

太阳能热利用

Solar Thermal Utilization



何梓年 编著

中国科学技术大学出版社

当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书

中国科学技术大学
校友文库

太阳能热利用
Solar Thermal Utilization

何梓年 编著

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书分为四篇:相关基础知识、太阳能热收集、太阳能热应用、太阳能热储存。“相关基础知识”包括太阳几何学、太阳辐射学和传热学基础。“太阳能热收集”介绍涂层材料、平板集热器、真空管集热器、聚光集热器和空气集热器。“太阳能热应用”阐述太阳能热水、采暖、制冷空调、游泳池加热、干燥、太阳灶、太阳房、温室、太阳池、海水淡化、工业加热、热发电和太阳炉。“太阳能热储存”涉及显热储存、潜热储存和化学反应热储存。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能热利用/何梓年编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2009.7
(当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书;中国科学技术大学校友文库)
“十一五”国家重点图书
ISBN 978-7-312-02239-5

I. 太… II. 何… III. 太阳能—应用—研究 IV. TK519

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 100508 号

出版发行 中国科学技术大学出版社

地址 安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编 230026

网址 <http://press.ustc.edu.cn>

印 刷 合肥晓星印刷有限责任公司

经 销 全国新华书店

开 本 710mm×1000mm 1/16

印 张 37.25

字 数 760 千

版 次 2009 年 7 月第 1 版

印 次 2009 年 7 月第 1 次印刷

印 数 1—2000 册

定 价 118.00 元

编 委 会

顾 问 吴文俊 王志珍 谷超豪 朱清时

主 编 侯建国

编 委 (按姓氏笔画为序)

王 水 史济怀 叶向东 伍小平

刘 兢 刘有成 何多慧 吴 奇

张家铝 张裕恒 李曙光 杜善义

杨培东 辛厚文 陈 颀 陈 霖

陈初升 陈国良 周又元 林 间

范维澄 侯建国 俞书勤 俞昌旋

姚 新 施蕴渝 胡友秋 骆利群

徐克尊 徐冠水 徐善驾 翁征宇

郭光灿 钱逸泰 龚 昇 龚惠兴

童秉纲 舒其望 韩肇元 窦贤康

总 序

侯建国

(中国科学技术大学校长、中国科学院院士、第三世界科学院院士)

大学最重要的功能是向社会输送人才。大学对于一个国家、民族乃至世界的重要性和贡献度,很大程度上是通过毕业生在社会各领域所取得的成就来体现的。

中国科学技术大学建校只有短短的五十年,之所以迅速成为享有较高国际声誉的著名大学之一,主要就是因为她培养出了一大批德才兼备的优秀毕业生。他们志向高远、基础扎实、综合素质高、创新能力强,在国内外科技、经济、教育等领域做出了杰出的贡献,为中国科大赢得了“科技英才的摇篮”的美誉。

2008年9月,胡锦涛总书记为中国科大建校五十周年发来贺信,信中说:半个世纪以来,中国科学技术大学依托中国科学院,按照全院办校、所系结合的方针,弘扬红专并进、理实交融的校风,努力推进教学和科研工作的改革创新,为党和国家培养了一大批科技人才,取得了一系列具有世界先进水平的原创性科技成果,为推动我国科教事业发展和社会主义现代化建设做出了重要贡献。

据统计,中国科大迄今已毕业的5万人中,已有42人当选中国科学院和中国工程院院士,是同期(自1963年以来)毕业生中当选院士数最多的高校之一。其中,本科毕业生中平均每1000人就产生1名院士和七百多名硕士、博士,比例位居全国高校之首。还有众多的中青年才俊成为我国科技、企业、教育等领域的领军人物和骨干。在历年评选的“中国青年五四奖章”获得者中,作为科技界、科技创新型企业界青年才俊代表,科大毕业生已连续多年榜上有名,获奖总人数位居全国高校前列。鲜为人知的是,有数千名优秀毕业生踏上国防战线,为科技强军做出了重要贡献,涌现出二十多名科技将军和一大批国防科技中坚。

