

272469

船舶管铜工工艺学

(中 级)

施正一 邵志深 陈昌明 编



哈尔滨船舶工程学院出版社

第一章 热工学常识和热交换器

热工学是研究热能在工程上有效利用的一门综合性的技术科学。它研究的内容包括工程热力学和传热学。工程热力学是研究热能与机械能相互转换的科学，它着重研究热能转变为机械能的一般规律，从而确定热机(内燃机、蒸汽机、汽轮机、燃气轮机等)工作的最经济的条件；传热学主要研究物体间由于温度差而引起的热量传递的科学。

热交换器是把热量从较热的流体传给较冷的流体的设备，是合理利用工业二次热能、实现热能回收、节约能源的主要设备。

第一节 热力学常识

一、工质的基本热力参数

凡是将热能转变为机械能的设备称为热机。在工业上，通过某一媒介物，将燃料的热能转变为机械能，此媒介物就称为工质。

工质的状态可用压力、温度、比容等基本热力参数来表示。

(一) 压力

工质对容器壁的单位面积上所施加的垂直力称压力。它是大量工质分子向容器壁面撞击的统计量。

压力的单位为帕(Pa)，也可用液柱高表示(如毫米汞柱、毫米水柱)。工程上常用的压力单位见表1-1。

表1-1 常用压力单位

单位名称	单位符号	换算关系
帕	Pa	
巴	bar	1 bar = 10^5 Pa = 0.1 MPa
工程大气压	at(kg·f/cm ²)	1 at = 9.80665×10^4 Pa
标准大气压	atm	1 atm = 1.01325×10^5 Pa
毫米汞柱	mmHg	1 mmHg = 1.333224×10^2 Pa
毫米水柱	mmH ₂ O	1 mmH ₂ O = 9.80665 Pa

说明容器内工程压力的大小有两种方法：一种是指工质施于容器壁上的压力的实际数值，叫做绝对压力；另一种是指用压力表测量同一压力时压力表的读数，叫做表压力。表压力是绝对压力高(低)于当时当地的大气压力的数值。

(二) 温度

温度表示工质冷热的程度，是判断工质能否从外界接受热量或者对外界传出热量的根据。气体的温度是气体内部分子不规则运动激烈程度的量度，是与气体分子平均速度有关的一个统计量。

温度的单位有热力学温度开尔文(K)与摄氏度(℃)。在法定计量单位制中，热力学温度(K)和摄氏度(℃)可以并行使用。摄氏度与热力学温度每一度的间隔完全一样，它们之间的关系是

$$t = T - 273$$

其中 t ——摄氏度℃；

T ——热力学温度K。

热力学温度是取水的三相点，即水的固、液、气三态共存的温度为基本定点，并定义其温度为273.16K。

(三) 比容

单位质量的工质所占的容积称比容，单位为米³/千克(m³/kg)，用符号 v 表示。比容的倒数，即单位容积中所容纳的工质的质量，称密度，单位是千克/米³(kg/m³)，以符号 ρ 表示。

(四) 比热

单位质量的工质温度每升高1度所需供给的热量，称该工质的比热。同一工质在不同条件下，同样升高1度所需供给的热量不同。供给的热量实际上只指外界传给工质的能量，并不是工质内部所增加的热运动的能量。

热量单位为焦耳(J)。工程上度量热量的单位目前仍大多沿用千卡。1千卡的热量是指1千克质量的纯水升高1℃所需的热量。

1. 质量比热、容积比热、千摩尔比热。工程上工质的数量单位可以取千克、标准米³或千摩尔。相应地就有质量比热 c [千卡/(千克·度)]、容积比热 c' [千卡/(标准米³·度)]或摩尔比热 μc [千卡/(千摩尔·度)]。既然1千摩尔的量为 μ 千克，而且不管什么气体总占据22.4标准米³的容积，则

$$\mu c = 22.4 c'$$

2. 定压比热和定容比热。工质在压力不变和容积不变的条件下被加热时的比热，分别叫做定压比热和定容比热，通常记作 C_p 和 C_v 。

气体在定压下受热时，由于在温度升高的同时，还要克服外界抵抗力而膨胀作功，所以同样升高1℃，比在定容下受热时需要更多的热量。对水和其他液体而言，实际上不需要区别定压比热和定容比热。气体的比热和温度的关系很大。温度不同，比热也不同，一般是随温度升高而增大。在温度不太高(在150℃以下)的情况下，比热随温度的变化可不必考虑，此时的比热称为定值比热，即不随温度变化的比热。在精确计算时，就应考虑比热随温度而变化的因素。

表1-2给出不同原子数的定容及定压摩尔比热数值。根据原子数，在表中查出摩尔

比热数值，再除以该气体的分子量 μ ，即可得出该气体的质量比热数值。

表1-2 定容定压摩尔比热值

比 原子数	μC_v , kcal/(kmol·°C)	μC_p , kcal/(kmol·°C)
单原子气体	3	5
双原子气体	5	7
三及多原子气体	7	9

例1 求氮(N_2)的定压质量比热。

因 N_2 系双原子气体，在表1-2中查出 $\mu C_p = 7$ ，而 N_2 的分子量为28，故 $C_p N_2 = 7/28 = 0.25$ kcal/(kg·°C)。

例2 求空气的定容质量比热。

因空气主要是由氧和氮组成，系双原子气体，在表1-2中查出 $\mu C_v = 5$ ，而它的分子量为29，不难求得 $C_v = 5/29 = 0.1724$ kcal/(kg·°C)。

用近似计算法求得的比热与查气体比热表中所得的平均比热值相当接近。

根据以上的比热值，我们可以求得温度升高 Δt 时所需的热量

$$Q = GC_v \cdot \Delta t = GC_v(t_2 - t_1)$$

例3 某锅炉设备的空气预热器，要求每小时加热 $3500m^3$ 的空气，如在定压 $0.11MPa$ 下从 $25^\circ C$ 升高到 $250^\circ C$ ，试计算每小时所应供给的热量。

