



# 太阳能应用技术

方荣生 项立成 编  
李亭寒 陈小霓

中国农业机械出版社

# 太阳能应用技术

方荣生 项立成  
李亭寒 陈小霓

编

中国农业出版社

## 内 容 提 要

本书介绍了太阳能应用的基础理论和各种装置的结构、原理与应用技术,包括传热学和流体力学的基础知识、太阳辐射、光热转换、光电转换、光化学转换、太阳能贮存的基本原理,以及太阳能在热水、热发电、光伏发电、采暖、空调、制冷、干燥、蒸馏、烹饪等方面的应用技术,并且列出了实例、图表和数据。本书可供从事太阳能应用(包括农业、建筑、热能动力、太阳能电池等方面)的科研人员和工程技术人员以及大专院校师生参考。

## 太 阳 能 应 用 技 术

方荣生 项立成 编  
李亭寒 陈小霓

中国农业机械出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092<sup>1/16</sup>·印张26<sup>3/4</sup>·字数 654千字

1985年9月北京第一版·1985年9月北京第一次印刷

印数 0,001—6,530·定价 5.85元

统一书号·15216·187

## 前 言

太阳能的应用由来已久。随着科学技术的发展及世界能源危机的出现，近年来有了很大的进展。人们越来越意识到，在生产和生活上消耗能源日益增多的情况下，作为常规能源的矿物燃料如石油、天然气、煤炭等，不仅不能满足要求，而且有朝一日还会用竭，因此必须发展非常规能源，包括太阳能、海洋能、风能、地热能和磁流体发电等等。在这些能源中，以太阳能最为突出，应用范围较广，并获得了实用效果，例如成功地用作卫星电源，实现太阳能采暖及大量使用太阳能热水器等。目前，国内外都在致力于太阳能应用的研究，积累了不少经验。为了适应当前发展的需要，我们编写了《太阳能应用技术》这本书。在介绍有关太阳能应用的基本原理和计算的同时，特别注意结合国内情况，给出适用于我国的太阳辐射资料及材料规格数据等，并且举例说明国内外的实际经验，以供有关的科研人员、工程技术人员及大专院校师生参考。

本书共分十五章。绪言及第一、二、四、八、九、十二（干燥器部分）、十五章由方荣生编写，第七（化学贮能部分除外）、十、十一章由项立成编写，第三、五、十二（蒸馏器部分）、十三章由李亭寒编写，第六、七（化学贮能部分）、十四章由陈小霓编写。由于编者的水平所限，书中难免有缺点和错误之处，请读者批评指正。

编者

一九八二年七月

# 目 录

绪言 .....	1	2.1.1 太阳概貌 .....	38
第一章 传热学基础 .....	3	2.1.2 地球的运动规律 .....	39
1.1 热传导 .....	3	2.1.3 天球坐标 .....	41
1.1.1 傅立叶定律 .....	3	2.1.4 太阳角的计算 .....	43
1.1.2 导热系数 .....	3	2.1.5 倾斜面上的太阳光线入射角 .....	48
1.1.3 单层平壁的稳定热传导 .....	4	2.1.6 太阳的跟踪 .....	50
1.1.4 多层平壁的稳定热传导 .....	4	2.2 大气层外的太阳辐射 .....	52
1.1.5 圆筒壁的稳定热传导 .....	5	2.2.1 太阳常数 .....	52
1.1.6 球形壁的稳定热传导 .....	6	2.2.2 大气层外太阳辐射的光谱分布 .....	52
1.2 对流换热 .....	7	2.2.3 到达大气层上界的太阳辐射 .....	54
1.2.1 换热系数 .....	7	2.3 太阳辐射在大气中的衰减 .....	55
1.2.2 相似定律 .....	8	2.3.1 大气质量 .....	55
1.2.3 平板表面对流换热的经验计算式 .....	9	2.3.2 大气对太阳辐射的散射 .....	56
1.2.4 管道内的对流换热计算 .....	11	2.3.3 大气对太阳辐射光谱的吸收 .....	57
1.2.5 圆柱壁面的对流换热 .....	13	2.4 到达地表的太阳直接辐射 .....	59
1.2.6 圆球换热 .....	14	2.4.1 大气透明度 .....	59
1.2.7 卵石床中的对流换热 .....	15	2.4.2 到达地表的法向太阳直接辐射的计算 .....	60
1.2.8 传导和对流系统 .....	15	2.4.3 水平面上的太阳直接辐射通量及日总量的计算 .....	62
1.3 辐射换热 .....	17	2.4.4 倾斜面上的太阳直接辐射通量的计算 .....	63
1.3.1 吸收、反射和透射 .....	17	2.4.5 倾斜面上和水平面上直接辐射通量的比值 .....	64
1.3.2 辐射量 .....	18	2.5 散射辐射 .....	65
1.3.3 黑体的概念 .....	20	2.5.1 水平面上的散射辐射 .....	65
1.3.4 黑体的辐射定律 .....	20	2.5.2 倾斜面上的散射辐射 .....	67
1.3.5 物体热辐射性质的定义 .....	21	2.6 太阳的总辐射 .....	67
1.3.6 透射率 .....	25	2.6.1 月平均全天总辐射量的计算 .....	67
1.3.7 基尔霍夫定律 .....	25	2.6.2 太阳总辐射的数表 .....	70
1.3.8 两平行平板之间的辐射换热 .....	26	2.7 从长期平均总辐射日总量推算每小时辐射量 .....	73
1.3.9 天空辐射 .....	26	2.7.1 直接辐射与散射辐射的分离 .....	73
1.3.10 透过远红外辐射的盖板与吸热板之间的辐射换热 .....	27	2.7.2 水平面上长期平均小时辐射量的计算 .....	74
1.3.11 透明盖板-吸热板系统对太阳辐射的有关特性 .....	27	2.7.3 水平面上小时日射量换算为倾斜面上小时日射量 .....	75
1.3.12 光子辐射 .....	29	2.8 太阳辐射通量的计算实例 .....	76
1.4 太阳能应用中的传热问题 .....	29	2.8.1 一天中每小时的日射量计算例题 .....	76
1.4.1 保温层厚度的计算 .....	29	2.8.2 月平均日总辐射量计算例题 .....	77
1.4.2 平板集热器的热损失计算 .....	30	2.8.3 月平均日总辐射量换算为小时总辐射量的例题 .....	78
1.4.3 其它计算 .....	35	2.9 太阳辐射的测量 .....	80
第二章 太阳辐射 .....	38		
2.1 太阳与地球的运动规律 .....	38		

