

高等学校教学参考书

传 热 学

(1965年修订第三版)

杨世铭 编

人民教育出版社

传 热 学

杨 世 铭 编

人民教育出版社出版(北京沙滩后街)

人民教育出版社印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

统一书号13012·0189 开本 850×1168¹/₃₂ 印张 5¹²/₁₆

字数 143,000 印数 5,200—65,200 定价(7)×0.70

1965年12月第1版 1978年12月北京第3次印刷

本书是编者 1965 年在杨世铭、陈大燮编“传热学”修订本(中国工业出版社 1961 年 10 月北京新一版)的基础上,依据 1962 年审订的本科五年制机械制造类动力机械各专业、动力类工业热工等专业 70 学时“传热学教学大纲(试行草案)”的基本精神,作了较大修订而成的,并由原热工学课程教材编审委员会委托清华大学王补宜同志审阅,后经该会复审通过。

全书共两篇。第一篇十二章,包括导热、对流换热、辐射换热、传热和换热器等几部分比较基本的内容。第二篇的内容归结为导热、对流换热和辐射换热三方面的个别问题,分列三章,供有关专业选学。

为了满足当前急需,本书重印时,除将原序删去外,其它均未改动。它可供高等工业院校传热学课程参考用书及有关工程技术人员参考。

基本符号

- a 导温系数, $\frac{\lambda}{c\gamma}$, 米²/小时。
- c 比热, 大卡/公斤·°C。
- C 辐射系数, 大卡/米²·小时·°K⁴。
- d 直径, 米。
- f 横截面积, 米²。
- F 换热面积, 米²。
- g 重力加速度, 米/秒²。
- G 重量, 公斤; 或流体的重量流量, 公斤/小时。
- k 传热系数, 大卡/米²·小时·°C。
- k_l 通过管壁的长度传热系数, 大卡/米·小时·°C。
- l 长度, 米。
- p 压力, 公斤/米², 公斤/厘米²。
- Δp 压力差, 公斤/米²。
- q 热流密度, 大卡/米²·小时。
- Q 热量, 大卡; 或单位时间内通过的热量, 大卡/小时。
- r, R 半径, 米; r 在集态改变放热中亦作为汽化潜热, 大卡/公斤。
- s 每单位面积的摩擦阻力, 公斤/米²。
- S 力, 公斤。
- t 温度, °C。
- T 绝对温度, °K。
- t_w 壁面温度, °C。
- t_f 流体温度, °C。
- Δt 温压, °C。

- V 容积, 米³; 或流体的容积流量, 米³/小时。
 w 速度, 米/秒, 米/小时。
 α 放热系数, 大卡/米²·小时·°C。
 β 容积膨胀系数, 1/°C。
 γ 重度, 公斤/米³。
 δ, Δ 厚度, 米, 毫米。
 ε 黑率。
 ζ 局部阻力系数。
 θ, Θ 过剩温度, °C。
 λ 导热系数, 大卡/米·小时·°C; 在辐射诸章中 λ 亦作波长, 米。
 μ 粘度(粘性系数), 公斤·秒/米²。
 ν 动粘度(运动粘性系数), $\frac{\mu}{\rho}$, 米²/秒, 米²/小时。
 ξ 摩擦阻力系数。
 ρ 密度, $\frac{\gamma}{g}$, 公斤·秒²/米⁴。
 σ_0 黑体辐射常数。
 τ 时间, 小时, 秒。
 ω 立体角。

相似准则

$$\text{Re} = \frac{w \cdot l}{\nu} \text{— 雷诺准则。}$$

$$\text{Eu} = \frac{\Delta p}{\rho w^2} \text{— 欧勒准则。}$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \text{— 普朗特准则。}$$

$$\text{Ga} = \text{Fr}/\text{Re}^2 = \frac{g l^3}{\nu^2} \text{— 伽里略准则。}$$

$$\text{Pe} = \text{Re} \cdot \text{Pr} = \frac{w \cdot l}{\alpha} \text{— 贝克利准则。}$$

$$\text{Fo} = \frac{\alpha \tau}{l^2} \text{— 傅里叶准则。}$$

$$\text{Nu} = \frac{\alpha l}{\lambda} \text{— 努谢尔特准则。}$$

$$\text{Bi} = \frac{\alpha l}{\lambda_w} \text{— 毕渥准则,}$$

$$\text{Gr} = \frac{g l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t \text{— 葛拉晓夫准则。}$$

