

约是第一级的 $\frac{1}{5}$ 。在同样的地热水耗量时，双级闪蒸系统比单级闪蒸系统可提高出力 25~30%，但增加了汽轮机和系统的复杂性。经闪蒸获得的饱和蒸汽中所含腐蚀和结垢成分减少，有利于汽轮机的

维护保养。但饱和蒸汽在膨胀过程中易于增加湿度而析出水滴，对高速旋转的汽轮机叶片产生磨蚀的危害。由于地热水的热焓值很低，所需采集的流量大，不仅导致有关设备尺寸增大，而且将经受更大程度的结垢和腐蚀作用。

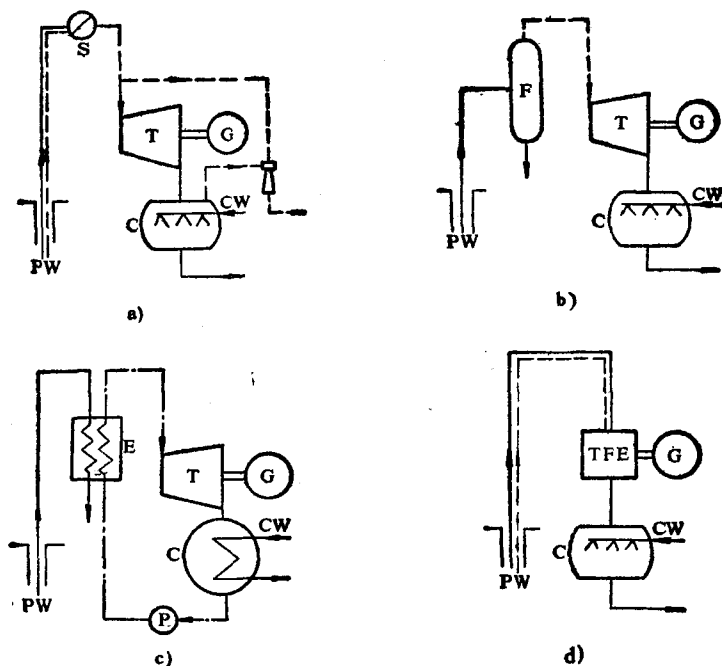


图 97-1 各种地热发电系统

a) 直接蒸汽法 b) 闪蒸法 c) 双工质循环法 d) 两相全流法 PW—生产井

S—分离器 F—闪蒸器 E—蒸发器 T—汽轮机 TFE—全流膨胀机

C—凝汽器 W—冷却水 P—循环泵 G—发电机 ----蒸汽

——水 - - - - -低沸点工质

97.2.3 双工质循环法(亦称中介介质法)

采用低沸点有机工质朗肯循环系统，极适用于中低温热水。热水通过蒸发器加热低沸点工质，如氟里昂、异丁烷、丙烷、氨等，使之蒸发为高压蒸汽，送入汽轮机膨胀做功，经表面式凝汽器凝结成液体，用泵再送回蒸发器，形成封闭循环回路，工质与地热卤水不接触，如图97-1c所示。其优点是地热水可保持在高于其饱和状态的压力，使溶解于水中的盐分和不凝性气体在管道系统里不分离出来。循环热效率较高，但对低沸点工质的防漏技术和汽轮机结构要求很高，而且配置的蒸发器相当庞大，以致造价较高。国外已成功应用的最低热水温度为85℃。

97.2.4 两相全流法

把地热汽水混合物全部通过一个缩扩喷嘴进行

膨胀，形成一股夹带微小液滴的高速两相气流，推动膨胀机，如图97-1d所示。这个转换过程的特点是避免了分离器或闪蒸器等设备的不可逆损失，把蒸汽的热能和液体的动能分别做功，以获得更多的净输出功率。由于机器部件直接与地热流体接触，故须特别考虑其结垢和腐蚀问题。有两种两相全流膨胀机正在研究开发中：

(1) 容积式螺杆膨胀机。适用于中低温和低膨胀比，运转时螺杆有“自洁”作用，可免除结垢。

(2) 旋转分离器涡轮机。由旋转分离器、水轮机和汽轮机三部分组成，适用于含水量超过80%的场合。试验证明，它的出力比单级闪蒸系统高15~20%。

97.3 地热电站的主要设备

97.3.1 汽轮机组

地热发电用的汽轮机结构基本上移植了常规火电汽轮机的技术,其主要特点是进口蒸汽温度低,约250~150℃或更低,同时对双级闪蒸系统汽轮机有低压蒸汽引进口。由于地热蒸汽的热焓低,导致汽流量大,机组尺寸大约是同功率常规火电汽轮机的3倍,所以功率在25MW以下的常采用单流式,在50MW左右的采用双流式,在100MW以上的采用多缸并列式。叶片的弦长和厚度都加大,以补偿由材料腐蚀疲劳所引起的叶片强度的下降。地热蒸汽在汽轮机通流部分膨胀过程中,在前几级易于析出盐分,形成结垢,引起堵塞,所以加宽叶片节距,以增大汽流通道的面积;在后几级,饱和蒸汽易于析出水滴,冲刷叶片,引起磨蚀,为此在汽缸设排水沟,并在动叶片的进汽边焊上硬质合金,以提高抗磨蚀能力。

