

国外研究和利用太阳能的概况

THE EXPLORATION AND UTILIZATION OF SOLAR ENERGY IN FOREIGN COUNTRIES

徐任学

现今人类利用的能源主要还是化石燃料：煤、石油和天然气。1981 年全球人口约为 40 亿，消费的能源约相当于 64 亿吨油。预计本世纪末，全球人口将增至 65 亿，消费的能源将增至 170 亿吨油。现在发展中国家平均每人每年消费能源相当于 0.3 吨油。到本世纪末，由于生活水平的提高，加上人口的增长（到那时估计发展中国家人口可达 40 亿），发展中国家的能源消费将增加 2~3 倍。化石燃料是不可再生能源，总有一天会耗尽。核能利用看来是解决问题的一个途径，但是它有环境污染的问题，特别是自从美国三里岛和苏联切尔诺贝利核电站发生事故以来，其安全性受到人们更大的怀疑。核聚变能也许能解决这个问题，但是离实际应用还很遥远。太阳是个巨大的自然能源；不停地以辐射方式向外放出能量。地球接受到的太阳能仅仅是它放出能量的极小一部分，然而这一小部分就是人类生产的能量的数百倍了。由此可见，利用太阳能是解决能源危机很有希望的途径。太阳能除一小部分以生物质能等形式储存下来以外，大部分以热辐射形式散放到太空中去，以维持地球的热平衡。化石燃料能实际上是过去储存下来的太阳能。太阳能是一种能流。太阳能的利用，只不过改变了这一能流的形式，使其为人类造福，因而对环境的影响就比较小些。这是太阳能的另一个优点。

1973 年石油危机以来，世界各国对于太阳能的研究开发有了很大进展。太阳能的利用主要采用光

热转换和光电转换两种形式。随利用的温度范围和用途不同，光热转换的形式也不同。

一、太阳能热利用

低温光热转换一般达到的温度在 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，大多采用不跟踪的平板及真空管集热器来实现，也有用复合抛物面聚光器的。联邦德国最近研制出一种装在透明盖板和吸热板之间抽真空的平板集热器，其实也是真空管集热器的一个变种。

空气型的集热器分为两种。一种装有非多孔性吸收器，空气绕吸收板流动而被加热。另一种装有多孔性吸收器。

真空管集热器在吸收管和透明套管之间采用 10^{-4} 毫米汞柱的高真空，以消除大部分传导和对流损失，同时用选择性吸光涂层来减少辐射损失 ($\varepsilon < 0.2$)。研究表明，这种集热器，即使在辐射强度较低条件下，仍能获得较高的运行温度 (120°C)。

将太阳能直接用于工业加工是太阳能利用的一个重要部分。表 1 所示是 20 多个发展中国家的工业加工用热需求。由表中可见，在热水和蒸汽需求方面，低温蒸汽和热水的需求较多，而在热空气的需求方面，高温热空气的需求较多。工业加工用热占总能耗的 27.81%，占工业能耗的 68.15%，涉及食品、饮料、化学（化肥）、纺织、造纸和纸浆、印刷、皮革、橡胶、烟草、茶叶、工程和农业等行

业。可见，太阳能技术在提供工业加工用热方面有着广阔的发展前景。

表 1 发展中国家工业加工用热和直接热耗

用热形式和温度范围	热水 <100℃	蒸汽 100℃-177℃	蒸汽 >177℃	热空气 <100℃	热空气 100℃-177℃	热空气 >177℃	总计
工业加工用热(10^{12} Btu/年)	585.6	2 988.05	385.40	625.64	1 176.21	8 158.38	13 919.30
总能耗(10^{12} Btu/年)							50 051.43
工业加工用热占总能耗的%	1.17	5.97	0.77	1.15	2.35	16.3	27.81
工业加工用热占工业能耗的%	2.90	14.80	1.91	3.09	5.84	40.42	68.15

