

# 太阳能集热材料的光热特性研究

欧阳德来, 左孝青, 潘小亮, 廖明顺, 崔霞

(昆明理工大学 材料与冶金工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 光滑金属板的作为吸热板芯时,其吸收率取决于涂层的吸收率,而用表面多孔板作为吸热板芯时,其吸收率则取决于板孔隙率和孔尺寸与涂层的吸收率.作者通过光线跟踪法多孔板的光热性能作了简单的分析,并设想采用表面多孔金属板代替光滑板作为太阳能集热器吸热板芯.分析得知:多孔板等效吸收率高于同等条件下光滑板的吸收率.同时详细阐述了太阳能集热器的发展状况、种类、原理以及集热器的光热转换原理.

**关键词:** 吸热板芯;表面多孔板;等效吸收率;太阳能集热器;光-热转换

**中图分类号:** TB31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2005)01-0018-04

## Studies on Light - Heat Property of Solar Collecting Material

OU YANG De-lai, ZUO Xiao-qing, PAN Xiao-liang, LIAO Min-shun, CUI Xia

(Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** The absorptivity of flat metal plate is determined by coat absorptivity and that of the surface porous metal plate is by not only the coat absorptivity but also the porous ratio and the dimension of the hole. The method of beam track is introduced to briefly analyze the light - heat property of the surface porous metal plate, and a consideration to adopt the surface porous plate to replace flat plate as the collecting heat plate is proposed. A conclusion is reached that the surface porous metal plate excels flat metal plate at equivalent absorptivity on the same condition. Also the development, type, rule and light - heat transfer principle of the solar collectors are summarized.

**Key words:** collecting heat plate; the surface porous metal plate; equivalent absorptivity; solar collector; light - heat transfer

## 0 引言

性能良好的集热器是太阳能低温利用系统的关键技术设备之一<sup>[1]</sup>.近年来人们对于太阳能集热研究主要集中在吸收涂层方面,而对于集热器吸热板的结构和材料本身方面的研究则相对较少.就目前的平板集热器而言,吸热板是用光滑的平板作为衬底,投射到吸热板的入射光只会得到一次反射,集热器吸收率即是表面吸收涂层的吸收率.基于此,也得益于本课题组对多孔材料的研究成果,作者设想用表面多孔的铝板作为太阳能吸热板的基板.投射到板上的入射光能得到多次反射,使得集热器的吸收率高于表面吸收涂层的吸收率,并有抑制自然对流的效果

## 1 集热器的发展状况

经过长时间许多研究者的研究和开发,目前市场上已使用的集热器有闷晒型、平板集热器、真空管集热器、热管真空集热管集热器、热泵式太阳能集热器几种.

### 1.1 闷晒型集热器

闷晒型集热器是把储热水箱和集热板合为一体,热水箱朝光面刷上无光黑板漆.由于集热效果和保温

收稿日期:2004-04-22.基金项目:多孔金属的制备及应用研究(项目编号:2000E0003Z).

第一作者简介:欧阳德来(1977.11~),男,在读硕士研究生.主要研究方向:表面多孔金属制备及光热性能研究. E-

mail: ouyangdelai@163.com

效果差而基本退出历史舞台。

### 1.2 平板集热器

平板型集热器直至1960年以后才真正进行深入研究和规模化应用。按工质划分有空气集热器和液体集热器,目前大量使用的是液体集热器;按吸热板芯材料划分有钢板铁管、全铜、全铝、铜铝复合、不锈钢、塑料及其它非金属集热器等;目前,国内外使用比较普遍的是全铜集热器和铜铝复合集热器。为了减少集热器的热损失,人们正试图用透明蜂窝板作为盖板,文献[2~4]对蜂窝结构的光、热学性能作了理论和试验分析。

### 1.3 真空管集热器

真空管型集热器由多根真空玻璃管组成,其吸热体被封闭在高真空的玻璃真空管内,为了增加太阳光的采集量,有的在真空集热管的背部还加装了反光板。真空集热管大体可分为全玻璃真空集热管,玻璃-U型管真空集热管,玻璃-金属热管真空集热管,直通式真空集热管和贮热式真空集热管<sup>[5]</sup>。

