

船舶辅机(一)

# 船舶辅助锅炉与海水淡化装置

08

4.5

8

上海海运学院

# 前 言

无产阶级文化大革命以来，远洋运输事业迅速发展，沿海和远洋船舶动力装置得到了不断的更新，船舶内燃机动力装置已被普遍采用，船用主锅炉为辅助锅炉所代替，海水淡化装置日益完善。为了适应这一新的情况，我们在船舶辅机本分册前一部份中，将着重叙述柴油机干货船的辅助锅炉和废气锅炉，以国产万吨轮所装备的辅助锅炉为重点，介绍其结构、工作原理、燃油系统、燃烧设备及辅助锅炉的自动化等，对锅炉附件、水处理和日常管理工作也作了详细介绍。另外，我国远洋船舶中采用的较新颖的“赛克”、“莫那赫”型辅助锅炉燃烧系统均有较为详细的介绍。

本分册后一部份为船舶海水淡化装置，对我国已定型生产，大量采用的表面式蒸馏装置和远洋船舶应用的闪发式蒸馏装置作了详细介绍。为了适应将来的发展，对其他新型海水淡化法如电渗析、反渗透等作了一些简要介绍。另外，对保证海水淡化质量、蒸发器的结垢及其防止、盐度计和板式热交换器等都有叙述。

为了便于学习时参考，本分册第一章为热工基础，介绍了工程热力学和传热学基本知识，这也是在学习后述章节时必不可少的有关热工基础理论知识。

本书在编写过程中得到上海、广州、天津各远洋运输分公司、上海江南造船厂、上海船厂、南京船舶辅机厂、六机部704研究所等单位的大力支持、热情帮助，谨在此表示感谢。

由于我们水平有限、编写时间仓促、缺乏经验，书中可能有不少缺点和错误，望读者批评指正。

大连海运学院轮机系辅机教研组

1977年12月

# 目 录

<b>第一章 热工基础</b> .....	( 1 )
<b>第一节 工程热力学基本知识</b> .....	( 1 )
一、热机中工质的基本状态参数.....	( 1 )
二、热力学第一定律.....	( 3 )
三、焓、熵和温熵图.....	( 5 )
四、热力学第二定律.....	( 6 )
五、水蒸汽的性质.....	( 7 )
<b>第二节 传热学基本知识</b> .....	( 13 )
一、基本传热方式.....	( 13 )
二、间壁传热.....	( 16 )
三、锅炉与换热器中的热交换.....	( 19 )
<b>第二章 船舶辅助锅炉与废气锅炉</b> .....	( 24 )
<b>第一节 概述</b> .....	( 24 )
<b>第二节 锅炉的组成和基本工作特性</b> .....	( 24 )
一、锅炉的组成.....	( 34 )
二、锅炉的基本工作特性.....	( 25 )
<b>第三节 船舶辅助锅炉的构造和类型</b> .....	( 26 )
一、火管锅炉.....	( 26 )
二、水管锅炉.....	( 29 )
<b>第四节 废气锅炉</b> .....	( 39 )
一、废气锅炉的构造.....	( 40 )
二、辅助锅炉与废气锅炉的联系.....	( 41 )
三、废气锅炉蒸发量的调节.....	( 41 )
<b>第五节 辅助锅炉的燃料、燃烧设备及燃油系统</b> .....	( 44 )
一、燃油的特性及其燃烧.....	( 44 )
二、辅助锅炉的燃烧设备.....	( 46 )
三、锅炉的燃油系统.....	( 52 )
四、燃烧设备的运行管理.....	( 57 )
<b>第六节 锅炉装置的汽水系统及其附件</b> .....	( 58 )
一、锅炉的蒸汽、给水和凝水系统.....	( 58 )
二、锅炉排污管路.....	( 60 )

三、水位计	( 61 )
四、安全阀	( 64 )
第七节 锅炉水处理	( 66 )
一、水中杂质及其对锅炉的影响	( 66 )
二、水质指标	( 67 )
三、锅炉金属的腐蚀及其防止	( 68 )
四、锅炉中水垢的形成及其防止	( 69 )
第八节 辅助锅炉的自动化	( 73 )
一、燃油辅助锅炉的调节对象及其调节系统	( 74 )
二、辅助锅炉的自动控制	( 82 )
第九节 “赛克”及“莫那赫”燃烧系统简介	( 88 )
一、“赛克”型燃烧系统	( 88 )
二、“莫那赫”型燃烧系统	( 97 )
第十节 辅助、废气锅炉的日常管理	( 99 )
一、锅炉的冷炉点火与升汽	( 99 )
二、运行时的管理	( 101 )
三、锅炉的停用	( 101 )
四、锅炉的内部检查	( 102 )
五、水垢的清洗	( 105 )
六、管子的扩接与爆裂时的处理	( 106 )
<b>第三章 船舶海水淡化装置</b>	( 108 )
第一节 概述	( 108 )
一、海水淡化的目的及其要求	( 108 )
二、海水淡化装置的分类和工作原理	( 110 )
第二节 提高海水淡化装置工作性能及其经济性的措施	( 115 )
一、如何保证海水淡化的质量	( 116 )
二、海水蒸发器中的结垢及其防止	( 118 )
三、提高海水淡化装置的经济性	( 123 )
第三节 蒸馏法海水淡化装置	( 126 )
一、表面式蒸馏装置	( 127 )
(一)装置的组成和工作性能	( 127 )
(二)装置的自动调节、盐度计	( 131 )
(三)表面式蒸馏装置的技术管理	( 140 )
二、闪发式蒸馏装置	( 146 )
(一)闪发式蒸馏装置的组成和工作	( 146 )
(二)板式热交换器	( 151 )
(三)闪发式蒸馏装置的技术管理	( 155 )

# 第一章 热 工 基 础

## 第一节 工程热力学基本知识

### 一、热机中工质的基本状态参数

热机利用其工作介质（简称工质）通过各种热力过程实现热能与机械能之间的转换而工作。因之，掌握在热力过程中随时变化的工质的状态是分析研究热力过程从而热机工作规律的基础。热机学和实用热力工程中常用压力、温度、比容等状态参数来表示工质在某一瞬间所处的状态。下面分别介绍这些状态参数的概念和度量方法。

#### 1. 压力

气体的压力就是气体的大量分子在紊乱运动中对容器内壁频繁撞击的总结果。它是以单位面积上所受的力来度量的，符号通常以  $p$  表示。于是：

$$p = \frac{F}{S}$$

式中  $F$ ——总作用力 公斤  
 $S$ ——总面积 厘米<sup>2</sup>  
 $p$ ——压力 公斤/厘米<sup>2</sup>

压力的单位用 公斤/厘米<sup>2</sup>，这个单位称工程大气压或简称大气压。

即  $1 \text{ 工程大气压} = 1 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10^4 \text{ 公斤/米}^2$