表 2 SEGS I-V 的基本特性

装置	开始运行 年份	状况	净容量 (兆瓦电)	太阳能场		涡轮循环效率%		年净输出 (兆瓦小时)
				温度(℃)	面积(米 ²)	太阳能	锅炉	
I	1985	正在运行	13.8	307	82 960	—	—	30 100
II	1986	正在运行	30	315	165 376	20.4	37.0	66 500
III	1987	正在运行	30	349	203 980	30.6	37.4	85 050
IV	1987	正在运行	30	349	203 980	30.6	37.4	85 050
V	1988	正在运行	30	349	233 120	30.6	37.4	91 820
VI	1989	正在建造	30	390	188 000	37.5	39.5	90 575
VII	1989	正在建造	30	390	183 120	37.5	39.5	94 410

表 3 太阳能集热器特性

	LS-1	LS-2	LS-3
面积(米 ²)	128	235	545
镜片数	64	120	224
开口宽度(米)	2.55	5.0	5.76
长度(米)	50.2	47.1	95.3
集热管直径(米)	0.42	0.070	0.070
平均焦距(米)	0.94	1.84	2.12
行距(米)	7.3	12.5	17.3
光学效率	0.734	0.737	0.772
集热管发射温度(℃)	300	300	350
集热管吸收率	0.94	0.94	97
集热管发射率	0.95	0.95	0.965
镜反射率	0.94	0.94	0.94
峰值集热效率(%)	66	66	68
年热效率(%)	51	50	53
用于 SEGS 型号	I, II	III-VI	VII

二、太阳能热发电

由于低温太阳能热利用效率太低，美国和以色列合作，在加利福尼亚建立了一系列组件式中温太阳能热发电系统，每套装置发电容量高达 30 兆瓦。这类系统代表了这方面的典型技术水平。系统的基本特性和太阳能集热器的特性见表 2 和表 3。其中 SEGS (Solar Electric Generating System) II 每小时能生产 17 大气压的蒸汽 2 300 公斤，每年生产能

量相当于 1700 桶油。这类系统是由美国民间集资建造的。最近由于美国国会决定提高太阳能电站的容量到 80 兆瓦，该公司还计划建造更大的这类太阳能电站。

高温光热转换系统一般有两种形式。一种是双轴跟踪的点聚焦抛物面盘装置。抛物面盘有玻璃和镀铝薄膜两种。麦克唐纳·道格拉斯公司的玻璃反射镜抛物面盘，聚光比达 2 000，其价格高达每平方米 200~300 美元。

另一种形式是中央接收式系统。目前在美国加州巴斯托的太阳一号是运行中最大的太阳能装置之一。它有定日镜 1 818 面，每面反射镜面积 39 平方米。接收器装在高 90 米的塔上，产生的蒸汽温度为 516℃，用以驱动汽轮机发电。设计发电容量为 10 兆瓦，运行时发出的净功率为 10.4 兆瓦。系统采用砾石和油储热器，容量为 7 兆瓦，在阴天或夜间能连续运行 4 小时。30 兆瓦和 100 兆瓦的发电站也在计划之中。

最近，开发了一种利用聚焦的太阳光加热气体的高温气体接收器，这种接收器运行时，在工作气体中加入很细的碳粒，然后进入带窗口的太阳能接收器。碳粒吸收聚焦的太阳辐射能，很快传给周围的气体，将气体加热到中、高温，用以驱动涡轮发电机。现在第一台接收器 SPHER MARKI 已经建成，并开始试验。试验达到的最高温度为 750℃，

输出热功率超过 30 千瓦。试验数据的分析表明, 加热作用主要限于气体和碳粒子间, 器壁温度比气体和碳粒低得多, 所以可以用不锈钢, 而不必用耐高温合金制造设备的器壁。这种研究还可能使高温化学反应和反应器壁隔离, 降低对器壁材料的要求。因此用太阳能驱动超高温反应将是可行的。

