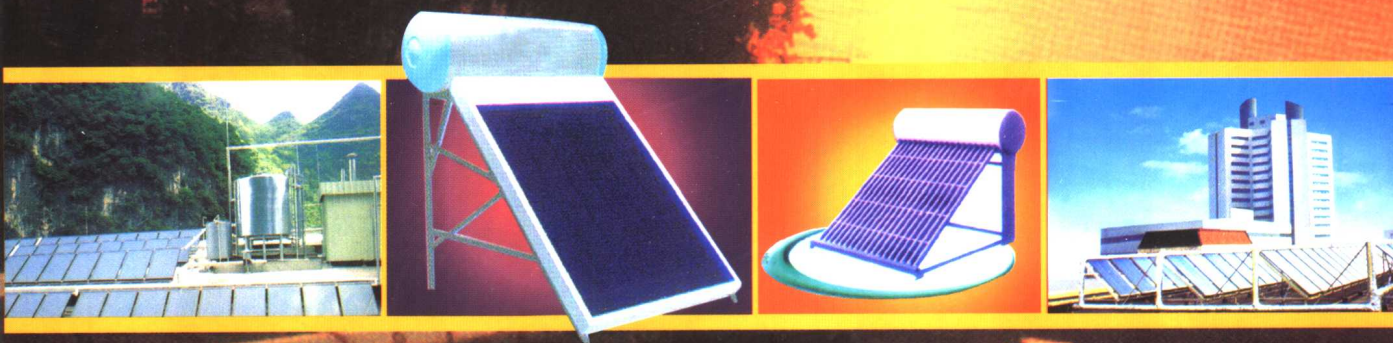


太阳热水器 原理、制造与施工

● 罗运俊 李元哲 赵承龙 主编



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

太阳热水器原理、制造与施工

罗运俊 李元哲 赵承龙 主编

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

太阳热水器原理、制造与施工/罗运俊,李元哲,赵承龙主编. —北京:化学工业出版社,2005.2
ISBN 7-5025-6621-X

I. 太… II. ①罗…②李…③赵… III. 太阳能水加热器-基本知识 IV. TK515

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 006949 号

太阳热水器原理、制造与施工

罗运俊 李元哲 赵承龙 主编

责任编辑:陈志良

文字编辑:余纪军

责任校对:李 林

封面设计:于 兵

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话 (010) 64982530
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京永鑫印刷有限责任公司印刷
三河市东柳装订厂装订
开本 787mm×1092mm 1/16 印张 17½ 字数 429 千字
2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-6621 X/TK·21
定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换
京化广临字 2005—04 号

前 言

能源是当今社会发展和人类生存的首要物质基础。人均年能耗水平是评价一个国家或地区穷富的重要标志,而能源消费结构状况则是衡量一个国家和地区环境污染、生态恶化程度的基本依据。

我国的常规能源储量虽然比较丰富,但人均能源资源却只有世界人均能源资源的二分之一,年人均能耗水平仅为发达国家的几分之一到十分之一。从能源消费结构来看,我国煤炭消费约占总能耗的67%,相当于全球煤炭消费占总能耗比例的3倍,这是造成我国环境污染严重、生态恶化的根本原因。因此,开发和利用新能源和可再生能源,尤其是太阳能,在我国国民经济可持续发展中具有重要作用,是我国能源发展战略的重要内容和组成部分,国家制定了一系列方针政策和措施来促进其发展。可以预料,太阳热水器的推广应用市场前景广阔,发展潜力巨大。

目前我国太阳热水器行业的发展形势喜人,不仅技术上已达世界先进水平,而且年销售量已占世界第一位。为了更好地宣传普及太阳热水器推广应用知识,提高产品的研发、生产、管理及施工业务技术水平,促进行业的健康发展,扩大产品的技术更新和出口创汇,我们组织了业内知名专家、教授和一些企业优秀技术人员,将十年来太阳热水器在生产制造和安装施工方面的新技术、新工艺、新材料、新设备进行了总结、收集和整理,编写了这本《太阳热水器原理、制造与施工》。

全书分原理篇、制造篇、施工篇,内容包括:太阳热水器基础理论知识;闷晒太阳热水器、平板型热水器、全玻璃真空集热管热水器、热管真空管热水器、空气源热泵热水器的结构、特征、制造工艺;产品及系统的质量标准和检验方法;产品的技术经济效益分析;水箱与支架的生产制造;太阳热水器系统及其与建筑一体化的设计、施工、运行与维护;热能再利用与节水技术。