为反映中国科大五十年来人才培养成果,展示毕业生在科学研究中的最新进展,学校决定在建校五十周年之际,编辑出版《中国科学技术大学校友文库》,于2008年9月起陆续出书,校庆年内集中出版50种。该《文库》选题经过多轮严格的评审和论证,入选书稿学术水平高,已列为“十一五”国家重点图书出版规划。

入选作者中,有北京初创时期的毕业生,也有意气风发的少年班毕业生;有“两院”院士,也有IEEE Fellow;有海内外科研院所、大专院校的教授,也有金融、IT行业的英才;有默默奉献、矢志报国的科技将军,也有在国际前沿奋力拼搏的科研将才;有“文革”后留美学者中第一位担任美国大学系主任的青年教授,也有首批获得新中国博士学位的中年学者……在母校五十周年华诞之际,他们通过著书立说的独特方式,向母校献礼,其深情厚意,令人感佩!

近年来,学校组织了一系列关于中国科大办学成就、经验、理念和优良传统的总结与讨论。通过总结与讨论,我们更清醒地认识到,中国科大这所新中国亲手创办的新型理工科大学所肩负的历史使命和责任。我想,中国科大的创办与发展,首要的目标就是围绕国家战略需求,培养造就世界一流科学家和科技领军人才。五十年来,我们一直遵循这一目标定位,有效地探索了科教紧密结合、培养创新人才的成功之路,取得了令人瞩目的成就,也受到社会各界的广泛赞誉。

成绩属于过去,辉煌须待开创。在未来的发展中,我们依然要牢牢把握“育人是大学第一要务”的宗旨,在坚守优良传统的基础上,不断改革创新,提高教育教学质量,早日实现胡锦涛总书记对中国科大的期待:瞄准世界科技前沿,服务国家发展战略,创造性地做好教学和科研工作,努力办成世界一流的研究型大学,培养造就更多更好的创新人才,为夺取全面建设小康社会新胜利、开创中国特色社会主义事业新局面贡献更大力量。

是为序。

2008年9月

目 次

总序	(1)
绪论	(1)
0.1 太阳能利用的意义	(1)
0.2 太阳能利用的特点	(2)
0.3 太阳能热利用简史	(3)
0.4 本书的主要内容	(7)
第 1 章 太阳几何学基础	(8)
1.1 引言	(8)
1.2 地球的自转与公转	(8)
1.3 天球及天球坐标系	(10)
1.4 太阳角的计算	(18)
1.5 倾斜面上的太阳射线	(21)
1.6 太阳的周日视运动	(23)
1.7 太阳时与时差	(25)
第 2 章 太阳辐射学基础	(29)
2.1 引言	(29)
2.2 太阳的能量	(29)
2.3 地球大气层外的太阳辐射	(31)
2.4 地球表面的太阳辐射	(35)
2.5 太阳辐射测量概述	(45)
2.6 中国的太阳能资源	(48)
第 3 章 传热学基础	(53)
3.1 引言	(53)
3.2 热传导	(54)
3.3 对流换热	(59)
3.4 辐射换热	(71)

第4章 太阳能集热器涂层材料	(85)
4.1 概述	(85)
4.2 光谱选择性吸收涂层	(86)
4.3 光谱选择性透过涂层	(96)
4.4 减反射涂层	(98)
第5章 平板太阳能集热器	(101)
5.1 概述	(101)
5.2 平板集热器的基本结构	(102)
5.3 平板集热器的热性能分析	(108)
5.4 平板集热器的热性能测试	(116)
5.5 平板集热器的技术要求	(126)
5.6 提高平板集热器性能的主要途径	(127)
第6章 真空管太阳能集热器	(129)
6.1 概述	(129)
6.2 全玻璃真空管集热器	(130)
6.3 热管式真空管集热器	(138)
6.4 其他型式金属吸热体真空管集热器	(148)
6.5 真空管集热器的热性能测试	(153)
第7章 聚光太阳能集热器	(156)
7.1 概述	(156)
7.2 聚光太阳能集热器的类型	(157)
7.3 聚光太阳能集热器的基本理论	(159)
7.4 抛物面聚光集热器	(164)
7.5 复合抛物面聚光集热器(CPC集热器)	(173)
第8章 空气太阳能集热器	(179)
8.1 概述	(179)
8.2 空气集热器的分类	(180)
8.3 空气集热器的设计及性能计算	(184)
8.4 空气集热器的热性能测试	(189)
8.5 空气集热器的应用	(191)

