

料在锅炉中的燃烧,还要求把燃烧所产生的热量通过锅炉各受热面传递给水 and 蒸汽。这就是炉内过程和锅内过程。如果传热过程组织得好,可以强化炉内传热,减少锅炉受热面金属的消耗,并提高锅炉的热效率。如果传热过程组织得不好,不仅影响锅炉的技术经济指标,还严重影响锅炉的安全可靠运行。例如,亚临界压力的锅炉,特别是直流锅炉的沸腾管中,受热面热负荷过高时,会发生沸腾换热恶化烧毁管壁的现象。因此,锅炉各种受热面的布置和结构型式,锅炉正常运行操作和变工况运行及启停过程都与传热问题有密切的联系。同样汽轮机的结构、运行和启停过程也涉及传热问题。因此,研究和掌握热量传递的规律,对电厂机炉的安全运行有着重要意义。

## 第二节 热量传递的三种方式

热量传递的三种方式为导热、对流和热辐射。

### 一、导热

两个相互接触的物体或同一物体的各部分之间由于温度不同而引起的热传递现象,称为导热。这种热传递方式的特点是物体各部分之间不发生相对位移,依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动进行热量传递。

早在 1882 年,法国数学、物理学家傅里叶 (Joseph Fourier) 从实验中发现导热量  $\Phi$  与导热面积  $A$  及壁面两侧温差  $(t_{w1} - t_{w2})$  成正比,与壁厚  $\delta$  成反比,提出了平壁导热的傅里叶公式,即

$$\Phi = \lambda A \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \quad \text{W} \quad (1-1)$$

式中:比例系数  $\lambda$  为导热系数,又称热导率,其数值反映了材料导热能力的大小,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $A$  为垂直于热流方向的截面积,  $\text{m}^2$ ;  $\delta$  为平壁的厚度,  $\text{m}$ 。

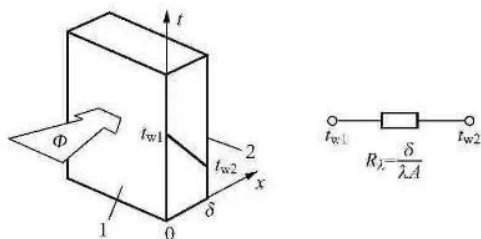


图 1-2 穿过平壁导热的示意

如图 1-2 所示,单位时间内通过某一给定面积的热量称为热流量,记为  $\Phi$ ,单位为  $\text{W}$ 。单位时间内通过单位面积的热流量称为热流密度,记为  $q$ ,单位为  $\text{W}/\text{m}^2$ 。傅里叶公式按热流密度形式表示为

$$q = \frac{\Phi}{A} = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \quad \text{W}/\text{m}^2 \quad (1-2)$$

导热系数是一种物性参数,不同材料的导热系数差别很大。即使是同一种材料,导热系数还与温度、密度和湿度有关,这将在第二章进一步讨论,这里仅指出:金属材料的导热系数最高,如银和铜;液体次之;气体最小。这正是手握铁棒和木棒冷热感觉不同的原因。在相同的温度下,铁棒的导热系数是木棒的 540 倍。

### 二、对流

炎热的夏天,打开电风扇,房间里会感到凉爽;寒冷的冬天,暖气片的散热又会使房间里暖和起来,这是由于温度不同的流体发生对流作用的结果。

对流是指流体各部分之间发生相对位移,冷热流体相互掺混所引起的热量传递方式。对流仅能发生在流体中,它是流体的流动和导热联合作用的结果,单纯的对流方式并不重要,

工程上应用最多的热量传递方式是对流换热。

流体流过与之温度不同的固体壁面时,与壁面之间发生的热量传递过程,称为对流换热。对流换热所传递的热量  $\Phi$  采用英国科学家牛顿(Isaac Newton)于 1701 年提出的公式,即牛顿冷却公式,如图 1-3 所示。

$$\text{流体被加热时} \quad \Phi = hA(t_w - t_f) \quad \text{W} \quad (1-3)$$

$$\text{流体被冷却时} \quad \Phi = hA(t_f - t_w) \quad \text{W} \quad (1-4)$$

$$\text{或统一写成} \quad \Phi = hA\Delta t \quad \text{W} \quad (1-5)$$

$$q = h\Delta t \quad \text{W/m}^2 \quad (1-5a)$$

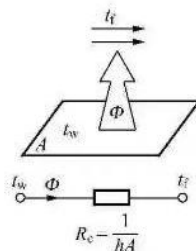


图 1-3 对流换热  
示意

式中:  $h$  为对流换热系数,或称表面传热系数,简称换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 它的数值大小表示对流换热的强弱;  $A$  为与流体接触的壁面面积,  $\text{m}^2$ ;  $t_w$  及  $t_f$  分别为壁面温度和流体温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta t$  表示壁面与流体的温差,  $^{\circ}\text{C}$ , 恒取正值。

换热系数的大小与换热过程中的许多因素有关。它不仅取决于流体的物理性质 ( $\lambda$ 、 $\eta$ 、 $\rho$ 、 $c_p$  等) 和换热面的形状与位置,而且还与流速有密切的关系。换热系数  $h$  值的确定是对流换热问题的主要研究内容。

### 三、热辐射

物体通过电磁波来传递能量的方式称为辐射。物体会因各种原因发出辐射能,其中因热的原因而发出辐射能的现象称为热辐射。物体的温度越高,辐射能力越强,同一温度下不同的物体的辐射能量也大不一样。在研究热辐射规律的过程中,一种称为黑体的理想物体的概念具有重要意义。黑体的辐射能力在同温度的物体中最大。