解：1 kmol的空气质量为29kg，占据 $22.4m^3$ 的容积，故空气流量

$$G = (3500/22.4) \times 29 = 4.53 \times 10^3 \text{ kg/h}$$

采用近似计算。查表1-2，可得 $\mu C_p = 7$ kcal/(kmol·°C)，则 $C_p = 7/29 = 0.2414$ kcal/(kg·°C)，因此

$$\begin{aligned} Q &= GC_p(t_2 - t_1) \\ &= 246.10 \times 10^3 \text{ kcal/h} \end{aligned}$$

二、热力学的基本定律

(一) 热力学第一定律

人们从实践经验中认识到，各种能量可以相互转换，例如热能可以转换为机械能，机械能可以转换为热能，但它们的总量保持不变，这就是能量守恒与转换定律。将这一定律应用在热力学上，便是热力学第一定律。

如图1-1所示，气体受热膨胀推动活塞移动做功(w)。由于气体状态的变化，一般将引起气体内能的变化(Δu)，即加入的热量(q)除一部分改变气体内能外，其余部分作了膨胀功，故得出热力学第一定律的数学表达式

$$q = \Delta u + w$$

(二) 热力学第二定律

热力学第一定律说明了热量和功转换时相互间的数量关系，但它并未涉及转换过程的质的方面，也未说明能量转换的方向和实现能量转换的必要条件。热力学第二定律就是

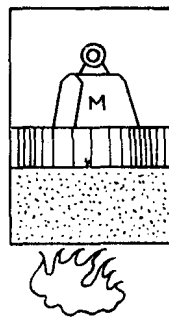


图1-1 工质在定压下受热

回答这些问题。

由观察结果我们知道，机械能很容易转换成热能，例如当摩擦时产生热。相反，要将热能转换为机械能需有一定的条件，而且使加给工质的热能全部转换为机械能是不可能的，因而引出了热效率的概念。

任何热机的热效率不仅不能超过1，也永远达不到1。这个事实确认了另一条客观规律，即热力学第二定律——使热能全部而且连续地转变为机械能是不可能的。在热能转变为功的过程中，必有一部分热能传给冷源，也就是说全部热能不可能完全转变为功。

热力学第二定律的另一种说法是：热不能自动地从低温体传给高温体。

三、气体的热力过程

在热力学中，为了研究方便，假设出一种气体，该气体分子间没有吸引力，而且分子本身又是不占有体积的质点，称这种气体为理想气体。在自然界中，理想气体并不存在。实际气体的分子具有一定的体积，分子间也存在吸引力。在对气体问题进行分析和计算时，为了使问题得到简化，通常将气体结构简化为理想气体的结构。

表示气体的三个基本参数（ p 、 v 、 T ），在平衡状态时存在着一定关系式（状态方程式）——某一定量的气体，当温度保持不变时，其容积与压力成反比（玻义尔-马略特定律）；当容积保持不变时，其压力与绝对温度成正比（查理定律）；当压力保持不变时，其容积与绝对温度成正比（盖-吕萨克定律）。理想气体状态方程解析表达式为

$$pv = RT$$

R 为常数，称气体常数。

气体由一个状态到另一个状态的转换，称为气体状态变化过程，即气体热力过程。热机将热能转变为机械能，就是通过工质的状态变化而实现的。也就是说，是经过一些热力过程所组成的热力循环来实现的。下面研究在热力学中起重要作用的几个特殊的热力过程。

（一）等容过程（定容过程）

柴油机工作时，气缸里被压缩了柴油蒸汽和空气的可燃混合气体被点燃，并在一瞬间爆发。当活塞尚未移动时，气体压力和温度就急剧升高，此过程就可看作是定容过程，即 $v = \text{常数}$ ， $v_1 = v_2$ ， $T_2/T_1 = p_2/p_1$ 。

（二）定压过程

蒸汽在锅炉里形成的过程，可以看成是定压过程，即 $p = \text{常数}$ ， $p_2 = p_1$ ， $T_2/T_1 = v_2/v_1$ 。

（三）定温过程

这种过程在实际上很难实现，即 $T = \text{常数}$ ， $pv = \text{常数}$ ， $p_2/p_1 = v_1/v_2$ 。

（四）绝热过程

四冲程柴油机的压气过程，如不考虑气体和气缸壁以及活塞的传热影响，可看作绝热压气过程，即 $q = 0$ ， $pv^K = \text{常数}$ 。其中 $K = C_p/C_v$ ，叫做绝热指数。

（五）多变过程

除以上所述的四种基本热力过程以外的各种热力过程。上述四种基本热力过程只是多变过程的特例，即 $pv^n = \text{常数}$ 。指数 n 为不同值时，就决定着不同的热力过程：当 $n = 0$ 时， $p = \text{常数}$ ，就是定压过程；当 $n = \infty$ 时，就是定容过程；当 $n = 1$ 时， $pv = \text{常数}$ ，就

是定温过程，当 $n=K$ 时， $pv^K = \text{常数}$ ，就是绝热过程。

(六) 气体的热力循环

前面所叙述的各种热力过程在循环中的应用，就是各种热机的热力循环。我们仅简单了解一下在热力学中具有理论意义的卡诺循环。

可逆的卡诺循环是由二个可逆等温过程和二个可逆绝热过程所组成。图 1-2 所示， ab 在温度较高的恒温热源温度下定温膨胀，吸热 q_1 ； bc 为绝热膨胀； cd 在温度较低的恒温冷源温度 T_2 下定温压缩，放热 q_2 ； da 为绝热压缩。

在一个循环中，工质净输出的功称为有用功。很明显，在卡诺循环中，工质所作的有用功在 $p-v$ 图中以面积 $abcd$ 表示。在循环中，转变为有用功的热量称为有效热。卡诺循环的有效热在 $T-s$ 图（温熵图）中以面积 $abcd$ 表示。卡诺循环是在同一温度限内热效率最大、最理想的循环。但实际上它不可能实现，仅能作为评定热机实际工作的经济性的标准。

