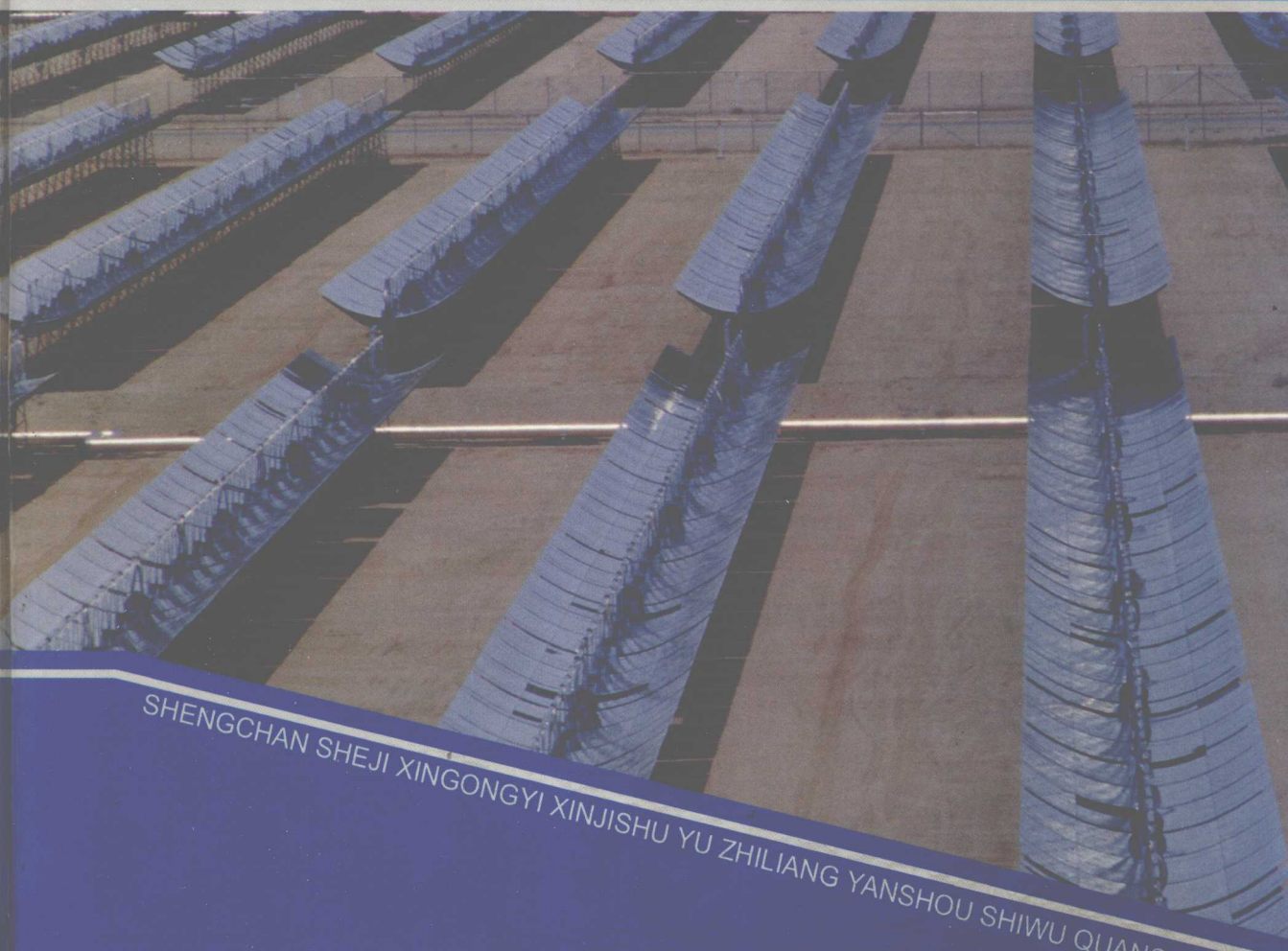


新型太阳能产品

生产设计新工艺、新技术与质量验收

XINXING TAIYANGNENG CHANPIN 实务全书



SHENGCHAN SHEJI XINGONGYI XINJISHU YU ZHILIANG YANSHOU SHIWU QUANSHU

中国能源出版社

新型太阳能产品生产设计 新工艺、新技术与质量 验收实务全书

主 编 贺有德(中国新能源研究中心)