第9章 太阳能热水	(193)
9.1 概述	(193)
9.2 太阳能热水系统的分类	(194)
9.3 自然循环太阳能热水系统	(196)
9.4 强制循环太阳能热水系统	(201)
9.5 直流式太阳能热水系统	(205)
9.6 整体式太阳能热水系统	(207)
9.7 太阳能热水系统在民用建筑中的应用	(208)
9.8 建筑中太阳能热水系统的设计	(213)
第10章 太阳能采暖	(226)
10.1 概述	(226)
10.2 太阳能采暖系统的特点	(227)
10.3 液体太阳能采暖系统	(228)
10.4 空气太阳能采暖系统	(233)
10.5 太阳能热泵采暖系统	(236)
10.6 太阳能地板辐射采暖系统	(238)
10.7 太阳能采暖/热水组合系统	(241)
10.8 国外太阳能组合系统实例	(244)
第11章 太阳能制冷空调	(249)
11.1 概述	(249)
11.2 太阳能制冷系统分类	(250)
11.3 太阳能吸收式制冷系统	(251)
11.4 太阳能吸附式制冷系统	(259)
11.5 太阳能除湿式制冷系统	(262)
11.6 太阳能蒸汽压缩式制冷系统	(270)
11.7 太阳能蒸汽喷射式制冷系统	(272)
11.8 太阳能空调系统实例简介	(274)
11.9 太阳能空调现阶段的局限性及有待解决的问题	(284)
第12章 太阳能游泳池加热	(286)
12.1 概述	(286)
12.2 无透明盖板集热器	(287)
12.3 游泳池的加热负荷	(290)

12.4 太阳能游泳池加热系统设计中的若干问题	(293)
第 13 章 太阳能干燥	(298)
13.1 概述	(298)
13.2 太阳能干燥基本原理	(299)
13.3 物料的干燥特性	(300)
13.4 太阳能干燥器分类	(306)
13.5 温室型太阳能干燥器	(307)
13.6 集热器型太阳能干燥器	(311)
13.7 集热器-温室型太阳能干燥器	(315)
13.8 整体式太阳能干燥器	(318)
13.9 其他型式的太阳能干燥器	(320)
第 14 章 太阳灶	(322)
14.1 概述	(322)
14.2 太阳灶的传热过程	(323)
14.3 太阳灶的设计方法	(326)
14.4 太阳灶的结构与材料	(333)
14.5 太阳灶的热性能测试	(337)
14.6 太阳灶的技术要求	(339)
14.7 箱式太阳灶和综合型太阳灶	(340)
第 15 章 被动式太阳房	(345)
15.1 概述	(345)
15.2 太阳房的基本类型	(346)
15.3 太阳房气象区划	(351)
15.4 太阳房设计要则	(353)
15.5 太阳房热工设计	(356)
15.6 太阳房的热性能测试	(363)
15.7 太阳房的热工技术条件	(366)
第 16 章 太阳能温室	(369)
16.1 概述	(369)
16.2 太阳能温室的结构类型	(370)
16.3 太阳能温室的设计	(374)
16.4 太阳能温室的建造与使用	(382)

