

船員业务学习小丛书

热工基本原理

下 册

潘 延 龄 編



人民交通出版社

船員業務學習小叢書

熱工基本原理

下 冊

潘 延 齡 編

人民交通出版社

为了有助于我国广大船员业务学习起见，本社组织有关方面编写了一套船员业务学习小丛书，希望通过它将船员各方面所必要的基本知识有系统地加以介绍。

本书为小丛书中的轮机部分之一。内容讲述了工程热力学及燃烧学的基本概念。为了适合电学文化程度的轮机工作人员自学之用，将大约有百万字的大学用教材篇幅编成只有十万字左右的本书（上、下册），因此，内容比较简练，并避免应用高等数学，着重于讲述基本概念和联系工程实际。

本书共分二篇：第一篇为工程热力学；第二篇为燃烧原理。分为上、下两册出版。

本书也适合电站工作人员自学之用，以及作为中等技术学校动力专业学生的参考书。

船员业务学习小丛书

热工基本理论

下册

潘延康 编

*

人民交通出版社出版

（北京安定门外和平里）

北京市书刊出版业营业许可证书出字第〇〇六号

新华书店科技发行所发行 全国新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印刷

*

1956年6月北京第一版 1960年6月北京第一次印刷

开本：787×1092 1/32 印张：1-5号

全书：35,000字 印数：1-3,500册

统一书号：15344·5702

定价（元）：0.14元

目 录

第二章 传热原理

第一章	概 论	3
第二章	稳定导热	5
§ 1	等温面、等温线和温度梯度	5
§ 2	傅利叶定律和导热系数	6
§ 3	平壁的导热公式	7
§ 4	圆筒壁的导热公式	13
第三章	对流换热	11
§ 5	对流换热的特征	11
§ 6	流体运动的特征及其对于对流换热的影响	12
§ 7	对流换热公式及放热系数	15
§ 8	求放热系数的方法	15
§ 9	常用的相似准则数及其物理意义	17
§ 10	各种不同对流换热过程的准则公式	18
第四章	辐射换热	24
§ 11	热辐射的本質与基本概念	24
§ 12	热辐射的基本定律	26
§ 13	气体与壁面之间的辐射换热	29
§ 14	炉内辐射的计算	30
第五章	稳定传热	32
§ 15	平壁内传热	32
§ 16	圆筒壁的传热	34
§ 17	肋壁的传热	35

§ 18 鍋爐傳熱問題的簡單分析	38
§ 19 傳熱的增強	39
§ 20 傳熱的削弱——熱絕緣	42
附 錄： 參考表格	43

第二篇 傳热原理

第一章 概 說

传热学是研究自然界热能传递的科学。对于輪机工作人員来說是經常可以遇到各种各样的传热現象。例如，在鍋爐中燃热的燃煤和烟气将热能传递給鍋爐中的水，使之变成水蒸汽；蒸汽管道和蒸汽机的热表面将热能传給机艙中的空气使机艙很热等等传热現象，都是传热学所研究的对象。因此，作为輪机工作人員，應該掌握传热学的基本知識，有了这些知識就不仅可以懂得各种传热現象的基本規律，而且还可以更进一步利用这些規律来为我們服务，达到我們所期望的目的：增强传热，或者削弱传热。例如，对于鍋爐應該研究如何增强传热，可以使原有的鍋爐安全地增大蒸汽产生量；对于爐仓和机艙温度过高的問題應該研究怎样削弱传热，以保証艙內有适宜的溫度，同时也少了热損失提高了經濟性。

显然，传热学研究的問題是不同于工程热力学，但其共同的目的——如何更好地将热能轉变为机械功——是一样的。因此，工程热力学和传热学是热力工程的理論基础，簡称热工原理。

我們仔細研究了各种各样的传热現象，可以发现热传递的方式有所不同，可以区分为三种不同的基本方式。

導热 由物体的溫度較高部分向溫度較低部分传递热量是依靠物体分子的热运动来传递的，物体本身並沒有相对移动。

例如，生火用的鉄鉤子在爐膛中扒火，手握的一端也逐漸熱起來，熱量由溫度較高的鉤端向溫度較低的手握一端傳遞，這是由於鉄分子的热运动。

对流换热 这是导热方式及流体各部分由于某种原因发生相对移动，将热量由一处传递到另一处的传热方式。例如鍋爐或蒸汽机的热表面对爐膛或机舱内空气的传递热量。

輻射换热 它不依靠任何物質作媒介將热量由热物体以輻射能的形式传递到另一物体，該物体將吸收到的輻射能又轉变为热能，因此，輻射换热除了將热能由一物体传递到另一物体以外，还伴随着能量形式的轉換。例如，打开爐門立刻感到人被火光照得发热。