角 碼^①

国际通用角碼

<i>f</i> 流体的	<i>m</i> 平均的
<i>o</i> 黑体的	<i>s</i> 饱和的
<i>w</i> 壁面的	

注 音 角 碼

d 当量(dangliang)	dr 导热(daore)
dx 等效(dengxiao)	dl 对流(duilian)
f 反射(fanshe)	fs 辐射(fushe)
g 垢(gou)	gy 固有(guyou)
jb 局部(jubu)	je 夹层(jiaceng)
kq 空气(kongqi)	jj 经济(jingji)
le 冷(leng)	lj 临界(linjie)
me 摩擦(mocra)	qt 气体(qiti)
nb 内部(neibu)	tr 投入(touru)
r 热(re)	yx 有效(youxiao)
xt 系统(xitong)	z 总(zong)
zq 蒸汽(zhengqi)	zz 滯止(zhizhi)
zx 中心(zhongxin)	

① 1. 国际通用代号下标, 除个别(如 \max , \min) 外, 一律排成斜体字; 汉语拼音代号下标则排成正体字, 以资区分。

2. 采用汉语拼音缩写作为代号下标时, 按下列原则进行:

(1) 尽可能采用一个缩写字母;

$$X_{\text{当量}} \rightarrow X_{\text{当}} \rightarrow X_d.$$

(2) 难于用一个字母表示清楚的, 则用两个字母;

$$X_{\text{辐射}} \rightarrow X_{\text{fushe}} \rightarrow X_{fs}.$$

目 录

基本符号..... iv

第一章 绪论..... 1

1-1 传热学的研究对象及其在科学技术上的重要性..... 1

1-2 换热的基本方式..... 2

1-3 传热学简史及展望..... 3

第 一 篇

第二章 导热基本定律..... 6

2-1 导热基本定律..... 6

2-2 导热系数..... 7

2-3 温度场..... 8

第三章 稳定导热..... 11

3-1 通过平壁的导热、热阻..... 11

3-2 通过圆筒壁的导热..... 15

3-3 两点讨论..... 21

3-4 导热微分方程式及其求解..... 22

第四章 对流换热的基本概念..... 27

4-1 放热过程和放热系数..... 27

4-2 影响放热的主要因素..... 28

第五章 相似原则在对流换热中的应用..... 32

5-1 流动相似和相似原则..... 32

5-2 相似原则在对流换热中的应用..... 36

5-3 实验数据的实用整理方法..... 39

第六章 管和槽内流体受迫流动时的放热..... 46

6-1 管内流体受迫流动时流动和放热的特征..... 46

6-2 紊流放热..... 49

6-3 层流及过渡状态时的放热..... 55

第七章 流体绕掠物体受迫流动时的放热	60
7-1 横向掠过单根圆管的放热	60
7-2 横向掠过管束的放热	63
第八章 流体自然对流放热	68
8-1 流体自然对流的特征	68
8-2 大空间内流体自然对流时的放热	70
第九章 凝结与沸腾的放热	76
9-1 珠状凝结与膜状凝结	76
9-2 膜状凝结放热的计算	77
9-3 泡状沸腾与膜状沸腾	79
9-4 大空间内泡状沸腾放热的计算	81
第十章 辐射换热	85
10-1 热辐射	85
10-2 热辐射的基本定律	87
10-3 实际物体的辐射和吸收, 灰体	89
10-4 有效辐射	91
10-5 辐射换热计算公式示例	92
10-6 遮热原理	97
第十一章 传热与热绝缘	99
11-1 复合换热	99
11-2 传热	102
11-3 强化传热	105
11-4 隔热保温	109
第十二章 换热器	113
12-1 间壁式换热器的构造特点	113
12-2 间壁式换热器中传热过程的计算	114
12-3 列管间壁式换热器设计的热计算	119
12-4 顺流与逆流的比较	122
第十三章 不稳定导热	124
13-1 不稳定导热过程的分析	124
13-2 不稳定导热过程求解示例	125

第 二 篇

第十四章 导热的个别问题	130
14-1 表面有散热作用的长杆稳定导热	130

14-2 肋壁稳定导热的计算.....	134
14-3 不稳定导热的有限差值图解法.....	137
第十五章 对流换热的个别问题.....	141
15-1 气体高速流动时的放热.....	141
*15-2 有限空间内的自然对流放热.....	145
15-3 模化实验的简单介绍.....	147
第十六章 辐射换热的个别问题.....	150
16-1 定向辐射强度和朗伯定律.....	150
16-2 角系数.....	152
16-3 气体辐射.....	154
16-4 气体与外壳间的辐射换热.....	158
16-5 火焰辐射的特征.....	159
附录.....	162
索引.....	176

第一章 绪论

1-1 传热学的研究对象及其在科学技术上的重要性

传热学的研究对象是热的传播过程。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。温度差普遍地出现在自然界里，所以热的传播是一个很普遍的自然现象。

