵搅动溶解后,向上层充淡水,在盐水层和淡水层间最终会因盐份传输增长达到平衡,形成一个稳定梯度层。有盐水的地域,直接用不同浓度的盐水注入池内,形成盐梯度层。建立太阳池梯度层,到目前,比较成熟的技术是 Zanggrando 技术。其步骤是先用含盐量高的盐水注入池中,然后通过一个置于浓溶液中恰当定时扩散器注入淡水,随着淡水注入,扩散器上方的盐水逐渐稀释,扩散器随水而上升,当扩散到水面时,此水面也正好是池的最终水面。

如死海附近的英·博克克太阳池和贝特·哈阿拉太阳池都是将死海水经与淡水混合成不同浓度后,注入池内,形成盐梯度层。建立盐梯度层后,在运行中,要保持其梯度的相对稳定性。一般方法是:底层补盐和表层冲淡。向太阳池加盐方法也很多,常用的是一个储盐罐,在它的底部有一个入口,罐内装满盐,用泵将太阳池底的盐水抽出,通过罐底进口分布管,使水流在罐内向上运动,并被盐饱和,然后再从罐顶部溢流口经另一个管回流到太阳池底。表面则冲淡换水,以保持盐梯底层。在运行时,设计合理的抽水器和扩散器,按置在池合理的位置,经以色列和美国等大中型太阳池的运行证明此方法是可行的。

3.4 提高太阳池热效率

第一:要严防污物沉淀。因为池水被污染之后,不但变浊,透明度下降,减少吸光性能,而且这些污物还会造成水生物如藻类滋生,不但影响透光,还要吸收光能。一般沙粒和灰粒大到一定程度,会很快下沉到池底。对太阳池运行没什么影响。但是,如果下沉很慢,或者将池液染色(如某些树叶),或者将池液变成胶体(如某些细粒粘土),就会给太阳池运行带来麻烦。在梯度层内的污物处理是用抽水器将污层抽出,经过滤后返回到原水层位置,这个方法与修复梯度层的方法类似,经试验取得成功。

第二:抑制水生物滋生。盐水池中有各种藻类活跃着。如何灭藻,曾有很多方案,如俄亥俄州大学太阳池采用的是在太阳池内加百万分之几的硫酸铜,获得成功,但后来,生物滋生再次出现,为此又添加硫酸铜,结果完全失效,这些硫酸铜均沉入池底,最后,加盐酸才使其保持溶

解状态. 在英·博克克太阳池, 成功的灭藻方法是“稀释冲击法”, 这种方法实质是过量冲洗表面. 生长在表面的藻类, 适应了一定的盐浓度, 当用淡水大量冲淡表面时, 藻类受渗透冲击, 失去浮力沉于池底, 被高温杀死. 另外, 在藻类繁殖期前夕, 加入适量的无毒硫酸钙, 以降低藻类浓度. 若池水略显酸性 $\text{pH}=5.5$ 微生物不易生长, 灭藻工作量不大.

第三: 控制风的混合效应. 风的作用对储热不利, 因此防风是一件大事. 对于小太阳池: 俄亥俄州200 米²曾装设了一个消浪格栅, 它是由标准的 L 型聚氯乙烯管装成, 管外径 3.4 厘米, 封闭, 彼此绑在一起, 形成浮排, 并固定在池边的桩柱上. 试验表明, 用这种方法方便、经济, 是可以达到消浪的目的. 对于大太阳池: 在以色列英·博克克和贝特·哈阿拉瓦大型太阳池上, 用阻尼网控制风效应. 网用黑色聚乙烯组成 10×6 平方厘米十字形排列, 四周固定在太阳池周边上, 这可以认为是较好的办法.

3.5 太阳池中热量提取法

太阳池中热提取一般有两种方法: 一种是直接提法, 是将太阳池中下对流层最热的热盐水提取出来, 通过池外的交换器放出热量, 用于生产和生活, 待溶液冷却后再送回到太阳池中去. 这种方法结构简单, 效率高, 到目前为止, 世界上许多大太阳池都采用这种方法. 如美国俄亥州迈阿密伯格太阳池, 以色列的英·博克克太阳池和贝特·哈阿拉瓦太阳池, 均采用直接提热法. 具体方法是: 在池的两侧相对位置处安装抽水器和扩散器, 也可以在池的同侧放置热水器和冷水返回器, 在同一侧放置时可节省大量的管道. 为了消除对池的扰动效应, 可以在池中架设两边打孔并带翅的聚乙烯管来抽取热盐水的方法. 另一种是间接取热法: 是在池中架设热交换器, 通过载热剂间接的将热量取出来, 载热剂一般用水. 热抽取点要选在梯度层下边界以上一个短距离, 以利从整个底层(即下对流层)抽热.