此外，压力也可以用毫米水银柱和毫米水柱作为测量较低压力的单位，此时，

$1 \text{ 工程大气压} = 1 \text{ 公斤/米}^2 = 10^4 \text{ 公斤/米}^2 = 735.6 \text{ 毫米水银柱} = 10 \text{ 米水柱}$

英美等国家压力的单位用磅/吋<sup>2</sup>来表示，根据 1 公斤即为 2.204 磅，1 厘米即为 0.3937 吋，可得

$1 \text{ 工程大气压} = 1 \text{ 公斤/米}^2 = 14.2 \text{ 磅/吋}^2 = 29 \text{ 吋水银柱}$

必须注意，工程大气压与物理大气压不同，所谓物理大气压是指纬度 45° 海平面上常年平均气压定做“标准大气压”或称为“物理大气压”，其值为 760 毫米水银柱。它与工程大气压之间的关系为：

$1 \text{ 物理大气压} = 760 \text{ 毫米水银柱} = 1.033 \text{ 公斤/厘米}^2 = 1.033 \text{ 工程大气压}$

压力通常用各种压力计来测定，压力计上的读数并不表示容器内压力的真正数值，而是容器内压力和外界大气压力的差值，压力计上读得的压力称表压力。见图 1—1 所示，如以

$p_B$  表示表压力

$p$  表示容器内绝对压力

$B$  表示外界大气压力

当容器内绝对压力  $p$  等于外界大气压力  $B$  时，压力计上没有指示，即  $p_B = 0$ ，也说明当

表压力等于零时，容器内实际上是具有大气压力的情况。这时在U形管1—1截面处二边液面高度相等，表示内外压力相等。

当容器内绝对压力  $p$  大于外界大气压力  $B$  时，压力计上就开始有读数指示，由此可见，其指示值即表压力为绝对压力与大气压力之差，绝对压力为指示表压力与容器内本来具有的大气压力之和，即  $p_B = p - B$ ， $p = p_B + B$ 。在1—1截面处二边液面右高左低，内部绝对压力与外界大气压力之差即表压力由  $h_1$  段液柱表示出来。

当容器内压力  $p$  低于外界大气压力  $B$  时，则大气压力与绝对压力的差称真空度，以  $p_{zk}$  表示，这时压力计也要换为真空表来度量，这时真空表上的指示值即真空度为  $p_{zk} = B - p$ 。

可知容器内绝对压力越低于大气压力时，则真空度就越高，U形管二边液面当为左高右低，内外压差即真空度也由液柱  $h_2$  表示了出来。

必须指出，大气压力  $B$  与标准大气压不同，它随时随地可能发生变化，因而会影响表压力或真空度的数值，只有绝对压力才能真正代表工质的状态。因此，在热力学中均以工质的绝对压力作为状态参数，在工程计算中，亦以绝对压力作为依据。

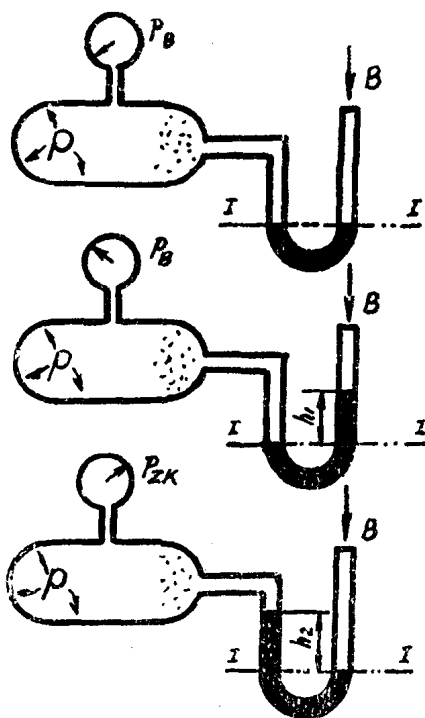


图 1—1

可知容器内绝对压力越低于大气压力时，则真空度就越高，U形管二边液面当为左高右低，内外压差即真空度也由液柱  $h_2$  表示了出来。

绝对压力不能从压力计上直接读得，显然还需通过当时当地气压计上所读得的大气压力  $B$  计算得到。但在工程应用上为了简便起见，常把大气压力近似地当作 1 个工程大气压来处理，这在计算较高压力时误差不太大，但在计算较低压力时，特别是在计算真空度时就不允许，因为误差影响较大。另外，由于大气压力的变化也会影响到工质的状态，不同程度地引起工质状态的变化，故热力学上规定当工质处在压力为 760 毫米银柱并温度为  $0^{\circ}\text{C}$  时的状态为“标准状态”。

## 2. 温度

温度是标志物体冷热的程度。分子运动学说认为由于冷热的不同，气体分子在作不规则的移动和碰撞时具有不同的速度和动能，温度是大量分子移动动能的平均值的标志，气体温度随着其动能的大小而高低。

在工程上温度是用符号  $t$  表示，单位是用摄氏的百度温标  $^{\circ}\text{C}$  表示，而在热力学的计算中则采用绝对温标  $^{\circ}\text{K}$ ，绝对温度的符号为  $T$ ，绝对温标的零度相当于摄氏温标的零下 273 度，两个温标之间的关系为：

$$t^{\circ}\text{C} = T^{\circ}\text{K} - 273$$

或

$$T^{\circ}\text{K} = t^{\circ}\text{C} + 273$$

英美国家在工程上习惯采用华氏温标  $^{\circ}\text{F}$ ，它将冰的融点和水的沸点分别规定在  $32^{\circ}\text{F}$  和  $212^{\circ}\text{F}$ 。摄氏温标与华氏温标间的关系为：

$$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}^{\circ}\text{C} + 32$$

### 3. 比容

单位重量的物质占有的容积称比容，工程上用每公斤工质占有的立方米计算，所以单位用米<sup>3</sup>/公斤。如有G公斤工质占有V米<sup>3</sup>容积，则它的比容为：

$$v = \frac{V}{G} \text{ 米}^3/\text{公斤}$$

比容的倒数，即单位容积内物质的重量称为重度，用符号 $\gamma$ 表示，即：

$$\gamma = \frac{1}{v} = \frac{G}{V} \text{ 公斤/米}^3$$

压力、温度和比容是三个可以测量的量，而且有着容易被理解的物理意义，它们从不同的角度说明了工质所处的状况，所以成为描述工质状态时最常用的基本状态参数。此外，人们通过长期的生产实践和科学实验总结还发现，在这些状态参数之间，根据不同的气态工质，均有其一定的内在联系和客观变化规律。热工学上通常把热机设备中应用的气态工质基本上分成为两种：即比容较大、分子体积微小而接近于一种理想气体（假定其分子本身为不占体积的质点并分子间没有相互作用力的气体）的空气、燃气等为一种以及分子本身所占体积不能忽略不计、相互间作用力又较大的离液态不远的实际气体如水蒸汽、氟利昂蒸汽等为另一种，分别研究它们的状态变化规律。