本书由罗运俊、李元哲、赵承龙主编。第一、二章由赵承龙编写,第三~五章由罗运俊编写,第六章由李云程、叶志浩、张孝义编写,第七、八章由李元哲编写,第九章由吴兆流、罗宣安、袁宝兴编写,第十~十四章由罗运俊、罗鸣、乔春明编写。2003年全国太阳热水器营销函授班优秀学员刘彦虎、刘伟娜、诸健、韩明柱、乔培胜也提供了宝贵的资料。

在编写过程中,我们参考和引用了不少书刊及有关协会、学会、编辑部内部发行的资料,并得到了北京市新能源与可再生能源协会、南京市太阳能学会的大力支持,在此,谨向上述单位和作品的作者表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免有不足或疏漏之处,欢迎读者批评指正。

作 者

2005年1月

目 录

第一篇 原 理 篇

第一章 相关基础知识	3
第一节 能源基础知识	3
第二节 热工基础知识	5
第三节 流体力学知识概要	18
第四节 材料力学知识概要	21
第五节 常用材料知识概要	24
第六节 电工学知识概要	29
第二章 太阳能	35
第一节 太阳与地球	35
第二节 太阳辐射	40
第三节 太阳能的特点	48
第四节 我国太阳能资源分布情况	49
第三章 太阳热水器概述	52
第一节 太阳热水器国内外发展概况	52
第二节 太阳热水器的定义、类型与用途	55
第三节 太阳集热器	56
第四节 太阳热水器的经济效益分析	58
第五节 太阳热水器的标准与检测	65

第二篇 制 造 篇

第四章 闷晒太阳热水器	75
第一节 定义、特点与类型	75
第二节 浅池式太阳热水器	75
第三节 塑料袋式太阳热水器	76
第四节 筒式太阳热水器	77
第五节 闷晒真空管太阳热水器	78
第五章 平板型太阳热水器	79
第一节 平板型太阳热水器的类型	79

第二节	平板型太阳集热器的结构	81
第三节	平板型太阳集热器的制造	84
第六章	全玻璃真空集热管的制造与设备	91
第一节	全玻璃真空集热管制造工艺	91
第二节	金属-玻璃真空太阳集热管	95
第三节	全玻璃真空管太阳集热器结构	97
第四节	磁控溅射镀膜设备及其镀膜工艺	99
第五节	镀膜机的结构与操作	113
第六节	镀膜机的电气维修	121
第七节	排气台的电气维修	129
第八节	镀膜机、排气台的检漏	130
第九节	镀膜机的机械维修	132
第七章	热管真空管的制造	138
第一节	热管真空管的定义与分类	138
第二节	热管的传热原理与性能分析	139
第三节	热管的传输能力极限	143
第四节	热管的工作介质及壳体材料	144
第五节	热管元件的设计步骤	145
第六节	热管的制造与检验	146
第八章	空气源热泵热水器的研制	148
第一节	概述	148
第二节	空气源热泵热水器的工作原理	148
第三节	空气源热泵热水器的工质与压缩机	149
第四节	R _{134a} 工质热泵热水机组的简介	151
第五节	家用空气源热泵热水器	153
第九章	太阳热水器水箱及支架的制造	156
第一节	概述	156
第二节	水箱内胆、外壳的制作	163
第三节	水箱的焊接	171
第四节	水箱制作专用设备介绍	175
第五节	水箱的聚氨酯发泡技术工艺及设备	179

第三篇 施 工 篇

第十章	太阳热水系统的设计	193
第一节	太阳热水系统概述	193
第二节	太阳集热器的连接方式	195
第三节	自然循环系统的设计	197
第四节	强迫循环系统的设计	200
第五节	定温放水运行系统的设计	203
第六节	太阳热水系统的工程参数	203
第十一章	太阳热水器与建筑一体化设计要点	206