太阳池的主要理论介绍^[13-18]

4.1 太阳池浓度和温度分布性质

在太阳池的动态运行和静态研究过程中, 随时掌握太阳池中的温度和浓度分布, 是太阳池维护过程中最基本的环节, 也是使太阳池供热与负载达到最佳匹配所应获取的最基本数据. 一般说来, 太阳池的动态提热和其它参数的改变, 均会对太阳池的温度和浓度分布产生影响.

太阳池中盐溶液浓度的变化, 基本原理都建立在太阳池中热稳定条件和盐扩散方程的基础上. 梯度区的盐扩散可用一维扩散方程描述:

$$\Gamma = A \times D \times dS/dZ$$

式中 Γ 是盐扩散流量 $\text{kg}/\text{日}$; S 是池中的浓度 kg/m^3 ; Z 是池深(从池面算起); A 是池深 Z 处的池截面积; D 是盐扩散系数 $\text{m}^2/\text{日}$; 扩散系数 D 随温度变化关系式为:

$$D = 1.2 \times [1 + 0.29 \times (T - 20)] \times 10^{-4}$$

梯度区的盐浓度分布:

$$S(Z) = S_1 + (\Gamma/C) \times \{1/(a + b) \times [1/(Z_1 - a) - 1/(Z - a)] + 1/(a + b)^2 \times \ln[(Z_1 - a)(Z_2 + b)]/[(Z - a)(Z_1 + b)]\}$$

其中 Z_1 和 Z_2 分别为上、下对流层与梯度层的交界坐标; S_1 和 S_2 , T_1 和 T_2 分别为上对流层和下对流层的盐浓度和温度值.

在太阳池中, 温度分布可用具有内热源的一维导热方程进行描述:

$$T = T_a + 1/K \times Hb\delta \ln\delta + 1/k \{PHb[\ln(x_0 \cos \gamma) + 1] - (T_d + T_a)/(D_1/K_1 + D_g/K_g)\}x - (1/K)PHbx \ln x$$

其中 K 为盐溶液热传导系数; T_a 、 T_d 分别为环境温度和下对流层温度; P 为太阳辐射中直射和散射进入水面份额的加权系数; H 为池面太阳辐射强度. x_0 、 b 为常系数; δ 为太阳池上对流层厚度; D_i 和 D_g 分别是池低和地下土壤厚度; K_i 和 K_g 分别是它们的导热系数; γ 为太阳辐射的平均倾角.

4.2 太阳池盐梯度稳定性

为了防止在太阳池的梯度区内发生对流, 梯度区的盐浓度作为温度的函数, 需要按照一定的规律随深度而增大. 如果在梯度区内某一小层中的盐浓度梯度小于所需要的值, 则梯度区的不稳定性就会首先在此层中以振荡的形式出现, 继而发生局部对流, 并形成内部对流层. 这种由梯度区中内部对流层的形成和扩展所引起的大量热损, 将会极大地影响太阳池内部的温度分布, 从而使太阳池的正常运行遭到破坏. 为保证太阳池稳定运行, 必须满足下式条件:

$$dS/dZ \geq -1.14(dP/dT)(dT/dZ)/(d\rho/dS)$$

其中 S : 盐水密度 (kg/m^3); ρ : 盐水密度 (kg/m^3); Z : 梯度层厚度 (m); T : 盐水温度 ($^{\circ}\text{C}$). 实践表明, 使太阳池稳定运行, 梯度层中应保证盐浓度梯度 dS/dZ 比上式求得的高. 从 1978 年, Nielsen 等致力于太阳池中非对流区和上下对流层之间的边界层的稳定性研究, 给出了保证上下边界层稳定的经验式:

$$\log G_s = 1.36 + 0.66 \log G_T$$

或 $1.56 \log G_e + 2.78 = \log G_T$

其中, G_s 是指边界层上的盐密度梯度 (kg/m^4); G_T 是指边界层上的温度梯度 ($^{\circ}\text{C/m}$); G_e 是指边界层上的比重梯度 (比重变化/ m).

