

# 实用太阳能热水器

邵家驥 马沅浚 袁旭东 编著

上海科学技术出版社

## 内 容 提 要

太阳能热水器是目前世界上使用最为普遍并效果显著的太阳能利用装置。我国近年来也研制了多种形式平板型集热器和热水器装置,并已推广使用,取得了良好效果。

本书详细介绍了平板型集热器基本原理,典型结构和制作方法,并分析了影响它的热效率的基本因素以及提高热效率的途径。本书还对热水器循环系统进行了详细探讨和分析,并提供了太阳能淋浴室的设计实例。本书所有介绍都提供了具体数据和设计方案,最后本书还探讨了聚焦型集热器基本原理和制作方法。

本书可供从事太阳能利用工作的设计、工艺人员及大专院校师生参考。

封面设计 卜允台

## 实用太阳能热水器

邵家骧 马沅浚 袁旭东 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 江苏溧水印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 5.125 字数 111,000

1983 年 5 月第 1 版 1983 年 5 月第 1 次印刷

印数 1—16,000

统一书号: 15119·2268 定价: (科三)·0.43 元

## 前 言

太阳能是一种巨大的、无污染的自然能源。地球每年从太阳获得的能量为  $6 \times 10^{17}$  千瓦小时，这种巨大的能量比目前人类消耗的全部能量还要大几万倍。

太阳能热水器装置是利用太阳辐射能转变成热能，并用来生产热水的一种设施。它的结构简单、加工方便、成本不高、效果良好，已进入实用化，日益普及推广，供工农业生产及居民生活上使用。许多先进工业国家广泛采用太阳能热水器，作为节约能源的措施之一，产品已商品化。

我国近年来在太阳能热水器的研制和推广使用上，取得了成效。根据有关资料统计，到目前为止，全国已推广使用的太阳能热水器的总采光面积，已达十多万平方米（每平方米一年相当用煤 200~300 斤）。现我国有 15 个省、市的三十多家工厂生产各种类型的太阳能热水器，年产量可达 5 万平方米。

在我国，太阳能热水器在北方一般可使用半年以上，南方可使用十个月。如上海某大楼于 1975 年建成了采光面积为 60 平方米的太阳能淋浴室，每年使用时间达 200 天左右，每天可供二百多人次淋浴。这种淋浴装置既节省了大量燃料，又可减少环境污染，经济实惠。

随着科学技术的迅速发展，新工艺、新材料、新技术的进一步采用，必将使太阳能热水器制造成本降低，使用寿命延长，可望有更多的新品种出现。

本书是在上海市太阳能学会朱成名同志组织下编写的。

本书由七一一研究所邵家骧编写第二、四、七章；上海工业建筑设计院马沅浚编写第三、六章；华中工学院袁旭东编写第一、五章。浦江轴承厂金华参加了第一章的部分编写工作。最后由邵家骧整理、统稿。上海机械学院太阳能研究所车茂隆同志和王锦浹同志在评阅本书时提出了很好意见，对此一并表示感谢。

由于我们水平有限，经验不足，书中定有不妥和错误之处，欢迎读者批评指正。

编者 1982.5.

## 符号说明

- $A$ ——集热器透光面积(米<sup>2</sup>);  
 $a$ ——对流放热系数(千卡/米<sup>2</sup>·时·°C);  
 $B$ ——抛物镜口径(米)、(毫米);  
 $C$ ——水的比热(1千卡/公斤·°C);  
 $D$ ——焦区直径(米)、(毫米);  
 $d$ ——管道直径(米)、(毫米);  
 $d_2$ ——水箱直径(米)、(毫米);  
 $E$ ——黑体辐射强度、能量密度(千卡/米<sup>2</sup>·时);  
 $F$ ——集热器效率因子;  
 $F'$ ——肋片效率因子;  
 $f$ ——焦距(米)、(毫米);  
 $G$ ——水流量(公斤/时);  
 $g$ ——重力加速度(9.8米/秒<sup>2</sup>);  
 $H$ ——水箱高度(米)、(毫米);  
 $h$ ——集热器中心至水箱中心垂直距离(米)、(毫米);  
 $h_a$ ——集热管沿程损失系数;  
 $h_j$ ——集热器局部损失系数;  
 $I$ ——太阳辐射强度平均值(千卡/米<sup>2</sup>·时)、(卡/厘米<sup>2</sup>·分);  
 $I_0$ ——直射时太阳辐射强度平均值(千卡/米<sup>2</sup>·时)、(卡/厘米<sup>2</sup>·分);  
 $I_c$ ——入射为 $\theta$ 时的太阳辐射强度平均值(千卡/米<sup>2</sup>·时)、(卡/厘米<sup>2</sup>·分);  
 $I_{sc}$ ——太阳常数(1353瓦/米<sup>2</sup>或1.94卡/厘米<sup>2</sup>·秒);  
 $i$ ——每天淋浴人次;  
 $i$ ——太阳入射角(度);