第一节	概述	206
第二节	太阳热水器与建筑一体化的分类与特点	207
第三节	太阳热水器与建筑一体化的设计要点	215
第四节	太阳热水器与建筑一体化的实例	219
第十二章	太阳热水系统的施工	231
第一节	系统施工合同的签约	231
第二节	工程施工图的识图步骤	231
第三节	基础施工	232
第四节	钢结构的施工	234
第五节	管路的施工	238
第六节	电控系统的安装施工	244
第七节	油漆的施工	245
第十三章	太阳热水系统的运行与维护	246
第一节	太阳热水系统试运行中的主要故障	246
第二节	太阳热水系统的一般维护	246
第三节	太阳热水系统的常见故障和维护	247
第四节	太阳热水系统运行故障及维护	248
第十四章	太阳热水系统的热能再利用与节水技术	249
第一节	热能再利用原理	249
第二节	热能再利用装置	249
第三节	热交换器	251
第四节	节水技术的概述	251
第五节	家庭住宅的节水技术	251
第六节	大型回收再生中水系统	252
附录一	常用计量单位及其换算	254
附录二	常用计算公式	257
附录三	全国基本风压分布图	261
附录四	建筑热工设计分区及设计要求	262
附录五	建筑围护结构表面与空气之间的换热系数和换热阻	263
附录六	建筑围护结构外表面的太阳辐射吸收系数	264
附录七	非金属材料的物理性质	265
附录八	常用建筑材料的物理性能	266
附录九	全国部分城市日照时数及日照百分率表	267
附录十	全国十二大城市太阳位置数据表	268
参考文献		274

第一篇 原理篇

第一章 相关基础知识

太阳热水器的原理、制造和施工方面的技术必然要涉及到有关学科的基础知识。为了尽量保持各自相关知识内部联系，同时又不能过多地作系统讲述，这里主要结合与太阳热水器有关的必要基础知识作出简介。

第一节 能源基础知识

太阳能是一种能源。那么，什么是能源，这里不妨先作一点介绍。

一、能量与能源

物理学中对能（能量）作出这样的说明，所谓能（能量），最简单的定义是“做功的能力”。

在物理世界里，物质都是以不同的物质运动形式存在着。例如，机械运动、分子不规则运动、电子运动等。在一定形式运动的某一状态（比如速度）下，具有一定的能量，当从这一状态变到另一状态时，能量也发生相应的变化，也就是它的做功能力大小发生改变。所以说能是物质运动的量度，并且是物质运动状态的一个单值函数（即对应于一种状态只有一个值）。

自然界中能够产生能量的资源称为能源。人们利用这些资源可以获得各种形式的能量，如热能、电能、机械能和辐射能等，为发展社会生产和丰富人类生活服务。

二、能源分类

能源可从不同的角度来分类。

（一）按能源形成的来源

从地球上能源形成的来源，可将能源分成四类。

1. 来自太阳的能量

除了直接来自太阳的辐射能外，石油、煤炭、天然气都是亿万年前太阳能转换的积蓄，当今水能、风能及除潮汐能以外的海洋能（包括海流、波浪、海水温差和海水盐度差能等）、还有众多的生物质能也是来源于太阳能。

2. 来自地球内部的热能

如地下热水、地下蒸汽等地热能。

3. 来自太阳、月亮对地球的引力能

如潮汐能等。

4. 来自放射性元素的核能

铀、钍等的核裂变能和氦氟等的核聚变能。

（二）按利用能源的方式

可将能源分成两类。

1. 一次能源

自然界现成存在，不需加工或转换改变其基本形态而直接加以利用的能源，如石油、煤炭、太阳能等都是**一次能源**。

2. 二次能源

由一次能源经过加工或转换而成的能源，如蒸汽、焦炭、煤气、电力和各种石油制品等都是**二次能源**。

（三）按人类利用能源的程度

这可将能源分成两类。

1. 常规能源

它一般是指已经被人类广泛使用、技术上比较成熟和在经济生活中起着重要作用的能源，如煤炭、石油、天然气等。

2. 新能源

它是指新近才开始利用、占人类现有总能耗比例较小，但资源丰富、清洁干净，有利于生态良性循环，而且具有较好的经济效益，是最有开发利用前景的替代能源。如太阳能、潮汐能、地热等。有些能源如风能、生物质能、雷电能等，虽属于古老的能源形态，但目前正在研究采用新的技术加以利用，所以也可列入新能源。