7.2.5 太阳池贮热 .....	224	9.2.4 几种抛物面聚光镜太阳灶 .....	272
7.3 光电化学转换及贮存 .....	225	9.2.5 折叠式聚光太阳灶 .....	272
7.3.1 光电化学装置的分类 .....	225	9.2.6 粘土底座的反光式太阳灶 .....	273
7.3.2 光电解电池 .....	225	第十章 太阳能采暖 .....	276
7.3.3 光致伽伐尼电池 .....	227	10.1 我国采暖期太阳能资源情况 .....	276
7.3.4 光致伏打电池 .....	227	10.2 太阳能采暖系统 .....	279
7.3.5 光致伽伐尼伏打电池 .....	228	10.2.1 空气加热系统 .....	279
第八章 太阳能热水器 .....	230	10.2.2 水加热系统 .....	280
8.1 太阳能热水器的类型 .....	230	10.2.3 被动式太阳能采暖系统 .....	281
8.1.1 静止型热水器 .....	230	10.2.4 主动式太阳能采暖系统 .....	283
8.1.2 流动型热水器 .....	231	10.2.5 热泵太阳能采暖系统 .....	284
8.2 集热器的选择 .....	235	10.3 太阳房 .....	285
8.2.1 吸热板结构的选择 .....	235	10.3.1 国外太阳房实例 .....	285
8.2.2 吸收涂层的选择 .....	239	10.3.2 国内太阳房实例 .....	288
8.2.3 透明盖板层数的确定 .....	239	10.4 太阳能采暖设计 .....	290
8.2.4 保温层的厚度 .....	241	10.4.1 建筑物的设计 .....	290
8.3 平板型集热器热效率的测定 .....	241	10.4.2 采暖系统的选择 .....	293
8.3.1 热效率特性 .....	241	10.4.3 集热器的选用与安装 .....	294
8.3.2 试验条件 .....	242	10.4.4 贮热器的类型及大小 .....	295
8.3.3 测量仪器 .....	242	10.4.5 辅助热源的选择 .....	295
8.3.4 试验装置 .....	243	10.4.6 采暖分配系统 .....	295
8.3.5 试验步骤及数据处理 .....	244	10.4.7 控制系统的选择 .....	296
8.3.6 几个与热效率有关的热性能测定 .....	244	10.5 太阳能采暖的计算 .....	296
8.3.7 试验结果处理 .....	246	10.5.1 计算建筑物的耗热量 .....	296
8.4 几个典型的水热器系统 .....	247	10.5.2 确定集热器的面积 .....	301
8.4.1 自然循环热水器系统 .....	247	第十一章 太阳能空调与制冷 .....	305
8.4.2 强迫循环热水器系统 .....	251	11.1 房屋冷负荷计算 .....	305
8.4.3 定温变流量直流式热水器系统 .....	255	11.1.1 房屋结构冷负荷计算 .....	306
8.5 太阳能热水器的安装和管理 .....	257	11.1.2 室内各种热源所形成的冷负荷 .....	311
8.5.1 安装 .....	257	11.2 太阳能空调系统 .....	312
8.5.2 管理与维护 .....	258	11.2.1 采暖与空调联合应用的系统 .....	312
8.6 太阳能热水器的技术经济指标 .....	259	11.2.2 带有太阳能制冷的太阳能空调系统 .....	313
8.6.1 技术经济指标的标准 .....	259	11.3 太阳能制冷系统 .....	317
8.6.2 计算方法 .....	259	11.3.1 太阳能吸收式制冷系统 .....	317
8.6.3 边界条件分析及C-P图 .....	261	11.3.2 太阳能蒸汽喷射式制冷系统 .....	328
8.6.4 有效比法 .....	261	11.3.3 太阳能朗肯循环驱动的压缩式制冷系统 .....	329
第九章 太阳灶 .....	264	第十二章 太阳能干燥与蒸馏 .....	331
9.1 吸收式太阳灶 .....	264	12.1 太阳能干燥器 .....	331
9.1.1 箱式太阳灶 .....	264	12.1.1 干燥过程及机理 .....	331
9.1.2 台式和管式太阳灶 .....	267	12.1.2 干燥条件 .....	332
9.1.3 回转式太阳灶 .....	267	12.1.3 太阳能空气集热器 .....	334
9.1.4 太阳能蒸汽灶 .....	268	12.1.4 吸收式太阳能干燥器 .....	343
9.2 反射式太阳灶 .....	268	12.1.5 对流式太阳能干燥器 .....	344
9.2.1 反射式太阳灶的设计 .....	269	12.2 太阳能蒸馏 .....	346
9.2.2 伞形太阳灶 .....	271		
9.2.3 偏轴椭圆抛物面太阳灶 .....	272		