### 1.4 热管真空集热管集热器

我国自80年代中期开始研制热管真空集热管集热器,主要原理是太阳光透过玻璃管照射在吸热板上,太阳选择性吸收膜将太阳辐射能转化为热能。吸热板吸收的热量迅速将热管内少量工质汽化,并迅速上升到冷凝端,放出汽化潜热后冷凝成液体,在重力作用下流回热管蒸发端。利用热管内少量工质的汽-液相变循环过程可连续地将吸收的太阳能传递到冷凝端加热水。文献[6,7]对热管式平板集热器的热性能进行了较为深入的理论和实验研究。

### 1.5 热泵式太阳能集热器

热泵式太阳能集热器采用热泵技术间接利用太阳能热量的集热器。热泵式太阳能集热器吸收经过阳光照射过的空气而收集热量,不需要庞大的太阳能集热板,由空气代替太阳能集热板,减少了使用空间。

## 2 太阳能平板集热板芯材料的种类

太阳能集热材料主要有金属、塑料、玻璃等,但实际使用的几乎全是金属。按吸热板芯材料划分有钢板铁管、全铜、全铝、铜铝复合、不锈钢、塑料及其它非金属集热器等;目前,国内外使用比较普遍的是全铜集热器和铜铝复合集热器。

**钢板铁管:**这种集热材料是用钢板作为吸热板的衬底,铁管传输流动工质。优点是价格相对便宜,但是铁管易腐蚀,而且钢和铁的导热系数低等缺点,使得这种集热材料目前运用很少。

**全铜:**铜对于水蚀具有可靠性。铜的导热系数也是在集热体所用的金属中最大的,加工和用软焊料或硬焊料都比较容易,但价格昂贵。

**全铝:**铝的比重小,导热系数良好,耐蚀性良好,富有加工性,价格也比较便宜而得到广泛的应用。

**铜铝复合:**结合了铜的高导热性、耐蚀性和铝的优点。铜铝复合技术还不太成熟,导致了成本相对较高。

**不锈钢:**强度高,机械加工,焊接等方面也比较简单,价格便宜,但也存在局部腐蚀、热导率低、笨重等缺点。

**塑料:**塑料的优点也很多,耐蚀性、加工性都很好,不过在导热性、耐热性、耐天候性方面有些问题,实际使用不多。

**玻璃:**玻璃常用于贮存式热水器,而强制循环式集热体,由于体重,价格昂贵,不耐冲击的缺点。

## 3 太阳能集热材料的光吸收特性、原理

同一种集热材料的光吸收性能是随着光的波长的改变而改变的,物体发出的热电磁波的频率取决于其表面的温度。

### 3.1 太阳能随频率的能量分布

普朗克从理论上证明了绝对黑体光谱辐射强度与波长和温度的关系:

$$b_{\lambda} = c_1 \frac{e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)}$$

可以看出,辐射能量随着波长的增加而增加,在某一波长  $\lambda_m$  达到最大值,然后又随  $\lambda$  增加而减少.对于工程上的温度范围内,辐射能几乎都集中在  $\lambda = 0.8 \sim 10 \mu\text{m}$  的红外线范围内,而到达地面的太阳辐射能 95% 以上的能量主要集中在  $0.3 \sim 2.5 \mu\text{m}$  的波长范围内.这对具有光谱选择性性质的材料在辐射换热中有重要的影响<sup>[8]</sup>.

### 3.2 吸收原理、过程

正是基于上述的关系,才使得有强烈吸收高温的热射线并且低温的吸收率极低也即低温热发射率极低的集热材料,由于太阳表面的温度高发出的高频热射线,当太阳能热辐射光照射到集热器时,表面上的吸收材料能强烈选择性地吸收太阳辐射短波辐射,而温度不高的集热器吸热面所辐射有很强的发出的热辐射则主要集中在  $2 \sim 30 \mu\text{m}$  的波长范围内.基本上是长波辐射,热辐射热损由于基板表面的长波发射率低,使得整个集热器的吸收率远大于发射率.