在实际工程中所遇到的传热现象，往往是几种方式同时存在的比較复杂的传热形式。例如，在鍋爐內由熾热烟气和燃煤將热量传递給水的过程就包括有导热、对流换热和輻射换热三种方式的传热过程：由燃煤和烟气对鋼板壁面的传热方式是由

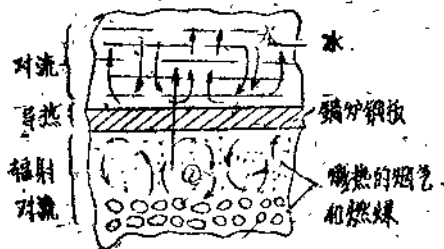


图 11

輻射换热和对流换热二种形式組成的，由鋼板的一面向另一面的热量传递是以导热的方式，由鋼板向水是以对流换热的方式传递热量。图11是鍋爐传热过程某一部分的示意图，清楚地說明了这一传热过程包括有所有的三种传热方式。

由于传热问题的复杂性，我們研究它的方法是先独立地分别研究一种传热方式，掌握每一种传热方式的基本规律、计算方法，然后再研究复杂的具有多种传热方式的传热过程，掌握它们的规律，从而解决实际工程中所遇到的各种传热问题。

第二章 稳定导热

热是由物体的高温部分向低温部分传递的，因此，传热就密切地与温度的分布情况有关系。我们把温度分布的情况称作温度场。如果温度分布的情况不随时间而改变，也就是说物体各部分的温度现在是这样，隔一些时候还是这样，这就叫做稳定的温度场。若温度场随时间而改变，例如，加热或冷却某物体则该物体内的温度场就是不稳定温度场。这一章是研究稳定导热，就是研究在稳定温度场内的导热现象。对于不稳定温度场的传热问题比较复杂，本书篇幅有限不作叙述。

§1 等温面、等温线和温度梯度

把温度场内各个相同温度的点连接成为一个面，这叫做等温面，在这个面上有相同的温度。如果把它连接成一条线表示出来就叫作等温线。由热力学第二定律已经知道热必定是由高温向低温传递，因此，热量只可能由高温等温面向低温等温面传导，并且还是沿最短的路径，即等温面的法线方向传导热量。图72表示蒸汽管壁内的温度场及导热的方向。管子内壁是温度为 t_1 的等温面，外壁是温度为 t_4 的等温面，可以看



图 72

出該管道的溫度場為同心圓筒形的等溫面。

在圖72上以虛線表出 t_2 和 t_3 二等溫面，二等溫面之間的距離為 ΔS ， t_2 與 t_3 的溫度差以 Δt 表示，則 $\frac{\Delta t}{\Delta S}$ 表示單位距離的溫度差，叫做溫度梯度，與穩定導熱的導熱系數有關。

§2 傅利葉定律和導熱系數

傅利葉根據實驗得知導熱系數 Q 與溫度梯度 $\frac{\Delta t}{\Delta S}$ 、時間 τ 以及傳熱面積 F 成正比，用數學式表示，即：

$$Q \propto \frac{\Delta t}{\Delta S} \times \tau \times F \quad \text{大卡}$$

將上式所示比例式化為等式，則必需乘上一個比例系數，得：

$$Q = \lambda \times \frac{\Delta t}{\Delta S} \times \tau \times F \quad (2-1)$$

此比例系數叫做導熱系數，公式 (2-1) 就是傅利葉定律的數學表达式，也叫做傅利葉方程式。式中各量的單位如下：

$\frac{\Delta t}{\Delta S}$ 以 $^{\circ}\text{C}/\text{公尺}$ 為單位； τ 以小時為單位； F 以 米^2 為單位； Q 以大卡為單位； λ 的單位可按式 (2-1)

$$\lambda = \frac{Q}{\frac{\Delta t}{\Delta S} \times \tau \times F} \quad \text{導出 } \lambda \text{ 的單位為大卡} / \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{米}} \cdot \text{小時} \cdot \text{米}^2$$