在太阳能光热转换系统中也可利用氢化金属作为氢和热的储存介质, 并进行热的输送。方法是在集热器内装入预先吸收了氢的金属 (即氢化金属), 当受到太阳热时, 氢化金属发生吸热反应, 放出氢。这些氢由管道集中到一处, 转送到另外的地方。在那里氢再被金属吸收并放出热量用来发电。这种系统的主要特点是作为传热介质的氢并不处于很高的温度, 通过输送管道时没有热损失, 因而不必隔热。氢化金属和氢在完全封闭的系统中基本上不会有消耗。日本对各种金属和合金的氢化反应特性及其热输送系统进行了研究和试验, 并对采用这种方法输送热能的太阳能发电系统做了设计。

三、太阳能新材料

光-热、光-电转换材料和部件的性能是有效利用太阳能的关键。这些材料包括: (1) 传热流体, (2) 透明材料, (3) 隔热材料, (4) 密封材料和密封胶, (5) 储热介质, (6) 吸收材料。选择性透光材料对可见光是透明的, 而对红外光则有高反射率。这种材料可分为掺杂半导体单层膜 (如 $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}, \text{SnO}_2 : \text{F}$ 等) 和介质/金属多层膜 (如 $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Ag}, \text{ZnS} / \text{Cu} / \text{ZnS}, \text{TiO}_2 / \text{Ag} / \text{TiO}_2$) 两种。还有一种选择性透光材料, 对可见光有高反射率, 而对红外光透明。这类材料 (如 $\text{ZnS} / \text{MgF}_2$ 及 $\text{TiO}_2 / \text{SiO}_2$ 膜等) 能够把光和热分离, 可用于暖房和热或光伏发电系统。植物生长需要 $0.3 \sim 0.75$ 微米波长的太阳光, 用这种方法可将其余部分的光能分离出来供给暖房采暖。

窗户通常比其他建筑部件热损失率大。现在有一种叫氧化硅气凝胶 (Silica aerogel) 的透明隔热材料, 热损失率很低, 相当于静止空气。在这种材料中, 由于氧化硅微粒比可见光波长小, 引起可见光的散射, 其光学特性除折射率接近 1 以外, 与氧化硅玻璃近似, 可以用雷利理论说明。间隔 20 毫米空气层的双重玻璃窗热损失率为 2.8 瓦/平方米·K, 而厚 20 毫米的氧化硅气凝胶热损失率为 1 瓦/平方米·K, 仅为前者的 $1/3$ 左右。20 毫米厚的氧化硅气凝胶对太阳光的半球向透光率 (Semispherical transmissivity) 约为 0.67, 而 5 毫米厚时, 其半球向

透光率为 0.9。可见这种透明隔热材料性能很好, 大有发展前途。

近来还研制出多种可控制透光率的材料, 其中包括光致变色材料, 热致变色材料, 电致变色材料和液晶。光致变色材料有有机、无机和玻璃三种。有机材料有立体异构体、色素、多核芳香族及碳化氢等, 无机材料包括 $\text{ZnS}, \text{TiO}_2, \text{Li}_3\text{N}, \text{HgS}, \text{HgI}, \text{HgCNS}$ 及碱土金属的硫化物和钛酸盐等。光致变色材料的缺点是只能随入射紫外线的量改变其透光率, 不能按需要自由调光。热致变色材料有螺吡喃、聚乙烯、聚甲醛树脂, 以及 $\text{HgI}_2, \text{AgI}, \text{Ag}_2\text{HgI}_4, \text{Cu}_2\text{HgI}_4, \text{SrTiO}_3$ 和含铜、锡、钴的化合物。热致变色效应只能在某个温度转变点以上发生, 而转变点目前是尚难控制的, 因而热致变色材料只能在不寒冷的地方使用。电致变色材料有: 过渡族金属氧化物如 $\text{WO}_3, \text{MoO}_3, \text{IrO}_x$ 膜等, 有机物中有氧化还原色素、蒽醌等。最近日本旭玻璃有限公司研制了一种调光窗, 其电致变色层是用电子束在氧化铟锡基膜上蒸镀的 WO_3 膜。当此膜处于负电位时, 透光率可降到 $10 \sim 20\%$ 。当此膜处于正电位时, 透光率可增至 80% 。美国加州大学应用科学部及材料和分子研究部研究了氧化镍和氢氧化镍的电致变色效应, 其透光率可由 73% 变到 35% 。电致变色材料可以通过改变电压任意改变其透光率。