学习和研究传热学的目的是要为生产服务。传热学的工程应用范围是很广泛的。许多隶属于动力、建筑、冶金、制冷、机械制造、电工、化工及航空等工程领域的生产技术，都涉及到传热问题。其中特别是热能动力部门对传热学的要求更为突出。热能动力设备的设计、制造及运行方面大量地应用着传热学所总结出的规律。

应用传热学规律来求解的实际问题不外乎两种类型：第一种类型是力求热传播过程的增强，例如设计最经济的换热设备来完成交换一定热量的任务就属于这个类型；第二种类型是力求热传播过程的削弱，例如减少不必要的热损失就属于这类问题。下面举具体的例子来说明传热学在热能动力部门的重要作用。

先谈力求增强换热的具体例子。按照热力学的理论，热能动力系统包括两个温度不同的热源和一个工作于这两个热源间的热机。在蒸汽动力厂里，热量最初存在于燃气（高温热源）之中。在锅炉里燃气将热传给蒸汽。蒸汽作功后进入凝汽器又把热传给冷却水。冷却水在通过冷却塔时又将热量传给大气（低温热源）。从燃气到大气载热体变换了好几次，要想提高系统热效率，就处处需要应用传热学的规律来处理。内燃机动力厂的情况与蒸汽动力厂不

同，没有载热体的变换。燃气直接做功，废气和废热一起排入大气。虽然如此，内燃机的设计和运行还是需要传热学的知识，因为气缸壁必须依靠水或空气冷却，保持在安全工作温度之下，并且热效率高的内燃机气缸输出功率的增加，也要在一定程度上取决于气缸壁的有效冷却和废气中热量的利用。燃气轮机动力厂也和内燃机动力厂的情况相类似，燃气轮机的叶片冷却、转子冷却和加强换热器效率是提高燃气轮机效率的重要途径。

其次 再谈第二类型的问题。减少不必要的热损失对热力机械的效率亦有很大的影响。热力学第二定律告诉我们，一定量的热在高温时较低温时做功能力为大。因此机器和管道的保温是很重要的事情。此外，社会主义国家很重视高温车间防暑降温改善劳动条件的工作，这和热力设备的隔热与保温也是分不开的。

1-2 换热的基本方式

根据传热过程物理本质的不同，热的传播可以有三种基本方式：导热的方式、对流的方式和辐射的方式。

导热是指直接接触的物体各部分能量交换的现象。在液体和固体介电质中，能量转移主要是依靠分子运动弹性波的作用；固体金属则主要依靠自由电子的运动；气体则主要依靠分子的不规则运动。

对流是指流体各部分发生相对位移而引起的热量交换。对流现象只出现在流体(气体和液体)中，而且总相伴着流体本身的热作用。

辐射是一种由电磁波来传播能量的现象。它与导热和对流方式有着本质上的区别。它不仅产生能量的转移，而且还伴随着能量形式之间的转化；从热能到辐射能，或者相反地从辐射能转化为热能。

不同的换热方式遵循着不同的换热规律，因此分别研究每一种的规律是非常必要的。此外，几种基本方式常常同时出现，使得实际的换热过程很复杂。以蒸汽锅炉为例：从燃气到沸水管的外表面（烟垢外表面），热量的传播同时具备导热、对流和辐射三种方式；从烟垢外表面通过烟垢层、沸水管的管壁、水垢层到沸水管内表面（水垢内表面）的热量的传递完全依靠导热；最后从水垢内表面到水流就依靠对流及导热。由此可见，实际换热的过程往往是两种或三种基本方式的复杂组合。在实际计算里，对于这一类复杂的过程，有时就给它一些专门名称，把它当作一个整体来看待。例如，把壁面和流体间的对流和导热的总作用叫做对流换热过程。把热量从一流体穿过间壁传往另一流体的过程叫做传热过程。

本课程将首先依次讨论导热、对流换热、辐射三种基本过程的规律。由于工程上总容易涉及流体与固体壁面的换热，所以我们不研究单纯对流方式的规律，而只研究对流换热的规律。其次讨论传热过程的规律，然后再讨论这些规律在换热器计算中的应用。

1-3 传热学简史及展望

传热学是从关于热的一般学说的基础上发展起来的。在十八世纪和十九世纪里，由于蒸汽机，接着是汽轮机和内燃机的相继出现，热学作为物理学的一部分而日益发展起来。它研究了一些普遍的原理，其中也包括着热的传播的各种问题，先后出现了导热，对流换热和热辐射的计算公式：