（四）按能源资源的再生性

这可将能源分成两类。

1. 可再生能源

它是指在自然界中可以不断再生并有规律地得到补充的能源，如太阳能、风能、生物质能及水能等。

2. 不可再生能源

它是指能源资源储藏量有限，随着不断的开发利用短期内无法恢复的能源。例如，煤炭、石油、天然气等矿物能源均属不可再生能源。

从环保角度来看，太阳能、水能、风能等可再生能源，不污染环境，属于清洁型能源；而煤炭、石油等不可再生能源，在利用中对环境污染较严重，属于非清洁型能源。

三、能源的计量单位

由于各种能源形态不一样，往往采用不同单位，这给能源统计以及计量带来许多麻烦。然而对于不同的能源要找到一种通用的度量单位，其先决条件是它们必须要有共同的属性。各种不同能源都有着一个共同的属性，那就是都含有能。在我国法定单位中规定了能量单位为焦（焦耳，J）。

但在现行统计中，仍然沿用“标准煤”或“标煤”单位。1kg 标准煤相当于 2.931×10^4 kJ。在能源单位中过去还用千卡（kcal）。1kcal 相当于 4.1868kJ（国际蒸汽表卡）。

在太阳能利用中常遇到另一种单位为瓦（瓦特，W），物理学上称为功率单位。它是单位时间内获得（或输出）的能量多少。如 1s 内获得（或输出）能量 1J 称为 1W（=1J/s）。例如，某时刻用仪器测得太阳集热器表面上接收的太阳辐射能为 700W/m^2 ，表明在 1m^2 集热器表面上每秒接收到 700J 的太阳辐射能。

第二节 热工基础知识

在太阳热水器中进行着许多与热有关的过程。例如，在集热器涂黑的吸热面上，进行着太阳辐射能转变为热能形式的能量转换过程。又如，平板式太阳集热器通过吸热板（或玻璃真空集热管的内管壁）将太阳辐射能转变的热能，以热量传递方式向水加热，使水温升高的吸热过程；相反，在水箱中通过箱壁、保温材料向环境散热，使水箱中水温降低的放热过程。再如，热管式太阳热水器高效地把热量从集热管传送到水箱的热量交换过程等。这些换热过程，都是属于热工学所要阐述的问题。

一、工质的热力参数

在太阳集热器里，不断地把太阳辐射能转变为热能，从而使水温升高，这里一定要借助于一种工作介质来实施，这种介质称为工质。上述示例中的水就是工质。再如，在某些集热器中用的不是水，而是空气（如空气集热器），那么这时的工质就是空气。

在工质进行换热的过程中，工质的某些物理特性也随之在变化，例如工质的温度、压力等就要引起改变，这种表征工质在热力变化的物理特性，常称为热力参数。由此可见，研究工质的热力变化时，首先要掌握工质的热力参数。现仅介绍几个对于流体（包括气体、液体）来说最重要的参数温度和压力，其他的参数这里就不作介绍了。

（一）温度

简单地说，温度就是物体的冷热程度。例如，热水温度比冷水温度高，就是用温度表示物体冷热程度的例子。温度的数值表示法称为温标。温标是人为规定的，不同的温标对物体同一冷热程度的温度数值也不同。目前，世界范围内采用“1990年国际温标（ITS-90）”，我国自1991年7月1日起实行。这个温标规定用热力学温度 T （单位为开尔文，K）及摄氏温度 t （单位为摄氏度， $^{\circ}\text{C}$ ）来度量温度。两者之间关系为：

$$t = T - 273.15 \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (1-1)$$

或

$$T = t + 273.15 \quad (\text{K}) \quad (1-2)$$

这个温标规定以水的三相点（即水的固、液、气三相平衡共存状态）的温度为基准点，定为273.16K。这个温标还规定，把273.15K定作为摄氏温度的起算点，即摄氏零度。实际上热力学温度和摄氏温度的每1度大小是相等的。所以在热力工程中用热力学温度或摄氏温度计算温度差值是相等的，即 $T_2 - T_1 = t_2 - t_1$ 。因而，水三相点对应的摄氏温度则为 0.01°C 。国外（尤其是英美国家）有时还沿用华氏温度，单位为 $^{\circ}\text{F}$ 。它与摄氏温度之间的关系为：

$$\theta = \frac{9}{5}t + 32 \quad (^{\circ}\text{F}) \quad (1-3)$$

（二）压力

流体的压力是以垂直作用于单位面积上的力的大小来衡量的。物理学称为压强。

压力的单位是帕斯卡（简称帕，Pa）。它是当1N的力垂直作用在 1m^2 面积上时的压力为1Pa。由于这个单位太小，工程上常用的单位有：kPa、MPa和巴（bar）。它们之间的关系：