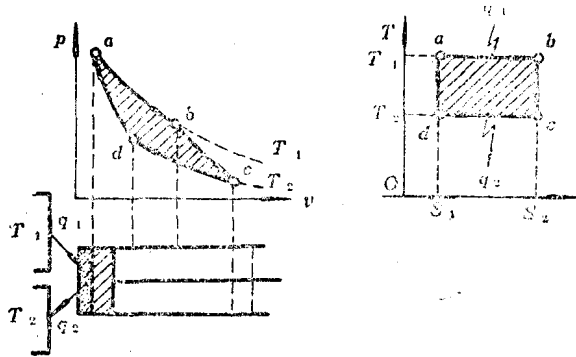


图1-2 卡诺循环

四、水蒸气的性质

在热力过程中，水蒸气的应用非常广泛。蒸汽机、汽轮机以及很多热交换器，都采用水蒸气作工质。这是由于水容易取得，并对金属腐蚀作用小、对人体无害。因而我们在这里对水蒸气的物理性能作些叙述，找出它的一些主要性质。

我们知道，物质的状态有固态、液态和气态。在一定的条件下，物质可以从一种状态转变为另一种状态。水在 0°C 时结成冰，这就是固态。水凝固为冰时的温度叫做凝固点；冰融解为水时的温度叫做熔点。在1个大气压情况下，水的凝固点为 0°C ；若外加压力每增加1个大气压时，该点温度就下降 0.0075°C 。如果水中掺入了杂质，如溶有食盐，该点温度也下降（海水就不易结冰）。当水中含有30%的食盐时，该点温度将下降到 -21°C 。水的另一个特点是它在凝固时体积增大。所以，为了防止管内的水结冰时胀破管子，总是要包扎好绝热材料。

物质从液态转变成气态的过程叫做汽化。汽化的方式有蒸发和沸腾。在水的表面发生的汽化现象称蒸发。液体在蒸发时它本身温度要降低。液体表面和内部同时进行的剧烈汽化现象称沸腾。沸腾是液体内部的汽泡压力大于外界压力，从而汽泡上升到液面破裂开来，把里面的蒸汽放走。

在工程上，水蒸汽一般都是在定压下对水加热而产生，见图 1-3。设一端封闭的筒状容器中盛有1kg水，用一个可移动的活塞压在水面上，故水承受了一定的压力 p 并和外界介质隔开。对水加热时，水的温度将不断上升，而水的比容却很少增加，当达到沸点温度（饱和温度） t_s 时，就开始沸腾。达到饱和温度的水叫饱和水〔图 1-3 (b)〕。在定压下继续加热，水便逐渐汽化，这时水和汽的温度都保持不变。当容器中最后一滴水

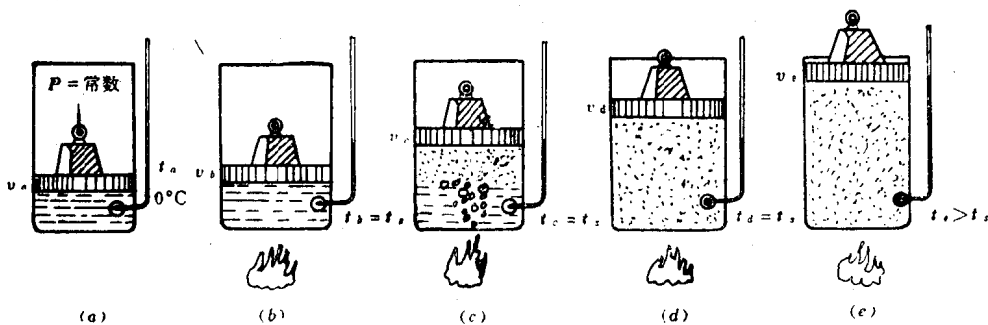


图1-3 在定压下蒸汽的形成

(a)未饱和水; (b)饱和水; (c)湿饱和蒸汽; (d)干饱和蒸汽; (e)过热蒸汽

完全变为蒸汽时[图1-3(d)], 温度仍然是 t_s , 这时的蒸汽叫干饱和蒸汽(简称饱和蒸汽)。水还没有完全变成饱和蒸汽之前, 容器中饱和水和饱和蒸汽共存[图1-3(c)]。通常把这种混合有饱和水的饱和蒸汽叫做湿饱和蒸汽, 简称湿蒸汽。如果对饱和蒸汽再加热, 蒸汽的温度又开始上升, 这时蒸汽的温度已超过饱和蒸汽的温度, 这种蒸汽叫过热蒸汽[图1-3(e)]。由于过热蒸汽的比容大于相同压力下饱和蒸汽的比容, 所以过热蒸汽是不饱和的。过热蒸汽的温度已经超过该压力下的饱和温度, 故可用超过温度的多少表示蒸汽过热的程度。这超过的温度叫过热度。过热度越低, 表示越接近饱和蒸汽; 过热度越高, 表示越趋近于理想气体。在不同的压力下, 水的饱和温度也不同。实验结果表明, 水的饱和温度随着压力的提高而升高。只有在标准大气压力(760 mmHg)下, 水的沸点温度才是 100°C 。在其它压力下, 水的饱和温度如表1-3。

表1-3

$p(\text{MPa})$	0.0006108	0.01	0.1	1.0	10.0
$t_s(^{\circ}\text{C})$	0.01	45.84	99.64	179.88	310.96

第二节 传热学常识

传热学是一门研究热量传递规律的学科。热力学第二定律指出: 只要有温度差存在, 热量总是自发地从高温物体传向低温物体。温度差普遍地存在于人类的生活和生产领域中。因此, 熟悉和研究热量传递的规律是人们生活活动的需要, 更是生产发展和科学技术进步的重要课题。

在动力装置中, 经常需要运用传热学的原理解决两类问题: 一类是如何增强传热, 以提高热效率, 减少热能的消耗或增加蒸汽的产量; 另一类是如何减弱传热。

一、热量传递的三种基本方式

在生产实践中所遇到的各种热量传递现象，可归纳为三种基本方式：导热、热对流和热辐射。这三种基本方式的热量传递，其物理本质各不相同。

导热，亦称热传导，是指直接接触的物体的各部分之间热量的传递现象。这种导热过程一般发生在固体中，是指热量由高温区域转移到低温区域的过程。不同固体之间的导热过程只有在它们接触时才有可能发生。在流体（气体和液体）中进行单纯的导热过程时，它们内部必须没有发生客观的相对移动，因而在流体中的导热一般很弱，常被忽略。