第 17 章 太阳池	(387)
17.1 概述	(387)
17.2 太阳池的类型	(388)
17.3 太阳池的光学特性	(389)
17.4 太阳池的热稳定性	(394)
17.5 太阳池的热量提取及储热能力	(396)
17.6 太阳池的设计与建造	(398)
17.7 太阳池的应用	(400)
第 18 章 太阳能海水淡化	(404)
18.1 概述	(404)
18.2 盘式太阳能蒸馏器	(405)
18.3 其他类型被动式太阳能蒸馏器	(413)
18.4 主动式太阳能蒸馏器	(418)
第 19 章 太阳能工业加热	(428)
19.1 概述	(428)
19.2 太阳能工业加热的潜在应用领域	(429)
19.3 中温太阳能集热器的开发和利用	(430)
19.4 国外太阳能工业加热实例简介	(432)
19.5 我国太阳能工业加热实例简介	(435)
第 20 章 太阳能热发电	(444)
20.1 概述	(444)
20.2 火力发电系统工作原理	(445)
20.3 太阳能热发电系统理论性能	(449)
20.4 太阳能热发电系统基本组成	(451)
20.5 太阳能热发电系统主要类型	(454)
20.6 槽式太阳能热发电系统	(455)
20.7 塔式太阳能热发电系统	(459)
20.8 碟式太阳能热发电系统	(466)
第 21 章 太阳炉	(469)
21.1 概述	(469)
21.2 太阳炉基本原理	(470)
21.3 太阳炉聚光理论	(474)

21.4 太阳炉实例简介	(477)
21.5 太阳炉应用范围	(480)
第 22 章 太阳能显热储存	(484)
22.1 概述	(484)
22.2 太阳能热储存的分类及一般要求	(485)
22.3 太阳能显热储存	(488)
22.4 液体显热储存	(491)
22.5 固体显热储存	(496)
第 23 章 太阳能潜热储存	(500)
23.1 概述	(500)
23.2 太阳能潜热储存	(501)
23.3 无机盐合物类储热	(504)
23.4 有机化合物类储热	(508)
第 24 章 太阳能化学反应热储存	(510)
24.1 概述	(510)
24.2 可逆化学反应的储热原理	(511)
24.3 选择化学反应的标准及可供选择的化学反应	(515)
24.4 可逆化学反应储热的主要优缺点	(517)
24.5 太阳能热储存的经济性及其他	(518)
附录	
附录 1 北纬 $25^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 太阳轨迹平面投影图	(520)
附录 2 地球外太阳光谱辐照度	(523)
附录 3 大气质量 $m = 1.5$ 太阳光谱辐照度	(533)
附录 4 我国 70 个城市各月的太阳能资源及气象参数	(537)
附录 5 黑体辐射函数表	(559)
附录 6 固体的热物理性质	(563)
附录 7 液体的热物理性质	(565)
附录 8 气体的热物理性质	(567)
附录 9 各类材料的太阳吸收比和发射率	(570)
附录 10 材料表面的发射率	(572)
参考文献	(575)

绪 论

0.1 太阳能利用的意义

太阳能是可再生能源的一种。开发利用太阳能,对于节约常规能源、保护自然环境、减缓气候变化等,都具有极其重大的意义。

(1) 可以节约大量使用的化石能源

在当今世界的能源结构中,人类利用的能源主要是石油、天然气和煤炭等化石能源。据有关资料统计,2002 年世界一次能源消费量为 94.05 亿吨石油当量。随着全球经济的发展、人口的增加、社会生活的提高,未来世界能源消费量还将继续增长。预计到 2020 年世界一次能源消费总量将达到 200~250 亿吨标准煤。

我国的能源资源储量也不容乐观。根据最新资料,现有探明经济可开发剩余可开采总储量为 1392 亿吨标准煤,约占世界总量的 10.1%。我国能源剩余可开采总储量的结构为:原煤占 58.8%,原油占 3.4%,天然气占 1.3%。我国能源资源保证程度仅为 129.7 年,其中:原煤仅为 114.5 年,原油仅为 120.1 年,天然气仅为 49.3 年。

由此可见,在人类开发利用能源的历史长河中,以石油、天然气和煤炭等化石能源为主的时期,仅是一个不太长的阶段,这些化石能源终将走向枯竭而被新的能源所取代。太阳能资源丰富,分布广泛,取之不尽,用之不竭。包括太阳能在内的可再生能源,是人类社会未来能源的基石,必将成为化石能源的替代能源。