97.3.2 闪蒸器(亦称扩容器)

闪蒸器是把地热水通过减压作用而蒸发成蒸汽的设备。其结构是一个大容器,地热水由喷嘴喷射进去,蒸汽通过多孔筛网引出。喷射出口速度控制在100m/s以下,可使蒸汽湿度小于0.05%。

97.3.3 分离器

装设在汽轮机进口前,以除去蒸汽中水分和夹带的颗粒等,并获得干度为99.9%以上的纯蒸汽。其结构一般采用旋流离心原理。

97.3.4 接触式凝汽器

对直接利用地热源的汽轮机组,其排汽不需回收,普遍采用接触式凝汽器,使排汽与冷却水直接混合。它具有效率高、压力损失低、尺寸小、结构简单和造价低等优点。考虑到地热水的腐蚀性,凝汽器的金属构件用不锈钢制成。其结构形式有两种,见图97-2。

(1) 淋盘式 圆筒垂直安装,冷却水由上分层往下淋,排汽由下而上反复穿过水帘。

(2) 喷射式 冷却水通过多个交错布置的喷嘴喷成雾状,以扩大与排汽的混合。其喷射压力往往利用冷却水塔的高位和凝汽器内真空之间的压差取得,不需另设水泵加压。

凝结水的排放可用气压法,即依靠重力向下排泄;或低位法,由水泵抽出。

97.3.5 抽气系统

地热汽中所含 CO_2 (约80%)、 CH_4 、 H_2 、 N_2 、

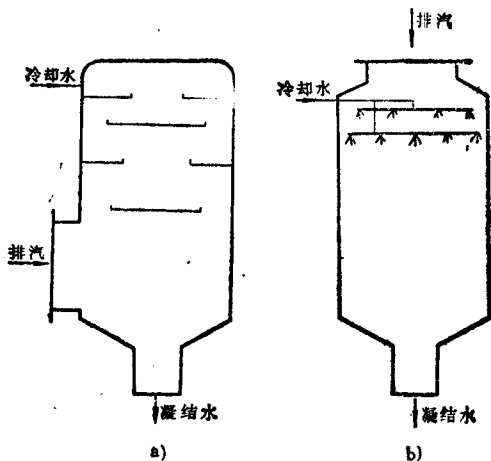


图 97-2 接触式凝汽器示意图

a) 淋盘式 b) 喷射式

NH_3 、 H_2S 等气体和冷却水中所含的空气,都在凝汽器中释出为不可凝性气体,少者约1%,多者可达10%以上,影响真空度,并降低机组的效率和出力,必须及时由抽气系统排除。一般采用蒸汽引射器抽气,见图97-1a。虽其结构简单,操作方便,但效率较低,所以只限于含气量少于2%的场合。当含气量较大,或操作蒸汽压力很低,不宜用引射器时,可根据容量大小选用往复式真空抽气泵、旋转容积式压缩机、离心式压缩机等。实践证明,在同样耗汽量下,以离心式压缩机取代引射器可提高出力5%。

97.4 地热电站的主要问题

97.4.1 腐蚀

地热流体中含有 CO_2 、 H_2S 等气体和氯化物、硫化物、硫酸盐等腐蚀性物质。酸性气体在干蒸汽里问题不大,如汽轮机的喷嘴和叶片采用含铬11~13%的合金钢制造就具有很好的抗腐蚀性能。但在湿蒸汽下,其腐蚀性就比较严重,如汽轮机的轴和汽封、排汽管和凝汽器内壁,都必须用不锈钢制成。由于镍对 H_2S 的腐蚀特别灵敏,所以受力很大的汽轮机轴所选用合金钢中应不含或少含镍,以防引起应力腐蚀。同样,地热流体在未渗入空气前,其腐蚀性低,通常可用碳钢或低合金钢,但渗入空气后,氧的极化效应使其腐蚀性剧增,所以循环冷却水系统的管道、泵等设备只能用不锈钢,甚至还要向凝结水注入氢氧化钠等碱性溶液以中和其酸度。在地热电厂潮湿环境下,铜及其合金对 H_2S 的抗腐蚀性