热对流，亦称对流换热，是指流体内部各部分发生相对位移而引起的热量转移现象。它包括流体和固体壁面之间的热量传递，在工业应用中具有现实意义的不是在流体内部进行纯粹的热对流，而是流体与壁面进行的热交换。

辐射换热是指温度不同的两个（或两个以上）物体间相互进行的热的辐射和吸收所形成的换热过程；是由物体表面直接向外界发射可见的和不可见的射线，在空间传递能量的现象。它与导热、热对流不同，在传递能量时不需要相互接触。所以，它是一种非接触传递能量的过程，即使传热空间的空气高度稀薄，辐射换热也照常能进行。

热量传递往往不是以导热、热对流及辐射换热这三个基本方式的任一单独形式出现，而是以这三种基本方式的复杂组合出现。不论其组合方式如何，温度差的存在是产生传热过程的先决条件。传热物体的温度高低、物体的物态（固态、液态、气态）及物体间的相互联系（接触或非接触，距离的大小）等，在某种程度上决定了传热方式。

二、导热过程

在导热过程中，热量是如何传递的？我们知道，温度是对物质微观粒子（分子、电子等）热运动激烈程度的衡量。温度愈高，微观粒子热运动就愈激烈，热运动的能量也就愈大；相反，温度愈低，热运动的能量就愈小。这些激烈运动的微观粒子相互碰撞的结果，导致了热运动能量的转移。在宏观上就表现为热量由物体的一部分传递到另一部分。例如将一根紫铜管的一端在炉上加热，另一端用手拿着，过一会就感到很热。这是由于紫铜管一端在炉上被加热后，该端物质的微观粒子热运动加快，能量也增大。通过微观粒子之间一系列碰撞，把能量转移到另一端，使另一端也热了起来。

对于不同物态的物质，传导热量的微观粒子及这些微观粒子传递能量的方式有所不同。气体分子可以作幅度较大的自由运动，因此气体导热主要依靠分子间的相互碰撞。固体中的金属和非金属的微观粒子热运动是不相同的。非金属物质的分子，只能在平衡位置附近振动，分子能量的传播是依靠分子的振动，而金属结构中有大量的自由电子，微观粒子热运动的动能主要是依靠自由电子进行传递。液体的结构介于气体和固体之间，分子可以作幅度不大的位移，因此热量的传递不仅依靠分子的振动，还依靠分子间的相互碰撞。

通常，只有在密实的固体中，才存在单纯的导热现象。当流体各处温度不同时，在发生导热的同时，一般都伴随有对流现象。只有在流体层很薄，且热流体在上冷流体在下时，才存在流体单纯导热现象。

热量传递是由温度差而引起的，因而导热过程的进行与物体内部的温度分布密切联系在一起。在某一瞬间，物体各点温度分布情况称为温度场。如果温度场不随时间变化，这种温度场称为稳定温度场；如果随时间变化，称为非稳定温度场。温度场中具有

相同温度的点连接起来所形成的线或面，称为等温线或等温面，如图 1-4 表示平板及长圆管的等温面。例如有个面积很大、材料均匀的等厚度平板，只要它两个表面上的温度都是均等的，则它的等温面就平行于表面。如果物体为长圆管，且内外壁面温度各自均等，管壁内部的等温面则为同心圆柱面。

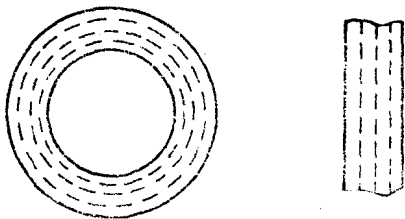


图1-4 平板及长圆管的等温面

导热的基本定律——傅立叶定律指出：在单位时间内，经由单位面积所传递的热量（热密度或比热流）与该时间同一地点的温度梯度成正比。其数学表达式为

$$q = -\lambda \text{grad}t = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}$$

式中 q ——热流密度，

λ ——导热系数，

$\text{grad}t$ ——温度梯度（在所给定的时刻，温度场在该地点朝着温度增加方向的温度变化率）。

这里，负号表明导热的方向永远顺着温度降低的方向，即导热的热流密度是一个矢量，它永远与温度梯度的方向相反。导热系数 λ 是一个比例常数。它是物质的一个重要热物理性质参数，表示物质的导热能力，即单位温度梯度时的热流密度。物质的导热系数不但因物质的种类而异，而且还与物质的结构、密度、湿度、温度等因素有关。

纯金属的导热系数一般随温度升高而减小。良导电体一般也是良导热体。在纯金属中若掺有少许杂质，其导热系数将降低很多。例如，纯铁的导热系数为 $73 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，而铸铁的导热系数为 $50 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

非金属固体材料导热系数的变化范围很大，其值为 $0.025 \sim 3.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。通常将 λ 小于 $0.25 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 的材料称为保温材料。这类材料的导热系数大多数随温度的升高而增大，并且还和材料的结构、多孔度、湿度、密度等因素有关。湿材料的导热系数比干材料的高，如冷藏库的隔热材料受潮后将降低制冷效果。

液体的导热系数为 $0.07 \sim 0.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。一般液体的导热系数随温度升高而减小，但在标准大气压下水的导热系数却随温度升高而增大。液体中，水的导热系数较大，油的导热系数较小。

气体的导热系数为 $0.006 \sim 0.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。在很大的压力变化范围内，它仅是温度的函数，而和压力无关。气体中以氢气和氮气的导热系数最大，在 0°C 时比空气高六倍。

经验表明，绝大多数材料的导热系数随温度呈线性变化，即

$$\lambda = \lambda_0 (1 + bt)$$

式中 λ_0 —— 0°C 时的导热系数；

b ——常数，由实验测定。

我们所讲述的是稳定导热，是物体内部各点温度不随时间而变化的导热过程。

在稳定导热计算里，温度取物体温度的算术平均值。

（一）平板的热传导

设一厚度均匀的平板，厚度为 δ ，其长度、宽度比厚度大得多，而且长和宽方向的

端面传出或传入的热量与厚度方向传出或传入的热量相比可以忽略不计；材料的导热系数是常数；平板的两个外表面各维持一定温度 t_1 和 t_2 。如图1-5所示。在上述前提下，可以认为物体内的等温面是平行于两侧面的平面。根据傅立叶公式可得出