## 二、热力学第一定律

热力学第一定律是主要研究热能与机械能相互转换时数量上的关系，它是热工计算的依据原则。

### 1. 热量的度量单位与热功当量

工程上把1公斤蒸馏水在20°C时温度变化1°C（自19.5°C加热到20.5°C）所需要的热量作为计量单位，并定名为1千卡（或称大卡）。对工质单位重量而言即为千卡/公斤。

人们作了许多精确的实验，测定出当消耗427公斤·米的机械功并使它全部转变为热量时，可以使1公斤的水温度升高1°C，由此得到热与功相互转化时的当量关系：

$$1 \text{ 公斤} \cdot \text{米} = \frac{1}{427} \text{ 千卡}$$

如果对工质作了L公斤·米的功，并使它全部转变为热量时，可以得到的热量是：

$$Q = AL \text{ 千卡}$$

这里

$$A = \frac{1}{427} \text{ 千卡/公斤} \cdot \text{米}, \text{ 称为功的热当量。}$$

工程上，把单位时间内所作的功称为功率，它用来表示机器或电机的工作能力。功率的单位常用马力或仟瓦。

$$1 \text{ 马力} = 75 \text{ 公斤} \cdot \text{米/秒}$$

$$1 \text{ 千瓦} = 102 \text{ 公斤} \cdot \text{米/秒}$$

因而工程上也常用“马力小时”或“千瓦小时”表示功的大小。这时功和热的转换关系为：

$$1 \text{ 马力小时} = \frac{75 \times 3600}{427} = 632 \text{ 千卡}$$

$$1 \text{ 千瓦小时} = \frac{102 \times 3600}{427} = 860 \text{ 千卡}$$

## 2. 内能

气态工质内部分子不停地运动而具有动能，又因分子之间有距离和相互作用力而具有势能，工质内部分子的动能和势能总称为工质的内能，并用符号  $u$  表示。由于工质的动能是温度的函数，势能是比容的函数，因此，工质的内能是温度和比容的函数，其关系如下式：

$$u = f(T, v)$$

内能既然只与温度和比容两个状态参数有关，即是状态一定，内能也就一定，因此，内能也是一个工质的状态参数。

内能的单位是常用热量单位千卡/公斤来度量的，由于工质内部分子不可能没有运动，内能也没有等于零的状态，所以内能的绝对值是无法确定的，在工程计算中，也并不要求知道内能的绝对值，而只需知道热力过程中工质内能的相对变化。因此可以任意规定一个温度，作为计算内能变化的起点，通常规定  $0^\circ\text{K}$  或  $0^\circ\text{C}$  时的内能为零。

## 3. 热力学第一定律

能量既不能创造，也不能消灭，但各种能量之间可以相互转换，并且总的能量保持不变。热力学第一定律就是能量守恒与转换定律在热力学上的应用，它说明了热量与功相互转换时的关系。如图 1—2 所示，当气缸内有 1 公斤工质，从外界加入热量  $q$  后，工质就膨胀，推动活塞对外作了功  $l$ ，同时工质的状态也发生了变化，它的内能也随着增大，如以符号  $u_1$  和  $u_2$  分别表示此热力变化过程开始与终了时的内能，则其增量为：

$$\Delta u = u_2 - u_1$$

根据能量守恒与转换定律可以得到

$$q = \Delta u + Al \quad \text{千卡/公斤}$$

式中  $q$  ——外界加入的热量

$\Delta u$  ——工质内能的增量

$Al$  ——对外作功所化的热量

上式即为以热量单位表示的能量平衡式，是热量与功相互转换时的数学表达式，亦即是热力学第一定律的基本方程式。我们把热量与功的转换规律称为热力学第一定律，它说明热和功是能量在传递、转换过程中的不同形式，在一定的条件下热可以转变为功，功也可以转变为热，在它们相互转变时有着一定的比例关系。

热力学第一定律揭露了热与功的内在联系，同时也指出了不可能制造一种不消耗任何能量而作功的永动机。

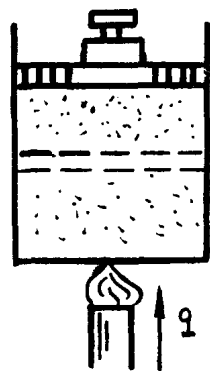


图 1—2



#### 4. 气体的比热

比热是单位物量的物质，其温度变化 $1^{\circ}\text{C}$ 时所吸收或放出的热量。因此，比热的单位取决于热量的单位和物量的单位，工程上热量的单位为千卡，物量的单位通常用公斤。当用重量作为物量单位时所得的比热称为重量比热，用符号 $c$ 表示，其单位是千卡/公斤 $\cdot^{\circ}\text{C}$ 。

如工质不用重量而用容积计量时，可用容积比热 $c'$ 计算。由于工质的容积是同状态有关的（即工质在不同状态时占有不同的体积），因此，在工程计算中规定工质在标准状态时的容积为计算基准，即用1标准米 $^3$ 的工质计算，相应的比热单位用千卡/标准米 $^3\cdot^{\circ}\text{C}$ ，对于各种状态的工质，计算时先要把它的容积换算到标准状态下的容积。

如以气体的加热过程为例，对比热列式表示，则对于重量比热 $c$ 为：

$$c = \frac{q}{t_2 - t_1} \quad \text{千卡/公斤}\cdot^{\circ}\text{C}$$

式中  $q$ ——加给1公斤气体的热量 千卡/公斤

$t_1$  及  $t_2$ ——气体在加热过程开始时和终止时的温度  $^{\circ}\text{C}$

其物理意义为：1公斤气体温度上升 $1^{\circ}\text{C}$ 所需加入的热量。

对于容积比热 $c'$ 为：

$$c' = \frac{q'}{t_2 - t_1} \quad \text{千卡/标准米}^3\cdot^{\circ}\text{C}$$

式中  $q'$ ——加给1标准米 $^3$ 气体的热量 千卡/标准米 $^3$

其物理意义为：1标准米 $^3$ 气体温度上升 $1^{\circ}\text{C}$ 所需加入的热量。

我们知道，使物质温度升高一度所需的热量是与过程有关的，在不同的热力过程中，即使初态和终态相同而加入气体的热量是不同的，所以比热也与过程有关。在工程上，对于气体在压力不变的情况下使其温度升高一度所需的热量称之为定压比热( $c_p$ )，如在容积不变的情况下的比热则称定容比热( $c_v$ )。