- $J$ ——热损失与光效率比率;  
 $K$ ——平均聚光度;  
 $L$ ——管道长度(米);  
 $L_{ao}$ ——集热器沿程损失的当量长度(米);  
 $L_{dj}$ ——局部损失当量长度(米);  
 $L_{at}$ ——水箱沿程损失的当量长度(米);  
 $\Sigma L_a$ ——各局部阻力与沿程阻力的当量长度之和(米);  
 $i$ ——水箱中水位下降的高差(米);  
 $m$ ——大气质量数;  
 $N$ ——玻璃层数;  
 $n$ ——吸热管数量;  
 $P$ ——大气透明度;  
 $P_m$ —— $m$ 个大气质量时的大气透明度;  
 $p$ ——水的压力(公斤/厘米<sup>2</sup>);  
 $\Delta p$ ——压差(公斤/厘米<sup>2</sup>);  
 $Q$ ——系统总热量(千卡/时);  
 $Q_m$ ——系统耗热量(千卡/时);  
 $Q_t$ ——系统总热量损失(千卡/时);  
 $Q_p$ ——系统产热量(千卡/时);  
 $Q_s$ ——系统蓄热量(千卡/时);  
 $Q_u$ ——集热器单位平方米的获热量(千卡/米<sup>2</sup>·时);  
 $q$ ——集热管收集到的有用热量(千卡/米<sup>2</sup>·时);  
 $R$ ——聚光镜的方向系数;  
 $R_b$ ——保温层热阻(米<sup>2</sup>·时·°C/千卡);  
 $R_f$ ——板液热阻(米<sup>2</sup>·时·°C/千卡);  
 $r$ ——镜面反射率;  
 $S$ ——水箱的截面积(米<sup>2</sup>);  
 $T$ ——绝对温度(K);  
 $t$ ——淋浴水温(°C);  
 $t_a$ ——环境温度(°C);

$t_c$ ——集热温度( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $t_e$ ——集热器出口温度( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $t_i$ ——集热器进口温度( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $t_p$ ——集热器吸热板温度( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $t_j$ ——试验开始时集热器中水的平均温度( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $t_s$ ——试验结束时集热器中水的平均温度( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $t$ ——时间(秒);  
 $U_b$ ——集热器底部散热系数(千卡/米<sup>2</sup>·时· $^{\circ}\text{C}$ );  
 $U_l$ ——集热器散热系数(千卡/米<sup>2</sup>·时· $^{\circ}\text{C}$ );  
 $U_t$ ——集热器顶部散热系数(千卡/米<sup>2</sup>·时· $^{\circ}\text{C}$ );  
 $V$ ——容积流量(升/时);  
 $v$ ——每人每天热水用量(升/日);  
 $W$ ——管间距(米)、(毫米);  
 $w$ ——水流速、风速(米/时);  
 $z$ ——擒纵轮齿数;  
 $\alpha$ ——吸收率(度);  
 $\beta$ ——集热器安装倾角(度);  
 $\gamma$ ——水的比重;  
 $\delta$ ——太阳赤纬(度);材料厚度(米)、(毫米);  
 $\epsilon$ ——黑体辐射率;  
 $\zeta$ ——沿程阻力系数;  
 $\eta$ ——集热器热效率;  
 $\Theta$ ——当量热损失系数(千卡/米<sup>2</sup>·时· $^{\circ}\text{C}$ );  
 $\theta$ ——太阳高度(度);  
 $\alpha$ ——截光系数;  
 $\Lambda$ ——对流传热系数(千卡/米<sup>2</sup>·时· $^{\circ}\text{C}$ );  
 $\lambda$ ——材料导热系数(千卡/米·时· $^{\circ}\text{C}$ );  
 $\nu$ ——黑体热辐射波长(微米);  
 $\mathcal{E}$ ——镜面精度系数;  
 $\xi$ ——局部阻力系数;