差, 常用漆、环氧树脂、镀锡等涂层进行保护, 甚至把继电器、控制器、开关等电气设备和仪表用封闭罩壳与散发到大气中的腐蚀性气体隔离。

97.4.2 结垢

地热流体含有碳酸钙、二氧化硅、硅酸盐等多种可溶性固体物质, 在减压和降温过程中, 按其各自不同的机理先后分析出来。除了被流体本身带走外, 一部分沉积在通道内壁形成结垢, 最后导致堵塞。在汽轮机叶片上的结垢使出力下降。在主汽阀或蝶阀式调节阀上结垢会造成卡死, 影响机组运行的安全可靠。现有地热电站普遍采用定期停机检查

和手工除垢措施。

97.4.3 环境污染

地热电站排放的地热卤水含有硫酸盐、碳酸盐、氯化物、氧化硅等化学物质以及钠、钾、钙、镁、铁、砷等元素, 其含量一般为1%, 有时达5~6%。此外, 还含有相当大的热量。冷凝式机组每10MW的排放量约80t/h, 背压式机组每1MW约25t/h。若直接排放在地面上会对环境造成严重化学污染和热污染。回灌是解决这种污染最有效和经济的措施, 并对补充地下热贮, 延长地热井使用寿命和防止地面沉降都有好处。

第 98 章 太阳发电

98.1 太阳能资源

太阳能一般指阳光直接辐射的能量。太阳以相当于表面温度 5762K 的黑体向外辐射, 其辐射能量主要集中在波长 0.3~2.5 μm 之间, 见图98-1。在大气层外垂直于太阳光的平面上的辐射强度为 1353W/m², 称为太阳常数。阳光穿过大气层时被氧、臭氧、水汽和二氧化碳气体等吸收了一部分能

量, 到达地球表面的太阳辐射可分为直射和散射两部分, 一般在地面上接收到的总辐射强度在 0~1100W/m²之间。阳光入射到地面上的情况用大气质量 AM 来表示, 它等于阳光穿过大气层的厚度与阳光垂直于水平面时穿过大气层的厚度之比。当太阳光线与水平面之间的夹角为 θ 时, 则 $AM = (\sin\theta)^{-1}$ 。所以在大气层外为 AM0, 太阳光垂直于水平面时为 AM1, $\theta=30^\circ$ 时为 AM2。

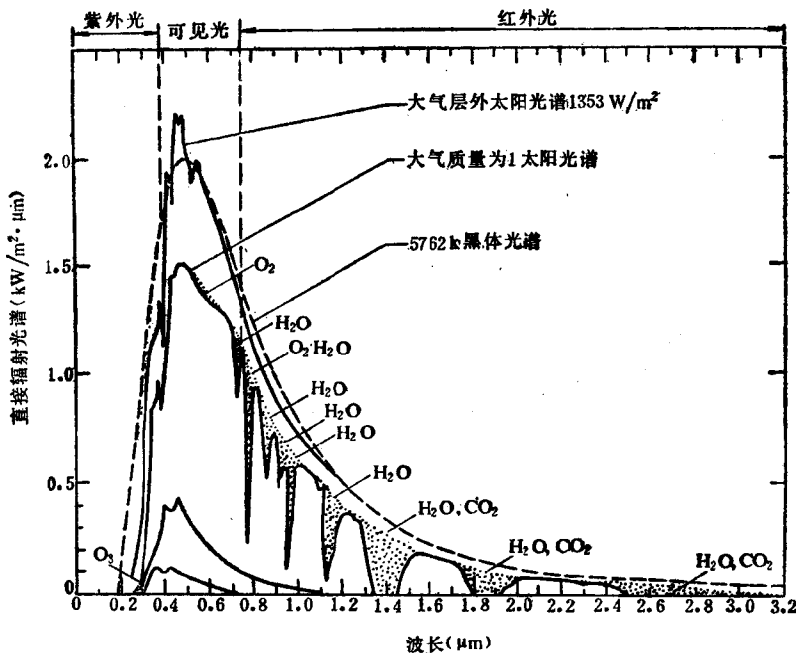


图 98-1 阳光在大气层外和大气质量为1时的辐射强度随波长的变化 (阴影为被吸收部分)