由上也可知，工质在各种热力过程中吸收的热量 $q$ 可由相应的比热和温度变化求得，即

$$q = c(t_2 - t_1) \quad \text{千卡/公斤}$$

如为定压过程时比热 $c = c_p$ ，定容过程时 $c = c_v$ 。

### 三、焓、熵和温熵图

#### 1. 焓

如果1公斤工质在作热力变化，根据热力学第一定律可知：

$$q = u_2 - u_1 + A_l \quad \text{千卡/公斤}$$

如果热力变化是按定压过程进行，工质的压力 $p$ 保持不变，而只是其比容 $v$ 和温度 $T$ 的变化，那末因其所作功为：

$$l = p(v_2 - v_1) \quad \text{公斤}\cdot\text{米/公斤}$$

式中  $v_2 - v_1$  为工质在过程始末即自状态1至状态2时的比容变化。

因此

$$q = u_2 - u_1 + Ap(v_2 - v_1) \quad \text{千卡/公斤}$$

将上式重行排列，即得

$$q = (u_2 + Apv_2) - (u_1 + Apv_1) \quad \text{千卡/公斤}$$

如果使  $u + Apv = i$  则  $q = i_2 - i_1$  千卡/公斤

符号  $i$  称为工质的焓，由上式可知，它是由内能和推动功组成的代表某一状态时的总能量的综合量，单位也是千卡/公斤，由于内能  $u$ 、压力  $p$ 、比容  $v$  都是状态参数，当工质的状态确定后， $u$ 、 $p$ 、 $v$  都有一定的数值，焓 ( $i$ ) 也就有一定的数值，因此焓也是工质的一个状态参数。

由上可知，在定压过程中，工质所吸收的热量，可以用工质终态与初态所具有的焓值差来表示。

## 2. 熵

熵 ( $S$ ) 也是一个状态参数。当单位重量的工质在一定温度 ( $T$ ) 下对外作热交换时，其熵的变化是过程中吸放热量与其绝对温度的比商，其单位为千卡/公斤·°C，从一微小过程来看 (见图 1-3) 即：

$$ds = \frac{dq}{T}$$

当工质由状态 1 变化到状态 2 时，其熵的变化为

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T} \quad \text{千卡/公斤} \cdot ^\circ\text{C}$$

由此也可知

$$dq = T \cdot ds$$

即在这微小变化过程中工质吸收的热量为其绝对温度与熵值变化的乘积。

## 3. 温熵 (T-S) 图

对于热量的传递也可以用二个状态参数即温度  $T$  和熵  $S$  来表示。如图 1-3 那样，用温度和熵两者构成的坐标图 ( $T-S$  图) 可以很方便地表示出热力过程中工质状态的变化和过程中吸放的热量。

因为，从上可知，微小过程中吸放的热量

$$dq = T \cdot ds$$

整个 1~2 过程中工质所吸放的热量则应为

$$q = \int_1^2 T \cdot ds$$

即为 1~2 过程线与横座标之间所围的面积  $s_1 1 2 s_2 s_1$ 。

所以在  $T-S$  图上每一个点就代表状态，每一条曲线就代表一个热力过程，曲线下面的面积就代表这个过程中工质对外的热量交换，因此，温熵图又可叫作“示热图”。

## 四、热力学第二定律

热力学第一定律仅仅是从能量守恒与转换的原理出发，说明热与功相互转换中的数量关系，并没有说明能量在转换过程中需要什么条件，有什么限制等方面的问题。

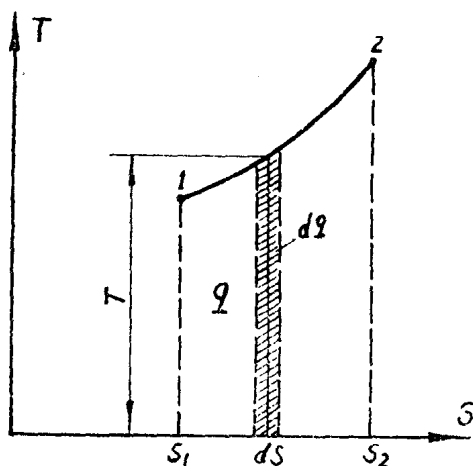


图 1-3

生产实践和生活经验告诉我们，功变热很容易，没有任何条件，也无限制。但是热变功却完全不同，首先要有循环发动机，而且至少要有二个热源。工质在从高温热源吸热作功的同时，必定要向低温热源放出部分热量，不可能把全部热量都转变为功，即效率 $< 1$ ，这说明热变功和功变热是性质不同的过程。

1. 热力学第二定律从热量传递的角度说明了：“热不能自发地、无代价地从低温传到高温”。若要热由低温传到高温(如制冷)，就要消耗一定的功，消耗功就是使热量从低温传到高温时的补偿条件。

2. 热力学第二定律从热转变为功的角度说明了：“不可能制造出一种只有冷却热源而作功的发动机”。若要使热转变为功，必须要有二个以上的热源，在从高温热源吸热作功的同时，向冷源放出一定的热量，以此作为热变功的补偿条件。

热力学第二定律和第一定律一样，都是人类在长期的生产实践中的经验总结，它虽不能用理论证明，但实践已证实了它们是完全正确的。第二定律使人类对热能有了更全面、更深刻的认识，它和第一定律共同组成了热力学的基础。

## 五、水蒸汽的性质

在以柴油机为主机的近代远洋船舶上，由辅助锅炉产生水蒸汽作为加热燃油、日常生活、热舱等用途，除此之外，也有以水蒸汽作为工质的锅炉——汽轮机组为主机的船舶，尤其在今后船舶吨位日益增大的情况下，这种动力装置必将得到更为广泛的采用。因此，我们应对水蒸汽的性质有个基本的了解。

水蒸汽的特性和理想气体大不相同，当水烧开时就会产生蒸汽，由于蒸汽虽然是气态物质，但距离液态不远，其分子所占的体积和分子间的作用力都不能忽视。关于水蒸汽的特性变化规律虽已有前人通过理论和实验的研究得出了水蒸汽的状态方程式，但因其十分繁复，直接使用极不方便，工程上计算使用一般都根据方程式编制出的水蒸汽图表。