副主编 黄宏业(中国太阳能协会)

(第二卷)

中国能源出版社

第四篇



太阳能集热器的生产设计 工艺技术

第一章 太阳集热器的生产设计工艺技术概述

第一节 太阳集热器概述

太阳集热器的定义是:吸收太阳辐射并将产生的热能传递到传热工质的装置。这短短的定义却包括了丰富的含义:第一,太阳集热器是一种装置;第二,太阳集热器可以吸收太阳辐射;第三,太阳集热器可以产生热能;第四,太阳集热器可以将热能传递到传热工质。

太阳集热器本身虽然不是直接面向消费者的终端产品,但是太阳集热器是组成各种太阳能热利用系统的关键部件。无论是太阳热水器、太阳灶、主动式太阳房、太阳能温室,还是太阳能干燥、太阳能工业加热、太阳能热发电等,都离不开太阳集热器,都是以太阳集热器作为系统的动力或者核心部件。所以,在分别介绍太阳热水器、太阳灶、太阳房、太阳能温室、太阳能干燥、太阳能工业加热、太阳能热发电等内容之前,有必要先介绍太阳集热器的有关知识,其中包括太阳集热器的型式分类、结构特点、运行性能等,以便对各种太阳能热利用系统有更深入的理解。

太阳集热器是太阳能热利用系统的关键部件,是用于吸收太阳辐射并将产生的热能传递到传热工质,因此太阳集热器与传热学有密切的联系。为便于分析太阳集热器的运行性能,本章首先简要介绍一些跟太阳集热器及太阳能热利用系统有关的传热学基础知识。

第二节 太阳能热利用中的传热学基础

1. 热量传递的基本方式

传热学是研究物体之间或物体内部因存在温差而发生热能传递的规律。这里所说的物体包括固体、液体和气体。在自然界,无论哪里有温差,哪里就会发生传热过程。

热能的传递可以通过三种方式来实现,它们就是:传导、对流和辐射,这三种方式在本质上是不同的。

(1) 热传导

热传导是依靠物质点的直接接触来传递能量的。例如:在气体中,这种传递是在气体分子之间碰撞时完成;在绝缘体中,这种传递是借助于邻近分子的振动;在导体中,这种传递主要是自由电子的热运动。热传导的特点是:在传热过程中,物体的各个部分并不发生明显的宏观位移。

在不透明的固体中,热传导是热能传递的惟一方式。当物体中存在温差时,热能将自动地由高温处向低温处传递。根据傅里叶(Fourier)热传导定律,物体中的热传导速率(亦称热流率)是与温度梯度及热流通过的截面积成比例,即

$$q_k = -\lambda A \frac{dT}{dX} \quad (1-1)$$

式中 q_k ——热传导速率, W;

λ ——导热系数, W/(m·K);

A ——截面积, m²;

T ——温度, K;

X ——沿热流方向的距离, m。

在热流方向上,由于随着距离 X 的增加,温度 T 总是下降,这使得温度梯度总为负值。因此,在热传导公式(3-1)右边,加上负号,使热传导速率 q_k 为正值,表示热流是和距离 X 的正方向一致的。

表 1-1 给出了几种常用材料的导热系数值

表 1-1 常用材料的导热系数 λ

材料名称	λ [W/(m·K)]	材料名称	λ [W/(m·K)]
纯铜	387	混凝土	1.84
纯铝	237	平板玻璃	0.76
硬铝	177	玻璃钢	0.50
铸铝	168	聚四氟乙烯	0.29
黄铜	109	玻璃棉	0.054
碳钢	54	岩棉	0.0355
镍铬钢	16.3	聚苯乙烯	0.027

(2) 对流传热

对流传热只能在流体(液体和气体)中发生。当流体的微团在空间改变自己的位置时,它们起着载热体的作用,并实现热能的传递。

对流传热过程可分为自然对流传热和强迫对流传热两大类。自然对流传热是指由流体中因密度不同而产生浮升力所引起的换热现象;强迫对流传热是指流体在外力作用

下流体与所接触的温度不同的壁面所发生的换热现象。对流传热过程总是伴随着质点与质点直接接触的热传导过程。

无论是自然对流传热还是强迫对流传热,流体的流动状态及热物理性质对于对流传热的换热率起着非常重要的作用。根据牛顿(Newton)冷却定律,对流传热的换热速率是跟表面与流体的温度差以及与流体接触的表面积成比例,即

$$q_c = h_c A (T_s - T_f) \quad (1-2)$$

式中 q_c ——对流换热速率, W;

h_c ——对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

A ——与流体接触的表面积, m^2 ;