- $\Pi_{\lambda}$ ——管壁对工质的换热系数(千卡/米<sup>2</sup>·时·°C);  
 $\pi$ ——圆周率;  
 $P$ ——集热管周长(米)、(毫米);  
 $\rho$ ——抛物面矢量半径(米);  
 $\sigma$ ——波耳兹曼常数( $4.9 \times 10^{-8}$ 千卡/米<sup>2</sup>·时·K<sup>4</sup>);  
 $T$ ——摆锤的摆动周期(1/秒);  
 $\tau$ ——玻璃透过率;  
 $\Phi$ ——半收集角(度);  
 $\phi$ ——镜面不精确角差(度);  
 $\phi_0$ ——太阳径角(度);  
 $\varphi$ ——地理纬度(度);  
 $\chi$ ——截光率;  
 $\psi$ ——误差角(度);  
 $\Omega$ ——时角(度);  
 $\omega$ ——角速度(弧/分)。



# 目 录

## 前 言

<b>第一章 太阳辐射能</b> .....	1
第一节 太阳常数和太阳辐射通量 .....	1
第二节 太阳辐射光谱 .....	3
第三节 地面上的太阳辐射强度 .....	6
一、太阳高度 .....	6
二、日照时间 .....	8
三、大气透明度 .....	10
第四节 我国的太阳能资源 .....	13
<b>第二章 平板型集热器</b> .....	16
第一节 平板型集热器基本原理与结构 .....	16
第二节 直管式集热器 .....	21
一、直管式集热器结构与制作 .....	21
二、直管式集热器性能特点 .....	25
第三节 瓦楞式集热器 .....	28
一、瓦楞式集热器结构与制作 .....	28
二、瓦楞式集热器性能特点 .....	32
第四节 扁管式集热器 .....	33
一、扁管式集热器结构与制作 .....	33
二、扁管式集热器性能特点 .....	36
第五节 铝翼式集热器 .....	38
一、铝翼式集热器结构与制作 .....	38
二、铝翼式集热器性能特点 .....	39
第六节 真空玻璃管式集热器 .....	41

一、真空玻璃管式集热器结构与制作 .....	42
二、真空玻璃管式集热器性能特点 .....	44
第七节 内循环式集热器 .....	46
一、内循环式集热器结构与制作 .....	47
二、内循环式集热器性能特点 .....	48
第八节 平板型集热器安装倾角 .....	49
<b>第三章 太阳能热水器及循环系统</b> .....	<b>53</b>
第一节 热水器组成及原理 .....	53
第二节 热水器水箱及水箱配管 .....	55
一、循环水箱 .....	55
二、补给水箱 .....	58
三、水箱配管 .....	59
第三节 热水器循环系统 .....	60
一、自然循环系统 .....	60
二、强迫循环系统 .....	64
第四节 热水器的平面布置 .....	66
第五节 热水器的管道系统 .....	72
一、等程式管道系统 .....	73
二、不等程式(非同程式)管道系统 .....	75
<b>第四章 平板型集热器热效率</b> .....	<b>77</b>
第一节 集热器热分析与效率 .....	77
第二节 集热器效率因子 .....	79
第三节 集热器透过吸收积 .....	82
一、平板玻璃透过率 .....	82
二、吸热体表面吸收率 .....	87
第四节 集热器散热损失系数 .....	91
<b>第五章 集热器热效率的测定</b> .....	<b>97</b>
第一节 集热器单体热效率测定 .....	97
一、试验条件 .....	98

二、	测量仪器仪表	98
三、	测试回路的安装	101
四、	试验程序及数据处理	103
五、	集热器单体热效率计算及曲线标绘	104
第二节	热水器效率测定	107
一、	试验回路	107
二、	水量测定	109
三、	综合温度测定	109
四、	蓄热量测定	110
五、	产热量测定	110
六、	热效率计算	110
七、	试验数据记录	111
第六章	太阳能淋浴室设计实例	113
第一节	淋浴用热水耗量及集热器采光面积的确定	115
一、	淋浴用热水耗量确定	115
二、	集热器采光面积确定	115
第二节	热水器装置及其附件	116
一、	热水器平面布置及管道系统	117
二、	水箱容量的确定	118
三、	定温自动放水装置	118
第三节	淋浴室设计	119
一、	淋浴室规模大小及土建要求	119
二、	淋浴室内部管道布置	121
三、	淋浴室管道综合布置	123
第七章	聚焦型集热器	126
第一节	柱形抛物镜	127
一、	工作原理和能量平衡	127
二、	聚光度与半收集角关系	131
三、	柱形抛物镜的反射材料	134

第二节	焦区能量分布及集热管径估算 .....	136
第三节	集热器框架与支架 .....	141
第四节	集热器跟踪装置 .....	143
一、	时钟机械式跟踪装置 .....	144
二、	光电式跟踪装置 .....	147