### 1. 饱和温度和饱和压力

地面上的水常因蒸发而干涸，空气中的水汽也常因受冷而凝成露珠，这些都是常见的汽化和凝结的例子。但是密闭容器的水却能长期保存而不致干涸，这是什么原因呢？原来，在密闭容器内，随时都有液体分子通过液面而进入空间，同时空间内的汽态分子在遇到液面时又重新返回液体中，前一种现象称为液体的汽化或蒸发，后一现象称为蒸汽的液化或凝结。水分子汽化和液化的内因是分子运动的结果，而外因则取决于所处的温度和压力，温度升高，汽化速度增大，压力升高，则液化速度增大。在密闭容器内，随着分子汽化，使空间蒸汽压力增大，压力大了，反过来又加速了液化，到一定时候，汽化和液化速度相同了，这时汽化的分子数量和液化的分子数量相等，汽化和液化达到了动态平衡，此时表现为：如果容器内温度一定，空间蒸汽压力也不再增加，而保持一定的数值，我们说它是处在饱和状态，这样的蒸汽叫它饱和蒸汽，此时蒸汽的压力叫饱和压力，温度叫饱和温度。

如果密闭容器中的水因受热而温度升高，那么汽化就会加速，汽化的分子数量要比液化的分子数量多，使蒸汽的压力相应增大，原有的动态平衡被破坏，但随着压力增大，液化速度也相应增快，最后必然趋于新的动平衡状态，此时蒸汽压力对应于新的温度，而比原有的大。所以，水蒸汽在一定的饱和温度下，就有一定的饱和压力，二者互成对应关系，饱和温度越高，饱和压力也越大。各种物质在蒸汽状态时都有这样一个重要的特性。

下表列举了水蒸汽的饱和温度 ( $t_b$ ) 和对应的饱和压力 ( $p_b$ ) 的关系。

$t_b$ °C	0	10	20	30	40	50	100	200	300	374.15
$p_b$ 大气压	0.006228	0.012513	0.02383	0.04325	0.07520	0.12578	1.0332	15.857	87.61	220.65

1.0332 工程大气压，也就是 760 毫米水银柱对应的饱和温度是 100°C。也就是我们通常讲的大气压力下（指 1 个物理大气压，等于 760 毫米水银柱）水的沸点是 100°C。例如烧开水，在沸腾以后，对它继续加热，这时水的温度不再升高，而只是水不断地转化为水蒸汽，直到烧干，全部水都转化为水蒸汽，这也是物质处于蒸汽状态时所共有的另一特性。为什么在高山上煮饭不易煮熟？因为高山空气稀薄，大气压力很低，相应的饱和温度也低，8000 米高空上的空气压力只有地面上的三分之一左右，只要烧到七十几度水就会沸腾，因此，登山运动员在高山上煮饭，必须使用压力锅。不要以为水一定在 100°C 时沸腾，水的沸点是随压力而变的，例如把压力降到 0.006228 公斤/厘米<sup>2</sup> 时，水在 0°C 时就会沸腾。如果压力升高到 10 公斤/厘米<sup>2</sup> 时，就要到 179.04°C 才会沸腾。

## 2. 水的定压汽化过程

锅炉中水蒸汽的产生过程基本上可以看作是在定压下进行的，因此，要着重分析在定压汽化过程中水和蒸汽的相互转化和热力性质的变化规律。为便于分析起见，以加热气缸中的水为例，假定气缸中有一公斤水，并在活塞上加以一定的压力，对水逐渐加热至沸腾温度后，就产生蒸汽，这种情况和锅炉中水的定压汽化过程一样。

我们把水在定压汽化的全部状态变化过程表示在图 1—4 的 T—S 图上。

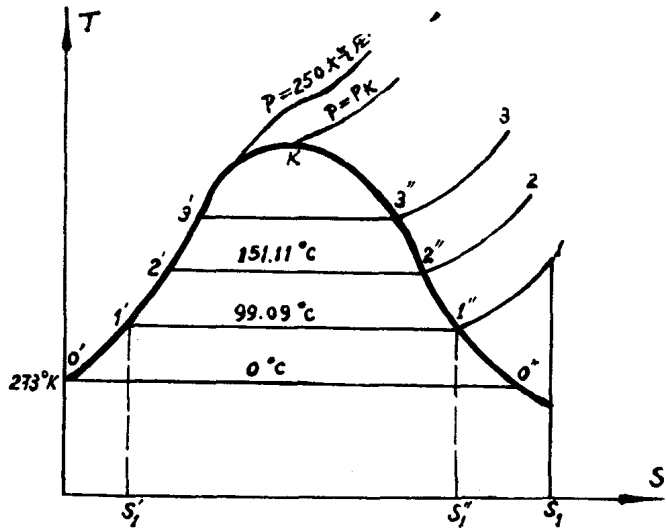


图 1—4

首先规定 0°C 时饱和汽压

0.006228 绝对大气压下饱和水的熵  $s'_0 = 0$ ，作为计算的基准。在热工计算中，注意的是熵值的变化而不是熵的绝对值，所以熵值计算的起点可以这样随意地选择。又因水的熵值不受压力影响，因此可以认为 0°C 的水，不论它所受的外界压力怎样，其熵值  $s_0 = 0$ 。

在 T—S 图上 0°C (273K) 时饱和水的状态以点 O' 表示。

气缸中 1 公斤 0°C 的水在 1 公斤/厘米<sup>2</sup> 压力下的定压加热过程，在 T—S 图上可分为三段。

1) 开始加热，液态水的温度和熵同时增加。它们之间的关系为：

$$ds = \frac{dq}{T}$$

对于定压过程其因放热量可由等压比热和温度变化求得，即  $dq = c_p dT$

$$\text{故 } ds = \frac{c_p dT}{T} \quad \text{积分得 } s - s_0 = \int_{273}^T c_p \frac{dT}{T}$$

由于水的比热  $c_p \approx 1$  千卡/公斤 $\cdot$ °C, 且  $s_0 = 0$ , 因此加热至某一温度时水的熵

$$s = \ln \frac{T}{273} \quad \text{千卡/公斤} \cdot \text{°C}$$

可知在水的加热过程中,  $T$  与  $s$  的关系为对数关系, 一直加热到饱和温度  $t_b = 99.9^\circ\text{C}$ , 此时为饱和水状态  $1'$ , 其熵值  $s_{1'} = \ln \frac{T_b}{273}$ 。