T_s ——表面温度, K;

T_f ——流体温度, K。

表 1-2 给出了几种工作流体在不同换热方式下对流换热系数的量级及近似值。

表 1-2 对流换热系数 h_c 的量级及近似值

工作流体及换热方式	$h_c [W/(m^2 \cdot K)]$	工作流体及换热方式	$h_c [W/(m^2 \cdot K)]$
空气, 自然对流	6 ~ 30	水, 强迫对流	300 ~ 6000
过热蒸汽或空气, 强迫对流	30 ~ 300	水, 沸腾	3000 ~ 60 000
油, 强迫对流	60 ~ 1800	蒸汽, 凝结	6 000 ~ 120 000

(3) 辐射传热

辐射传热的过程是, 物体的部分热能转变成电磁波——辐射能向外发射, 当电磁波碰到其他物体时, 又部分地被后者吸收而重新转变成热能。

所有的物体只要其温度高于绝对零度, 总可以发出电磁波; 与此同时, 所有的物体也吸收来自外界的辐射能。与传导和对流不同, 电磁波的传递即使在真空中也可进行, 到达地面的太阳辐射就是其中一例。

通常, 把物体因有一定的温度而发射的辐射能称为热辐射。热辐射所包括的波长范围近似为 $0.3 \sim 50 \mu m$ 。在这个波长范围内有紫外、可见和红外三个波段, 其中 $0.4 \mu m$ 以下为紫外波段, $0.4 \sim 0.7 \mu m$ 为可见波段, $0.7 \mu m$ 以上为红外波段。热辐射的绝大部分集中在红外波段。

根据斯蒂芬—玻耳兹曼(Stefan - Boltzmann)定律, 物体的辐射功率是跟物体温度的 4 次方及物体的表面积成比例, 即

$$q_R = \varepsilon \delta A T^4 \quad (1-3)$$

式中 q_R ——辐射功率, W

δ ——斯蒂芬—玻耳兹曼常数, $5.669 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$;

ε ——发射率;

A 表面积, m^2 ;

T ——表面温度, K 。

发射率是物体发射的辐射功率与同温度下黑体发射的辐射功率之比值。发射率有法向发射率和半球向发射率的区分。在工程应用情况下,一般可用法向发射率近似代替半球向发射率。

表 1-3 给出了几种常用材料表面的法向发射率值。

表 1-3 常用材料表面的法向发射率 ε

材料名称及表面状态	ε	材料名称及表面状态	ε
金:高度抛光的纯金	0.02	钢:抛光的钢	0.07
铜:高度抛光的电解铜	0.02	轧制的钢板	0.65
轻微抛光的	0.12	严重氧化的钢板	0.80
氧化变黑的	0.76	各种油漆	0.90~0.96
铝:高度抛光的纯铝	0.04	平板玻璃	0.94
工业用铝板	0.09	硬质橡胶	0.94
严重氧化的	0.20~0.31	碳:灯黑	0.95~0.97

实际上,传导、对流和辐射这三种传热方式是经常同时发生的,只是在特定的条件下,有时以这种方式为主,有时则以另一种方式为主。这在以后章节的讨论中,将分别举例说明。

2. 太阳辐射的吸收、反射和透射

当太阳辐射投射在一个物体上时,部分辐射能量将被吸收,部分辐射能量将被反射,其余的辐射能量将透过物体。根据能量守恒定律,应有

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

式中 α ——太阳吸收比;(1-4)

ρ ——太阳反射比;

τ ——太阳透射比。

如果物体是不透明的,也就是说如果物体不能透过太阳辐射,则有

$$\alpha + \rho = 1 \quad (1-5)$$

有的物体即使不是很厚,也只在一些特定的波长范围才能透过辐射,而在大部分波长范围不能透过辐射。例如,普通平板窗玻璃几乎不能透过波长大于 $3\mu\text{m}$ 的辐射。