$$1\text{kPa} = 10^3\text{Pa}$$

$$1\text{MPa} = 10^3\text{kPa} = 10^6\text{Pa}$$

$$1\text{bar} = 0.1\text{MPa} = 10^2\text{kPa} = 10^5\text{Pa}$$

在工程上还常遇到下面一些单位：工程大气压（at）、物理大气压（atm）、毫米汞柱（mmHg）和米水柱（mH₂O）等。它们之间的换算关系见表 1-1。

表 1-1 压力单位换算表

压力单位	物理大气压 /atm	工程大气压 /at	帕(斯卡) /Pa	兆帕(斯卡) /MPa	毫米汞柱 /mmHg	米水柱 /mH ₂ O
atm	1	1.0332	1.013×10^5	0.1013	760	10.332
at	0.9678	1	0.981×10^5	0.0981	735.6	10
Pa	0.987×10^{-5}	1.0197×10^{-5}	1	10^{-6}	75×10^{-4}	1.0197×10^{-4}
MPa	9.87	10.197	10^6	1	75×10^2	101.97
mmHg	1.316×10^{-3}	1.36×10^{-3}	133.3	1.33×10^{-4}	1	1.36×10^{-2}
mH ₂ O	0.09678	0.1	0.0981×10^5	0.00981	73.56	1

工程中工质的压力是由压力表（计）来测定的。一般用弹簧管式压力计测定，如图 1-1 所示，较小压力则用 U 形管压力计测定如图 1-2 所示。这些表（计）的测量原理都是建立在力平衡基础上的。弹簧管式为管内外保持力平衡，U 形管式为左右连通管保持力平衡。由此可见，压力表（计）所测定的压力都是工质的真实压力与环境大气压力之间的差值。工质的真实压力称为绝对压力，以 p 表示。绝对压力大于大气压力时，其超出大气压力 p_0 之值，亦即表（计）所显示出来的测定压力值，称为表压力，以 p_g 表示。根据力平衡原则有：

$$\text{绝对压力 } p = \text{大气压力 } p_0 + \text{表压力 } p_g \quad (1-4)$$

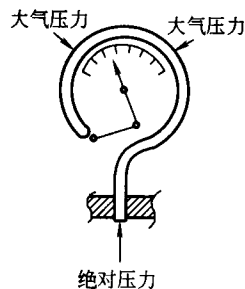


图 1-1 弹簧管式压力计

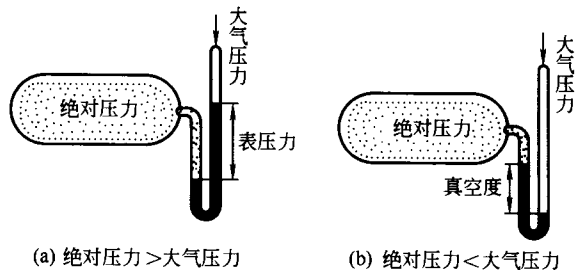


图 1-2 U 形管压力计

对于低于大气压力的压力，其表压力必然是负值。在这种情况下，通常以真空度 p_v 表示表压力的大小，这时有：

$$\text{绝对压力 } p = \text{大气压力 } p_0 - \text{真空度 } p_v \quad (1-5)$$

图 1-3 所示表示绝对压力、表压力、大气压力和真空度之间的关系。

大气压力可用气压计测定。

二、热量、比热容和热量计算

(一) 热量

物体之间由于存在温度差而引起热交换，这时传递的能量称为热量，用符号 Q 表示。它的

单位与能量单位相同，即焦耳。

(二) 比热容

单位质量的物质温度升高 1°C （或 1K ）所吸收的热量或降低 1°C （ 1K ）所放出的热量，这时热量的数值就是该物质的比热容。

比热容是工质的一个热力性质,不同的工质具有不同的比热容。可以用实验测得各种物质的比热容。利用比热容可以计算该物质进行热交换时的热量。

严格地说,比热容与过程进行的条件有关,与换热过程的温度范围也有关,但是在太阳热水器中工质为水,而且温度变化范围也不大,所以通常认为水的比热容不变,其数值为:

$$c=4.1868\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$$

(三) 热量计算

在换热过程中,如果知道工质的质量为 m (kg),比热容为 c ,其温度从 t_1 变化到 t_2 ,那么,工质在这换热过程中获得(或放出)的热量 Q 为:

$$Q=mc(t_2-t_1) \quad (1-6)$$

式(1-6)算出正值为吸热,负值为放热。

例 1-1 某太阳热水器的容量为 80kg (水),若将其温度由 15°C 升高至 45°C,需要多少热量?