自然界中物体只要温度高于绝对零度,它都不停地向空间发出热辐射,同时又不断地吸收其他的物体发出的热辐射。辐射与吸收过程的综合结果就形成了以辐射方式进行物体间的热量传递——辐射换热。

热辐射与导热、对流这两种热量传递方式的区别是热辐射可以在真空中传播,而导热和对流都必须在物质存在的条件下才能实现。辐射换热区别于导热、对流的另一个特点是,它不仅产生能量的转移,而且还伴随着能量形式的转化,即发射时从热能转换为辐射能,而被吸收时又从辐射能转换为热能。

黑体在单位时间内发出的热辐射热量由斯忒藩-玻耳兹曼定律确定,表示为

$$\Phi = A\sigma_b T^4 \quad \text{W} \quad (1-6)$$

式中:  $T$  为表面温度,  $\text{K}$ ;  $A$  为物体参与辐射的表面积,  $\text{m}^2$ ;  $\sigma_b$  为黑体辐射常数,其值为  $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

一切实际物体的辐射能力都小于同温度下黑体的值。实际物体的辐射能力与同温度下黑体辐射能力的比值称为黑度,用  $\epsilon$  表示,其值总是小于 1。不同物体的黑度值不同,黑度也是一个重要的物性参数。用实验测出物体的黑度值,实际物体的辐射能就可以采用式 (1-7) 方便地计算,即

$$\Phi = \epsilon A\sigma_b T^4 \quad \text{W} \quad (1-7)$$

物体间辐射换热量计算将在第六章中介绍。这里只介绍两种最简单的情况。一种是表面积为  $A$ , 表面黑度为  $\epsilon$ , 温度为  $t_{w1}$  的物体与包围它的很大的表面 (温度为  $t_{w2}$ ) 之间的辐射换热,例如测量炉膛烟气温度的热电偶与炉膛四周水冷壁壁面的换热就属于这种情况,计算

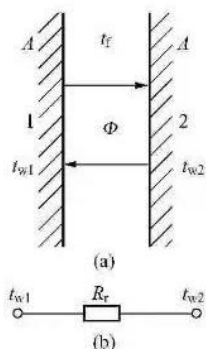


图 1-4 辐射换热图示

公式为

$$\Phi = A\epsilon\sigma_b(T_{w1}^4 - T_{w2}^4) \quad \text{W} \quad (1-8)$$

另一种情况是如图 1-4 所示的两个面积相同、平行放置的无限大黑体平表面，其间介质无辐射和吸收能力，当两表面间距很小时，任一表面辐射的能量可认为全部落在另一表面上，并被全部吸收。若表面 1 的温度  $T_{w1}$  大于表面 2 的温度  $T_{w2}$ ，则

$$\Phi = A\sigma_b(T_{w1}^4 - T_{w2}^4) \quad \text{W} \quad (1-9)$$

以上分别讨论了导热、对流和热辐射三种热量传递的基本方式。在实际工程问题中各种换热器的热传递过程都是几种基本传热方式同时作用的结果。下面对电厂中常见的换热器进行分析。

#### 1. 过热器

高温烟气 → (对流换热和辐射换热) → 外壁 → (导热) → 内壁 → (对流换热) → 过热蒸汽

#### 2. 水冷壁

高温烟气 → (辐射换热) → 外壁 → (导热) → 内壁 → (对流换热) → 汽水混合物

#### 3. 管式空气预热器

烟气 → (对流换热) → 内壁 → (导热) → 外壁 → (对流换热) → 空气。

#### 4. 冷油器

油 → (对流换热) → 外壁 → (导热) → 内壁 → (对流换热) → 水。

#### 5. 凝汽器

水蒸气 → (有相变的对流换热) → 外壁 → (导热) → 内壁 → (对流换热) → 循环水。

从以上分析可知，许多热量传递过程都是由基本传热方式组合起来的，即由许多传热环节组成。而且对于某一个传热环节也有多种传热方式参与换热。每一种换热方式对一个换热器的影响也不相同。因此，对于实际热量传递问题的分析不仅需要扎实的理论基础，而且还要具有丰富的实际经验。例如，对于锅炉为什么称炉膛内的受热面为辐射受热面，而称尾部烟道的受热面为对流受热面？屏式过热器又为什么称为半辐射式受热面？这些问题应如何解释呢？对这些问题必须在学完导热、对流和热辐射的全部内容后才能得到正确的解释。

### 第三节 传热过程和热阻

#### 一、传热过程与传热系数

发电厂中所有的换热设备在正常运行时，各部分的温度、压力等参数基本上是不随时间而变的，称为稳定状态。对热传递现象来说，温度不随时间而变的过程为稳态过程。

上节所介绍的换热器，其热传递过程的共同特点都是高温流体通过固体壁面把热量传给壁面另一侧的低温流体的过程，这称为传热过程。下面分析稳态的传热过程。

一般来说，传热过程包括串联的三个环节：①从热流体到高温壁面的热量传递；②从高温壁面到低温壁面的热量传递；③从低温壁面到冷流体的热量传递。对于稳态传热过程，通过串联着的各环节的热流量  $\Phi$  是相同的。设平壁的表面面积为  $A$ ，参看图 1-5 的符号， $h_1$  为热流体与高温壁面的换热系数； $h_2$  为低温流体与低温壁面的换热系数； $t_{f1}$ 、 $t_{f2}$  分别为高温流

节选自：

《传热学（第4版）》，主编 张天孙 卢改林，中国电力出版社，  
ISBN9787512359628。