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) = \frac{\lambda \cdot \Delta t}{\delta}$$

由上式可以看出，在单位时间内通过平板单位面积所传递的热量与导热系数 λ 及平板两表面的温差 Δt 成正比，而与平板的厚度 δ 成反比。根据此式不难确定由侧面积 F 传递的总热量 Q 。

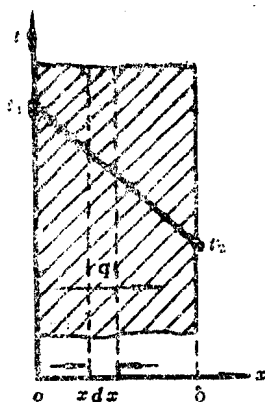


图1-5 平板的导热

$$Q = qF = \frac{\lambda \cdot \Delta t \cdot F}{\delta} = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\lambda F}}$$

式中， $\delta/(\lambda F)$ 称为平板导热的热阻。

(二) 多层平壁的热传导

由若干层不同材料组成多层平壁。为了分析和计算多层平壁的热传导，首先作以下假设：多层平壁的各层之间的接触必须非常良好；接触层的两表面上具有相同的温度；是稳定热传导，热流密度 q = 常数，而且对于任何一层来说都相同。

设有一个三层平壁，各层的导热系数分别为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 ，厚度为 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 ；已知平壁两外表面的温度各为 t_1 和 t_4 （如图1-6所示）。因此，各层平壁的比热流量为

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_1 - t_2)$$

$$q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (t_2 - t_3)$$

$$q = \frac{\lambda_3}{\delta_3} (t_3 - t_4)$$

则，各层平壁的温度变化为

$$t_1 - t_2 = q \frac{\delta_1}{\lambda_1}$$

$$t_2 - t_3 = q \frac{\delta_2}{\lambda_2}$$

$$t_3 - t_4 = q \frac{\delta_3}{\lambda_3}$$

各层温度变化的总和就是整个多层平壁的总温差。把式中的左右两边彼此相加，得

$$t_1 - t_4 = q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)$$

由上式得到

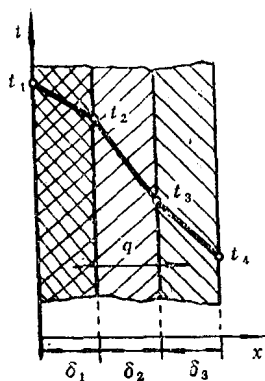


图1-6 多层平壁的热传导

即

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

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

就是说，多层平壁总的热阻力等于各层平壁热阻力之和。

(三) 单层圆筒壁的热传导

设，圆筒的长为 L ，内径为 d_1 ，外径为 d_2 ；筒壁表面的温度是均等的，分别为 t_1 和 t_2 ；材料的导热系数为 λ 。见图1-7。由平壁导热原理，假定 $L \gg d_2$ ，则等温面是同心圆柱面，并和圆筒内、外表面平行。根据傅立叶定律，得

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dr} F = -\lambda \frac{dt}{dr} 2\pi r L$$

分离变量并积分，得

$$dt = -\frac{Q}{2\pi\lambda L} \frac{dr}{r}$$

$$t = -\frac{Q}{2\pi\lambda L} \ln r + C$$

当 $r=r_1$ 时， $t=t_1$ ；当 $r=r_2$ 时， $t=t_2$ 。

$$t_1 = -\frac{Q}{2\pi\lambda L} \ln r_1 + C$$

$$t_2 = -\frac{Q}{2\pi\lambda L} \ln r_2 + C$$

$$t_1 - t_2 = \frac{Q}{2\pi\lambda L} (\ln r_2 - \ln r_1) = \frac{Q}{2\pi\lambda L} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

由此可得

$$Q = \frac{2\pi\lambda L}{\ln \frac{r_2}{r_1}} (t_1 - t_2) = \frac{2\pi\lambda L}{\ln \frac{d_2}{d_1}} (t_1 - t_2)$$

根据上式可知，通过圆筒壁的热阻为

$$R = \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi\lambda L}$$

公式表明，圆筒壁内温度分布为对数曲线。它与平板内的温度分布曲线不同。产生这种差异的原因是由于圆筒壁各等温面的面积不相等。如果圆筒壁的内外面积相差不大，可以近似地当作平板传热，其温度分布均为线性规律。

(四) 多层圆筒壁的热传导

圆筒壁由三层不同的物质组成。假设：层与层之间接触良好；不同层接触的两表面有着同样的温度；各层内外直径和导热系数已知。见图1-8。此外，多层壁的内表面与外表面温度为 t_1 和 t_4 ，层与层之间两接触面温度为 t_2 、 t_3 。

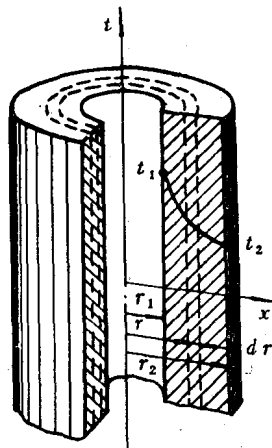


图1-7 单层圆筒壁的热传导

因为通过每一层的热量相等，多层壁的总热阻力等于各单层壁的分热阻力的总和，故参照多层平壁的导热公式和单壁圆筒壁的导热公式，可得出多层圆筒壁的导热公式

$$Q = \frac{2\pi L(t_1 - t_4)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3}}$$

三、对流换热

对流换热是指流动的流体和固体壁面直接接触，当两者的温度不同时，相互间所发生的热传递过程。这种过程既包括流体位移所产生的热对流作用，也包括流体分子间的热传导作用。

动力装置中热交换器（如滑油冷却器、淡水冷却器、蒸汽冷凝器等）的器壁或管道的内外壁，都与不同温度的流体相接触，它们间所发生的热传递过程都属于对流换热。在分析对流换热过程时，主要是分析影响换热的各种因素，进而确定通过固体表面的热流量 q ，即计算单位面积在单位时间内与流体所交换的热量。