对于物体的反射表面,可以有以下 4 种不同的类型。

(1) 镜反射表面

物体表面非常平整光洁,它对投射太阳辐射的反射性能如同镜子,符合反射定律,反

射角等于入射角,这种表面称为“镜反射表面”,它的反射称为“镜反射”。

(2) 漫反射表面

物体表面非常均匀,它对投射太阳辐射无差别地向所有的方向反射,这种表面称为“漫反射表面”,它的反射称为“漫反射”。

(3) 镜 - 漫反射表面

固体表面以镜反射为主,但围绕镜反射的还有部分漫反射,这种表面称为“镜 - 漫反射表面”。

(4) 混合型反射表面

固体表面既有漫反射,又有镜反射;这种表面称为“混合型反射表面”。

跟反射的情况相类似,固体表面对太阳辐射的透射也有 4 种类型,分别是“镜透射表面”、“漫透射表面”、“镜 - 漫透射表面”和“混合型透射表面”。

第三节 太阳集热器的分类

太阳集热器可以用多种方法进行分类,例如:按传热工质的类型;按进入采光口的太阳辐射是否改变方向;按是否跟踪太阳;按是否有真空空间;按工作温度范围等。

1. 按集热器的传热工质类型分类

按集热器的传热工质类型,太阳集热器可分为两大类型。

(1) 液体集热器

液体集热器是用液体作为传热工质的太阳集热器。

(2) 空气集热器

空气集热器是用空气作为传热工质的太阳集热器。

2. 按进入采光口的太阳辐射是否改变方向分类

按进入采光口的太阳辐射是否改变方向,太阳集热器可分为两大类型。

(1) 聚光型集热器

聚光型集热器是利用反射器、透镜或其他光学器件将进入采光口的太阳辐射改变方向并会聚到吸热体上的太阳集热器。

(2) 非聚光型集热器

非聚光型集热器是进入采光口的太阳辐射不改变方向也不集中射到吸热体上的太阳集热器。

3. 按集热器是否跟踪太阳分类

按集热器是否跟踪太阳,太阳集热器可分为两大类型。

(1) 跟踪集热器

跟踪集热器是以绕单轴或双轴旋转方式全天跟踪太阳视运动的太阳集热器。

(2) 非跟踪集热器

非跟踪集热器是全天都不跟踪太阳视运动的太阳集热器。

4. 按集热器内是否有真空空间分类

按集热器内是否有真空空间,太阳集热器可分为两大类型。

(1) 平板型集热器

平板型集热器是吸热体表面基本上为平板形状的非聚光型集热器。

(2) 真空管集热器

真空管集热器是采用透明管(通常为玻璃管)并在管壁和吸热体之间有真空空间的太阳集热器。其中吸热体可以由一个内玻璃管组成,也可以由另一种用于转移热能的元件组成。

5. 按集热器的工作温度范围分类

按集热器的工作温度范围,太阳集热器可分为三大类型。

(1) 低温集热器

低温集热器是工作温度在 100°C 以下的太阳集热器。

(2) 中温集热器

中温集热器是工作温度在 $100 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 的太阳集热器。

(3) 高温集热器

高温集热器是工作温度在 200°C 以上的太阳集热器。

以上分类的各种太阳集热器实际上是相互交叉的。譬如:某一台液体集热器,可以是平板型集热器,自然也是非聚光型集热器及非跟踪集热器,属于低温集热器;另一台液体集热器,可以是真空管集热器,又是聚光型集热器,但是非跟踪集热器,属于中温集热器等。