它表示當厚度為 1 米、溫度為 1°C 時每小時通過每 米^2 的熱量大卡數，可將此單位化簡為大卡/米小時 $^{\circ}\text{C}$ 。

由 λ 的單位顯然可見導熱系數 λ 是表明各種不同材料導熱

性能好坏的物性参数。不同的材料有不同的导热系数 λ 值，并且， λ 值还随物体的温度、重度等因素而变，现将常用的一些材料导热系数值列于表4：

表 4

名 称	温 度 °C	导 热 系 数 大卡/米小时°C	名 称	温 度 °C	导 热 系 数 大卡/米小时°C
空 气	0°C—40°C	0.021—0.0237	橡 胶	0°C	0.14
水 蒸 汽	100°C—200°C	0.0204—0.0305	油 布	20°C	0.16
水	0°C—200°C	0.047—0.057	鍋爐水垢	65°C	0.4—2.7
煤 油	0°C—200°C	0.104—0.077	耐 火 磚	800°C	0.8—1.2
重 油	32°C—65°C	0.102—0.089	鋼	20°C	88
烟 灰	40°C	0.027	鑄 鐵	20°C	54
玻 璃 綫	0°C	0.032	黃 銅	0°C	78.6
石棉繩綫	50°C	0.085	紫 銅	0°C	320

λ 随温度变化的关系由实验结果制成曲线可查，或得出近似计算公式 $\lambda = \lambda_0 + Bt$ 大卡/米时°C (2-2)。

此处 λ_0 表示在0°C时材料的导热系数， B 为实验得出的该材料的温度校正系数。

§3 平壁的导热公式

1. 单 壁

应用傅利叶定律可以计算经过平壁的热量。在工程上经过壁面的热量通常以每小时每平方米壁面通过的热量来表示，用

公式表出为： $\frac{Q}{F\tau} = q$ 大卡/米²时，称为热流量。则计算公式为：

$$q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} \quad (2-2)$$

δ ——壁厚，以米为单位。

公式(2)也可写成下面形式:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\lambda}} \quad (2-3)$$

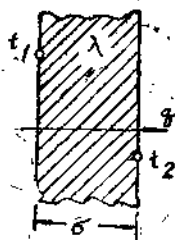


图 73

这一公式与电学中的欧姆定律 (电流与电压成正比与电阻成反比, $I = \frac{E}{R}$) 很类似; 即热流量 q 与温差成正比

比与平壁的热阻成反比。可以看出 $\frac{\delta}{\lambda}$ 是平壁的热阻, 单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{大卡}/\text{小时米}^2$, 表示每小时每平方米壁面传过 1 大卡热量所需的温度差若干 $^{\circ}\text{C}$ 数, 所以数值愈大表示热阻愈大。

2. 多层壁

实际工程上常常遇到多层壁导热的問題; 例如冷藏室壁面的导热問題, 就是由鋼板、絕热材料、木板等組合起来的, 各有其不同的导热系数和厚度 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 和 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 。可以按求单壁的公式导出多层壁的计算公式。因为是稳定导热, 则通过各层的热流量是一样的皆为 q , 否则温度场就会随时间改变成为加热或冷却的不稳定导热。

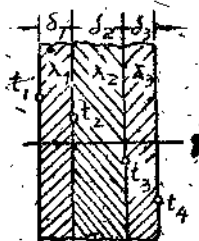


图 74

对第一层壁 $q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}}$ 移项得 $t_1 - t_2 = q \frac{\delta_1}{\lambda_1}$

对第二层壁 $q = \frac{t_2 - t_3}{\frac{\delta_2}{\lambda_2}}$ 移項得 $t_2 - t_3 = q \cdot \frac{\delta_2}{\lambda_2}$

对第三层壁 $q = \frac{t_3 - t_4}{\frac{\delta_3}{\lambda_3}}$ 移項得 $t_3 - t_4 = q \cdot \frac{\delta_3}{\lambda_3}$

将移項后所得的三个式子相加得

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

$$\therefore q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} \quad (2-4)$$

此为多层壁的导热计算公式。表明了通过多层壁的热流量是多层壁二面温度差与各层热阻总和的商值。总热阻为各层热阻之总和，若为五层不同材料组成的平壁，则总热阻为该五层分热阻之和。这与电学中串联时电阻相加的概念一样。