Nielsen 认为, 边界层一般来说是移动的, 其移动方向与梯度层中的温度和密度有关, 并得出结论: “在上下对流层的盐密度和温度一定的情况下, 太阳池中的非对流层有一个十分稳定的确定的平衡厚度.” 所谓平衡厚度指太阳池梯度层两端保证一定的温差 ΔT 时必须具有的最小梯度层厚度.

另外, 以色列的太阳池研究人员, 在长期的实践工作中总结了一个大致判别太阳池稳定与否的简易方法, 即考察在盐梯度层两端的密度 ($\Delta\rho$) 和温度差 (ΔT) 的关系. 以 MgCl_2 为主的盐水作介质, 当 $(\Delta\rho/\Delta T) \geq 2$ 时, 太阳池即处于稳定运行状态. 对于 NaCl 盐类大型太阳池的稳定充分条件 $(\Delta\rho/\Delta T) \geq 2.5$.

太阳池其它技术^[19-23]

太阳池技术一般是指盐梯度太阳池技术, 除此之外, 还包括隔膜分层太阳池 (广称胶体太阳池)、蜂窝太阳池、潜热太阳池、全饱和型太阳池和无盐太阳池等技术.

5.1 隔膜分层太阳池 (胶体太阳池)

Wilkins 的研究指出, 具有较好光学特性和隔热性的透明聚合物胶体, 可用于太阳池以代替非对流盐梯度层, 作为太阳辐射体和隔热体. 这种胶体应满足下列原则: (1) 能透过可见光, 在整个太阳光谱区吸收率极低. (2) 在聚合作用前可溶于冷水, 但聚合后不溶解. (3) 粘度高. (4) 相对于 100°C 或更高温度的热盐溶液其物理与化学性质都是稳定的. (5) 在池温范围内比热高, 体积膨胀率低. (6) 有惰性但无毒. (7) 在用生物方式或借助紫外辐射重复冻结—融化循环时不会降解. 除此之外, 机械强度好和结构稳定也是所希望的特性. 这种聚合物凝胶导热率低, 并以近似固体的状态被使用, 所以不会发生对流. Wilkins 等人 1980 年在新墨西哥大学完

成了凝胶池的首次实验. Taga 等人进一步研究了这种太阳池, 结果表明, 隔膜池是可行的. 适用于提供民用能源, 抑制对流的最合适增稠剂是一种离子化聚丙烯酰胺溶液. 在胶体太阳池领域, 迄今进行的工作表明, 从技术和经济观点看, 有着远大的前途.

4.2 蜂窝太阳池

最初的设想是应用蜂窝解决盐梯度太阳池的问题, 是一块浮于池贮热水层上的密封充气蜂窝板, 在蜂窝尺寸与空气层表面和底面温度相匹配的情况下, 蜂窝行列能够使该空气层保持稳定, 无对流. 这一空气层既透过太阳光, 又提供了良好隔热. 利用蜂窝结构减少平板集热器盖板的热损失的实例已经很多. Sharma 研究表明, 用 0.0125×0.0125 米的孔尺寸, 深 $0.12-0.17$ 米的薄壁(例如: 热塑聚碳酸酯)蜂窝行列对太阳池而言效果较好. 一个设计合理的蜂窝行列的太阳池, 池效率可以是常规盐梯度太阳池的两倍.

5.3 潜热太阳池

太阳辐射强度随季节性的变化, 使得太阳池底部的温度变化很大. 在夏秋季, 池底温度较高, 对环境热损失较大. 因此, 需要寻找一种方法, 既能使太阳池充分蓄热, 又能使池底温度达到提热要求后保持近似恒温的状态. Nielson 提出了利用水合盐类相变材料来提高太阳池蓄热能力, 这种方法蓄能密度高, 蓄热或提热时温度波动幅度小.

5.4 全饱和型太阳池

太阳池稳定性的基础就是利用一定的盐浓度梯度所形成的密度梯度, 来抑制或消除一定温度梯度所形成的逆密度梯度. 如能在这两个梯度之间建造一种纵向各层都处于饱和状态太阳池, 即可进一步抑制和消除由于盐浓度的变化而形成的盐扩散, 从而保证太阳池更高的稳定性. 由于全饱和型太阳池的各层盐水溶液均处于饱和状态, 故由高饱和浓度层(底部)向低饱和浓度层(顶部)的扩散只能带来同步等量的结晶盐回沉, 从而形成一个自平衡体系. 因此, 在全饱和型太阳池中并不存在盐的定向净扩散, 其盐浓度分布仅由温度分布所决定. 但这种太阳池尚处于理论探讨阶段.