以上分类的各种太阳集热器还可以进一步细分,而且细分又有不同的分类方法。下面仅以聚光型集热器为例。

聚光型集热器可以用几种方法进行分类。

(1) 按聚光是否成像

① 成像集热器。成像集热器是使太阳辐射聚焦,即在接收器上形成焦点(焦斑)或焦线(焦带)的聚光型集热器。

② 非成像集热器。非成像集热器是使太阳辐射会聚到一个较小的接收器上而不使太阳辐射聚焦,即在接收器上不形成焦点(焦斑)或焦线(焦带)的聚光型集热器。

(2) 按聚焦的形式

① 线聚焦集热器。线聚焦集热器是使太阳辐射会聚到一个平面上并形成一条焦线(或焦带)的聚光型集热器。

② 点聚焦集热器。点聚焦集热器是使太阳辐射基本上会聚到一个焦点(或焦斑)的聚光型集热器。

(3) 按反射器的类型

①槽形抛物面集热器。又称为抛物槽集热器,它是通过一个具有抛物线横截面的槽形反射器来聚集太阳辐射的线聚焦集热器。

②旋转抛物面集热器。又称为抛物盘集热器,它是通过一个由抛物线旋转而成的盘形反射器来聚集太阳辐射的点聚焦集热器。

(4)其他聚光型集热器

①复合抛物面集热器。又称为 CPC 集热器,它是利用若干块抛物面镜组成的反射器来会聚太阳辐射的非成像集热器。

②多反射平面集热器。多反射平面集热器是利用许多平面反射镜片将太阳辐射会聚到一小面积上或细长带上的聚光型集热器。

③菲涅耳集热器。菲涅耳集热器是利用菲涅耳透镜(或反射镜)将太阳辐射聚焦到接收器上的聚光型集热器。

本章将着重介绍最常用的太阳集热器,即用液体作为传热工质的平板型集热器和真空管集热器。有关它们的进一步分类方法,将在文中分别叙述。

第二章 太阳能集热器的设计

第一节 概述

太阳集热器是吸收太阳辐射能加热工质的一种换能装置。所谓平板太阳集热器,是指其吸收太阳辐射能的面积与其采光窗口的面积相等。若采光窗口的面积大于其吸收太阳辐射能的面积,则称为聚光太阳集热器。两者为相对而言。

与聚光太阳集热器相比,平板太阳集热器具有结构简单、固定安装、可以采集太阳直射辐射和散射辐射、成本较低等优点,因此,目前平板集热器已被广泛应用于家庭和大型公用太阳热水系统、建筑物的采暖与空调、制冷与干燥等方面,并已逐步形成新兴的太阳能工业。由于平板集热器不具备聚焦阳光的功能,因此其工作温度一般均在 100°C 以下。它是太阳能低温热利用系统中的关键部件。

第二节 典型平板太阳集热器的构造

现有的平板太阳集热器尽管式样很多,但其基本工作原理相同,甚至完全一样。为了能清楚地阐述其工作原理,我们取其最具代表性的一种,简化为图 2-1 所示的模型。按此分析所得出的结论和公式,直接或作少许变化,即可用于分析其它形式的平板太阳集热器。这全模型就是典型平板太阳集热器。

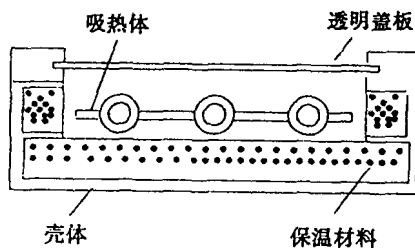


图 2-1 典型平板太阳集热器构造示意图

由图 2-1 可知,典型平板太阳集热器的基本结构由以下几个主要部件组成。

(1) 吸热体 吸热体也叫集热体,它是集热器内吸收太阳辐射能,将其转换为热能,并向工质传递热量的部件。实际上是吸热面板和与之具有良好热结合的流体管道或通道的结合体。

吸热体是平板太阳集热器的关键部件。其性能优劣对平板太阳集热器的工作特性起着决定性的作用,它应具有下列特性。

- ①热工性能好。即板面的太阳辐射吸收率高,热辐射率低,具有良好的传热结构设计。
- ②能承受一定的工质压力。
- ③与水有良好的相容性。
- ④加工工艺简单。

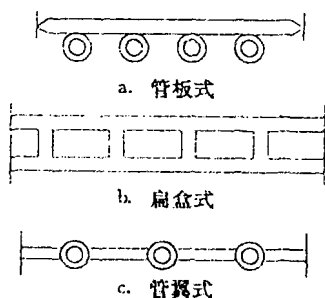


图 2-2 平板集热器吸热体的三种基本类型

吸热体大都采用金属制作,目前国内外基本上都采用铜、不锈钢或铜铝复合结构。吸热面板表面涂有选择性或非选择性吸收涂层。所谓选择性吸收涂层就是对太阳辐射具有较高的吸收率 α ,而在面板工作温度下,具有较低的红外发射率 ε 。这样,涂有这种选择性吸收涂层的吸热体,将能吸收更多的太阳辐射能,同时,减少了向环境的辐射热损失。非选择性吸收涂层是指在一定温度下,其吸收率 α 等于其发射率 ε 。一般平板太阳集热器均采用非选择性涂层,如黑板漆。但目前很多高性能的平板太阳集热器都采用选择性吸收涂层,如铝阳极氧化、镀黑镍等。