对流换热的计算方法，目前仍采用牛顿所提出的公式

$$Q = \alpha F(T_f - T_w) \quad \text{或} \quad q = \alpha(T_f - T_w)$$

式中 Q ——在单位时间内，整个壁面面积 F 和流体之间的对流换热量；

T_f ——流体的平均温度；

T_w ——固体壁面的平均温度；

α ——对流换热系数，即在单位时间内流体和壁面温差为 1°C 时，通过每单位面积所传递的热量。

由上式可看出，当外界环境条件相同时，影响对流换热的重要因素是 α 值的大小。对流换热系数 α 与导热系数 λ 不同， λ 是材料的物理性质， α 则不是物理性质，而仅受物理性质的影响，同时还与影响传热量 Q 的因素有关。

下面分析影响对流换热的主要因素。

（一）流体流动动力

流体流动产生的原因，也就是流体流动的动力来源，一般来说分为两类：一是动力来自流体以外的机械力，如动力装置中的水泵、油泵、风机等所提供的机械力。在力的作用下，流动阻力得以克服，并形成所需要的流动速度，这类流动称为受迫流动，或强迫流动。此时，流动速度的大小决定于外力所产生的压差、流体的物理性质和流通的阻力。另一类是动力来自流体内部的密度不同所形成的浮升力，而密度不同的原因，归根到底还是由于流体内部各处温度不同，这类流动称为自然对流。它往往是流体与不同温度的固体壁面相接触的结果，其流动速度除决定于受热或冷却的强度外，还与流体性质、空间大小和位置等有关。

在受迫流动时产生的换热称为受迫对流换热，在自然对流时产生的换热称为自然对流换热。它们的换热计算方法也各不相同。一般说，受迫对流换热的主要因素是流速

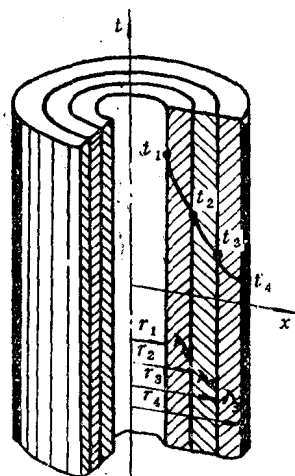


图1-8 多层圆筒壁的热传导

(流速高, 换热系数 α 也大); 自然对流换热的主要因素是温度差。

(二) 流体的流动情况

流体的流动情况主要包括层流和紊流, 通常由雷诺数 Re 的大小来判别。在层流的情况下, 流体各部分质点都处在有规则的运动中, 且平行于流道的壁面, 各流层间相互不混合, 如图1-9(a)所示。因为层流时, 流体质点处于有规则运动, 所以层流对壁面垂直方向的热量转移主要依靠导热。紊流时流体各部分质点都处在不规则的运动状态中, 见图1-9(c)。这种情况的产生是由于流体内部有旋涡存在, 旋涡扰动了流动, 流体受了扰动, 同时又产生了新的旋涡。因此, 在离开壁面的空间内到处充满了旋涡, 这就是紊流的特征。但必须指出, 即使是在紊流情况下, 在靠近壁面处, 总有一层很薄的层流存在, 这一薄层称为边界层。它的厚度取决于流速, 并随流速增大而减薄。

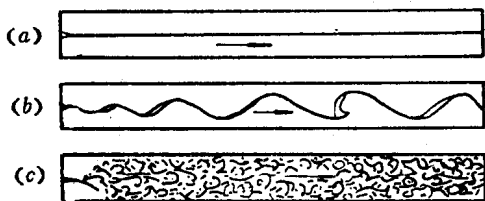


图1-9 流体在管内流动的特性

(a) 层流; (b) 过渡状态; (c) 紊流

所以, 在紊流状况下, 流体的流速愈大, 换热强度也就愈大。

在船舶动力装置中采用的热交换器, 绝大部分是流体在管内或槽内的受迫流动下与管道壁(槽壁)进行换热。例如滑油冷却器中的润滑油、蒸汽冷凝器管中的冷却水等流体的被冷却均属此类。它们的对流换热主要的依据是雷诺准则数 Re 。对于不同的流体和不同直径的管路, 流体在管内流动的临界速度不相同, 但是, 如果 Re 相同, 运动的情况应该是一致的。流体在管内或槽内流动时层流和紊流的临界雷诺准则数 Re 为2200。当 $Re < 2200$ 时为层流; 当 $Re > 2200$ 时就发生从层流转变为紊流状态的过渡过程; 当 $Re > 10000$ 时达到旺盛的紊流状态。因此, 当流体流动的情况不同时, 它的换热计算方法就不同。

(三) 流体有无相变发生

这里所讲的相变, 是指在换热过程中参与换热的流体因吸热或放热而发生的状态的变化。例如参与换热的水蒸汽在放热时凝结为水, 或水在吸热时要沸腾。流体具有相变的对流换热过程, 与无相变的对流换热过程有很大的差别。发生相变时, 流体温度基本不变(在等压情况下), 这时流体与壁面间的换热量等于流体吸收或放出的潜热。一般地说, 对于同一种流体, 有相变比无相变时的换热强度要大得多。这是由于液体沸腾时, 在放热的表面将产生大量气泡, 在这些气泡穿过流体层由液面逸出的过程中, 放热表面和液体内部都会受到气泡的强烈扰动, 因而该时的换热系数大大的高于自然对流和受迫对流的换热系数。当蒸汽和低于它的饱和温度的壁面接触时, 就放出汽化潜热而凝结成液体。如果凝结液体在壁面上形成一层液膜, 称之为膜状凝结; 如果在壁面聚成一个个水珠, 则称之为珠状凝结(这种凝结大多发生在具有油膜的壁面上)。这两种不同的凝结方式所产生的换热效果不同。凝结液的密度、汽化潜热及导热系数、粘度等影响换热效果。在热交换器中的蒸汽凝结, 大多数是膜状凝结。