2) 继续加热, 饱和水不断汽化, 温度不变而熵增大, 在  $T-S$  图上是条水平线, 从  $1'$  到  $1''$  即干饱和蒸汽状态为止, 其熵也增大到  $s_{1''}$ 。根据温熵图的性质,  $1'-1''$  下的面积即  $1'1''s_{1'}s_{1'}$  等于汽化过程中加入的全部热量, 因汽化过程中温度未升高, 故称为汽化潜热, 以  $r$  表示。

3) 再继续加热, 则蒸汽的温度将进一步增高, 成为过热蒸汽, 温度和熵同时增大, 这时的关系为:

$$ds = \frac{dq}{T} = \frac{c_{p\text{汽}}dT}{T}$$

因蒸汽的比热与水的比热不同, 在过热过程中其温度与熵值变化之间的关系也不同, 故此过程  $1''-1$  线段的斜率和水加热时的  $0'-1'$  段不同。

总起来看, 水的定压汽化过程在  $T-S$  图上分为三段, 中间  $1'-1''$  为水平段, 其余二段为向右上方倾斜的曲线。

再看把原来为  $0^\circ\text{C}$  的水在气缸中由活塞把它增压到 5 大气压, 其状态在  $T-S$  图上仍是  $0'$  点不变, 观察这时水的定压汽化过程, 同样由三段组成。

1) 水的加热过程线  $0'-2'$ , 近似对数曲线, 直到饱和水的状态  $2'$ , 此时饱和温度增大到  $t_b = 151.11^\circ\text{C}$ , 其熵值也比  $1'$  点有所增大。

2) 饱和水的汽化过程线  $2'-2''$ , 是水平线段, 直至干饱和蒸汽状态  $2''$ , 由于汽化潜热比 1 大气压时为小, 故其熵值的增量也小。

3) 过热蒸汽的定压加热线  $2''-2$  是一条朝右上方倾斜的曲线, 温度和熵均继续增大。

如果把压力增加到 225.65 公斤/厘米<sup>2</sup>, 则加热水到对应的饱和温度为  $t_b = 374.15^\circ\text{C}$  后, 继续加热时, 饱和水就直接全部汽化为干饱和蒸汽而没有温度不变的蒸发阶段, 由此得到临界点  $K$ , 临界点的状态参数称临界参数, 如临界压力、临界温度等。

把各种压力的饱和水状态点相连, 得一曲线叫下界限曲线; 把干饱和蒸汽各状态点相连, 则可得下界限曲线, 显然, 上界限曲线的右上方表示过热蒸汽区, 二界限曲线之间为饱和水和饱和蒸汽的混合物称湿饱和蒸汽(简称湿蒸汽)区, 要决定湿蒸汽的状态, 有了压力和温度还不够, 还需要一个反映湿蒸汽成分的参数——干度  $x$ , 干度是指所含干饱和蒸汽的重量百分数, 譬如干度  $x = 0.9$  的湿蒸汽, 即表示 1 公斤湿蒸汽中有 0.9 公斤是干饱和蒸汽, 其余  $(1-x)$  即 0.1 公斤是饱和水。

至于未饱和水的状态点, 由于水的熵值只与温度有关, 而与压力无关, 故在  $T-S$  图上, 不同压力下水的加热线都重叠在下界限曲线上, 因此下界限曲线不仅代表饱和水的状态, 而且也代表各种压力下液态水的状态。

$T-S$  图虽然对于分析水蒸汽的热力过程很方便, 但若要进行热工计算时, 还必须根据水蒸汽表(如表 1-1)和焓熵图( $i-s$  图)来确定水和蒸汽的状态参数。

表1—1 饱和水蒸汽(按压力排列)

p	t <sub>b</sub>	v'	v''	γ''	i'	i''	r	s'	s''
0.010	6.698	0.0010001	131.7	0.007593	6.73	600.2	593.5	0.0243	2.1450
0.015	12.737	0.0010007	89.64	0.01116	12.78	602.9	590.1	0.0457	2.1098
0.020	17.204	0.0010013	68.26	0.01461	17.25	604.9	587.6	0.0612	2.0849
0.025	20.776	0.0010020	55.28	0.01809	20.81	606.4	585.6	0.0735	2.0658
0.030	23.772	0.0010027	46.52	0.02149	23.80	607.8	583.8	0.0837	0.0501
0.035	26.359	0.0010034	40.22	0.02486	26.39	608.9	582.4	0.0924	2.0368
0.040	28.641	0.0010041	35.46	0.02820	28.67	609.8	581.1	0.0999	2.0254
0.050	32.55	0.0010053	28.73	0.03481	32.58	611.5	579.0	0.1127	2.0065
0.060	35.82	0.0010064	24.18	0.04135	35.84	613.0	577.2	0.1233	1.9909
0.070	38.66	0.0010074	20.92	0.04780	38.67	614.1	575.5	0.1324	1.9780
0.080	41.16	0.0010084	18.45	0.05421	41.17	615.2	574.0	0.1402	1.9665
0.090	43.41	0.0010093	16.51	0.06058	43.41	616.2	572.8	0.1474	1.9565
0.10	45.45	0.0010101	14.95	0.06691	45.45	617.0	571.6	0.1540	1.9479
0.12	49.06	0.0010196	12.59	0.07946	49.05	618.6	569.5	0.1652	1.9326
0.14	52.18	0.0010130	10.88	0.09188	52.17	619.9	567.8	0.1748	1.9197
0.16	54.94	0.0010144	9.604	0.1041	54.92	621.1	566.2	0.1832	1.9085
0.18	57.41	0.0010157	8.600	0.1163	57.40	622.1	564.7	0.1908	1.8988
0.20	59.67	0.0010169	7.789	0.1284	59.65	623.0	563.4	0.1976	1.8901
0.25	64.56	0.0010196	6.317	0.1583	64.51	625.0	560.5	0.2121	1.8718
0.30	68.68	0.0010221	5.324	0.1878	68.66	626.7	558.0	0.2242	1.8567
0.40	75.42	0.0010261	4.066	0.2459	75.41	629.5	554.1	0.2438	1.8333
0.50	80.86	0.0010296	3.299	0.3031	80.86	631.6	550.7	0.2593	1.8152
0.60	85.45	0.0011327	2.781	0.3595	85.47	633.5	548.0	0.2722	1.8004
0.70	89.45	0.0010355	2.409	0.4152	89.49	635.1	545.6	0.2833	1.7878
0.80	92.99	0.0010381	2.126	0.4704	93.05	636.4	543.4	0.2931	1.7771
0.90	96.18	0.0010405	1.904	0.5252	96.25	637.6	541.3	0.3019	1.7677
1.0	99.09	0.0010428	1.725	0.5797	96.18	638.7	539.5	0.3097	1.7592
1.2	104.25	0.0010468	1.455	0.6876	104.38	640.6	536.2	0.3236	1.7447
1.4	108.74	0.0010505	1.259	0.7944	108.92	642.3	533.4	0.3355	1.7322
1.6	112.73	0.0010538	1.111	0.9001	112.96	643.8	530.8	0.3460	1.7216
1.8	116.33	0.0010570	9.9957	1.004	116.60	645.1	528.5	0.3554	1.7123
2.0	119.62	0.0010600	0.9019	1.109	119.94	646.3	526.4	0.3640	1.7039
2.2	122.65	0.0010627	0.8249	1.212	123.0	647.3	524.3	0.3718	1.6963
2.4	125.46	0.0010653	0.7604	1.415	125.9	648.2	522.3	0.3789	1.6894
2.6	128.08	0.0010678	0.7055	1.417	128.6	649.2	520.6	0.3856	1.6830
2.8	130.55	0.0010702	0.6580	1.520	131.1	650.0	518.9	0.3918	1.6771
3.0	132.88	0.0010726	0.6160	1.621	133.5	650.8	517.3	0.3976	1.6716
3.5	138.19	0.0010780	0.5338	1.873	138.9	652.4	513.5	0.4109	1.6594
4.0	142.92	0.0010829	0.4708	2.124	143.7	653.9	510.2	0.4226	1.6488
4.5	147.20	0.0010875	0.4215	2.372	148.1	655.2	507.1	0.4331	1.6394
5.0	151.11	0.0010918	0.3818	2.619	152.1	656.3	504.2	0.4426	1.6310
6.0	158.08	0.0511000	0.3214	3.111	159.4	658.3	498.9	0.4594	1.6163
7.0	164.17	0.0011071	0.2778	3.600	165.7	659.9	494.2	0.4740	1.6039
8.0	169.61	0.0011140	0.2448	4.085	171.4	661.2	489.8	0.4868	1.5931
9.0	174.53	0.0011202	0.2190	4.567	176.5	662.3	485.8	0.4983	1.5834