5.5 淡水太阳池

在淡水池上利用低成本的浮式集热器主动地吸收太阳能, 具有长期贮热能力, 是一种新型太阳能平板集热器和贮热器. Sokolov 等建了一个实验性淡水太阳池, 整个池底和壁用一层厚度适中的塑料薄膜覆盖, 隔热材料(泡塑)板浮在充满淡水的池面上. 板上放置多孔水管, 其上用黑色塑料膜覆盖. 用透明塑料薄膜密封全池, 形成一空气隔热层, 为维持该层气压, 用一台低压(15mm 水压头)鼓风机. 在太阳辐射期间, 水泵通过池底入水管将水吸入, 由多孔水管将水均匀喷洒在吸热器表面上, 然后水由漂浮板之间的缝隙再回流池中. 在太阳辐射很低或没有辐射时, 不再泵水, 空气层和隔热浮板将起到隔热作用. 能量的提取是由泵从上层池水中抽取热水, 利用后在由池低的回流管回流到池低. 漂浮集热器式太阳池为太阳能利用提供了一种新的设计思想. 这种太阳池也处于机理探索阶段, 迄今未建成实用性淡水太阳池.

国外太阳池研究和应用情况^[24-27]

太阳池的研究和应用, 在国外已到了相当广泛的程度. 以色列、美国、日本、印度、西班牙、澳大利亚和阿根廷等国的太阳池研究和应用已有相当的规模. 但是, 三十多年来, 以色列的太阳池技术一直处于世界前列. 这里着重介绍以色列太阳池的研究和应用, 同时简单介绍一些美国、日本等其它国家的情况.

以色列太阳池最初在 1959 年—1963 年在死海边上建了两个小型太阳池,主要研究了用制盐剩余母液建立盐梯度池的可能性及从底层抽出一薄层热水而不致扰乱临近水层的实验,获得成功,最高池底温为 96°C 。1975 年后,太阳池的研究工作被列为以色列的重点项目。1975—1976 年在死海边用废料建的 1100 平方米太阳池,池底温度达到 103°C 。1977 年,以色列科学基金会与 Ormat 发电机公司组建了一家专门研究太阳池发电的公司—Solmat 公司,以该公司为核心,组织研究太阳池发电项目。从 1977 年,在死海南端建造并成功运行了一个 6250 m^2 的大型太阳池,称英·博克克(Ein-Boqek)太阳池,建池所需的浓盐液直接取自死海。死海水经与淡水混合成不同浓度后,注入池内,形成盐梯度层。该太阳池于 1979 年与郎肯(Rankine)循环发电机配用,发电 150 千瓦,并向周围供电获得成功。英·博克克太阳池在当时是世界上最大的太阳池。此池运行成功说明了预期的大型太阳池运行中的所有困难都是可以克服的。该池的运行还总结了许多经验,如池低衬垫技术,斜墙效应,地下水对池热损影响程度,水的清洁度对池的影响及处理方法,控制风的混合效应,大型太阳池的储热能力等。为以后建超大型太阳池积累了宝贵的经验。

在英·博克克太阳池发电成功的基础上,以色列当局同意投资建造一个更大规模的太阳池,其面积为 100 万 m^2 ,为了减少风险,这个项目分四步走:(1)首先在死海边上建了 4 个表面积为 1600 m^2 的池子,以试验衬垫方法等,总结出了用三明治式的池底衬垫是最合适的,接缝处留重叠部份的搭接方法可用于大型太阳池。(2)然后,建一个 4 万 m^2 的太阳池,池深 4.5 米,1982 年 6 月开始向池内充盐液,建立盐梯度层,到 8 月完工,1983 年 4 月,池底最高温度已达 102°C ,配套安装了日本三菱公司的 2.5 兆瓦涡轮机和 Ormat 公司的郎肯(Rankine)发电机。并进一步试验大型太阳池表面如何控制风的影响,研究大型池盐梯度的建立和保持技术,试验从池的同一边抽取热盐水和返回冷盐水,灭藻方法及 Rankine 循环发电机系统等,摸索完善大型太阳池运行技术。(3)在这基础上,动工建迄今为止世界上最大的太阳池—贝特·哈阿拉瓦(Beit-HaAraba)太阳池。该池原定 25 万 m^2 ,因利用天然地形,池表面形状不规则,实际面积为 21 万 m^2 。池深 4.6 米,池底铺设三明治式衬垫,将混合到一定密度的死海水注入到池内设计高度,建立梯度层,底部密度为 1230 kg/m^3 ,表面层密度 1040 kg/m^3 ,整个底部储热容量达 75 万 m^2 。对梯度层受扰后的修复,在该池上使用了“重新分布法”,即用 Y 形抽水器从梯度变化了的那一层上抽出盐水,混合后注入到原梯度层去,这个方法是成功的。该太阳池配备了从美国通用公司购进容量为 10 兆瓦的发电机。整个发电厂的电力控制系统,数据处理系统,测量系统等十分完善。1984 年 5 月开始发电,电峰值达 5 兆瓦,1984 年 7 月正式并网供电,全年供电 $5500-6000$ 小时,占当地总电力的 56% 。这是当今太阳能热利用中发电量最大的一个电厂。(4)在 25 万 m^2 池子旁边留出足够的土地,正在建更大面积(100 万 m^2)的太阳池。以色列太阳池研究的历史和成功运行大型太阳池的经验,很值得借鉴。