12.2.1 蒸馏器的结构 .....	346	14.6.2 无反射电池 .....	381
12.2.2 太阳能蒸馏装置的热性能分析 .....	347	14.6.3 紫光电池 .....	382
12.2.3 影响太阳能蒸馏器热性能的主要因素 .....	348	14.7 整体二极管硅太阳能电池 .....	383
12.2.4 两个实用的玻璃顶棚式太阳能蒸馏器 .....	349	14.8 太阳能电池的规格及连接法 .....	383
<b>第十三章 太阳能热动力系统 .....</b>	<b>350</b>	14.8.1 太阳能电池的规格 .....	383
13.1 太阳能热动力系统的焓分析 .....	350	14.8.2 太阳能电池组件的连接方式 .....	384
13.1.1 以焓参数评价集热器的性能 .....	350	14.9 太阳能电池电源装置供电电路 .....	384
13.1.2 太阳能热动力系统的焓参数分析 .....	352	14.10 地面用太阳能电池电源装置设计 .....	385
13.2 太阳能低温差发电 .....	354	14.10.1 设计原则 .....	385
13.2.1 低温差太阳能热发电系统 .....	354	14.10.2 太阳能电池容量的确定 .....	385
13.2.2 太阳能热发电系统的特性 .....	355	14.10.3 蓄电池容量的确定 .....	389
13.3 太阳能中高温热发电 .....	356	14.10.4 太阳能电池方阵输出功率的计算 .....	389
13.3.1 抛物面反射聚焦发电系统 .....	356	14.10.5 设计举例 .....	389
13.3.2 塔式太阳能发电系统 .....	357	14.10.6 太阳能系统应用举例 .....	392
13.4 流体斯特林水泵 .....	365	14.11 空间飞行器的太阳能电池方阵 .....	393
13.4.1 水泵的运行原理 .....	365	14.11.1 太阳能电池方阵概述 .....	393
13.4.2 流体斯特林水泵模型试验 .....	367	14.11.2 几种典型的轻太阳能电池帆板 .....	395
<b>第十四章 太阳能光电系统 .....</b>	<b>368</b>	14.11.3 卫星太阳能电池方阵设计要点 .....	397
14.1 太阳能电池发展简史及应用前景 .....	368	14.11.4 太阳能电池方阵计算举例 .....	401
14.1.1 太阳能电池发展简史 .....	368	14.12 太阳能电池在开关电路及灵敏	
14.1.2 太阳能电池的应用前景 .....	369	光电探测头中的应用 .....	403
14.2 太阳能电池的结构 .....	369	<b>第十五章 太阳能在农业中的应用 .....</b>	<b>405</b>
14.3 硅太阳能电池的制造工艺 .....	370	15.1 太阳能育种 .....	405
14.4 硫化镉薄膜太阳能电池的制造		15.2 太阳能温室和温床 .....	406
工艺 .....	371	15.2.1 太阳能温室 .....	406
14.5 大规模地面应用的硅太阳能电池 .....	372	15.2.2 太阳能温床 .....	408
14.5.1 单晶硅带 .....	372	15.3 太阳能水泵灌溉 .....	410
14.5.2 多晶硅薄膜 .....	373	15.4 太阳能干燥器在农业中的应用 .....	413
14.5.3 陶瓷硫化镉太阳能电池 .....	374	15.5 太阳能孵化与养鸡 .....	413
14.5.4 无定形硅太阳能电池 .....	375	15.5.1 太阳能孵化 .....	413
14.5.5 其它薄膜电池 .....	377	15.5.2 太阳能暖房养鸡 .....	414
14.5.6 聚光硅太阳能电池 .....	379	15.6 太阳能温水池养鱼 .....	415
14.6 高效率硅太阳能电池 .....	380	<b>参考文献 .....</b>	<b>417</b>
14.6.1 背面场电池 .....	380		

## 绪 言

能源与国民经济的发展有着密切关系。随着经济的增长和技术的进步,以及人口的增加,对能源的需求量越来越大。目前,世界上能源消费的增长率大约为人口增长率的三倍,石油、天然气、煤炭等常规能源已不能满足日益增长的需要。世界各国都感到矿物燃料的蕴藏量正在日益减少,甚至有用竭的可能。因此,当今世界的能源问题已变得十分尖锐。在这种情况下,必须重视再生能源的利用和发展,其中最突出的是太阳能的研究与应用。自从1973年资本主义世界能源危机以来,不少人相信太阳能将成为主要能源之一。随着科学技术的发展,太阳能的利用在某些方面已显示出其一定的经济性,因而引起许多国家对太阳能研究的重视。美国能源研究与开发署预计,到2000年太阳能将是美国一次能源总消费量的25%。太阳能之所以受到人们如此的重视,是因为它具有许多优点:太阳能是一种巨大的能源,每天到达地表面的太阳辐射能大约相当于2.5亿万桶石油;太阳能可以再生,因而具备取之不尽、用之不竭的特点;在工业越来越发达而环境污染越来越严重的今天,太阳能却是非常干净的能源;太阳能可以在当地取得,大大节省了在使用矿物燃料时所需的运输费用。

我国的煤炭、石油蕴藏量丰富,水力资源充足,发展非常规能源虽非近期的主要目标,但是,我们也必须清醒地认识到,我国能源分布不均衡,北煤需要南运;我国人口多,无论从生产的发展还是从生活消费的角度看,能源的需求量是十分可观的;能源问题是世界性的,现在已普遍认为不能完全依赖于矿物能源的开发,向新的能源构成的过渡迟早总会到来,我国当然也是这样。因此,我们应该着眼于未来。