# 第一章 太阳辐射能

物质在分子运动过程中，产生以电磁波的方式向四周辐射的能量，这种能量的辐射称为辐射能。

太阳是一个巨大的炽热球状体，表面的平均绝对温度为6000 K (5700°C)，这一热体以电磁波的形式向四周辐射能量，即太阳辐射能。

太阳辐射能是地球上热能最重要的源泉。地球每年接受来自太阳的能量为  $1.68 \times 10^{24}$  卡/年或为  $1.51 \times 10^{18}$  度的电力。这个能量比全世界每年所消耗的总能量还多3万倍。

因此，太阳能是极其丰富的，用之不尽的。但是它很稀疏地分布在广阔的地球表面上，而且在到达地面时又变化无常。所以在研究太阳热能转换时，首先要研究大气上层太阳辐射能的分布，然后研究在大气中所发生的变化，而后再研究地面的辐射情况。

## 第一节 太阳常数和太阳辐射通量

地面上太阳辐射能量究竟有多少，这是个比较复杂的问题。因为它的变化除昼夜之差外，在白天，中午与傍晚、晴天与阴天、冬季与夏季、南方与北方都不一样。

人们经过长期观测，发现在地球的大气层外，在不受大气影响的情况下，太阳辐射能接近某一恒定值，但仍稍有些变化。这是由于地球绕太阳旋转的轨道是椭圆形的，一年之中

地球距离太阳有近有远,最远与最近的距离相差 500 万公里。大家知道,能量辐射强度是与距离的平方成反比。既然太阳与地球间距离(日地距离)一年之内总在变化,所以在大气层外的太阳辐射强度一年之内也总有变化。

为方便起见,人们把当日地距离等于地球轨道的平均半径时,在地球大气层外垂直于太阳光线的表面上,单位面积单位时间内的太阳辐射能数值,叫做太阳常数。根据美国最新测量资料得出,太阳常数值为 1353 瓦/米<sup>2</sup> 或 1.94 卡/厘米<sup>2</sup>·秒。

很明显,太阳常数对于研究和利用太阳辐射能,是一个十分重要的数据。因为当我们知道太阳辐射在大气中衰减规律时,便可根据已知的太阳常数值获得地面上的太阳辐射强度。

太阳辐射强度即太阳辐射通量,是指单位时间内通过单位面积的阳光辐射能量,其基本单位是 1 卡/厘米<sup>2</sup>·分。由此可见,太阳常数只是在特定条件下测定的太阳辐射通量。

太阳辐射通量包括直接辐射通量和散射辐射通量。地面上的太阳辐射通量,对于不同地点(如纬度和海拔高度)、不同时间(季节和时刻)以及不同天气(晴天和阴天)是不同的。对于研究和利用太阳能来说,测量出到达地球表面不同地区的太阳辐射通量的极大值是十分必要的。