美国的太阳池研究始于七十年代初,1975 年美国俄亥俄州立大学建了一个太阳池,表面积为 350 m^2 ,深 2.5 米,该池着重用于理论研究,如太阳池不稳定性因素及有关参数等。美国新墨西哥大学建的直径为 15 米的太阳池,于 1980 年 6 月 23 日,池水沸腾,测到的最高温度为 106.5°C ;又于 1980 年建了一个半实验性规模的胶体太阳池,池底铺上聚脂和泡沫隔热层,研究了胶体太阳池的可行性。现在新墨西哥州的拉斯—克赛斯已建了一个商业规模的胶体太阳池,从该池得到的能量用作一家食品公司的生产用热。另一个太阳池(400 m^2)在当地的一家出版公司施工。1981 年美国田纳州建了一个池表面积为 4000 m^2 的太阳池,深度 3 米,运行良好。1986 年 6 月美国得克萨斯州的 UTEP 太阳池开始连续运行至今,并成功地示范了利用太

阳池提供工业用热,发电及海水淡化.美国正在南加利福尼亚州 Salton 海建一个巨型太阳池.突尼斯利用 Sebkhah Moknine 也建了一个大型太阳池,每年可提供约 6 亿千瓦时电能.在美国俄亥俄州、衣阿华州、伊利诺斯州等已将太阳池用于温室供热.美国能源部计划到 2000 年,美国太阳池发电将占美国计划电力生产总量的 7.2%.

日本许多地方(小笠原、筑波、熊本)都建有实验性太阳池,对盐梯度太阳池的性能和运行等进行了研究.印度在曼哥罗建的表面积为 560 米² 太阳池,自 1984 年始运行正常.印度班加罗尔正在建一个为鸡蛋孵化室供热的太阳池.西班牙建了用于化工生产的太阳池,用于生产钾肥(KNO₃),获得成功.澳大利亚、阿根廷等许多国家都建有实用性的太阳池.

我国太阳池的研究现状^[28-36]

我国也对太阳池进行了一些研究,但迄今仍处于太阳池理论和机理的探索阶段.北京师范大学物理系太阳能课题组,在李申生教授的领导下,开展了以下几方面的工作:(1)盐梯度太阳池内部稳定性的研究.(2)太阳池中盐浓度的测定方法.(3)卤水太阳池的透过率.(4)全饱和太阳池和潜热太阳池.讨论了建立自平衡体系的全饱和太阳池模型,并进行了计算机模拟,对潜热太阳池的材料进行了针对性研究.(5)对我国建太阳池的区域进行了初探.另外,北京师范大学物理系与连云港市太阳能研究会及江苏省工业制盐研究所合作,进行了中型太阳池理论,运行机理等基础性工作.

广西大学物理系太阳能研究组于 1988 年建立了一个采光面积为 20 米²,深为 1.5 米的圆形太阳池,底层直径为 2 米,分别以 NaCl 和 MgCl₂ 为工质,采用人工配制不同盐浓度溶液分层灌池的方法,建立梯度层,进行了以下几方面的研究工作:(1)太阳池的最佳浓度梯度层和最大能量收益.结果表明建立较深的梯度层更为有利.(2)太阳池梯度区温度分布研究.(3)太阳池梯度区浓度分布的研究.从理论上解释了这类太阳池梯度区的浓度分布非线性问题.(4)太阳池的盐扩散研究.讨论了盐扩散对池内浓度分布的影响,并计算了该池的盐扩散流量,发现其数值随季节变化.(5)太阳池温度和浓度分布的计算机拟合.另外广西大学与合浦县竹林盐场合资建造一个采光面积为 500 米² 的中型太阳池,拟用于化工生产和水产品越冬养殖.若此项工程成功,将是我国第一个应用性太阳池.