萤光聚光体最近也研究得很多。它是由含有萤光油、若丹明 (rhodamine) 和菲 (Perylene) 等萤光材料的 PMMA (Polymethyl metaacrylate) 透明板。它吸收符合它的吸收带波长的光。由于和周围环境光折射率的差异, 被吸收的光大部分在板内多次全反射, 最后由边缘射出。由于射出的面积比吸收的面积小得多, 从而实现聚光作用。此外, 它的发射光谱带和吸收光谱带相比, 向长波方向转移。这种特性很适用于太阳电池, 既实现了聚光, 又可免除跟踪, 因为它能吸收各个方向入射的光, 还可以把一部分对太阳电池作用很小的短波辐射转移到对太阳电池作用较大的长波范围, 以提高转换效率。有人研究把不同的萤光聚光板重叠起来, 以便聚集不同波长范围的光, 以提高效率。除在太阳电池系统中应用外, 还设想把它做成建筑物的外壳, 通过平面光导, 把光引到建筑物内部供照明用。也设想把它用于暖房或塑料大棚, 可以让植物需要的光透过, 把植物不需要的光变成它需要的光, 多余的光用于发电或采暖。

典型的相变储热材料有盐、氢氧化物或石蜡,

遇到很大困难。多晶硅电池损失最重要的原因是颗粒边界处带电粒子的复合。美国在高效聚光电池方面研究得比较多。它的理论效率可达 37%。目前硅电池效率已达 25%，化合物电池达到 24~26%。叠层电池已超过 26%。聚光电池的主要问题是耐久性和可靠性。美国在国内外已建立了 9 个聚光电池电站，其中最大的为 350 千瓦，在沙特阿拉伯，总计容量为 665.9 千瓦。70 年代以来，开展了非晶硅光电池的研究。这种电池的优点是可以做成任何形状和尺寸的薄膜，从而大大降低了成本。现在它的问题是效率还比较低，而且不太稳定。美国和日本在这方面研究得较多。商业非晶硅光电池效率已达 7~8%。它被大量用于电子表和计算器，近来也逐渐用作汽车蓄电池的充电器，农村水泵的电源等。它已开始进入能源领域。美国阿拉巴马动力公司于 1986 年在阿拉巴马州贝明翰附近建成了一套 100 千瓦的非晶硅光电系统，并于当年 6 月投入运行。另外，有消息说，美国克罗纳公司计划和加州圣地亚哥的海西工业公司建立一座 50 兆峰瓦的非晶硅光电站。建造工作将于 1989 年下半年开始，预计在 1992 年完成。现有工艺生产的非晶硅光电装置成本已降到每峰瓦 1 美元，可以与煤、石油、天然气和铀相竞争了。

本文作者徐任学 (Xu Renxue) 系北京市太阳能研究所副研究员。

(上接第 62 页)

重视调动和发挥私营高技术公司的作用和积极性。

结束语

印度一直强调“进口替代”，从未象亚洲“四小龙”那样经历过“出口替代”或“出口导向”阶段，因而工业发展的规模和速度受到很大限制，难以吸收农村过剩劳力；也未象巴西那样自 70 年代初就大力“促进出口”，因此，印度工业发展不足，出口不力，外贸逆差大，近年虽鼓励出口，但附加价值高的高新技术产品依然出口不力。

对国内市场保护过份，保护期过长，造成国营企业生产率低，大多亏损。每单位固定资产投资的增值，国营企业仅及私营企业的1/6。

对引进技术的消化吸收不足。历年来,印度的技术消化吸收指数(本国研究开发投资与引进外国技术投资之比)从未超过1。而一般认为,要充分利用引进的技术,该指数至少应为4。但印度核工业消化吸收效果极佳。

科技经费虽逐年增加,但约 90%由政府支出,企业研究开发积极性不高,国营企业尤其不如私营高技术小公司。

(中国科学技术情报研究所贾谦)