(2) 可以保护人类赖以生存的自然环境

化石能源的大量开采和使用,是造成全球环境污染与生态破坏,进而危害人类健康和生命的主要原因之一。如何在开发和利用能源的同时,保护好人类赖以生存的地球的环境与生态,已经成为一个全球性的重大问题。

我国的能源开发利用对于环境造成的污染也相当严重。我国是世界上少数几个能源结构以煤炭为主的国家,也是世界上最大的煤炭消费国。煤炭燃烧所产生的 CO_2 排放量比燃烧同热值的天然气要高 61%,相比燃油要高 36%。不仅如此,煤炭燃烧还产生 SO_2 、 NO 、粉尘等有害物质,严重污染周围的自然环境和生态

环境。

与此相反,包括太阳能在内的可再生能源,没有或只有很少的污染物排放,清洁干净,因而是与自然环境和生态环境相协调的清洁能源。

(3) 可以减缓日益严重的全球气候变化

全球气候变化是当前国际社会普遍关注的重大全球环境问题,它主要是由发达国家在其工业化过程中燃烧大量化石燃料产生的温室气体排放所造成的。因此,限制和减少化石燃料燃烧产生的温室气体排放,已成为国际社会减缓全球气候变化的重要组成部分。

观测资料表明,在过去的 100 年中,全球平均气温上升了 $0.3^{\circ}\text{C}\sim 0.6^{\circ}\text{C}$,全球海平面平均上升了 $10\sim 25\text{ cm}$ 。如果不对温室气体采取“减排”措施,则在未来几十年内,全球平均气温每 10 年将可升高 0.2°C ,这势必将进一步造成陆地面积缩小、生物物种减少、人类疾病增多等一系列严重后果。

根据权威机构预测,21 世纪全球平均气温升高的范围可能在 $1.4^{\circ}\text{C}\sim 5.8^{\circ}\text{C}$ 之间,但实际究竟上升多少,将取决于 21 世纪化石燃料的消耗量和气候系统的敏感程度。

由上述各种分析可见,太阳能是保护人类赖以生存的地球生态环境的清洁能源;采用包括太阳能在内的可再生能源以逐渐减少和替代化石能源的使用,是保护生态环境、走经济社会可持续发展之路的重大措施。

0.2 太阳能利用的特点

太阳能利用是开发利用可再生能源的重要领域。依据能量转换的形式,太阳能可以分别转换为热能、电能和化学能等,即太阳能的转换方式有光热转换、光电转换和光化学转换等几种。依据太阳能这些转换原理而加以利用的,分别称之为“太阳能热利用”、“太阳能光电利用”和“太阳能光化学利用”等。本书介绍的内容集中在太阳能热利用。

太阳能作为一种能源,与煤炭、石油、天然气等化石能源相比较,有其独占鳌头的特点。太阳能的优点可概括为以下几点:

(1) 普遍——阳光普照大地,处处都有太阳能,可以就地利用,不需要到处寻找,更不需要火车、轮船、汽车等日夜不停地运输。这对于解决边远偏僻地区以及交通不便的乡村、山区、海岛等地的能源供应,尤为重要。

(2) 巨大——太阳能无比巨大。一年内到达地面的太阳能的总量,要比地球上现在每年消耗的各种能源的总量大几万倍。

(3) 长久——只要存在太阳,就会有太阳能。因此,利用太阳能作为能源,可以说是取之不尽、用之不竭的。

(4) 无害——利用太阳能作为能源,没有废渣、废料、废水、废气排出,不产生对人体有害的物质,因而不会污染环境,没有公害。

当然,太阳能还有如下几个不可忽视的特点:

(1) 分散性——即太阳能的能量密度低。晴朗白天的正午,在垂直于太阳光方向的地面上,1 m²面积所能接受的太阳能,平均只有1 kW左右。作为一种能源,这样的能量密度是比较低的。因此在实际利用时,往往需要一套相当大的装置来收集太阳能,这就使得太阳能利用装置占地面积大、用料多、成本较高。