解 由题意知 $m=80\text{kg}$, $t_1=15^{\circ}\text{C}$, $t_2=45^{\circ}\text{C}$,且水的比热 $c=4.1868\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。根据式(1-6)得

$$Q=mc(t_2-t_1)=80\times 4.1868\times (45-15)=10048.32\text{kJ}$$

三、热力学第一定律

人类从长期实践中总结出这样一条规律:在自然界里,一切物质都具有能量。能量有各种不同的存在形式。能量不能凭空创造,也不能凭空消灭,它只能从一种形式转换为另一种形式。转换时,转换前、后能量的总量不变,这就是能量转换及守恒定律。从微观方面来看,不同能量的形式就是不同的物质运动形式。所以说,能量转换及守恒定律的实质是阐明了物质运动的不灭性和永恒性。

热力学第一定律是能量转换及守恒定律在热现象中的应用。这个定律适用于热能和其他能量之间的相互转换,同时也适用于热交换过程中在能量数量上守恒的关系。由此可以导出一个由能量项组成的“能量平衡关系式”,亦称能量平衡方程。实际上它就是热力学第一定律在工程应用中的数学表达式。

在用热力学方法分析问题,有一个重要的处理方法,就是首先要把分析对象的范围加以划定,这样才有可能弄清所分析的对象与其相联系的外在物之间存在的能量和质量交换的关系。所划定作为热力分析对象的那一部分称为热力系统(以下简称系统),系统以外的物体都称为外界。系统和外界的分界面称为系统的边界。通过边界,系统和外界之间可以有能量和质量的交换。例如在分析太阳集热器热交换问题时,就是把集热器本体当作系统,系统以外的环境都是外界。在分析集热器中水的加热过程时,可以认为集热器引出的管道里没有水的进入或流出,这样一来,在分析问题时更简单。系统与外界之间可认为没有质量交换(通常称为闭口系统),只有能量的交换,诸如向系统进入的能量(如太阳辐射能就属于输入能量),系统向外界放出的能量(如通过集热器壁散发给环境的热量等)。与此同时,系统中的水吸收热量后变成了水的内能储存起来,具体表现为水的温度提高。

热力学第一定律在系统与外界进行能量交换时,作为能量在数量上的守恒关系式(即能量平衡方程)总的表示原则是:

$$\text{进入系统的能量}=\text{离开系统的能量}+\text{系统中储存能量的增加} \quad (1-7)$$

上述原则形式的能量平衡方程在热能工程中被广泛应用。

四、热力学第二定律

通过对自然界仔细观察发现,自然界里发生的过程是不能自动逆向进行的,如高温物

体可自动向低温物体传热，但逆向传热即低温物体向高温物体传热，则不能自动进行。前者过程的进行不需要任何条件，能自发进行，称为自发过程。而相反的变化却不能自发进行，称为非自发过程。

热力学第一定律只说明能量的转换及守恒关系，而没有涉及到自然界过程进行的方向性问题。如上述两物体接触后产生的热交换，热力学第一定律只给出低温物体获得的热量等于高温物体放出的热量，或低温物体放出的热量应等于高温物体获得的热量，而没有指出在这种换热过程中存在着两种不同性质的区别。高温物体向低温物体传热是自发过程，而反过来是非自发过程，不能自动进行。为了要实施这种非自发过程，是有条件的，要付出代价的，这就是热力学第二定律的实质。它指明了在能量交换过程中自发过程及非自发过程的区别。热力学第二定律有多种叙述方式，其中之一就是克劳修斯说法：“不可能不付代价地把热量从一个低温物体（又称低温热源）传给另一个高温物体（高温热源）”。