## 4 太阳能集热材料的光热转换原理

### 4.1 微观方面阐述光热转换原理

太阳辐射的光热转换原理目前主要认为:太阳光其实是载着热量的高频率电磁波,当太阳光沿一定的方向射入金属表面时,金属内即引起与射入方向平行的电磁振动.金属中的自由电子在这个电磁振动场的影响下,即以外界辐射波的频率开始振动.这种振动产生两种不同的效果:(1)自由电子的振动撞击了晶体结构中的分子,加速了分子点阵结构的振动,形成了热能.该热能的形成如同电流通过电阻时生热情况.这部分热量就是吸收热,即辐射能的一部分被金属所吸收.(2)正在振动的电子亦放射出辐射电磁波,如同谐振动,金属内的电子在不停地变动着它的振动速度.电子在加速或减速时都会辐射出电磁波.当电子振动的频率和射入光线的频率相同时,电子也用同一频率对外界辐射.每一电子都向各个方向辐射.从理论上证明,所有电子的辐射经过相互干扰后的总效果是只存在一条射入的波和一条射出的波,这就是穿透的波和反射的波.但是,每一种物质的吸收和辐射性能是各不相同的<sup>[9]</sup>.

### 4.2 宏观阐述光热转换原理

从宏观方面来讲,研究表明,对于辐射源是黑体的情况,表面光洁的纯金属,其发射率和吸收率之间存在着下面的关系:温度为  $T_2$  的金属表面对于温度为  $T_1$  的黑体辐射的吸收率等于这个金属表面在温度  $T = \sqrt{T_1 T_2}$  时的发射率.当光能以一定的角度射入吸热板时,由于板上的光谱选择性吸收材料的吸收波长几乎处在太阳热射线光谱短波长中,而强烈地吸收其能量.对于板的热辐射来说,由于板的温度远远地低于太阳表面温度,使得板的热辐射波长是长波辐射,对于长波辐射,板的发射率是极低的,从而使得太阳能吸热板的吸收率高和而热损辐射少.

## 5 不同材料的光热特性规律

实验表明金属在洁净和光学粗糙度范围内的半球发射率随表面温度增大而增大.金属的辐射率受温度的影响趋势主要归因于金属电阻率随温度的增高而增大的趋势.而非金属的辐射特性随波长的分布是各不相同的,辐射角在  $0 \sim 50^\circ$  以内一般保持均匀,而当  $\theta$  角度再增大时,  $\epsilon$  迅速下降到零<sup>[10]</sup>.

文献[11]应用电磁理论得到了金属表面的热辐射率与折射指数、衰减系数之间的关系式.即:

$$\epsilon = \frac{4n_2}{(n_2 + 1)^2 + k^2}$$

文献[10]也给出了金属表面的热辐射率与电阻之间的关系式.即:

$$= 36.05 \sqrt{R}$$

这两个公式都可以理论上计算出金属材料的辐射率,计算结果与试验测定值之间有一定的差值,误差还比较大,但精度要求不太高时也是可以进行估测的.

## 6 不同结构的光热特性规律

材料的光吸收性能及辐射性能,不仅取决于材料的种类和表面的温度,还取决于材料的表面状态,也

就是表面孔洞的几何尺寸. 因为当吸热板的表面有孔洞时, 光进入孔洞后就会在里面不断反射, 增加了对光热的吸收次数. 从而增加了吸热板的吸收性能. 同时, 由于表面孔洞的存在, 相比与光滑平板, 改变了表面的辐射面积. 从而影响了吸热板的热辐射性能.

### 6.1 平板吸热板

目前, 大多数平板型集热器还是真空玻璃管的集热板和反光板采用光滑的平板. 主要原因是制备简单, 减少成本. 但光滑平板对入射光的反射次数只有一次, 也即只有一次的光热吸收, 吸收率相对较低. 吸收性能主要取决于其表面的涂层.

### 6.2 波纹状吸热板

其优点不仅具有方向选择性, 而且光线射入 V 型槽内的太阳直射辐射要经受多次的反射后才能离开 V 型槽, 使得其对太阳辐射的吸收率大于发射率. 但其辐射热损大. 文献[12] 对这种结构的集热器的性能作了分析讨论.