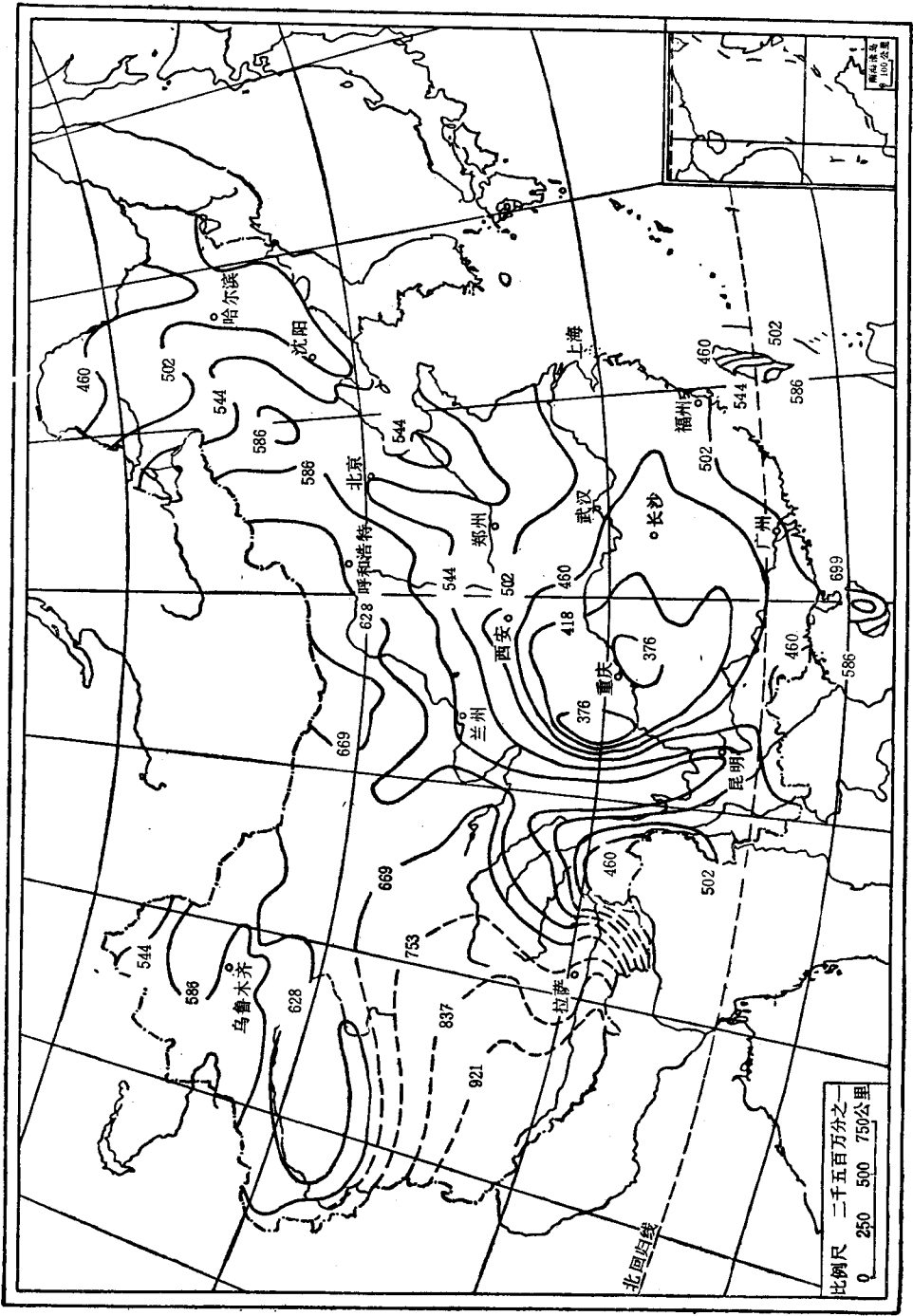


图 98-2 我国太阳年总辐射量分布图
(单位, $\text{kJ}/\text{cm}^2 \cdot \text{年}$)

我国的太阳能资源按年太阳总辐射量分布情况见图98-2。大致是西藏、西北、华北一带较丰富,尤其青藏高原,海拔高,日照时间长,常年晴空无云,太阳年总辐射量达 $670\text{kJ}/\text{cm}^2$ 以上。长江中下游及江南大部分地区为低值区,四川盆地阴雨多雾,最低大约只有 $335\text{kJ}/\text{cm}^2$ 。我国太阳年日照 2000h 以上、年总辐射量达 $580\text{kJ}/\text{cm}^2$ 以上的地区约占全国总面积 $2/3$ 以上,表98-1列出若干地区的数据。

表 98-1 我国若干地区的太阳日照
时数和总辐射量

地 点	年日照 时 数 (h)	年总辐射量 (kJ/cm^2)	地 点	年日照 时 数 (h)	年总辐射量 (kJ/cm^2)
拉 萨	3005	816	郑 州	2426	511
敦 煌	3187	653	汉 口	2154	473
二 连	3233	602	上 海	2092	469
北 京	2793	552	成 都	1267	385