根据观测表明,在最好条件下,垂直于太阳光线表面的直接辐射通量的极大值约为太阳常数值值的 80% 左右。

测得当地的太阳辐射通量,再根据当地一年中日照时数的多少,即可粗略估计出该地区一年中能获得的总太阳辐射能。

表 1-1 列出了我国一些城市的地理纬度、日照时数和日照百分率。

日照百分率是指日照时数与可照时数之比。

表 1-1 我国一些城市的地理纬度、日照时间、日照百分率

地名	北纬	东经	日照时数 (时)			日照百分率 (%)		
			年	冬	夏	年	冬	夏
徐州	34°19'	117°22'	2400.4	155.9	234.9	54	50.7	55.0
宝鸡	34°16'	106°58'	1958.1	144.1	198.1	44	46.7	46.3
西安	34°16'	108°55'	1966.4	130.0	212.2	44	42.3	49.7
蚌埠	32°56'	117°27'	2179.7	143.9	218.7	49	46.0	51.7
南京	32°04'	118°47'	2182.4	141.9	227.5	49	45.7	54.0
合肥	31°53'	117°15'	2287.9	142.5	247.9	51	45.7	58.7
上海	31°12'	121°26'	1986.1	132.2	215.6	45	41.7	51.3
成都	30°40'	104°04'	1211.3	66.8	154.9	27	21.0	37.0
武汉	30°38'	114°17'	1967.0	111.4	226.6	45	36.0	54.3
杭州	30°20'	120°10'	1902.1	122.8	205.9	43	40.0	49.3
宁波	29°54'	121°32'	2019.7	129.0	229.9	46	40.7	54.7
拉萨	29°45'	91°02'	3005.1	240.0	234.4	68	75.3	56.3
重庆	29°30'	106°33'	1257.6	45.3	97.4	28	14.3	44.7
南昌	28°40'	115°58'	1968.3	110.8	235.3	44	34.7	55.7
长沙	28°15'	112°50'	1815.1	94.3	235.4	41	29.3	56.6
遵义	27°41'	106°55'	1236.9	40.3	178.1	28	12.7	40.3
福州	26°05'	119°18'	1859.7	114.3	219.2	43	34.3	53.7
厦门	24°27'	118°04'	2238.8	152.7	235.3	51	46.6	57.3
广州	23°00'	113°13'	1951.4	132.3	207.7	44	40.0	51.3
南宁	22°48'	108°18'	1843.1	101.9	198.9	41	30.7	39.3
长春	22°00'	120°45'	2396.4	176.7	223.2	54	32.0	54.0
湛江	21°02'	110°28'	1932.8	115.8	203.7	45	37.0	50.7
东沙岛	20°42'	116°43'	1745.3	87.4	179.8	39	26.0	44.0

## 第二节 太阳辐射光谱

太阳以光辐射的形式将能量送到地球表面上。但由于地

球大气层的存在，到达地面的太阳光谱与大气层上界的太阳光谱有所不同。图 1-1 中阴影部分，表示太阳辐射被大气所吸收的部分。

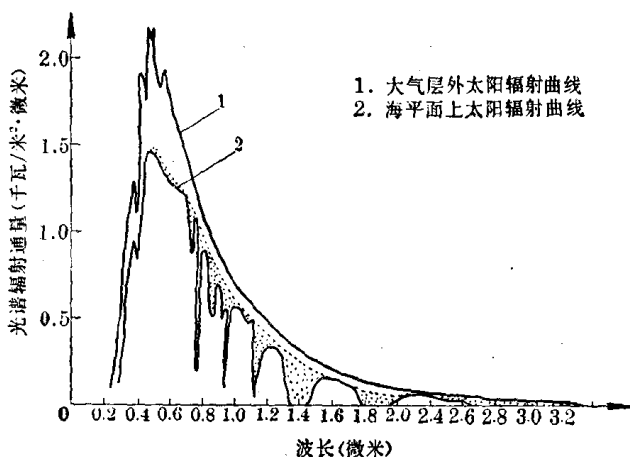


图 1-1 太阳辐射光谱分布

太阳的光辐射，是由不同波长的光波组成的。根据波长，太阳光谱可分为紫外线光谱(波长约小于 0.40 微米)、可见光谱(波长约为 0.40~0.76 微米)和红外线光谱(波长约大于 0.76 微米)。

由图 1-1 可见，在地球大气层外空间，可见光谱区能量约占 40.3%，红外光谱区约占 51.4%，紫外光谱约占 8.3%。太阳辐射能量主要在 0.3~3.0 微米之间，即集中在可见光谱和红外光谱区。

人的眼睛只能看到可见光谱的光线。可见光部分又分为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等七种单色光谱，其波长范围见表 1-2。

太阳辐射光谱中不同波长的光线，对植物叶子、细菌和人



表 1-2 各种不同颜色光的波长

颜 色	波 长 (毫微米)	标 准 波 长 (毫微米)
紫	390~455	430
蓝	455~485	470
青	485~505	495
绿	505~550	530
黄-绿	550~575	560
黄	575~585	580
橙	585~620	600
红	620~760	640

体皮肤作用是不同的。

植物生长取决于可见光谱部分，大量的波长短于 0.3 微米的紫外线对植物有害；波长超过 0.8 微米的红外线仅能提高植物的温度并加速水分的蒸发，不能引起光化学反应（光合作用）。植物中各种光化学反应过程的光谱曲线是不同的，例如红光刺激无性繁殖器官的生长，蓝光刺激茎的生长，叶绿素形成是在光谱的蓝光和红光部分中。

太阳射线的杀菌作用主要集中于紫外部分，但光谱的可见光部分也有很大的杀菌作用，这是由于可见光部分的总能量很多的缘故。

太阳光线对人体皮肤的作用表现为下列三种形式：形成红斑和灼伤，这主要是由波长短于 0.38 微米的辐射所引起的；使皮肤表层中的脂肪光合成为维生素 D<sub>3</sub>（维生素 D<sub>3</sub> 可防止得佝偻病）；生成黧黑（器官的保护性反应），这是由波长为 0.3~0.45 微米的辐射引起的。