深圳大学新能源研究所的王义方,对太阳池的有关参数、贮热性及太阳池经济可行性等进行了探讨.甘肃省自然能源研究所的毛荫秋,曾对非对流型盐梯度太阳池的稳定条件进行了探讨.从上述情况看,我国太阳池研究处于理论和运行机理等基础性阶段.太阳池是一个实用性技术,尽快开展太阳池应用研究,是发展我国太阳池的着重点.另一方面,我国盐湖太阳池的研究迄今没有开展,这与国外大力发展盐湖太阳池应用技术的情况很不相称.因此开展盐湖太阳池的应用性研究是十分重要的.

参 考 文 献

- [1] 任文明,谷玉文,实用能源,1990,4:33.
- [2] 蒙沛南,郑宏飞,广西节能,1991,1(4):20.
- [3] 陆一,石豪,新能源,1990,12(11):14.
- [4] G. Lesine and L. Saravia, Solar Energy, 1991,46(6):377.

- [5] S. B. Idso, *Solar Energy*, 1984,33(2):147.
- [6] J. R. Hull, *Solar Energy*, 1986,36(6):551.
- [7] 杨如陵等, *新疆化工*, 1990,1:15.
- [8] 秋实, *新能源*, 1989,11(3):24.
- [9] A. Akbarzadeh, *Solar Energy*, 1989,43(1):17
- [10] K. Y. Kimzo, et al. , *Solar Energy*, 1991,46(6):353.
- [11] F. Collade and P. Lowrey, *Solar Energy*, 1991,46(6):361.
- [12] E. Wilkins, *Solar Energy*, 1991,46(60):383.
- [13] H. Tabor, *Solar Energy*, 1981,27:3.
- [14] P. D. Lund, *Solar Energy*, 1984,33:237.
- [15] R. H. John, *Solar Energy*, 1989,43(1):57.
- [16] G. A. Bemporad, *Solar Energy*, 1992,48(6):375.
- [17] D. Subhakar and S. S. Murthy, *Solar Energy*, 1993,50(4):307, (3):275.
- [18] H. Rubin and B. A. Benedict, *Solar energy*, 1984,32:771.
- [19] J. R. Hull, *Solar Energy*, 1986,36(6):551.
- [20] J. F. Atkinson, *Solar Energy*, 1984,34(2):163.
- [21] R. Schaefer and P. Lowrey, *Solar Energy*. 1992,48(2):69.
- [22] A . Vitner and R. Reisfeld, *Solar Energy*, 1984,32(5):671.
- [23] H. Z. Tabor, *Solar Energy*, 1990,4:4.
- [24] J. Gonzalez and L. R. Perez, *Solar Energy*, 1992,48(4):261.
- [25] M. C. Tleimat and E. D. Howe, *Solar Energy*, 1989,42(4):339.
- [26] R. Prasad and D. P. Rao, *Solar Energy*, 1993,50(2):135.
- [27] 李申生等, *太阳能热利用导论*, 高等教育出版社, 1989.
- [28] 李启旺, 李申生, *北京师范学院学报*, 1990,11(3):10.
- [29] 张审, 李申生, *北京师范学院学报*, 1990,11(3):16.
- [30] 莫珍, 陆维德, 李申生, *太阳能学报*, 1992,13(1):53.
- [31] 蒙沛南, 郑宏飞, 洪军, *新能源*, 1992,14(2):1.
- [32] 郑宏飞, 蒙沛南, 周科, *太阳能学报*, 1992,13(4):354.
- [33] 郑宏飞, 蒙沛南, *广西大学学报*, 1991,16(4):36.
- [34] 王义方, *太阳能学报*, 1987,8(4):333.
- [35] Y. F. Wang, *Solar Energy*, 1982,29(6):557.

Solar energy utilize of salt lake—Solar pond

Li Jicai

(*Qinghai Institute of Salt Lakes, Academia Sinica, Xining 810008*)

ABSTRACT

This paper is a detailed summary including general principle of solar pond, many uses of solar pond. building and working of solar pond, main theories of solar pond, special techniques of solar pond, study and utilize of solar pond by internal and external.