(续表 1-1)

p	$t_b$	$v'$	$v''$	$\gamma''$	$i'$	$i''$	r	$s'$	$s''$
10.0	179.04	0.0011262	0.1980	5.050	185.2	663.3	482.1	0.5088	1.5748
11.0	183.20	0.0019318	0.1808	5.531	185.7	661.1	478.1	0.5184	1.5669
12.0	187.08	0.0011372	0.1663	6.013	189.8	664.9	475.1	0.5272	1.5598
13.0	190.71	0.9011425	0.1540	6.494	193.6	665.6	472.0	0.5356	1.5531
14.0	194.13	0.0011475	0.1434	6.974	197.3	666.2	468.9	0.5435	1.5468
15.0	197.36	0.0011524	0.1342	7.452	200.7	666.7	466.0	0.5508	1.5410
16.0	200.43	0.0011572	0.1261	7.931	204.0	667.1	463.1	0.5577	1.5355
17.0	203.35	0.0011618	0.1189	8.410	207.2	667.5	460.3	0.5642	1.5303
18.0	206.14	0.0011662	0.1125	8.889	210.2	667.8	457.7	0.5705	1.5254
19.0	208.81	0.0011707	0.1068	9.366	213.1	668.2	455.1	0.5764	1.5206
20.0	211.38	0.011751	0.1016	9.843	215.9	668.5	452.6	0.5822	1.5161
22.0	216.23	0.0011834	0.09244	10.82	221.3	668.9	447.6	0.5932	1.5077
24.0	220.75	0.0011914	0.08486	11.78	226.2	669.2	443.0	0.6031	1.4999
26.0	224.99	0.0011992	0.07838	12.76	231.0	669.4	438.4	0.6124	1.4925
28.0	228.98	0.0012067	0.07282	13.73	235.3	669.4	434.1	0.6211	1.4857
30.0	232.76	0.0012142	0.06798	14.71	239.6	669.5	430.0	0.6295	1.4794
35.0	241.42	0.0012320	0.05819	17.18	249.5	669.5	419.9	0.6484	1.4647
40.0	249.18	0.0012493	0.05018	19.69	258.4	669.0	410.6	0.6654	1.4517
50.0	262.70	0.0012826	0.04026	24.84	274.3	667.5	393.2	0.6950	1.4288
60.0	274.29	0.0013147	0.03312	30.19	288.4	665.4	377.0	0.7203	1.4089
70.0	284.48	0.0013466	0.02798	35.74	301.0	662.6	361.6	0.7428	1.3911
80.0	293.62	0.0013787	0.02405	41.58	312.8	659.4	346.6	0.7632	1.3746
90.0	301.92	0.0014115	0.02097	47.69	323.8	655.7	331.9	0.7817	1.3588
100.0	309.53	0.0014453	0.01846	54.17	334.3	651.7	317.4	0.7992	1.3440
110	316.58	0.001481	0.01638	61.03	344.2	647.1	302.9	0.8157	1.3295
120	323.15	0.001518	0.01462	68.40	354.0	642.4	288.5	0.8316	1.3152
130	329.30	0.001558	0.01314	76.13	363.3	637.3	274.0	0.8466	1.3012
140	335.09	0.001600	0.01182	84.60	372.6	631.6	259.0	0.8614	1.2872
160	345.74	0.001693	0.009626	103.9	391.0	618.9	227.9	0.9901	1.2581
180	355.35	0.001812	0.007804	128.1	410.1	602.8	192.7	0.9192	1.2260
200	364.08	0.00199	0.00618	161.9	431.4	581.1	149.7	0.9515	1.1865
220	372.1	0.00239	0.00438	228	463.0	542.1	78.8	0.9993	1.1215
224	373.6	0.00265	0.00384	260	478.0	522.4	44.3	1.0228	1.0960

由表 1-1 即可知道水和蒸汽的一些特性变化规律, 如当压力增高时, 其对应的饱和温度也增高, 饱和水的比容  $v'$  则几乎不变, 即表示水是可认为不可压缩的, 而干饱和蒸汽的比容  $v''$  则急剧减小, 汽化潜热  $r$  也是压力高时为小。相反, 当压力降低时, 蒸汽的比容及汽化潜热就增大。此外, 由表还可了介水和蒸汽的焓值和熵值的一些变化规律。至于焓熵图 ( $i-s$  图) 则情况与蒸汽表相似, 不过是把些状态参数间的变化规律更全面地以线图形式来表示罢了。