虽然太阳能辐射到地面的数量很可观,其分布也广,但能量品位低,转换为电能的成本较高,技术难度很大,所以寻求能与常规水、火电厂的投资和发电成本有竞争力的太阳能发电技术是一项重大课题。太阳能转换成电能的途径主要有以下两种:
①热力转换;②光电转换。

98.2 太阳热发电

98.2.1 太阳热发电工作原理和型式

太阳热发电是先利用集热器把太阳能转换成热能,然后采用常规成熟的热力循环系统产生机械功和发电。为了获得较高的循环效率,力求提高初温,但太阳能集热器的效率却随其工作温度的提高而降低,必须权衡此矛盾而选定合理的工作温度,以达到最佳经济性。

太阳热发电系统按其选用的集热方式而有多种型式,经过多年来的试验探索和运行验证,其中比较成功的主要有:塔式中央聚光、抛物面线聚焦槽镜、抛物面点聚焦盘镜和太阳水池等四种发电系统。

98.2.2 塔式中央聚光太阳热发电系统

这种发电系统如图98-3所示。接收器在塔顶受到数百甚至数千台定日镜的反射阳光集中照射,使接收器吸热管内的水受热蒸发为约 500°C 的高温蒸汽,以其驱动汽轮机组发电。定日镜的精密双轴自动跟踪机构能使跟踪的角度误差不超过10分,以保证反射阳光准确地投射到接收器上。定日镜的本体结构及其安装基础均要有足够的机械强度以抗大风,耗用钢材、水泥和玻璃较多。同时为了在云遮的短暂时间里,避免机组反复起停并维持正常发电,在系统里还设置了相当庞大的贮热器。所以这种发电系统的造价很高。1981年在美国曾建成一座10MW太阳塔式试验电站,塔高90m,1860台定日镜,每台反射镜的面积约为 40m^2 ,镜场占地约 $40 \times 10^4\text{m}^2$,系统总转换效率为17%左右。此后意、日、法、德国、西班牙、苏等国也曾相继建造一些 MW 级的类似电站,进行技术上和经济上的探索。

98.2.3 抛物面线聚焦槽镜太阳热发电系统

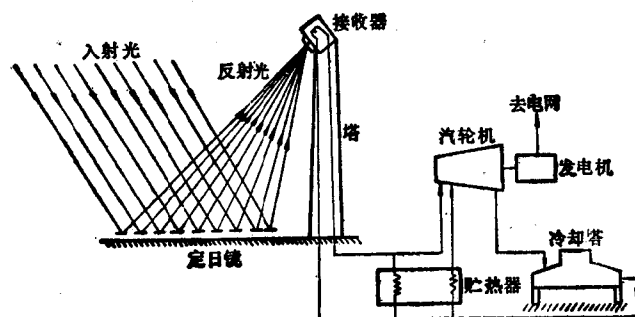


图 98-3 塔式中央聚光太阳发电系统

这种发电系统由多个槽镜串并联组成集热镜场,槽镜聚焦线上的吸热管内流有导热油把热量引出,导热油在热交换器加热热力循环系统的工质(水或其它有机工质),一般工作温度在 $200\sim 400^{\circ}\text{C}$ 之间。槽镜只需简单的单轴跟踪机构。镜场的管路输送系统长,散热损失较大。目前这种发电系统最成功的实例是美国卢兹(LUZ)公司的产品,尤其是1989年投运的第三代产品 SEGS III,见图 98-4。852 个槽

镜,每个宽 5.76m ,长 95.3m ,镜场占地 $160\times 10^4\text{m}^2$ 。出力为 80MW ,进入汽轮机的蒸汽参数为 $371^{\circ}\text{C}/100\text{Pa}$,系统总转换率为 22.5% 。系统中有辅助锅炉作为备用热源而省去贮热系统。现已有9座这种电站,总功率为 354MW ,在美国南加州投入商业运行,其造价比塔式电站约低一半。