(2) 间歇性——到达地面的太阳能,随昼夜的交替而变化,这就使大多数太阳能利用装置在夜间无法工作。为克服夜间没有太阳能所造成的困难,就需要配备必要的储能设备,以便在白天把太阳能收集并储存起来,供夜晚使用。

(3) 随机性——到达地面的太阳能,由于受气候、季节等因素的影响,是极不稳定的,这也给太阳能利用增加了不少难度。为克服阴雨天没有太阳能所造成的困难,也需要配备必要的储能设备,以便在晴朗天时把太阳能收集并储存起来,供阴雨天使用。

0.3 太阳能热利用简史

人类利用太阳能有悠久的历史。中国古代太阳能利用的历史虽远不如四大发明那样为世人所知,但实际上中国却是世界上利用太阳能最早的国家之一。根据古籍记载,早在公元前十一世纪(西周时代),我们的祖先就已开始利用铜制凹面镜汇聚阳光点燃艾绒取火,古书上称之为“阳燧取火”。这是一种原始的太阳能聚光器,在世界科学发明史上占有重要的地位,大约比古希腊的阿基米德利用太阳能聚焦要早900多年。现今在中国博物馆中还收藏着春秋、汉、唐、宋等朝代出土的利用太阳能取火的器具“阳燧”。

公元前214年,古希腊科学家阿基米德让数百名士兵手持磨亮的盾牌,将这种反光器面对着太阳,使照射在盾牌上的太阳光经过反射而聚焦,对准攻打西西里岛拉修斯港的古罗马帝国的木制战船,最终使得这支入侵的舰队被烧着而沉没和溃散。

然而,由于受生产力和科学技术发展水平低下的制约,在人类社会相当长的一个历史时期内,太阳能除用来取火之外,始终处于自然利用的初级阶段,主要用以晾晒谷物、果蔬、鱼肉、衣被、皮革等。直到20世纪下半叶,伴随科学技术和现代工

业生产的迅猛发展,在化石能源资源有限性逐步显现及大量使用化石燃料对生态环境破坏性日益加剧的情况下,才促使人们对于太阳能利用的重视,进入了应用现代科学技术利用太阳能的阶段。

尽管人类利用太阳能已有 3 000 多年的历史,但把太阳能作为一种能源和动力加以利用,却只有不到 400 年的历史。按照太阳能利用发展和应用的状况,可以把现代世界太阳能热利用的发展过程划分为如下几个阶段^[45]。

1615~1900 年

近代太阳能利用的历史,一般从 1615 年法国工程师所罗门·德·考克斯发明世界上第一台利用太阳能驱动的抽水泵算起。这一阶段的主要成果有:1860 年法国人穆肖研制出世界上第一台抛物镜太阳灶,供在非洲的法军使用;1878 年法国人皮福森研制出以太阳能为动力的印刷机;1883 年美籍瑞典人埃里克森试验成功用太阳能驱动一台 1.6 马力的往复式发动机。这些动力装置几乎全部采用聚光方式采集阳光,发动机功率不大,工质大都是水蒸气,造价昂贵,实用价值不大。

1901~1920 年

在这一阶段,世界太阳能研究的重点仍然是太阳能动力装置,但采用的聚光方式出现多样化,并开始采用平板太阳能集热器和低沸点工质。同时,装置的规模也有所扩大,最大输出功率已达 73.55 kW,实用价值增大,但造价仍然很高。这一阶段的主要成果有:1901 年美国人伊尼斯在加州建成一台太阳能抽水装置,采用自动跟踪太阳的截头圆锥聚光器,功率为 7.36 kW;1902~1908 年维尔斯在美国建造了五套双循环太阳能发动机,其特点是采用氨、乙醚等低沸点工质和平板太阳能集热器;1913 年舒曼与博伊斯合作,在埃及开罗以南建造了一台由五个每个长 62.5 m、宽 4 m 的抛物柱面反射镜组成的太阳能动力灌溉系统,总采光面积达 1 250 m²,功率为 54 kW。