根据  $T-S$  图的性质, 在图上每条过程线下的面积即为该过程加入的热量, 而要具体进行计算这些过程的热量时, 首先因为在定压过程中工质所吸收的热量等于其焓值的增量, 即过程终态焓值与初态焓值之差, 于是我们一方面规定  $0^\circ\text{C}$  时饱和水的焓  $i_0' = 0$ , 作为计算的起点, 另一方面再根据蒸汽表及  $i-s$  图确定各状态时的焓值等参数, 求取各过程的热量。

下面分别介绍三个阶段的热量计算方法。

### 1) 水的等压预热过程

在任何压力下, 把 1 公斤  $0^{\circ}\text{C}$  的水加热到沸腾温度时所需的热量称为液体热, 用  $\lambda'$  来表示, 可知:

$$\lambda' = i' - i_0 \quad \text{千卡/公斤}$$

式中  $i'$  —— 饱和水的焓

$i_0$  ——  $0^{\circ}\text{C}$  时水的焓

由前所假定  $0^{\circ}\text{C}$  时饱和水的焓  $i_0' = 0$ , 又因压力对水的焓值影响极小, 故可认为只要是  $0^{\circ}\text{C}$  的水, 不论所处压力大小, 其焓值  $i_0 = 0$ , 因此

$$\lambda' = i' \quad \text{千卡/公斤}$$

另外, 因在定压过程中, 水加热至某一温度  $t$  时所吸取的热量可以下式计算:

$$\lambda' = c_p (t - 0) \quad \text{千卡/公斤}$$

又因在压力、温度不十分高时水的定压比热  $c_p \approx 1$  千卡/公斤 $\cdot^{\circ}\text{C}$ , 所以可得

$$\lambda' = i' \approx t$$

即定压下自  $0^{\circ}\text{C}$  加热水至某一温度所需的热量即这时其所拥有的焓值, 在数值上基本上与温度值相当。

### 2) 饱和水的等压汽化过程

在一定压力下, 加热一公斤沸腾水使转变成干饱和蒸汽所需的热量汽化潜热  $r$  即为:

$$r = i'' - i' \quad \text{千卡/公斤}$$

式中  $i''$  —— 干饱和蒸汽的焓

如果是沸腾水只变成湿饱和蒸汽时, 则它具有干度  $x$ , 就是说 1 公斤湿饱和蒸汽中有  $x$  公斤干饱和蒸汽和  $1-x$  公斤的沸腾水, 这时的汽化潜热应为:

$$rx = i_x - i' \quad \text{千卡/公斤}$$

式中  $i_x$  —— 湿饱和蒸汽的焓

假使将这公斤湿饱和蒸汽继续加热至干饱和蒸汽时尚须吸收的汽化潜热当为:

$$r(1-x) = i'' - i_x \quad \text{千卡/公斤}$$

### 3) 饱和水蒸汽的等压过热过程

在定压下继续加热干饱和蒸汽使变成过热蒸汽时, 所需的热量为:

$$q_{\text{过}} = i - i'' \quad \text{千卡/公斤}$$

式中  $i$  —— 过热蒸汽的焓

另一方面  $q_{\text{过}}$  也可由下式计算得到

$$q_{\text{过}} = c_{p\text{汽}} (t - t_b) \quad \text{千卡/公斤}$$

式中  $t$  —— 过热蒸汽温度

$t_b$  —— 饱和蒸汽温度

$c_{p\text{汽}}$  —— 过热蒸汽温度  $t$  及在同压力下饱和温度  $t_b$  间的过热蒸汽定压平均比热

由上可知, 将 1 公斤  $0^{\circ}\text{C}$  的水, 在一定压力下加热、蒸发、过热至某一过热温度时, 三个阶段所吸取的总热量应当是:

$$q = \lambda' + r + q_{\text{过}} = (i' - i_0) + (i'' - i') + (i - i'') = i \quad \text{千卡/公斤}$$

说明这总热量就是过热蒸汽在此过热温度时所具有的焓值。



## 第二节 传热学基本知识

两物体间或同一物体的不同部分，由于存在温度差别所引起的热量传递过程叫做“传热”。

传热常常是一种复杂的热交换过程，传热学上一般把它分为导热、对流换热和热辐射三种基本形式来分析和研究，实际上这三种形式很少单独出现，而是一种形式伴随着另一种形式同时出现的。例如，锅炉中的蒸发受热面，它一面承受了燃烧着的烧料及烟气的辐射热以及烟气与管壁接触时的对流传热，然后将这些热量用导热的方式从管外壁传到内壁，另一面则利用对流换热形式将内壁上的热传给管内工质。这种传热过程是以几种不同方式同时进行的，所以称为复杂的热交换。

### 一、基本传热方式

#### 1. 导热

这是物体内部相互接触的质点或相互接触的两物体间，把较热分子的动能传给较冷分子的传热过程。

在单层平壁导热情况下：所传过的热量 $Q$ 可从下式求得：

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) F \tau \quad \text{千卡}$$

式中  $\lambda$  ——材料导热系数（即壁厚为1米时，在每米<sup>2</sup>面积上，两侧温差为1°C时，每小时所能传过的热量）千卡/米·时·°C

$t_1 - t_2$  ——平壁两侧温差 °C

$\delta$  ——壁厚 米

$\tau$  ——热量传递时间 小时

$F$  ——平壁传热面积 米<sup>2</sup>

因之，单位时间、单位面积所通过的热流应为：

$$q = \frac{Q}{F\tau} = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\lambda}} \quad \text{千卡/米}^2 \cdot \text{时}$$

由上二式可以导出通过多层平壁（图1—5）的热量和热流公式，即

$$Q = \frac{(t_1 - t_2) F \tau}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_{II}}{\lambda_{II}} + \frac{\delta_{III}}{\lambda_{III}}} = \frac{(t_1 - t_2) F \tau}{\sum \frac{\delta}{\lambda}} \quad \text{千卡}$$

$$q = \frac{Q}{F\tau} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_{II}}{\lambda_{II}} + \frac{\delta_{III}}{\lambda_{III}}} = \frac{t_1 - t_2}{\sum \frac{\delta}{\lambda}} \quad \text{千卡/米}^2 \cdot \text{时}$$

式中  $t_1$  及  $t_2$  ——平壁内外表面的温度 °C

$\delta_1, \delta_{II}, \delta_{III}$  ——依次为烟灰、金属壁、水垢的厚度 米

$\lambda_1, \lambda_{II}, \lambda_{III}$  ——依次为烟灰、金属壁、水垢的导热系数 千卡/米·时·°C