98.2.4 抛物面点聚焦盘镜太阳热发电系统

把结构紧凑、重量轻、循环效率高的斯特林热气

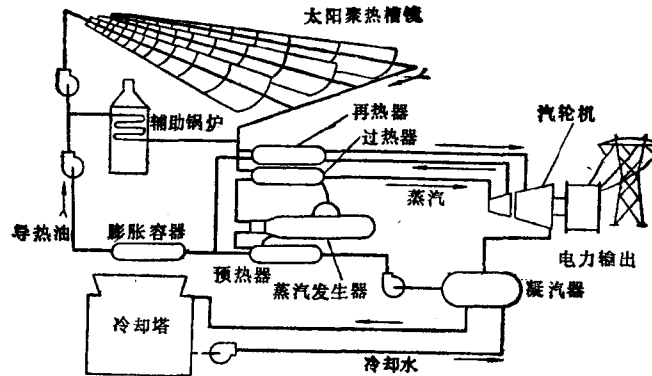


图 98-4 LUZ 公司的 SEGS III 太阳热发电系统示意图

机装在聚光比为 $4000\sim 5000$ 的盘镜焦点处,直接获得高温热源,见图98-5。其优点是热传递路线短,热损失少。在美国和德国研制的直径为 11m 和 7.5m 盘镜太阳热发电试验装置,出力为 25kW 和 10kW ,工作温度为 720°C 和 680°C 。系统总转换效率为 31% 和 21% 。目前热气机的连续运行时间和可靠性尚待进一步完善。这种发电装置适合于作为孤立电站,或多台并联组成较大功率的太阳发电站。

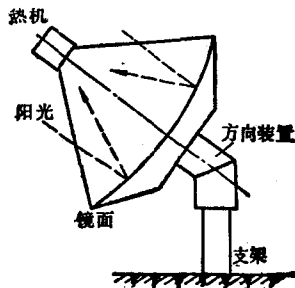


图 98-5 抛物面聚焦盘镜高温太阳发电装置

98.2.5 太阳水池发电系统

它是利用天然或人工的浅水池使池面为淡水,而池底为氯化钠、氯化镁、亚硝酸钠等盐类的较浓或

饱和溶液,形成由上而下的浓度递增梯度。黑色的池底吸收阳光后使水池底层温度上升到 90°C 左右,池水上冷下热而引起的热对流被盐水浓度梯度所抑制,这样太阳水池起着吸热和贮热双重作用。利用池面和池底的温度差,采用低沸点有机工质朗肯热力循环系统就可进行发电,见图98-6。太阳水池的吸热效率为 20% 左右。由于水池贮热量大,可长期昼夜连续供热,故宜在赤道两侧南北纬 40° 度以内的地带应用,因这一地带的阳光入射角较大,有利于水池吸收太阳能。同时,还要有就地提供廉价盐类的条件,才能获得经济效益。在以色列死海附近曾建成这种试验发电系统。

98.3 太阳光发电

98.3.1 太阳电池工作原理

太阳电池是利用半导体的光生伏打效应把光直接转换成电能的器件。当阳光照射硅太阳电池时,光子能量大于硅的能隙时就能破坏晶体内的共价键而激发产生电子-空穴对。在半导体硅PN结的势垒电场作用下,电子和空穴会分别扩散到两侧电极,并产生电动势,见图98-7,当接通外电路时就有电

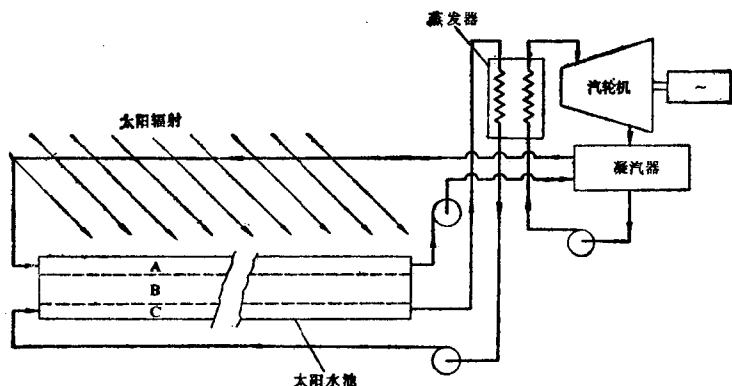


图 98-6 太阳水池发电系统示意图
A—低盐浓度对流层 B—含盐不对流层
C—高盐浓度对流贮热层

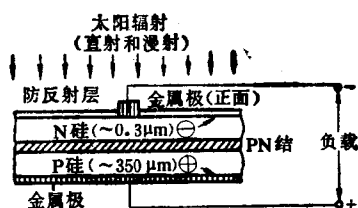


图 98-7 硅太阳能电池光伏打过程示意图

流。半导体硅是制作太阳电池最常用的材料，它的能隙只有 1.1eV。普朗克提出太阳光子的能量(E)为

$$E = hc/\lambda = 1.2398/\lambda \text{ (eV)} \quad (98-1)$$

式中 h ——普朗克常数, $4.13576 \times 10^{-18} \text{ (eV} \cdot \text{s)}$;

c ——光速 $3 \times 10^{14} \text{ (}\mu\text{m/s)}$;

λ ——光波长 (μm)。

波长在 0.3 至 $1.1\mu\text{m}$ 之间的阳光，其相应的能量为 4.1 至 1.1eV，显然波长超过 $1.1\mu\text{m}$ 的阳光不能被利用，见图 98-8。波长较短的阳光能量，其超过用于激发电子-空穴对的部分，都将转化为热。此外，太阳电池还有其它损失，如阳光在电池表面的反射损失、电子和空穴重新结合的损失、电池内部损失等，都是导致转换效率低的原因。多层太阳电池是利用不同半导体材料分层在不同能隙转换更多的能量，见表 98-2。