太阳能应用是一门古老而新兴的科学。我国早在三千年前的西周时代就利用“阳燧”取火。实际上阳燧就是凹面镜,用金属制成。这是太阳能应用的杰出发明。传说古时候,希腊著名数学家阿基米德利用许多光亮的盾牌来会聚太阳光,烧毁了攻击西西里岛东部西拉修斯港的一支罗马船队。后来,有位希腊工程师曾仿照传说中的方法,用100个光亮的铜盾牌会聚太阳光,终于将离海岸90米的一艘木船烧毁。但是,人们真正认识到太阳能作为一种能源和原动力,还是近三百多年的事。1615年法国工程师所罗门·德·考克斯(Solomon de Caux)发明一种利用太阳能加热空气使其膨胀作功而进行抽水的设备。1774年法国的拉伏齐尔在巴黎进行了用两块透镜聚光来熔化金属的表演,这是太阳炉的雏型。1913年弗·舒曼(F·Shuman)在开罗制成一个长62.5米、面积为1200平方米的抛物面太阳能集热器,输出功率达到100马力。1920年美国加利福尼亚州开始大量使用太阳能热水器。1938年第一座实验性太阳房建成。1949年第一台太阳炉在法国建成,达到3500℃高温。1954年硅太阳能电池研制成功,揭开了使用光电池电源装置的序幕。1955年苏联制成第一台吸收式太阳能制冷机。1957年以后,利用太阳能电池作为人造卫星的电源,促进了光电装置的发展。太阳能电池的应用逐渐扩大到地面。此外,在太阳能热动力、采暖、空调、干燥、蒸馏以及制冷等方面的进展也很快。

太阳能是一种低密度、间歇性能源,这就对太阳能的收集与应用提出更高的要求,成本问题是太阳能推广应用中的重要障碍之一。同时,太阳能应用是一门综合性的科学技术,因



为受到各种条件的限制，目前还处于初级阶段，还有许多课题等待解决。总的来说，需要解决三个问题：提高太阳能的收集效率与集光比的问题；降低太阳能应用装置成本与提高使用寿命的问题；解决低成本、高效率的贮能手段的问题。就集热效率而言，应从太阳能的光热转换、光电转换、光化学转换三种转换形式分别考虑。光热转换所用的平板集热器，提高收集效率的潜力不大，目前最高热效率已达到70%左右，若能将成本降低一半及使寿命延长一倍，效果是可观的。光电转换是太阳能利用中非常有发展前途的一种形式。当前的工作是提高转换效率和降低光电转换器的成本。如果能象科学家们预言的那样，向太空发射贴有大量太阳能电池片的人造卫星**太阳能电站**，把光能转换为电能，然后用微波形式将电能输送到地球上，那么太阳能作为一种巨大而廉价的能源将有美好的前景。在光化学转换方面，虽然人为地转换目前还不很多，但是植物的光合作用就是光化学转换的一种形式，它一直为人类提供生活和生产资料。如果能进一步加以利用，就会获得更大的效果。太阳能的贮存是解决太阳能间歇性的不可缺少的手段。到目前为止，贮能方法都不够理想，效率低，装置庞大。科学家们认为理想的化学贮能的方法，目前仍然处于探索和研制阶段。

由此可见，太阳能在非常规能源中很有发展前途，包括用于生产和生活方面。但是关于能量转换和贮能的技术以及提高经济性的研究，无论作为空间电源还是地面应用，都有待进一步探讨，并为继续扩大应用范围而努力。

# 第一章 传热学基础

从事太阳能的研究和应用时，对于设计太阳能集热器、换热器、热负载以及整个热系统，都必须进行传热分析和计算，以便提高热效率或预测热性能，这就要求熟悉并掌握有关传热学的基本知识。

传热学是一门专门的学科，在这里只是概要地介绍传热学的基本规律和定理以及与太阳能应用有关的常用计算公式。下面就按热传递的三种不同形式，即热传导、对流和热辐射分别加以论述。

## 1.1 热 传 导

当物体中存在温度梯度时，热能就会从高温区域向低温区域传递。这种能量传递过程叫做热传导。热传递是依靠物体各部分直接接触而进行能量传递的。对于非透明固体，热传导是唯一的热传递方式。

### 1.1.1 傅立叶定律

热传导过程中，单位面积上的传热量的大小与垂直该平面上的温度梯度成正比：

$$\frac{q}{A} \propto \frac{dT}{dx}$$

引入比例常数后，上式可写成

$$q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (1-1)$$

式中  $q$  ——热流量 (千卡/小时)；

$A$  ——面积 (米<sup>2</sup>)；

$dT/dx$  ——在  $x$  方向的温度梯度；

$\lambda$  ——比例常数。

式 (1-1) 就是傅立叶热传导定律的数学表达式。负号表明导热方向永远沿着温度降低的方向。

### 1.1.2 导热系数

式 (1-1) 中的比例常数  $\lambda$  叫做导热系数，其值为

$$\lambda = \frac{q}{A \Delta T / \Delta x} \left( \frac{\text{千卡}}{\text{米} \cdot \text{小时} \cdot \text{°C}} \right) \quad (1-2)$$

导热系数是材料的重要热物理性质之一。材料的导热系数越大，表明它的热传导能力越大。金属及合金的导热系数在 10 以上以至几百；建筑材料及一些非金属固体材料的导热系数小至 1 以下，当导热系数小于 0.2 时，就叫做隔热材料。表 1-1 列出了某些物质的导热系数。