导热：傅里叶(1822)公式

$$Q = \lambda \frac{F \Delta t}{L} \text{大卡/小时。} \quad (1-1)$$

对流换热：牛顿(1702)公式

$$Q = \alpha F \Delta t \text{ 大卡/小时。} \quad (1-2)$$

热辐射：热辐射的四次方定律

$$Q = \sigma F T^4 \text{ 大卡/小时。} \quad (1-3)$$

式中， Q 为单位时间内所传递的热量，大卡/小时； F 为面积，米²； Δt 为温度差，°C； L 为热量传递路程的长度，米； λ 为导热系数，大卡/米·小时·°C； α 为放热系数，大卡/米²·小时·°C； σ 为辐射常数，大卡/米²·小时·°K⁴。

在十九世纪末，随着生产的发展要求提高单个发动机功率，传热过程在热机中的作用显得愈来愈重要。同时，建筑、冶金、制冷、机械制造和电工等其他技术部门都开始对换热现象注意起来。

在本世纪里，伴随着大工业的迅速发展，传热学发展成为一门独立的科学。

通过对生产实践积累的丰富的感性材料不断整理和改造，逐渐形成了相似原则、层流、紊流流动等理论，深刻地阐明了对流换热过程的物理本质。这些理论在回到生产实践中去的过程中接受了反复地检验，并获得了进一步发展。在这些理论的指导下，对流换热方面的已有实验资料都重新经过审定，同时还根据生产需要，充实了许多有意义的新研究成果，使得对流换热的知识形成比较明确的系统。在导热和辐射换热方面，随着生产的发展，在反复实践、不断总结的过程中也大大地扩展了我们认识的领域和深刻程度。

在传热学方面，我国劳动人民在向自然界斗争的过程里，积累了极其丰富的经验，卓越地运用了符合客观规律的科学原理。远在五千年前，我国制造的陶器中有一种名为“商”的东西，它有长而中空的三个足，用它烧水和煮食物比一般器具易熟，原因是它的传热面积较大并且结构有利于器中的流体自然对流。我国古代炼丹炉上所用的黄土、石灰、纸筋泥有隔热的作用，使炼丹炉的温度变

化不急剧。我国古代炼钢制剑所以能够放出异彩也是和改进炉膛辐射及选用有效的隔热材料分不开的。这些事例充分说明了我国劳动人民的高度智慧。可是，长期的封建和反动派统治阻碍了生产力的发展，使我国这些早期的实践经验也就只能长期停留在纯经验的基础上。

解放后，在党的英明领导下，生产力的迅速发展也给传热学的发展奠定了可靠的基础。有关高等学校从1952年开始，按照专业的需要开设了独立的传热学课程，建立了传热学实验室，为培养传热研究的干部创造了条件。同时在第一个五年计划期间，一些工业企业部门，也开始建立传热研究的机构。在党的领导下制定的科学规划，给传热学的发展起了巨大的推动作用。在短短的十几年里，科学院、高等学校和企业部门的传热研究联系了我国的生产实际，逐步加强了学术活动，并已取得了初步的研究成果，出现了蓬勃发展的新气象。

在党的社会主义建设总路线的光辉照耀下，我国国民经济各个部门，正以史无前例的高速度继续跃进，生产的跃进、技术革命的发展对传热学提出很多新的要求，有力地推动了这一学科的进一步发展。可以确信，在党的正确领导下，我国劳动人民高举毛泽东思想的伟大红旗，在生产斗争和科学实验的实践中，不断实践，不断总结经验，使传热学在为我国社会主义建设服务的过程中，一定会取得辉煌的成绩，把传热学的发展推向前所未有的新水平。

第一篇

第二章 导热基本定律

2-1 导热基本定律

物体中冷热不一样的两部分之间有热量转移。那末，单位时间内热量转移的大小如何确定呢？这个问题由导热基本定律来回答。

为了说明问题起见，想象在物体中存在着两个彼此平行的平面，它们的温度在整个平面上是均匀的，分别为 t_1 和 t_2 ，参看图 2-1。平面面积为 F ，彼此间距离为 Δx 。经验表明，对于两平行平面间单位时间内的热量转移，傅里叶公式往往是适用的：

$$Q = \lambda F \frac{t_1 - t_2}{\Delta x} = \lambda F \frac{\Delta t}{\Delta x} \text{大卡/小时}, \quad (2-1)$$

式中 λ 称为导热系数。应该指出：式(2-1)有它的局限性。如果在 Δx 一段范围内， $\frac{\Delta t}{\Delta x}$ 不是常量而是变化着的，式(2-1)就不能正确地表示穿过 F 的真实热量。要克服这个局限性，必须取 $\frac{\Delta t}{\Delta x}$ 的比值极限，即所谓温度梯度来代替 $\frac{\Delta t}{\Delta x}$ ：

$$\text{温度梯度} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right) = \frac{dt}{dx} \text{ } ^\circ\text{C/米}。 \quad (2-2)$$