从结构上看,吸热体大致可概括为如图 2-2 所示的三种基本类型。

类型 a:称为管板式。吸热板与管子之间以焊接或紧配合方式连接。吸热板与管内流体之间传热性能取决于它们之间的热结合状况。一般,管板式吸热体的热容量较小。这是平板太阳集热器规模生产初期最早采用的一种型式。

类型 b:称为扁盒式。吸热体本身即为通道的一个组成部分,故其传热性能较好,但热容量较大。承压也有一定的限制,对焊接工艺有较高的要求。因此其成本较高,这种结构目前已较少采用。

类型 c:称为管翼式。通道本身带有吸热翅翼,其传热性能好,能承受较高的压力,不

漏水,制造工艺也较简单。目前国内外生产的平板太阳集热器的吸热体基本上都采用这种结构型式。

(2)透明盖板 在吸热体的上方,集热器壳体的顶部,盖有一层或若干层能很好地透过太阳辐射的透明盖板,以减少吸热体对环境的对流和辐射热损失,并保护吸热体和其它部件不受雨、雪、灰尘、污物等的直接侵袭。这对平板集热器尤为重要,因为其吸热面积等于透光面积,也等于散热面积,散热损失很突出。透明盖板应具有以下特性。

- ①光学性能好。即太阳辐射透过率高,吸收率和反射率低,热辐射不透过性好。
- ②机械性能好。能承受一定的风压、积雪、冰雹、投掷石子等外力和热应力的作用。
- ③耐老化性能好。长期暴露在大气环境和阳光下,上述特性无严重恶化。

(3)隔热层为了降低集热器的热损失以提高其热效率,在吸热体的底部和四侧,必须填充一定厚度而绝热性能良好的隔热层,用作平板太阳集热器隔热层的绝热材料,除要有较低的热导率外,还要求不吸水。这样,就可以用较薄的隔热层达到较好的保温效果。

(4)壳体 壳体用于将吸热体、透明盖板和隔热层装配成一体,构成一个完整的太阳集热器。壳体要有一定的刚度和机械强度,便于安装,同时保护吸热体和隔热层不受外界环境的影响。

第三节 太阳集热器的能量平衡方程

1 太阳集热器的基本工作原理

如图2-3所示,平板太阳集热器的基本工作原理十分简单。概括地说,阳光透过透明盖板照射到表面涂有吸收涂层的吸热体上,其中大部分太阳辐射能为吸收体所吸收,转变为热能,并传向流体通道中的工质。这样,从集热器底部入口的冷工质,在流体通道中被太阳能所加热,温度逐渐升高,加热后的热工质,带着有用的热能从集热器的上端出口,蓄入贮水箱中待用,即为有用能量收益。与此同时,由于吸热体温度升高,通过透明盖板和外壳向环境散失热量,构成平板太阳集热器的各种热损失。这就是平板太阳集热器的基本工作过程。

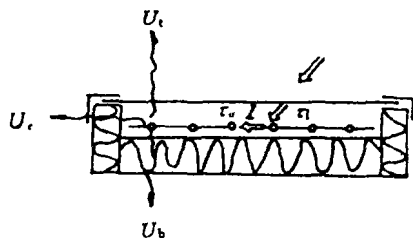


图 2-3 平板太阳集热器热过程示意图

2 能量平衡方程

如图 2-3 所示,投射到集热器吸热体上的太阳辐射能大部分为工质吸收,成为集热器的有用能量收益,其余为集热器向环境的散热损失和集热器本身的贮能(图 2-3 中的 U_t 、 U_b 、 U_c 分别为集热器顶部、底部及侧面边框的热损失系数,详见。这样整个集热器的能量平衡方程可以写为:

$$Q_A = Q_U + Q_L + Q_s \quad (2-1)$$

(1) 投射到吸热体上的太阳辐射能量 Q_A

$$Q_A = A_c (\tau\alpha)_e I_\theta = A_c [(\tau\alpha)_{D\theta} + (\tau\alpha)_d I_d \theta + (\tau\alpha)_R I_R \theta] \quad (2-2)$$