(四) 换热面的几何因素

几何因素包括换热面的形状、大小以及换热面在流体中的相对位置。换热面的形状和大小, 影响流体在换热面附近的流动。例如, 暖汽管系中的取暖器的形态具有有肋片及无肋片的区别, 在自然对流换热中, 它们换热效果就有很大的差别。自然对流换热时

的流体受热上升，安装时，若将取热器表面朝下，就会抑制自然对流换热，换热效果就差。因此，应将散热片垂直于地面放置。在热交换器中，如果流体横向流过光滑的管束，此时的换热情况就很复杂。管束中管子的排列方式有顺排及叉排两种，如图1-10所示。管束间距离、管子的直径及排管次序等都会影响换热效果。从图1-11中可以看出：顺排时，除了第一排以外，管子的正面与背面，都是在涡流区，受不到流体的冲击；叉

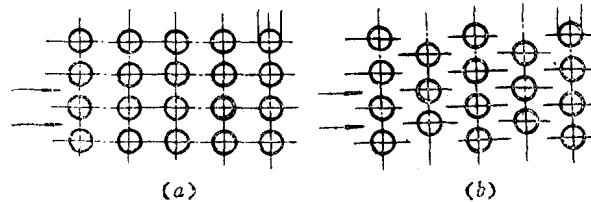


图1-10 管束排列

(a) 顺排式；(b) 叉排式

排时，除第一排与顺排情况相接近以外，其它各排所受到的流体冲击也和第一排相似。根据实验数据得知，第一排的换热要随着流动的初始扰动度有差异，第二排及第三排的换热效果较第一排为好，第四排以后平均换热基本相同。但是，叉排换热系数的绝对值比顺排要高些，这是由于叉排时流过管子的流体扰动较剧烈。

流体在管内流动时的换热，除了前面已叙述过的影响因素外，管子直径、管子的长度都将影响换热效果。例如，当流体进入管子时，流体从大的空间进入小的管口，流速的分布规律要发生很大变化，流线发生收缩性的干扰，随着离管口距离的增加，干扰逐渐消失；由于壁面摩擦，流速将逐渐降低，经过一段距离，达到热稳定状态。一般长度为50倍管径时才能达到稳定状态。管长小于50倍管径的称为短管，大于50倍管径的称为长管。短管的平均换热系数高于长管的平均换热系数。管内流体处于水平和竖向流动时，都将影响换热效果。当流体流过弯曲管道时，由于扰动增加，边界层减薄，故使换热效果增强。

(五) 流体的物理性质

对于不同的流体，如空气、燃气、水和油类等，由于物理性质不同，也影响其换热过程。

在边界层厚度相同时，流体的对流换热系数 α 随着导热系数 λ 的增大而增大。如水的导热系数是空气的20多倍，因此水的换热系数远比空气高。单位容积热容量愈大，流体温度改变1℃所需的热量就愈多，因而增加了流体与壁面之间的热交换，提高了换热效果。流体的粘性愈大，则流体流过壁面时的滞留作用就愈大。在相同的流速下，粘性大的流体，其层流边界层的厚度就较厚，因此减弱了对流换热效果。在分析物理性质对换

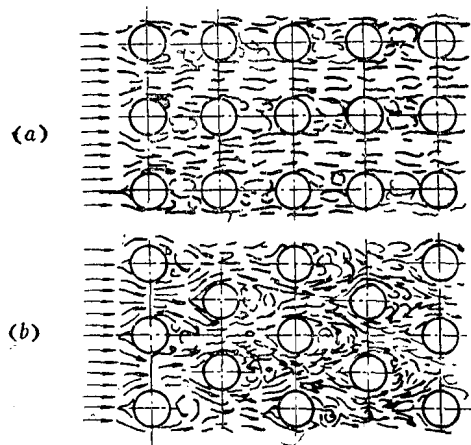


图1-11 流体在管束间的流动

热系数的影响时,应考虑综合影响,如水的粘度要较空气的大,但是水的导热系数 λ 、密度 ρ 及比热 c 都较空气大的多,因而在相同的流速及相同几何因素下,水的换热系数要比空气大的多。

通过以上对影响换热系数主要因素的分析,可以知道,对流换热的计算比较复杂,其关键在于确定换热系数 α 值。

表1-4为不同流体在不同性质的换热情况下平均换热系数的大致范围。

表1-4 平均换热系数 α 数值

对 流 换 热 情 况	α W/($m^2 \cdot K$)
自 然 对 流 (空 气)	5~50
受 迫 对 流 (空 气)	25~500
受 迫 对 流 (水)	250~15000
水 沸 腾	2500~25000
水 蒸 气 凝 结	5000~100000

四、辐射换热

导热和对流换热是不同温度的物体直接接触的热传递方式,而辐射换热是另一种不依赖于介质的直接接触的传递热量的方式。例如太阳热能的传递就是依靠辐射的方式。热辐射的机理是当物体的分子、原子、电子等微粒的能量发生变化时会产生各种波长的电磁波,不同波长的电磁波到达其它物体后将产生不同的效应:有的能迅速提高该物体的温度,有的能产生强烈的化学反应,有的能穿透厚钢板等等。波长为 $0.4 \sim 0.76 \mu m$ 的电磁波称为可见光线,波长为 $0.76 \sim 40 \mu m$ 范围的电磁波称为红外线,波长大于 $40 \mu m$ 的电磁波通常称为无线电波,波长小于 $0.4 \mu m$ 的称电磁波。光线和红外线以及一部分紫外线能对物体产生热效应,因而在这一部分波长范围内的电磁波称热射线,它的传播过程称为热辐射。

物体每时每刻都在进行着发射和吸收辐射能的过程,其本身能量的增减,完全取决于同一时间间隔中所发射和吸收辐射能的差值。只要参与辐射换热的各物体的温度不同,就存在差值。即使温度相同,物体的发射和吸收仍照常进行,只是发射和吸收的能量在数量上相等而已。

辐射能投射到物体表面上后,一般地说,一部分被吸收,其余的将被反射,而被吸收的部分中有一部分可能穿透过去。实践证明:气体对于辐射能几乎不能反射;固体和液体对于投入的辐射能将完全吸收,而不透射。