在丰富的感性知识的基础上，导热现象的经验规律性被总结为导热基本定律（又称傅里叶定律）。它指出：在纯导热现象中，单位时间内通过给定面积的热量，正比例于该处的温度梯度及垂直于导热方向的截面面积。用算式表示，每小时通过垂直于导热

方向面积 F 米² 的热量为

$$Q = -\lambda F \frac{dt}{dx} \text{大卡/小时。} \quad (2-3)^* \textcircled{1}$$

式中负号表示热量传递的方向与温度梯度的方向相反。

单位时间内、单位截面积所通过的热量称为**热流密度**，用符号 q 表示。导热基本定律用热流密度表出时有下列形式：

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \text{大卡/米}^2 \cdot \text{小时。} \quad (2-4)^*$$

直流电路中的导电现象是大家熟悉的。它和导热现象具有类似性(详见 3-1)。

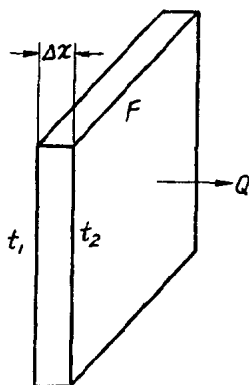


图 2-1

2-2 导热系数

导热系数由导热基本定律给出定义

$$\lambda = -\frac{q}{\frac{\partial t}{\partial n}} \text{大卡/米} \cdot \text{小时} \cdot ^\circ\text{C}, \quad (2-5)$$

它表示物质导热能力的大小。物理本质上，它就是单位温度梯度作用下物体内产生的热流密度值。

工程计算用的各种物质的导热系数值都是用专门实验测定出来的。一些常用物质的导热系数值被引列在附录 1 里。一般来说，导热系数的值以金属最大，非金属次之，液体更小，而气体最小。常温下铜、钢铁、水、空气的导热系数分别为 330、40、0.5 和 0.02 大卡/米·小时·°C。

影响导热系数数值的主要因素是物质的种类和温度。图 2-2 示出多种物质导热系数对温度的依变关系。从图上可以看到：大多数材料在广阔的温度区间内的实用计算，都容许采用 $\lambda = \lambda_0(1 +$

① 公式后面有 * 号者表示计算中直接应用的重要公式。

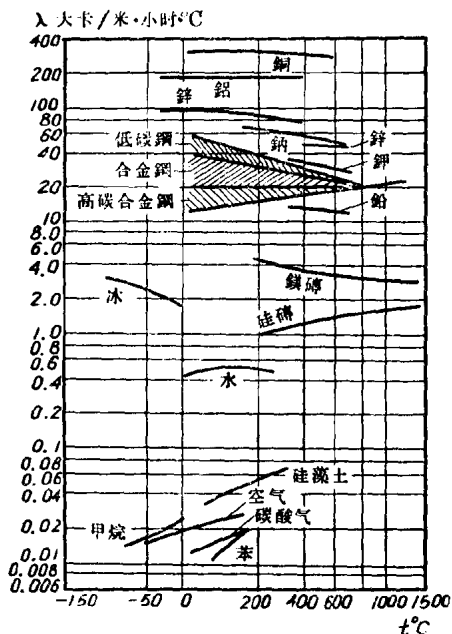


图 2-2 导热系数对温度的依变关系

有一些材料，像木材、石墨等，它们各向的结构不同，所以导热系数随导热方向不同而有很大差别。这些材料称为各向异性材料。对于各向异性材料，必须指明导热的方向才能查得正确的导热系数数值。

2-3 温度场

导热基本定律表明，导热热量是和温度梯度联系在一起的。所以，研究导热必须涉及物体的温度分布。一般地讲，物体的温度分布是坐标和时间的函数，即

$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (2-6)$$

式中 x, y, z 为空间直角坐标， τ 为时间坐标。

像重力场、速度场等一样，物体中存在着温度的场，称为温度

+ bt)的直线变化近似关系。式中 λ_0 为 0°C 时的导热系数值， t 为温度， b 为常数。

导热系数较小的固体材料有良好的隔热效用。习惯上把导热系数在常温下小于 0.2 大卡/米·小时·°C 的材料称为隔热材料(或称保温材料)。石棉、矿渣棉、硅藻土、硅石、泡沫塑料、泡沫混凝土和泡沫硅藻土等都是隔热材料的例子。