如果付出代价，这种把热量从低温物体传给高温物体的非自发过程是可以实现的，例如空调机中进行的的就是非自发过程。夏天，为了使室内保持低于外界环境的温度，这时室内空气是低温热源，而室外环境空气是高温热源，空调机通过机内工质进行制冷循环工作，不断地从室内抽出热量传送给室外环境，使室内保持相对低的舒适温度，这一非自发过程得以完成是靠输入机械功（由电源供给）才能实现，这就是条件（付出代价）。再如冬天，为了使室内温度高于外界环境温度，这时室外环境成为低温热源，室内则为高温热源，空调机内工质进行的是将原来的两个（高、低）热源倒换后的循环（即热泵循环），其结果是不断地从低温热源的外界环境抽取热量传送给相对于室外温度高一些的室内（高温热源），使室内保持较高的温度。这也是一个非自发过程，其进行的条件仍是消耗机械功（由电源供给）。

由此可见，非自发过程的实施是有条件的（或要付出代价），是不能自动进行的。这就是热力学第二定律在上述工程实例中的具体体现，它是指导人们在工程实践中必须遵循的原则。

五、传热知识简介

太阳热水器工程中的传热问题很多，需要应用传热的有关基本知识来分析。由于温差而发生的热量传递过程就是传热过程，传热过程是一种复杂的过程。为了便于分析和研究，根据传热过程的物理本质不同，一般分为三种基本形式，即导热、对流和热辐射。

（一）稳定导热

一个物体的高温部分向低温部分传热，或彼此互相紧密接触的两物体之间的传热就是一种导热。如图 1-4 所示，当固体壁面两侧的温度 t_1 和 t_2 不相等（若 $t_1 > t_2$ ），热量 Q 就会从高温 t_1 侧传向低温 t_2 侧，例如在平板式太阳集热器的盖板内外表面间进行的传热过程。在一开始受到加热的过程中， t_1 、 t_2 温度是随时间而变的，经过一定时间后，工作状态趋于稳定，将达到 t_1 和 t_2 温度不随时间而变的情况，这时的导热称为稳定导热。在这种条件下，进行传热分析或计算要简便得多。此外，在以下分析中，还假定 t_1 、 t_2 所在的面都是等温面。

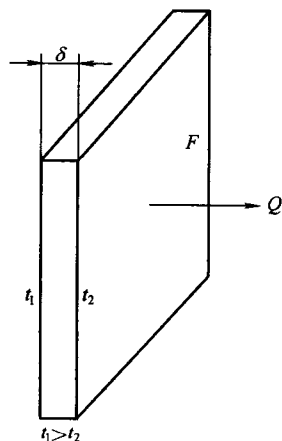


图 1-4 通过固体壁面的导热

1. 导热的基本定律

由实验得出导热所遵循的规律是傅里叶定律。它指出：单位时间内所传导的热量与垂

直于导热方向的截面面积及温度差（高温—低温）成正比，与壁面厚度成反比。对上述稳定导热的基本公式为

$$\Phi = \lambda \frac{(t_1 - t_2)A}{\delta} \quad (\text{W}) \quad (1-8)$$

式中 Φ ——由高温表面传给低温表面的热流量，W；

t_1, t_2 ——导热两表面高温、低温的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

A ——垂直于导热方向的截面积， m^2 ；

δ ——导热壁面的厚度，m；

λ ——热导率， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

2. 热导率

热导率（又称导热系数）是傅里叶定律表达式中的比例系数，它是表明材料导热能力大小的一个热物理量。在数值上等于壁的两表面温度差为 1K、壁厚为 1m、在 1m^2 壁面积上每秒钟传导的热量。

热导率与材料的性质、温度、湿度以及多孔性等有关。热导率的数值通常由实验测定，制成图表，以供查阅。表 1-2 所列是几种材料热导率的简表，如需详细资料可查有关手册。

表 1-2 几种常见材料的热导率

材料名称	热导率/ $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	材料名称	热导率/ $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$
铜	349~407	水垢	0.58~2.33
钢、铸铁	46.5~53.1	烟灰	0.06~0.12
红砖	0.46~0.70	油	0.12~0.19
耐火黏土砖	0.71~0.85	水	0.55~0.67
石棉	0.15~0.23	烟气	0.02~0.10
膨胀珍珠岩	0.02~0.06	空气	0.02~0.09

例 1-2 太阳集热器的透明玻璃盖板厚 0.4cm，采光面积为 2m^2 ，热导率为 $0.8\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，若玻璃内外表面温度分别为 36°C 及 26°C 。求通过玻璃的热流量。