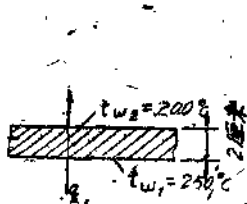


图 75

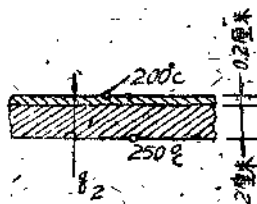


图 76

例题：已知苏格兰锅炉燃烧室顶部平板的温度 $t_1 = 250^\circ\text{C}$, $t_2 = 200^\circ\text{C}$, 板厚 $\delta = 2$ 厘米, 钢板的导热系数 $\lambda = 50$ 大卡/米小时 $^\circ\text{C}$, 求热流量 q

的数值。

$$q_1 = \frac{50}{0.02} (250 - 200) = 125000 \text{ 大卡/米}^2\text{时}$$

若在此顶板上积有一层水垢厚 0.2 厘米，水垢的导热系数为 1 大卡/米小时°C，求因为积有水垢热流量减少多少倍。

$$q_2 = \frac{250 - 200}{\frac{0.02}{50} + \frac{0.002}{1}} = \frac{50}{0.0024} = 20800 \text{ 大卡/米}^2\text{小时}$$

$$\text{减少倍数} = \frac{q_1}{q_2} = \frac{125000}{20800} = 6 \text{ 倍。}$$

若该处的蒸发量必须维持不变，则热流量应仍维持 q_1 不变。锅炉内部压力不变，内壁温度 200°C 也不变，则外表面温度 t_{w1} 必须提高到多少才可以？

$$125000 = \frac{t_{w1} - 200}{\frac{0.02}{50} + \frac{0.002}{1}} = \frac{t_{w1} - 200}{0.0024}$$

$$t_{w1} = 125000 \times 0.0024 + 200 = 300 + 200 = 500^\circ\text{C}$$

可以看出由于积有水垢钢板有过热，以致发生破裂的危险， 500°C 已经是接近普通钢板的最大允许温度了（图 75，76）。

§4 圆筒壁的导热公式

如计算通过包于蒸汽管外面一层绝缘物体的热量，就必须用到圆筒壁的导热公式。圆筒壁导热公式也是根据傅利叶定律导出，不过由于圆筒壁的内外壁面积不一样，公式的导出就比平壁复杂，还必须用到微积分，所以直接将公式列出（图 77）：

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{2\pi l} \ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot L \cdot \tau \text{ 大卡}$$

$$\frac{Q}{L \cdot \tau} = q_l = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (2-5)$$

式中:

q_l ——每小时经过 1 公尺长圆筒壁导出的热量大卡数。

如对于多层圆筒壁则与多层平壁一样，总热阻与各层热阻之和。对于二层圆筒壁（图78）得出计算公式如下：

$$q_l = \frac{t_1 - t_3}{\frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2}} \quad (2-6)$$

如有三层，同理可推导出计算公式。

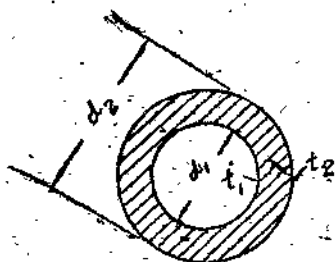


图 77

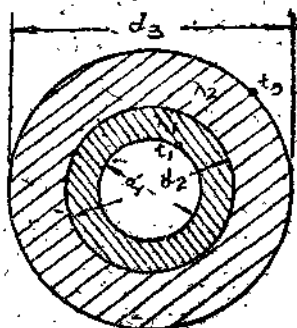


图 78

第三章 对流换热

§5 对流换热的特征

对流换热是指流体（气体和液体的统称）和固体直接接触相互进行热量交换的换热过程，在这过程中导热与对流的方式传递热量是同时进行的。所谓对流的方式传递热量，就是例如

在鍋爐的四周空气被鍋爐的外壁以导热方式所加热，被加热了的空气由于温度比周围未加热的高而重度小，则具有浮升力而离开壁面将热量由壁面处帶到鍋爐的上方（图79）。冷空气从