某些能将投射到表面上的辐射能全部吸收的物体称绝对黑体,简称黑体。如果物体将投射到表面上的辐射能全部反射出来,则称绝对白体,简称白体。凡能使落在表面上的辐射能量全部穿透过去的物体称绝对透明体,简称透明体。在客观上并不存在绝对黑体、绝对白体和绝对透明体。例如,空气对于热射线是透明体,但实际上空气中混杂有水蒸汽或碳酸气,它只能是半透明体。液体和固体材料一般属于不透明体,玻璃只对可见光线及部分红外线可以透射,而对于紫外线几乎是不透射的。

具有一定温度的物体均具有热辐射能力，而黑体具有最大的辐射能力。辐射能力随温度变化而变化。辐射能力可按斯蒂芬-波尔茨曼定律计算，即物体的辐射力与其绝对温度的四次方成正比，又称为四次方定律

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

式中 E_0 ——黑体的辐射能力（表示黑体在单位面积单位时间内所放射出去的能量）；

C_0 ——黑体的辐射系数；

T ——黑体的表面绝对温度。

在同一温度下，各物体的辐射力有很大差别。黑体的辐射力为最大，通常以黑体作为同温度下各种物体辐射能力比较的标准，故引进物体黑度的概念。

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{C}{C_0}$$

式中 ε ——物体的黑度；

E ——物体的辐射力；

E_0 ——黑体的辐射力；

C ——物体的辐射系数；

C_0 ——黑体的辐射系数。

物体的黑度表明该物体接近黑体的程度。由上式可知，物体的辐射系数为 $C = \varepsilon C_0$ ，其中 C_0 为定值。所以只要知道物体的黑度，就可求得该物体的辐射系数 C ，而物体的黑度 ε 都小于 1，并且不是一个常量，而与温度有关。工程上常用材料的黑度由实验测定，见表 1-5。

各种辐射表面的黑度可归纳如下：①金属导电体的黑度非常小，且基本上与绝对温度成正比。金属表面的黑度由于表面不平整和氧化作用，可能达到理论最小值的数倍。②电解质的黑度较导电体高，它的黑度随温度的升高而降低。耐火材料在 1500℃ 时的黑度较 1000℃ 时要低 1/4~1/3。表面的颜色和颗粒结构对黑度的影响要比化学成分的影响大。③大多数非金属材料的黑度在低温时为 0.8。④钢铁的黑度随氧化程度与表面粗糙程度的不同而有很大变化。

物体之间总是同时吸收也同时辐射，参与辐射换热过程的物体失去或吸收的热量，取决于该物体在同时间内所发射和吸收的辐射能的差额。这种差额只要参与互相辐射的物体的温度不同，就不等于零。计算物体之间的辐射换热量，就是确定物体对外辐射能量和它所接受能量的差额。

气体的辐射和吸收的特点：①不同的气体，辐射和吸收的能力不同。由于气体的辐射是由原子中自由电子的振动引起的，凡单原子气体和双原子气体（如 N_2 、 O_2 、 H_2 ）都没有自由电子，因此它们的辐射能力很小，实际上是透明体。但多原子气体，尤其烟气里的三原子气体（ H_2O 、 CO_2 和 SO_2 ）却具有相当大的辐射和吸收能力。②固体能吸收和辐射全部波长范围的能量，而气体只能辐射和吸收某些波长范围内的能量。③对于一般固体，热射线难以透过，固体的辐射和吸收都在表面一薄层范围内进行。而气体对能量的吸收和辐射是在整个气体容积范围中进行。

气体对辐射能的吸收与气体温度、压力及热射线在气体中经历的行程长度等有关。

表1-5 工程上常用材料的黑度

材 料 和 表 面 状 况	t °C	ε
表面磨光的铝	225~575	0.039~0.057
表面不光滑的铝	26	0.055
在600°C时氧化后的铝	200~600	0.11~0.19
表面磨光的铁	425~1020	0.144~0.377
氧化后的铁	100	0.736
未经加工处理的铸铁	925~1115	0.87~0.95
表面磨光的钢铸件	770~1040	0.52~0.56
经过研磨的钢板	940~1100	0.55~0.61
在600°C时氧化后的钢	200~600	0.80
在600°C时氧化后的生铁	200~600	0.64~0.78
氧化铁	500~1200	0.85~0.95
无光泽的黄铜板	50~350	0.22
在600°C时氧化后的黄铜	200~600	0.61~0.59
精密磨光的电解铜	80~115	0.018~0.023
在600°C时氧化后的铜	200~600	0.57~0.87
镀镍酸洗而未经磨光的铁	20	0.11
锡, 光亮的镀锡铁皮	25	0.043~0.064
纯 汞	0~100	0.09~0.12
磨光的纯银	225~625	0.0198~0.0324
铬	100~1000	0.08~0.26
有光泽的镀锌铁皮	28	0.228
石棉纸	40~370	0.93~0.945
水 面	0~100	0.95~0.963
耐火砖	—	0.8~0.9
上釉的粘土耐火砖	1100	0.75
有光泽的黑漆	25	0.875
无光泽的黑漆	40~95	0.9~0.98
各种不同颜色的油质涂料	100	0.92~0.96
各种不同含铝量的铝质涂料	100	0.27~0.67
平整的玻璃	22	0.937

五、传热

前面已介绍了热量传递的三种基本方式——导热、对流和辐射,而实际应用中的换热过程是多种方式的复合过程,并且彼此之间又互相影响。例如,船上所用的取暖设备,就是导热、对流和辐射三种换热过程的组合,即复合换热过程。在实际应用中常遇到热量从间壁一侧的热流体通过间壁传给另一侧的冷流体,这种热量传递过程称为传热过程。

(一) 平壁的传热

如图1-12所示,热、冷流体被一平壁隔开,壁的导热系数为 λ ,厚度为 δ 。在平壁的一边,有温度为 t_{f1} 的热流体,另一边有温度为 t_{f2} 的冷流体;两边的壁面温度为 t_{w1} 和