解 由题意知 $A=2\text{m}^2$ ， $\lambda=0.8\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ， $t_1=36^{\circ}\text{C}$ ， $t_2=26^{\circ}\text{C}$ ， $\delta=0.004\text{m}$ 。代入式 (1-8) 得

$$\Phi = \lambda \frac{(t_1 - t_2)A}{\delta} = 0.8 \times \frac{(36 - 26) \times 2}{0.004} = 4000\text{W} = 4\text{kW}$$

3. 通过平壁的导热

通过单层平壁热流量的表达式可将式 (1-8) 改写为

$$\Phi = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\lambda A}} = \frac{t_1 - t_2}{R} \quad (\text{W}) \quad (1-9)$$

式 (1-9) 与电学中欧姆定律表达式（电流=电位差/电阻）类似：热流量对应电流；温度差对应电位差，则对应电阻的 $\left(\frac{\delta}{\lambda A}\right)$ 称为热阻，用符号 R 表示即为

$$R = \frac{\delta}{\lambda A} \quad (\text{K/W}) \quad (1-10)$$

可以看出，壁厚愈厚，热导率愈小，则热阻愈大，这正表明热量通过的“阻力”愈大，也就是热量愈难以通过。因此，在导热过程中热阻正像电阻在导电过程中起着“阻碍”的作

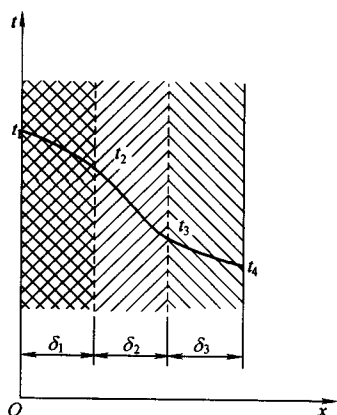


图 1-5 通过多层平壁导热

用一样。

现讨论由几层不同材料的平壁所组成的多层平壁导热。图 1-5 所示为由三种不同材料组成的三层平壁，三层面积相等 $A_1 = A_2 = A_3$ ，壁厚分别为 δ_1 、 δ_2 及 δ_3 ，热导率分别为 λ_1 、 λ_2 及 λ_3 。已知两个最外表面的温度为 t_1 和 t_4 ，且 $t_1 > t_4$ 。如果各层之间接触良好，则中间层直接接触的两表面有相同的温度，如 t_2 和 t_3 ，且 $t_2 > t_3$ 。

在稳定导热条件下，各层表面温度均保持不变，则通过每一层的热流量是相等的，即

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \Phi$$

而由式 (1-9) 可写出各层的 Φ_1 、 Φ_2 及 Φ_3 分别为

$$\Phi_1 = \frac{t_1 - t_2}{R_1} = \Phi$$

$$\Phi_2 = \frac{t_2 - t_3}{R_2} = \Phi$$

$$\Phi_3 = \frac{t_3 - t_4}{R_3} = \Phi$$

式中， R_1 、 R_2 及 R_3 分别为三层材料的热阻。将上述三式变换后可写为

$$\left. \begin{aligned} t_1 - t_2 &= \Phi R_1 \\ t_2 - t_3 &= \Phi R_2 \\ t_3 - t_4 &= \Phi R_3 \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

将式 (1-11) 中三式相加，则有：

$$t_1 - t_4 = \Phi(R_1 + R_2 + R_3)$$

所以

$$\Phi = \frac{t_1 - t_4}{R_1 + R_2 + R_3}$$

或

$$\Phi = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1 A} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 A} + \frac{\delta_3}{\lambda_3 A}}$$

依此类推，对于 n 层的多层平壁导热，其热流量计算式为

$$\Phi = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1 A} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 A} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n A}} \quad (1-12)$$

由此可见，多层平壁的热流量与总的温度降度成正比，与各层热阻之和（可称为总热阻）成反比。总热阻为各层热阻之和，这与电学中电阻串联时，其总电阻等于各串联电阻之和是类似的。

对于多层平壁导热问题，只要知道组成平壁的各层材料的热导率 λ 、壁厚 δ 以及平壁面积 A ，再测出多层平壁两外侧平面的温度 t_1 及 t_{n+1} ，即可根据式 (1-12) 计算出热流量 Φ ，还可根据式 (1-11) 计算出各层分界面上的温度

$$t_2 = t_1 - \Phi R_1$$

$$t_3 = t_2 - \Phi R_2$$

.....

$$t_{n+1} = t_n - \Phi R_n$$