## 7 表面多孔板的光热性能

本课题组实验室已制备出不同孔径、不同孔隙率的多孔板. 为了简化计算可以设想孔型是半球状, 光线在表面的反射近似是镜面反射. 作者通过光线跟踪法, 经过分析, 可以初步得出: 当入射角  $0 \sim 45^\circ$  时, 射入孔的光大约 50% 的光能有至少二次反射. 当入射角  $> 45^\circ$  时, 射入孔的光超过 80% 的光能有至少二次反射. 有效增加了入射光射入孔洞时的发射次数, 每一次反射都被吸收一部分能量. 使得多孔板的吸收效率有效提高. 同时在球孔的表面吸收率一定的条件下改善了吸热板的光热吸收性能. 但另一方面, 必须考虑到球孔表面也增大了热辐射面积. 作者初步分析: 根据辐射角系数观点, 辐射热损可以表示为:  $Q = F_{12} (T_2^4 - T_1^4) S$ , 它与表面辐射率、辐射角系数、板面积、板温和环境温度有关. 对于球孔, 辐射角系数等于  $1/2$ , 与球孔表面积的乘积刚好等于平板的面积. 因此, 可以认为, 表面多孔板的热损与平板的热损相差不大. 对于自然对流而言, 表面孔洞在一定的程度上起到阻碍空气流动的作用, 因为表面的空气被隔成许多小股的空气流, 可以拟制了空气的自然对流.

## 8 结束语

传统的平板型太阳能集热板是光滑板, 其热吸收性能取决于涂层的吸收率. 而采用表面多孔板作为集热板则不仅取决于板表面涂层的吸收率, 还取决于表面孔的孔隙率和孔的尺寸. 理论上, 孔的存在必定增加进入孔的光线的反射次数, 也即提高多孔板的热吸收性能, 可以预料随着金属多孔制备技术的发展, 定性研究多孔板的各项参数对热吸收性能的影响以及把多孔板应用在太阳能方面的研究, 将会吸引越来越多研究者的目光.

### 参考文献:

- [1] 李戟洪, 江晴. 一种高效平板太阳能集热器试验研究[J]. 太阳能学报, 2001, 2(22): 131.
- [2] 张诗钗, 张平. 蜂窝结构太阳能辐射光学特性的数值计算方法[J]. 太阳能学报, 1988, 3(9): 317 ~ 324.
- [3] 黄护林. 透明蜂窝结构太阳能辐射透过率的简化分析[J]. 太阳能学报, 1995, 2(16): 138 ~ 142.
- [4] Hkollands K G T, Raithby G D, Duffie J A, et al. Coupled Radiative and Conductive Heat Transfer Across Honeycomb Panels and Through Single Cells[J]. Heat Mass Transfer, 1985, 34(4/5): 203 ~ 209.
- [5] 殷志强. 全玻璃真空管太阳能集热管光 - 热性能[J]. 太阳能学报, 2001 1(22): 1 ~ 2.
- [6] 陆维德, 过慧芬, 张祖山, 等. 重力热管平板集热器的热性能研究[J]. 太阳能学报, 1983, 4(2): 148 ~ 156.
- [7] Bong T Y, Ng K C, Bao H. Thermal Performance of a Flat - Plate Heat - Pipe Collector Array[J]. Solar Energy, 1993, 50(6): 491 ~ 498.
- [8] [美]达菲 J A, 贝克曼 W A. 太阳能 - 热能转换过程[M]. 葛新石, 龚堡, 陆维德译. 北京: 科学出版社, 1980, 5 ~ 7.
- [9] 葛绍岩. 热辐射性质及其测量[M]. 北京: 科学出版社, 1978, 8 ~ 9.
- [10] 卞伯绘. 辐射换热的分析与计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987, 28 ~ 51.
- [11] 葛绍岩. 热辐射性质及其测量[M]. 北京: 科学出版社, 1979, 9 ~ 11.
- [12] Chiou J P, El - Wakil M M, Duffie J A. A Slit and Expanded Aluminium - Foil Matrix Solar Collector[J]. Solar Energy 1965, 9(2): 73 ~ 80.