必须指出，导热系数随着温度而改变。对于大多数材料，导热系数  $\lambda$  与温度  $t$  都可以得

到如下的关系:

$$\lambda = \lambda_0(1 + bt) \quad (1-3)$$

式中  $\lambda_0$ —— $0^\circ\text{C}$ 时的导热系数值;

$b$ ——实验测定的常数。

因此,更完整的导热系数表都应当给出不同温度下的导热系数。太阳能应用中常用材料在不同温度下的导热系数见第四章。

表1-1 各种物质在 $0^\circ\text{C}$ 时的导热系数

物 质	导热系数 $\lambda$ (千卡/米·时· $^\circ\text{C}$ )	物 质	导热系数 $\lambda$ (千卡/米·时· $^\circ\text{C}$ )	物 质	导热系数 $\lambda$ (千卡/米·时· $^\circ\text{C}$ )
金属:		非金属固体:		氨	0.46
银(纯)	353	石英(轴向)	36	SAE50润滑油	0.13
铜(纯)	331	大理石	1.79	氟里昂12( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ )	0.063
铝(纯)	174	砂岩	1.57	气体:	
镍(纯)	80	窗用玻璃	0.67	氢	0.15
铁(纯)	63	木屑	0.051	氮	0.12
碳钢(1% C)	37	玻璃纤维	0.033	空气	0.021
铅(纯)	30	液体:		水蒸汽(饱和)	0.018
镍铬钢		汞	7.06	二氧化碳	0.013
(18% Cr, 8% Ni)	14	水	0.48		

### 1.1.3 单层平壁的稳定热传导

由一种材料做成的壁,由于导热系数相同,叫做单层平壁(见图1-1)。单层平壁的热传导公式可由式(1-1)积分得到:

$$q = -\frac{\lambda A}{\Delta x}(T_2 - T_1) = \frac{\lambda A}{\Delta x}(T_1 - T_2) \quad (1-4)$$

式中  $\Delta x$ ——壁厚;

$T_1$ 、 $T_2$ ——壁两边表面温度。

式(1-4)为导热系数 $\lambda$ 是常数时的单层平壁的热传导计算式。当 $\lambda$ 随温度变化时,将 $\lambda = \lambda_0(1 + bt)$ 代入式(1-4)得:

$$q = -\frac{\lambda_0 A}{\Delta x} \left[ (T_2 - T_1) + \frac{b}{2}(T_2^2 - T_1^2) \right] \quad (1-5)$$

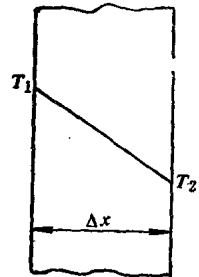


图1-1 单层平壁的热传导

〔例1-1〕太阳能集热器的透明盖板采用厚为0.5厘米、面积为 $12\text{米}^2$ 的玻璃。已知玻璃的导热系数为 $0.8\text{瓦/米}\cdot\text{K}$ ,玻璃两面的温度分别为 $272.5\text{K}$ 及 $274.5\text{K}$ ,试求通过玻璃的热流率。

解:利用式(1-4):

$$\begin{aligned} q &= \frac{\lambda A}{\Delta x}(T_1 - T_2) = \frac{0.8 \times 12}{0.005} \times (274.5 - 272.5) \\ &= 3.84 \times 10^3 \text{瓦} \end{aligned}$$

### 1.1.4 多层平壁的稳定热传导

由两种以上不同导热系数组成的壁叫做多层壁。如图1-2所示。在稳定状态下,通过多层平壁中每层壁的热流率应相同,即

$$q = \frac{\lambda_A A}{\Delta x_A} (T_1 - T_2) = \frac{\lambda_B A}{\Delta x_B} (T_2 - T_3) = \frac{\lambda_C A}{\Delta x_C} (T_3 - T_4)$$

消去上式中的  $T_2$  和  $T_3$ , 可得

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\Delta x_A}{\lambda_A A} + \frac{\Delta x_B}{\lambda_B A} + \frac{\Delta x_C}{\lambda_C A}} \quad (1-6)$$

如果将式 (1-6) 中的  $q$  比作电流,  $(T_1 - T_4)$  比作电位差, 根据欧姆定律, 分母中的三项就相当于三个串联电阻 (见图 1-3), 从而可将上式写成

$$q = \frac{T_1 - T_4}{R_A + R_B + R_C} \quad (1-7)$$

式中  $R_A = \frac{\Delta x_A}{\lambda_A A}, \quad R_B = \frac{\Delta x_B}{\lambda_B A}, \quad R_C = \frac{\Delta x_C}{\lambda_C A}$

这样, 就可以写出任意层数平壁的热传导通用公式:

$$\text{热流量} = \frac{\text{总温差}}{\text{总热阻}} \quad (1-8)$$

**【例1-2】** 设房子的墙壁由厚度为 0.1 米的普通砖及一层 0.0375 米厚的灰泥组成。砖及灰泥的导热系数分别为 0.70 瓦/米·K 及 0.48 瓦/米·K。求通过此墙的热流率。如果在砖及灰泥之间添加一层 0.0508 米厚的石棉隔热材料, 热流率将是多少? (石棉的导热系数为 0.065 瓦/米·K)。

**解:** 设壁的内外温差为  $\Delta T$

(1) 对于只有砖和灰泥组成的墙

$$q = \frac{\Delta T}{\frac{\Delta x_A}{\lambda_A} + \frac{\Delta x_B}{\lambda_B}} = \frac{\Delta T}{\frac{0.10}{0.70} + \frac{0.0375}{0.48}} = \frac{\Delta T}{0.221} = 4.52 \Delta T \quad (\text{瓦/米}^2 \cdot \text{K})$$