式中, A_c 为集热器采光面积; ID_θ , $I_d \theta$, $I_d \theta$, $I_R \theta$ 分别为换算到倾斜面的总辐射、直射辐射、散射辐射及反射辐射强度; $(\tau\alpha)_e$, $(\tau\alpha)_D$, $(\tau\alpha)_d$, $(\tau\alpha)_R$ 分别为总辐射、直射辐射、散射辐射及反射辐射的透明盖板之透过率—吸收率乘积。

(2) 集热器的有用能量收益 Q_u

$$Q_u = A_c G C_p (T_{f,i} - T_{f,o}) \quad (2-3)$$

式中, $T_{f,i}$, $T_{f,o}$ 为集热器的入口和出口工质温度, $^{\circ}\text{C}$; G 为集热器单位面积单位时间的工质质量流量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; C_p 为工质的定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

(3) 集热器的散热损失 Q_L

$$Q_L = A_c U_L (T_p - T_a) \quad (2-4)$$

式中, U_L 为集热器的总热损失系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; T_p 为吸热板温度, $^{\circ}\text{C}$; T_a 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 集热器本身的贮存能量 Q_s

$$Q_s = C_c \frac{dT}{d\tau} \quad (2-5)$$

式中, C_c 为集热器的热容量, $\text{J}/^{\circ}\text{C}$; τ 为时间, s ; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

稳定工况时, $\frac{dT}{d\tau} = 0$, 则 $Q_s = 0$, 这时集热器本身各部分既不吸热也不放热。非稳定工

况时, 当 $\frac{dT}{d\tau} > 0$, 则 $Q_s > 0$, 如上午集热器开始工作时, 集热器本身各部分将不断地吸热; 当

$\frac{dT}{d\tau} < 0$, 则 $Q_s < 0$, 如傍晚集热器停止工作时, 集热器本身各部分将不断地放热。

3. 任意倾斜平面上太阳辐射强度的计算

任意倾斜平面上太阳辐射强度 I_θ 为:

$$I_\theta = I_d \theta + I_R \theta \quad (2-6)$$

式中, θ 为任意倾斜平面对水平面的倾斜角。

(1) 任意倾斜平面上太阳直射辐射强度

$$I_D \theta = I_D N \cos i \quad (2-7)$$

$$I_D \theta = I_D H \frac{\cos i}{\sin h} \quad (2-8)$$

式中, I_{DN} 为法向太阳辐射强度; I_{DH} 为水平面直射辐射强度; h 为太阳高度角; i 为任意平面上的太阳入射角。

对面向正南倾斜角为 θ 的任意倾斜面:

$$\cos i = \cos(\varphi - \theta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \theta) \sin \delta \quad (2-9)$$

式中, φ 为地理纬度; ω 为太阳时角, δ 为太阳赤纬角。

(2) 任意倾斜平面上太阳散射辐射强度

$$I_{\text{d}\theta} = I_{\text{dH}} \cos^2 \frac{\theta}{2} \quad (2-10)$$

式中, I_{dH} 为水平面上太阳散射辐射强度。

(3) 任意倾斜平面上所获得的地面反射辐射强度

$$I_{\text{R}\theta} = \rho_{\text{g}} I_{\text{H}} \left(1 - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (2-11)$$

式中, ρ_{g} 为地面反射率; I_{H} 为水平面上太阳总辐射强度。

4. 透过率—吸收率乘积

对平板集热器, 阳光首先要通过透明盖板才能入射到吸热板上。阳光在通过透明盖板时, 被盖板本身反射和吸收一小部分, 剩下的大部分透过盖板到达吸热板。这个透过部分的百分数, 为透明盖板的透过率 τ 。透过部分的阳光, 也不能为吸热板全部吸收, 也只有其中的一部分被吸收。这个被吸收部分的百分数, 为吸热板的吸收率 α 。因此, 在平板集热器的热性能计算中, 出现了一个特殊的物理参量, 即透过率—吸收率乘积 $\tau\alpha$ 。它说明入射到集热器上的总太阳辐射, 只有其中的 $\tau\alpha$ 部分可作为集热器的能量输入用于计算。