98.3.2 太阳电池的种类

按太阳电池的结构形状和制造工艺，可划分为五种。

(1) 片状太阳电池。采用单晶硅或砷化镓棒料切片后，经抛光清洗、扩散制结、制作电极、涂

覆减反射膜等复杂工艺过程制成。单晶硅太阳电池是获得最广泛实际应用的太阳电池，其最好转换效率为 18% 左右，但耗用材料多，价格昂贵。最新的在实验室条件下制成的具有背面点接触结构的硅太阳电池效率达 22%。这种电池的光照正面没有任何金属电极，点状的 P^+ 、 N^+ 高掺杂区都集中在电池的背面，轻掺杂的 P 型硅基片直接受阳光照射。即电池的正表面不存在高掺杂的“死层”，也没有金属栅线遮挡阳光。基体材料采用少数寿命高达 7000 μs 的区熔单晶硅，能确保光照表面和基体内部产生的光生载流子在到达电池背面被 $P-N$ 结分离之前不会被大量地复合掉。电池基片背面的二氧化硅层除了起钝化背表面的作用外，合理地设计它的厚度，有可能成为一个有选择性的背反射器。它把穿过基片但能利用的阳光反射入基片，从而增加光生载流子的产生，并让无用的长波阳光穿透，降低电池的热吸收。预计在现有的材料和工艺条件下，对各项主要设计参数进行优化，硅电池的效率有可能提高到 28%，而 GaAs 电池效率高达 30%。由于 GaAs 材料的表面复合速率比硅高几个数量级，所以在 P 型 GaAs 基片的两个表面上制作 AlGaAs 层以改善表面状态。若用多晶硅块料制作太阳电池，虽价格较低，但因晶界抑制电子流动，其转换效率也较低。用旋抛法研制的多晶硅制成的多晶硅电池效率在 11% 左右。该方法采用空腔面积为 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ，厚度为 0.5mm 的模具，将模具加热后置于旋转工作台上，注入硅熔液后立即加盖旋抛，冷却后打开模具，就得到与空腔相同尺寸的多晶硅片，目前单机

表 98-2 各种类型太阳电池的能隙和效率

材 料	能 隙 (eV)	理论效率 (%)	实 际 效 率 (%) ③	
			实验室效率	产品效率
硅 Si	1.1	28	22.1(0.090cm ²) 27.8(聚光140倍)	18
			17.5	11
		单结18.7	13(聚酰亚胺衬底) 14.4(玻璃衬底)	10.1(1.09cm ²) 6.0(200cm ²)
		级联结26.6	14.4	
砷化镓GaAs	1.43	27	30	18(LPE工艺)① 20(MOCVD工艺)②
磷化铟InP	1.35		20.4(MOCVD)工艺	15.4(MOCVD工艺)
碲化镉CdTe/CdS	1.50	17		12.8(0.78cm ² 印刷法)
二硒化铜铜CuInSe ₂ /CdS		24		11.9

① LPE—液相外延法。

② MOCVD—金属有机化学气相沉积法。

③ 本表所列太阳电池效率大多为小面积元件，大面积元件、组件效率将低许多。

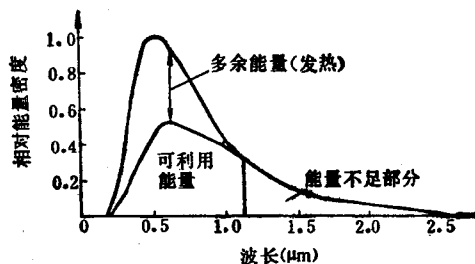


图 98-8 硅太阳电池能量利用和波谱关系

生产速度为1片/min。

(2) 带状太阳电池。降低太阳电池的发电成本，关键在于材料价格。以定边喂膜(EFG)法拉制呈多边形薄壁筒状单晶硅带，用激光切开后就能制造厚度为0.3~0.35mm的太阳电池，可免去切片和抛光工艺，省料省工，用此法研制的电池效率达到12~14%。

(3) 薄膜太阳电池。薄膜厚度约1~5μm，用CVD法在基底上形成，半导体材料可用非晶硅、砷化镓、硫化镉、二硒化铜铜。此类电池用料省，其制作工艺适合于大规模生产，及制作多层电池，有利于大幅度降低成本。目前在实验室条件下