(2) 添加了石棉隔热层的墙

$$q = \frac{\Delta T}{R_A + R_B + R_C} = \frac{\Delta T}{\frac{0.10}{0.70} + \frac{0.0508}{0.065} + \frac{0.0375}{0.48}} = \frac{\Delta T}{1.003} = 0.997 \Delta T \quad (\text{瓦/米}^2 \cdot \text{K})$$

### 1.1.5 圆筒壁的稳定热传导

一个内径为  $r_i$ 、外径为  $r_o$ 、长度为  $L$  的圆筒, 如果内外壁的温差为  $T_i - T_o$ , 如图 1-4 所示, 那么通过筒壁热传导的热流量为

$$q = \frac{2\pi\lambda L(T_i - T_o)}{\ln(r_o/r_i)} \quad (1-9)$$

这里热阻  $R_{th}$  为

$$R_{th} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi\lambda L}$$

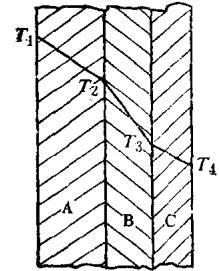


图1-2 通过多层平壁的一维热传导

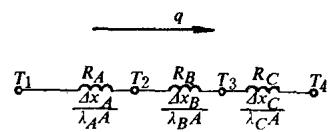


图1-3 多层平壁热传导的模拟电路图

利用热阻的概念可以得到多层圆筒壁的热流量计算公式。三层圆筒壁及其热阻如图 1-5 所示, 所以

$$q = \frac{2\pi L(T_1 - T_4)}{\ln(r_2/r_1)/\lambda_A + \ln(r_3/r_2)/\lambda_B + \ln(r_4/r_3)/\lambda_C} \quad (1-10)$$

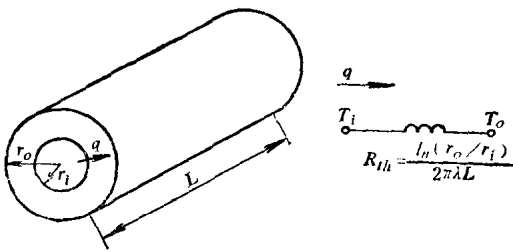


图1-4 通过圆筒壁的一维热传导及其模拟电路

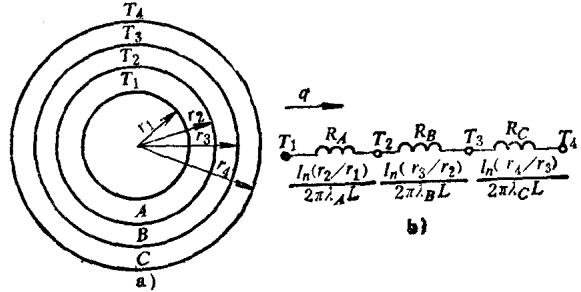


图1-5 通过多层圆筒壁的热传导及其模拟电路

在太阳能应用技术中, 圆筒壁的热传导问题是会遇到的。例如, 输液管道及其保温层(两层或多层)的热传导计算就是属于这类问题。为了实际应用中计算方便, 可将圆筒壁的热传导计算简化如下:

设圆筒的外径和内径分别为  $r_o$  和  $r_i$ , 圆筒长为  $L$ , 在半径  $\frac{r_o + r_i}{2}$  处, 热流通过的面积  $A$  为

$$A = 2\pi L \frac{r_o + r_i}{2} = \pi L(r_o + r_i)$$

这样, 将上述圆筒近似地作为厚度是  $\Delta x = r_o - r_i$  和面积是  $A$  的平壁来处理, 于是得到

$$q' = \frac{\pi \lambda L (r_o + r_i)}{r_o - r_i} (T_i - T_o) \quad (1-11)$$

由于式 (1-11) 计算  $q'$  时忽略了圆筒曲率的影响, 因此算得的  $q'$  与式 (1-9) 算得的  $q$  不同。为了进行修正, 引入筒壁的曲率系数  $\varphi$ , 从而把  $q'$  和  $q$  的关系写成

$$q' = \varphi q \quad (1-12)$$

式 (1-11) 和式 (1-9) 相比即可得到

$$\varphi = \frac{q'}{q} = \frac{(r_i + r_o) \times \ln(r_o/r_i)}{2(r_o - r_i)} = \frac{(r_o/r_i + 1)}{2\left(\frac{r_o}{r_i} - 1\right)} \times \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \quad (1-13)$$

式 (1-13) 表明,  $\varphi$  是  $r_o/r_i$  的函数。表 1-2 列出了某些  $r_o/r_i$  值时的  $\varphi$  值。如果算得的  $q$  允许其误差在 0.5% 以内, 而当  $r_o/r_i < 1.3$  时, 也可以直接利用式 (1-11) 计算。

### 1.1.6 球形壁的稳定热传导

当温度仅是半径的函数时, 球形壁也可以用一维方程来处理, 其热流量为

$$q = \frac{4\pi\lambda(T_i - T_o)}{1/r_i - 1/r_o} \quad (1-14)$$

式中  $T_i$ 、 $T_o$ ——球形壁内、外表面温度;

$r_i$ 、 $r_o$ ——球形壁内、外半径。

表1-2  $\varphi$ 与 $\frac{r_o}{r_i}$ 的函数关系

$\frac{r_o}{r_i}$	$\varphi$	$\frac{r_o}{r_i}$	$\varphi$	$\frac{r_o}{r_i}$	$\varphi$	$\frac{r_o}{r_i}$	$\varphi$
1.10	1.001	1.40	1.009	1.80	1.029	3.0	1.099
1.20	1.003	1.50	1.014	2.0	1.040		
1.30	1.006	1.60	1.018	2.5	1.069		