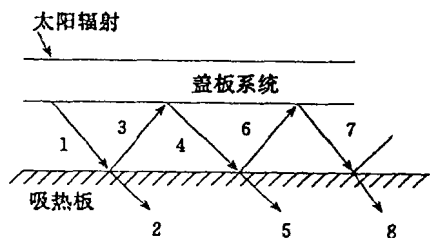


图 2-4 吸热板与盖板系统之间对太阳辐射的吸收和反射过程

$$\begin{aligned} 1 & \rightarrow \tau; 2 \rightarrow \tau\alpha; 3 \rightarrow (1-\alpha); 4 \rightarrow (1-\alpha)\tau\rho_{\text{d}} \\ 5 & \rightarrow \tau\alpha(1-\alpha)\rho_{\text{d}}; 6 \rightarrow (1-\alpha)\tau\rho_{\text{d}}; \\ 7 & \rightarrow (1-\alpha)^2\tau\rho^2; 8 \rightarrow \tau\alpha(1-\alpha)^2\rho + 2d \end{aligned}$$

图 2-4 表示吸热板和盖板系统之间对太阳辐射的吸收和反射过程。一般平板集热器的透明盖板, 由 1~2 层平板玻璃或透明塑料板组成, 称为集热器的盖板系统。由图 4—4 可以看到, 阳光透过盖板系统后, $\tau\alpha$ 部分为吸热板所吸收, $(1-\alpha)\tau$ 部分从吸热板

反射回盖板系统。这种反射多半是漫反射。到达盖板的散射辐射 $(1-\alpha)\tau$, 其中的 $(1-\alpha)\tau\rho_d$ 又被反射回吸热板。如此反射吸收, 一直继续下去。这样, 代表过程最终为吸热板所吸收能量的比值 $(\tau\alpha)$ 为:

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho_d} \quad (2-12)$$

上式中, ρ_d 为盖板系统的漫反射率。对于由 1、2、3 以及 4 层玻璃组成的盖板系统, ρ_d 的数值分别是 0.16、0.24、0.29 和 0.32。

应该看到, 太阳辐射经过盖板系统时, 盖板吸收一部分能量, 并非全部损失掉。因为被盖板所吸收的这部分能量, 将增加盖板温度, 从而减少由吸热板传向盖板的热损失。从效果上看, 似乎增加了盖板系统的透过率。如此, 在式(4-12)的基础上, 可以得到一个新的量, 即有效透过率—吸收率乘积 $(\tau\alpha)_e$, 可以写为:

$$(\tau\alpha)_e = (\tau\alpha) + \alpha_1(1-e_1^{-K}L_1 + \alpha_2\tau_1(1-e_2^{-K}L_2) + \alpha_3\tau_1\tau_2(1-e_3^{-K}L_3) + \dots \quad (2-13)$$

式中, α_1 、 α_2 、 α_3 为计算常数, 由表 4-1 查得; K_i 为 i 盖板的消光系数, 对同种玻璃取相同数值, 由表 2-2 查得; τ_i 为 $i+1$ 层盖板的透过率, 由表 2-2 查得; L_i 为辐射经过 i 层盖板时所实际走过的路程。

表 2-1 式 2-13 中常数 α_i 的数值

透明盖板层数	α_i	$\varepsilon_p = 0.95$	$\varepsilon_p = 0.50$	$\varepsilon_p = 0.10$
1	a_1	0.27	0.21	0.13
2	a_1	0.15	0.12	0.09
	a_2	0.62	0.53	0.40
3	a_1	0.14	0.08	0.06
	a_2	0.45	0.40	0.31
	a_3	0.75	0.67	0.53

计算常数 a_i 的值, 实际上与板温、环境温度、吸热板发射率以及风速等诸量有关。表 4-1 中所给 a_i 的数值, 是在风速 5 m/s, 板温 100℃ 以及环境温度和天空温度为 10℃ 的条件下算出的。 a_i 与温度的影响关系可以忽略不计, 而受风速的影响则较大。例如, 对于吸热板发射率为 0.95 的双层盖板集热器, 风速为 10 m/s 时, a_1 和 a_2 的值分别为 0.09 和 0.60。但对风速 5 m/s, a_1 与 a_2 之和为 0.77, 而风速 10 m/s 时为 0.69。这就是说, 用风速 5 m/s 下的 a_i 值, 在计算玻璃中吸收而贡献给有用能量收益的太阳辐射量时会造成 10% 的误差。但被玻璃吸收的能量总量毕竟很小, 所以 10% 的误差并不重要。