1921~1945 年

由于化石燃料的大量开采应用及第二次世界大战的影响,此阶段太阳能利用的研究开发处于低潮,参加研究工作的人数及研究项目和研究资金均大为减少。

1946~1965 年

第二次世界大战结束之后的 20 年间,一些有识之士开始注意到随着石油、天然气等的大量开采利用,其资源必将日渐减少,仅仅依靠资源有限的化石燃料来满足人类日益增长的能源需求终非长久之计,所以呼吁有关方面早做准备,寻找新的能源,重视太阳能的研究开发。在这一阶段,太阳能利用的研究开始复苏,研究者加强了太阳能基础理论和基础材料的研究,取得了太阳能选择性吸收涂层等一批关键技术的重大突破。这一阶段的主要业绩和成果有:1952 年法国国家研究中心于比利牛斯山东部建成一座功率为 70 kW 的太阳炉;1954 年 10 月于印度新德里成立了应用太阳能协会,即现在的国际太阳能协会(ISES);1955 年 12 月在美国召开了有 37 个国家的约 3 万多名代表与会的国际太阳能大会和展览会;1955 年以色

列科学家泰伯(Tabor)等人首次提出了光谱选择性吸收表面的基础理论,并研制成功实用的黑镍等选择性吸收涂层,为高效太阳能集热器的发展创造了条件;1960年法勃在美国佛罗里达州,用平板太阳能集热器建成了世界上第一套氨-水吸收式太阳能空调系统,制冷能力为5冷吨;1961年一台带有石英窗的斯特林发动机问世。

1966~1973 年

此阶段的世界太阳能利用工作停滞不前,发展缓慢。主要原因是太阳能利用技术还不成熟,尚处于成长阶段;太阳能利用设备投资巨大,效果不佳,难以与常规能源相竞争,尚得不到公众、企业和政府的重视和支持。

1973~1980 年

1973年10月爆发的中东战争,迫使石油输出国组织以石油为武器,采取减产与提价等措施支持中东人民的斗争,维护各产油国的利益。结果,使得主要依靠从中东大量进口廉价石油的发达国家在经济上遭到沉重打击。于是,西方国家的一些人士惊呼,世界发生了“石油危机”。这次危机,在客观上促使人们认识到,现时的能源结构必须改变,应加速向新的能源结构过渡。许多国家、特别是发达国家重新加强了对太阳能利用的支持,在世界范围再次掀起了开发利用太阳能的热潮。这一阶段的太阳能利用具有如下特点:

(1) 各国加强了太阳能研究工作的计划性,不少国家制定了近期和远期的阳光计划,开发利用太阳能成为政府行为,支持力度大大加强。同时,国际合作十分活跃,一些发展中国家也相继开始参与太阳能利用工作。

(2) 研究领域不断扩大,研究工作日益深入,取得了一批较为重要的成果,如复合抛物面镜聚光器(CPC)、太阳能真空集热管、太阳能热发电系统等。

(3) 太阳能热水器开始实现商品化,初步建立起太阳能热水器产业,但规模还比较小,经济效益尚不理想。

这一世界性的太阳能开发利用热潮,也对中国产生了重大影响,推动了中国太阳能开发利用工作的发展。一些有远见的科技人员纷纷投身太阳能事业,积极向政府有关部门提出建议。太阳能推广应用工作发展迅速,在农村推广太阳灶和被动式太阳房,在城市研发应用太阳能热水器,极大地推动了中国太阳能事业。太阳能研究和推广工作纳入了国家计划,获得了专项经费及短缺物资专项供应的支持;一些高等院校和科研院所纷纷设立了太阳能研究室或课题组,有的地方并开始筹建太阳能研究所。1979年国家经委和国家科委制定了太阳能利用国家发展规划,成立了中国太阳能学会,进一步推动了中国太阳能事业的发展。

1981~1991 年

进入20世纪80年代后不久,太阳能开发利用的热潮出现回落,许多国家相继削减太阳能研究资金,其中以美国最为突出。导致这一状况的主要原因是:世界石油价格大幅度下跌,而太阳能产品价格缺乏竞争力;太阳能利用技术无重大突破,