## 1.2 对 流 换 热

对流换热主要是研究运动着的流体（包括液体和气体）与同它相接触的固体表面之间的换热。同固体一样，液体和气体的热传导也取决于导热系数和温度梯度。对流换热则截然不同，它与流体的流动特性（层流还是湍流）、引起流动的原因（自然对流还是强迫对流）、流体的物理性质、接触面的形状、表面光洁度和几何尺寸等因素有关。

众所周知，鼓风机或风扇能驱动空气流动，水泵能使水或其他液体来往流动，这种在外力作用下引起流体的流动叫做强迫对流。由于流体内部各部位的温度变化使密度发生变化而引起流体的流动叫做自然对流，自然界的风是最常见的一个例子。

流体的流动特性由一个称为雷诺数的无量纲数来决定。对于内部流（如管内），雷诺数  $Re_d$  的表达式为

$$Re_d = \frac{\rho V_m d}{\mu} \quad (1-15)$$

式中  $\rho$  ——密度（公斤/米<sup>3</sup>）；  
 $V_m$  ——平均流速（米/秒）；  
 $d$  ——水力直径（米）；  
 $\mu$  ——动力粘度（公斤/米·秒）。

实验表明，对于管道内的流动，当  $Re \leq 2300$  时，总是呈层流状态，所以 2300 叫做临界雷诺数。

### 1.2.1 换热系数

固体与流体接触面的对流换热量可以用牛顿冷却定律表示，其数学式为

$$q = hA(T_w - T_\infty) \quad (1-16)$$

式中  $A$  ——固体与流体的对流换热面积（米<sup>2</sup>）；  
 $T_w$  ——固体壁面温度（℃）；  
 $T_\infty$  ——流体外界层外温度（℃）；  
 $h$  ——对流换热系数（瓦/米<sup>2</sup>·℃）。

除了极简单情况可以用分析法计算换热系数  $h$  以外，一般都用实验方法求得。然而，由于变量数多，要确定换热系数与各变量之间的函数关系是不容易的。简单可行的方法是应用相似定律。

表 1-3 给出了对流换热系数的大致数值范围。

表1-3 对流换热系数一般数值范围

换热方式	对流换热系数 $h$		换热方式	对流换热系数 $h$	
	英热单位/英尺 <sup>2</sup> ·时·°F	瓦/米 <sup>2</sup> ·°C		英热单位/英尺 <sup>2</sup> ·时·°F	瓦/米 <sup>2</sup> ·°C
空气自然对流	1~5	5~25	水湍流	600~1600	3000~8000
空气强迫对流	2~100	10~500	水沸腾	500~5000	2500~25000
水层流	100~400	500~2000	水蒸汽凝结	1000~20000	5000~100000

### 1.2.2 相似定律

应用相似定律的理由是：

1. 根据物理相似理论，无需对过程中的所有变量逐个地用实验方法确定它们相互间的关系。只要从微分方程中引出若干个由各变量组合而成的无量纲数，求出这些无量纲数间的关系就可以了。这些无量纲数叫做相似准则。

2. 任何用实验方法确定的相似准则间的关系，不仅适用于导出此关系的实验室条件，还适用于所有相似条件。

3. 根据相似定律可以构成模型。

基于上述理由，物理相似理论为各种过程的实验研究和实验数据的分析提供了科学根据。

传热计算中经常使用的相似准则有：

$$\text{努谢尔数} \quad Nu = \frac{hd}{\lambda} \quad (1-17)$$

$$\text{普朗特数} \quad Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (1-18)$$

$$\text{雷诺数} \quad Re = \frac{\rho V_m d}{\mu} \quad (1-19)$$

$$\text{葛拉晓夫数} \quad Gr = \frac{g\beta d^3 \rho^2}{\mu^2} \cdot \Delta T \quad (1-20)$$

其中  $h$  —— 换热系数 (瓦/米<sup>2</sup>·°C),  $h = \frac{\lambda}{c_p \nu}$ ;

$\lambda$  —— 导热系数 (瓦/米·°C);

$\rho$  —— 流体密度 (公斤/米<sup>3</sup>);

$\mu$  —— 动力粘度 (公斤/米·秒);

$V_m$  —— 平均速度 (米/秒);

$c_p$  —— 比热 (瓦·秒/公斤·°C);

$a$  —— 导温系数 (米<sup>2</sup>/秒),  $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ ;

$\nu$  —— 运动粘度 (米<sup>2</sup>/秒);

$\beta$  —— 体胀系数 (1/°C);

$\Delta T = (T_w - T_m)$  (°C)。

以上各相似准则之间有如下关系：

(1) 自然对流

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (1-21)$$

(2) 强迫对流

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (1-22)$$

(3) 原子数目相同的气体

$$Nu = f(Gr, Re) \quad (1-23)$$

由努谢尔数可知:

$$h = \frac{Nu\lambda}{d}$$

因此, 把求换热系数  $h$  的问题归结于求努谢尔数  $Nu$ 。下面介绍在太阳能热利用系统中分析计算时较常用的一些准则关系式。

### 1.2.3 平板表面对流换热的经验计算式

在太阳能热利用系统中, 经常要计算平板表面对流换热。例如, 平板集热器透明盖板表面对流换热及吸热板与透明盖板之间的对流换热。

#### 1. 平板表面的自然对流换热

在无风情况下, 平板集热器及建筑墙壁的对流热损主要是自然对流引起的。如果换热平板(板)长度为  $L$ , 板与水平面的倾角为  $S$ , 则平均对流换热系数  $\bar{h}$  可由下式计算