制作的以聚酰亚胺为衬底的非晶硅小面积电池转换效率约为13%，以玻璃为衬底的可达14.4%。目前还在提高效率和寿命、减低初期光致衰减方面作进一步改善。其中利用汞、氙、氖等元素灯产生的紫外光分解二硅烷的低温沉积a-Si材料的光-化学气相沉积工艺制成的a-Si材料已获得光照稳定性优于用一般放电生长的材料。采用MOCVD技术生产的GaAs太阳电池，一次处理2×2cm²的电池120只，平均效率20%，但每峰瓦价格比硅电池贵。

近年来，开发各种多晶材料薄膜电池受到重视。现在已有CuInSe₂、CdTe、CuGaSe₂、CuInGeSe₂等材料所制成的基片上加上一层硫化镉窗口层的多种异质结太阳电池，如二硒化铜铜薄膜太阳电池的效率已达11.9%，稳定性较好。还有在碲化铟基片上用有机金属气相外延法(OMVPE)生长n型和p型的CdTe单晶层构成异质结太阳电池。

(4) 叠层复结电池。原理是把具有不同能隙的太阳电池，按E_g由小到大从底向上排，制成各层分别吸收不同波长能量的叠层电池，以提高电池的转换效率。两电池叠层的电池理论效率为37%，三电池叠层可达40%。由于制作工艺的难度和三电池叠层光子热效应损失多，因此目前着重在开发二

电池系统。

(5) 聚光太阳电池。聚光方式可用抛物曲面或非涅尔透镜。以小面积 (0.152cm^2) 单晶硅太阳电池为例, 在电流密度 J_{sc} 为 $0.0411\text{A}/\text{cm}^2$ 条件下效率为 21.7% , 在聚光倍率为 140 时, $J_{sc}=5.75\text{A}/\text{cm}^2$, 效率为 27.8% , 见图 98-9。由于阳光照射等效强度的增高, 元件温度上升, 必须增设冷却系统, 以避免太阳电池寿命和效率的下降。冷却系统吸收热量的利用将可提高太阳能的利用率。

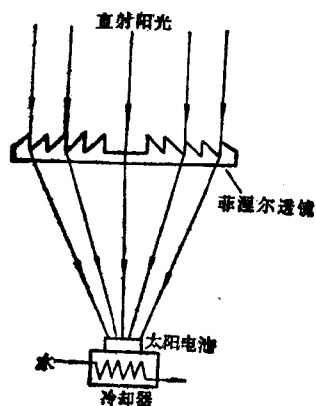


图 98-9 采用菲涅尔透镜的聚光太阳电池

98.3.3 太阳电池发电装置及其应用前景

太阳电池的应用实践证明, 它具有运行可靠、维护简易、无污染、无人值守等特点, 除了在人造

卫星、电子计算器上早已得到应用外, 作为陆用小电源已在信号灯、电围栏、无人气象站、水文地震遥测、森林火灾报警器、微波中继站灌溉水泵动力等方面陆续获得应用, 采用太阳电池的太阳汽车也已经出现。美国对多座 100kW 级和 1000kW 级的太阳电池示范电站的探索, 已证明技术上是可行的, 但目前元件价格昂贵, 从经济上看尚难推广应用。对各类不同设施、配置的太阳电池发电装置有不同容量要求, 装置主要由电池方阵、防反充二极管、蓄电池组等组成, 见图 98-10。电池方阵以太阳电池组件为单元串联并联所组成, 以达到所需电压和所需功率。电池组件则由单电池串并联所组成。并联的单电池要求具有相同的电压性能, 串联的单电池则要求有同样的短路电流密度, 否则会造成组件内部功耗, 降低输出功率。每个组件用无色玻璃覆盖, 四周用硅胶密封, 以防止潮气侵入和损伤。

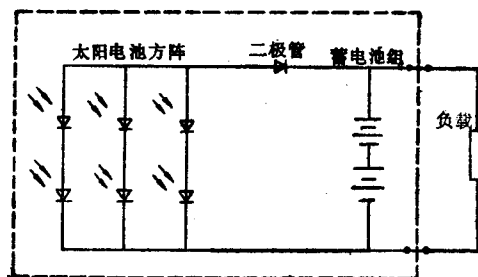


图 98-10 太阳电池发电装置线路图

参 考 文 献

- 1 电气工程师手册, 北京: 机械工业出版社, 1987
- 2 M.M. EL-WAKIL, Powerplant Technology, McGraw-Hill Book Company, 1984
- 3 Wind Energy Technology. Generating Power From the Wind, U.S. Department of Energy, 1985
- 4 Geothermal Energy: ITS Role In The Energy Scenario, Energy and the Environment into the 1990, Vol 5, Pergamon Press, 1990.
- 5 Wolfgang Palz, Solar Electricity, Butterwords, Unesco, 1978