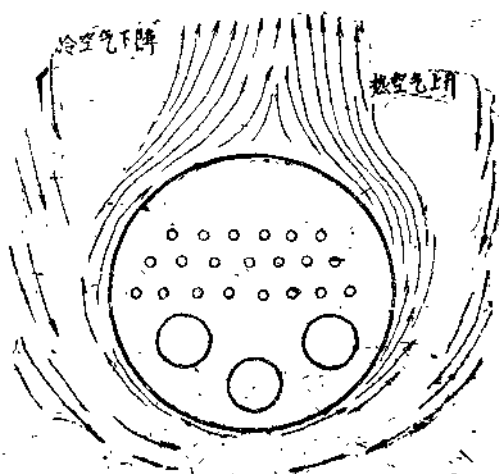


图 79

周围又不断的补上，重新被加热而上升，这是自由运动对流换热过程的例子。如果由风扇迫使气体或液体运动而传递热量，叫做受迫运动对流换热过程。例如苏格兰火管鍋爐內，烟气給火管热量的换热过程。显然，对流换热只能是固体壁面与流体之間才能进行的换热过程，它与流体运动的方式，激烈程度有密切的关系。

§6 流体运动的特征及其对于对流换热的影响

专门研究流体运动的特征及其规律，这是一門专门的学科流体力学的任务，我們只能擇其与对流换热最有密切关系的問

題作簡略的解說。

我們觀察流体在玻璃管道內流动的情况，发现在不同的流速和对不同的流体，可以得到下列三种不同的运动情况。

1. 层 流

在管道中流体的流动，形成互不相混的独立流层，每一层有不同的速度，愈靠近管壁流动速度愈小，在管道中心具有最大流速；不存在与流体运动方向垂直的流体运动。用图綫表示如下（图80）。

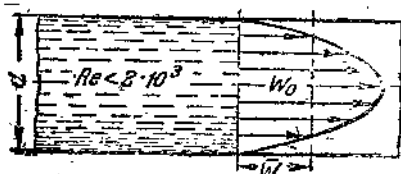


图 80

W_0 为最大流速，是在管道中心的流速， $\bar{W}$ 表示整个管道的平均速度。实验证明在层流运动时 $\bar{W} = 0.5 W_0$ 。

2. 乱 流

流体除了向前流动以外，并有垂直于流动方向的运动，使得流体不再是分层的互不相混的层流流动，而是不规则激烈扰动的混乱运动状态。此时的 W_0 就不比 $\bar{W}$ 大一倍，这是由于混乱运动自发地作了一些平均的结果，用图綫表示如下（图81）。



图 81

3. 过渡状态流动

是层流运动转变到乱流运动的过渡状态。此时，层流的特性被破坏，但还未达到激烈扰动的乱流运动状态。

在流体力学中找到一个判别数——雷诺准则，可以判别各种流体在不同速度和不同大小管道中流动时，是属于上述三种运动情况中的哪一种。雷诺准则以科学家雷诺名字的前二个字母 Re 代表，它是由流体运动的平均速度 W ，管子的直径 d 和流体的相对粘度组成的没有单位的数字，因 $W \times d$ 的单位与 ν 的单位相同皆为米²/秒，相消后就成为一个无单位的量， $Re = \frac{Wd}{\nu}$ 。

当 $Re < 2200$ 时流体在管道内为层流；当 $Re > 10000$ 时为乱流；当 $Re = 2200 \sim 10000$ 之间即为过渡状态。

经过深入的研究发现，即使是在乱流运动，由于流体具有粘滞性的缘故，在紧贴壁面的一薄层运动着的流体中，还是具有层流的特点，这一层称作层流边界层。

知道了流体流动的不同情况，就可以了解各种不同情况对于对流换热的影响。在层流中由于流体各层不相混杂，当在流体运动的垂直方向上具有温度差时，热量的传递就差不多完全依靠导热，只有较微弱的自由运动的影响，因此，强迫运动层流的对流换热是不强烈的。而在乱流中因流体有激烈扰动着的混乱运动，因此对流传热的作用大为增强。只是在一薄层层流边界层中还是只以导热的方式传递热量（见图82）。但由于边界层很薄，热

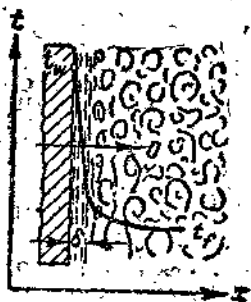


图 82