$$\bar{h} = 1.42 \left( \frac{\Delta T \sin S}{L} \right)^{0.25} \quad (1-24)$$

此式的适用范围是  $10^4 < Gr < 10^9$ 。当  $Gr > 10^9$  时, 建议用下式:

$$\bar{h} = 0.95 (\Delta T \sin S)^{1/3} \quad (1-25)$$

以上两式中,  $\Delta T = (T_w - T_\infty)$  (K)。

#### 2. 风吹过平板表面对流换热

完全无风的情况是极少的, 当有风吹过平板集热器透明盖板表面时, 盖板的对流换热系数  $\bar{h}$  可直接利用下式:

$$\bar{h} = 5.7 + 3.8V \quad (1-26)$$

式中  $V$  —— 风速 (米/秒),  $\bar{h}$  的单位为瓦/米<sup>2</sup>·K。

#### 3. 两平行平板之间的自然对流换热

在平板集热器的吸热板与透明盖板之间和被动式太阳房的贮热墙与玻璃壁之间的对流换热就是属于这种情况。

对于  $30^\circ < S < 60^\circ$ ,  $12 < \frac{H}{\delta} < 40$  及  $1.3 \times 10^4 < Gr \cdot Pr < 10^8$  的情况, 可用下式:

$$Nu = 0.064 \left( \frac{H}{\delta} \right)^{1/6} \cdot (Gr \cdot Pr \cos S)^{0.285} \quad (1-27)$$

式中  $H$  —— 间隙的高度;

$\delta$  —— 间隙的厚度;

$Gr$  —— 葛拉晓夫数;

$Pr$  —— 普朗特数;

$S$  —— 平板与水平面之间的夹角。



当  $30^\circ < S < 60^\circ$ ,  $18 < \frac{H}{\delta} < 40$  及  $1.3 \times 10^4 < Gr \cdot Pr \cos S < 3.5 \times 10^5$  时, 则用下式计算:

$$Nu = 0.115 (Gr \cdot Pr \cos S)^{0.285} \quad (1-28)$$

当  $S = 0$  或  $S \leq 15^\circ$ ,  $18 < \frac{H}{\delta} < 40$ ,  $2.2 \times 10^4 < Gr \cdot Pr < 4 \times 10^5$  时, 可用下式:

$$Nu = 1.3 (Gr \cdot Pr \cos S)^{0.285} \quad (1-29)$$

当  $S = 90^\circ$ ,  $18 < \frac{H}{\delta} < 40$ ,  $2.2 \times 10^4 < Gr \cdot Pr < 4 \times 10^5$  时, 则用下式:

$$Nu = 0.068 (Gr \cdot Pr)^{0.285} \quad (1-30)$$

在计算  $Gr$  时, 空气的膨胀系数取  $1/T$ ,  $K^{-1}$ 。

对于  $75^\circ < S < 90^\circ$  时, 取下列三个式中数值最大的一个:

$$Nu = 1 \quad (1-31 a)$$

$$Nu = 0.288 (B \sin S Gr \cdot Pr)^{1/4} \quad (1-31 b)$$

$$Nu = 0.039 (\sin S Gr \cdot Pr)^{1/3} \quad (1-31 c)$$

式中  $B$ ——空气隙厚度  $\delta$  与在上坡方向沿受热面或冷却面量得的空气隙长度  $H$  之比。

对于三种特殊倾角的平板, 其间以空气为介质, 可用下列准则关系式:

当  $S = 0^\circ$ , 热流向上,  $10^4 < Gr < 10^7$  时, 则

$$Nu = 0.152 (Gr)^{0.281} \quad (1-32 a)$$

当  $S = 45^\circ$ , 热流向上,  $10^4 < Gr < 10^7$ , 则

$$Nu = 0.093 (Gr)^{0.310} \quad (1-33 a)$$

当  $S = 90^\circ$ ,  $1.5 \times 10^5 < Gr < 10^7$  时, 则

$$Nu = 0.062 (Gr)^{0.327} \quad (1-34 a)$$

当  $S = 90^\circ$ ,  $1.5 \times 10^4 < Gr < 1.5 \times 10^5$  时, 则

$$Nu = 0.033 (Gr)^{0.381} \quad (1-35 a)$$

为了计算方便, 可将上列四个公式作适当处理。先假定空气温度为  $10^\circ\text{C}$ , 则四个公式可表示为有量纲形式, 即:

$$h_{1,0} = 1.513 \frac{\Delta T^{0.281}}{b^{0.157}} \quad (1-32 b)$$

$$h_{1,0} = 1.14 \frac{\Delta T^{0.310}}{b^{0.070}} \quad (1-33 b)$$

$$h_{1,0} = 0.82 \frac{\Delta T^{0.327}}{b^{0.09}} \quad (1-34 b)$$

$$h_{1,0} = 0.57 \frac{\Delta T^{0.381}}{b^{-0.143}} \quad (1-35 b)$$

式中  $h$  的单位为  $\text{瓦}/\text{米}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ;  $\Delta T$  的单位为  $^\circ\text{C}$ ;  $b$  是两平行平板间的距离, 单位为厘米。当任何温度  $T$   $^\circ\text{C}$  时, 可用下式来修正物性的变化:

$$\frac{h_r}{h_{1,0}} = 1 - 0.0018(\bar{T} - 10) \quad (1-36)$$

式中  $\bar{T}$ ——两平行平板的平均温度 ( $^\circ\text{C}$ )。

对于任何倾角  $S$  及  $Gr > 2 \times 10^5$  时, 也可用下式计算, 但所得的换热系数略偏低: