

高等学校教材

传热学

南京工学院 张正荣 编

科学出版社



内 容 提 要

本书是在哈尔滨工业大学热工教研组编写的《热工理论基础》“传热学”部分的基础上,根据 1980 年 5 月高等工业学校热工教材编审委员会扩大会议审订的四年制非动力类专业 30 学时《传热学教学大纲》(草案)改编的。

书中主要讲述传热学的基本概念、基本定律和简单的计算方法,并附有例题和习题。全书采用国际单位制(SI)单位。

本书可作为非动力类各专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

本书由热工教材编委会委托天津大学章熙民同志审阅,并经热工教材编委会复审通过。

本书责任编辑李心柱。

高等学校教材

传 热 学

南京工学院 张正荣 编

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷二厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 5.75 字数 138,000

1982 年 5 月第 1 版 1982 年 9 月第 1 次印刷

印数 00,001- 9,500

书号 15012·0401 定价 0.62 元

前 言

本书是在哈尔滨工业大学热工教研组编写的《热工理论基础》“传热学”部分的基础上,根据 1980 年 5 月高等工业学校热工教材编审委员会扩大会议审订的四年制非动力类专业 30 学时《传热学教学大纲》(草案)改编的。

在原书的基础上,本书增添的主要内容有:傅里叶微分方程、非稳态导热过程的计算、边界层理论、黑体辐射的普朗克定律、计算固体表面间辐射换热的网络法、计算平均角系数的代数法、通过肋壁的传热、传热单元数法等,修订了对流换热计算的全部实验公式。

本书对某些抽象问题,例如非稳态导热过程的进行、边界层厚度的发展等,尽量用初学者容易接受的具体形象来说明。在本书中对一些重要的计算方法除说明具体内容外,还适当地阐述其基本思想及思想的来龙去脉。编者认为,这样做对培养学生的思维能力,从而提高分析问题和解决问题的能力将有所帮助。

本书由热工教材编审委员会委托天津大学章熙民同志审阅,并经 1981 年 12 月热工教材编审委员会复审通过,章熙民同志为本书的质量提高做了认真的审阅,有关兄弟院校对本书的改编给予大力的支持和帮助,编者在此一并致以衷心的感谢。

由于水平所限,时间仓促,书中肯定有不妥和错误之处,恳切希望使用本书的同志给以批评和指正。

编 者

1982.4.

4-2 普朗克定律和斯蒂芬-玻尔兹曼定律	100
4-3 克希荷夫定律	104
4-4 任意放置的两黑体表面间的辐射换热	108
4-5 平均角系数	111
4-6 计算辐射换热的网络法	114
4-7 特殊排列的两灰体表面间的辐射换热	118
4-8 复杂系统的辐射换热	123
4-9 气体辐射	125
习题	131
第五章 传热	133
5-1 复合换热	133
5-2 传热	135
5-3 传热的增强	140
5-4 传热的减弱	145
习题	149
第六章 换热器	151
6-1 换热器的种类	151
6-2 换热器计算的一般说明	152
6-3 平均温差	155
6-4 传热单元数法	160
习题	165
附录	166
表 1-A 金属材料的密度、比热容和导热系数	166
表 1-B 保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	168
表 2 各种材料的辐射黑度 ϵ	169
表 3 干空气的热物理性质 ($p = 760 \text{ mm Hg} \approx 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$)	170
表 4 饱和水的热物理性质	171
表 5 干饱和水蒸气的热物理性质	172
表 6 在大气压力下烟气的热物理性质	174
主要参考文献	175

绪 论

热力学第二定律指出，热量总是自发地由高温物体传向低温物体。因此，哪里有温度差，哪里就有换热现象，就有热量传递。传热学就是研究换热现象的一门科学。

由于换热现象普遍地存在，并且在人类物质生产过程中起着重要的作用，因此引起众多的科技工作者的重视。

从事热能动力工程的科技人员，必需掌握和运用换热规律，因为他们的工作内容之一就是要妥善处理换热问题。例如，在锅炉中必需使燃料燃烧后的高温烟气尽快地将热量传给低温的水。为此，一方面需采取措施使换热速度加快，另一方面还需极力减少因烟气和空气间存在较大的温度差而引起的向大气的热量散失。

在其它许多工业部门，传热学的应用也很广泛。例如，在机械制造部门内，工件在冷加工或热加工过程中的温度控制；在电子部门内，电子元件或电子设备的冷却；在化工部门内，化工流程中最佳温度的保证；在食品加工部门内，食品在贮藏和运输过程中低温的产生和维持等，都需要应用传热学的知识。

如上所述，热量的传递取决于温度差的存在。实践经验进一步说明，在一定的换热系统中，温度差的大小决定了热量传递的多少，这和电学中电位差决定通过导体的电流大小的情况相类似。在传热学中也把温度差看作是驱动热量传递的动力。不言而喻，热量传递过程中不仅有动力，而且还应有阻力，这种阻力称为热阻。在一定的换热系统中，热阻是一定的。生产实践中的换热问题，大致说来有两种：一种是根据给定的温度差，实现希望传递的热量，

或者根据允许传递的热量，实现希望的温度差。解决这类问题的关键，在于造成具有一定热阻的系统；另一种是在给定的换热系统中，由已知的温度差确定所传递的热量，或者由所传递的热量确定温度差的大小。解决这类问题的关键，在于事先知道换热系统的热阻。

在分析温度差、传递的热量和热阻三者之间的关系时，除去依据有关的换热基本定律外，还需应用能量守恒原则。能量守恒原则和换热基本定律结合起来才能解决换热问题，这一点往往为初学者所忽视。

下面用简单的实例来说明热量的传递过程。

现在来考察取暖用火炉内高温烟气通过炉壁向室内空气传递热量的过程。首先，热量由高温烟气传递给炉壁内表面，而后再由炉壁内表面通过炉壁传递给炉壁外表面，最后再由外表面传递给空气和周围物体。上述热量传递过程称为传热过程。

在上述过程内，热量从内壁面传递给外壁面的过程和由外壁面传递给周围空气和其它物体的过程有本质的不同。在前者的热量传递过程中，炉壁各部分之间没有相对运动，热量的这种传递过程称为导热过程；而在后者的热量传递过程中，空气对壁面有相对运动，且空气内部也有相对运动，这样的热量传递过程称为对流换热过程。此外，炉壁外表面对周围与之不接触的物体（如墙壁、桌椅、人体等）还进行辐射换热过程。至于炉内的热量传递，则有高温烟气和内壁面之间的对流换热和辐射换热。总之，上述传热过程由导热过程、对流换热过程和辐射换热过程组成。下面分别简略地说明这些过程的特点。

一、导热过程

就一块固体而言，这种换热过程是指热量由固体的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。在气体和液体中进行单纯的导热过程时，它们的内部必须没有宏观的相对移动。

平壁中进行的导热过程最简单。可以想象，当平壁内各处温度不随时间变化时，平壁两侧面的温度差愈大，壁愈薄，壁的面积愈大，则单位时间内通过此平壁的导热热量愈多，即

$$Q \sim \frac{\Delta t}{\delta} F W \quad (a)$$

写成等式为

$$Q = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} F W \quad (1)$$

式中， Q ——单位时间内导热传递的热量，称为热流量， W ；

Δt ——平壁两侧面的温度差， $^{\circ}C$ ；

δ ——平壁的厚度， m ；

F ——平壁的面积， m^2 ；

λ ——比例常数，表征材料的导热性能，称为导热系数。它表示当两侧面具有单位温度差时，经由单位厚度的壁，在单位时间内通过单位面积导热所传递的热量，它说明材料导热能力的大小。导热系数的可靠值一般由实验测定。

将式(1)改写为

$$Q = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\lambda F}} \quad (1-a)$$

此式类似于欧姆定律的表示式：

$$I = \frac{\Delta u}{R}$$

温度差 Δt 类似于电位差 Δu ； $\frac{\delta}{(\lambda F)}$ 类似于电阻 R ，称为热阻。热阻是个很重要的概念，有时用它分析一些换热问题显得很方便。后

面将会看到,热阻还可以串联、并联等。

通过平壁导热时,对整个壁面而言的热阻为 $\frac{\delta}{(\lambda F)}$,但通过其它形状的物体导热时,热阻的表示式是另外的形式。

由式(1-a)的变形,

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

可以看出,热阻 $\frac{\delta}{(\lambda F)}$ 是单位时间内传递单位热量所需的温度差,它起阻止热量传递的作用。

二、对流换热

这种换热过程是指,由于流体微团改变空间位置所引起的流体和固体壁面之间的热量传递过程。流体微团改变空间位置的过程称为对流。在对流时,作为载热体的流体微团不可避免地要引起热对流,同时,在对流过程中微团又不可避免地和周围流体接触而进行导热。因此,在对流换热过程中流体内部进行着热对流和导热的综合过程。这种综合过程,当然影响流体和壁面之间的对流换热。

牛顿于 1701 年提出了计算对流换热量的公式:

$$Q = \alpha(t_w - t_f) \cdot F \quad (2)$$

式中, Q ——对流换热量, W;

t_w 、 t_f ——壁面和流体的平均温度, °C;

F ——换热面积, m²;

α ——平均对流换热系数。它表示当流体和壁面的温度差为 1°C 时,在单位时间内单位壁面面积和流体交换的热量。它的大小说明对流换热的强弱,常用的单位为 W/(m²·°C)。

将上式改写成

$$Q = \frac{\Delta t}{\frac{1}{\alpha F}}$$

可知对流换热的热阻为 $\frac{1}{(\alpha F)}$ 。

三、辐射换热

这种换热过程是指温度不同的两个(或两个以上)物体间相互进行的热辐射和吸收所形成的换热过程。习惯上,仅将和温度有关的辐射称为热辐射。它的能量是由热能变来的,并且被物体吸收后又重新变成热能。波长在 $0.1-40\mu\text{m}$ 范围内的射线(即电磁波)就具有这种性质,这一范围内的射线称为热射线。

当物体的温度大于绝对零度时,物体恒向外放射辐射能。在单位时间内物体的单位面积向外放射的能量,即辐射力为

$$E = C \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad \text{W/m}^2 \quad (3)$$

式中, T ——物体的温度, K;

C ——辐射系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。它和物体的性质、表面状况等因素有关,说明物体向外辐射能量的能力。一切物体中,以黑体的辐射系数最大,为 $5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

两物体间的辐射换热量为

$$Q = C_n \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1 \quad \text{W} \quad (4)$$

式中, C_n ——当量辐射系数,它和两物体的性质、形状、表面状况和相对位置等因素有关, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

T_1, T_2 ——两物体的温度, K;

F_1 ——物体 1 的表面积, m^2 。

辐射换热与导热和对流换热不同,导热和对流换热仅发生在冷、热物体接触时,而辐射不需如此,因为辐射能可以在真空中

传播。

以上分别简略地说明了三种热传递过程。实际的热量传递过程常常是上述基本过程组合而成的复合过程。如上所述,对流换热过程就包含热的对流和导热。有时对流换热过程还伴有辐射换热过程。不论是由三种基本过程,还是由两种基本过程组合而成的复合换热过程,我们总认为它的作用结果是基本过程单独作用结果的总和,实践证明了这种看法的正确性。

四、传热过程

这种过程是指热流体通过固体间壁(将冷、热流体隔开的壁)将

热量传给冷流体的过程。例如,一大平板厚度为 δ , 面积为 F , 平板一侧有温度较高的流体在流动, 另一侧有温度较低的流体在流动, 它们对两侧壁面的对流换热系数分别为 α_1 和 α_2 (在复合换热的情况下, α 应是对流换热和辐射换热共同作用的结果, 详见第五章第一节); 它们

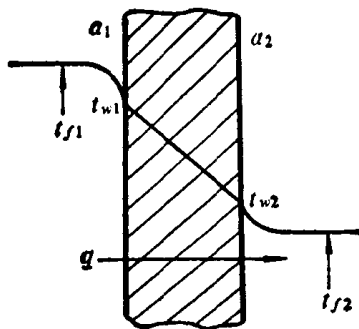


图1 通过无限大平板的传热

的温度分别为 t_{f1} 和 t_{f2} 。在流体和平板的温度不随时间变化的情况下, 热流体将热量首先传递给左侧板面, 然后此热量由左侧板面传递给右侧板面, 最后同一热量又由右侧板面传递给冷流体, 从而实现了热量从热流体通过间壁传递给冷流体的过程。这里需要强调指出, 自左至右传递的是同一数量的热量, 如果不是这样, 则流体或平板的温度将随时间变化。在这种情况下, 可以写出下列三式:

由热流体传递给左侧板面的热量为

$$Q = \alpha_1 (t_{f1} - t_{w1}) F$$

由左侧板面传递给右侧板面的热量为

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{w1} - t_{w2}) F$$

由右侧板面传递给冷流体的热量为

$$Q = \alpha_2 (t_{w2} - t_{f2}) F$$

以上三式中的 t_{w1} 和 t_{w2} 为未知的板面温度。由以上三式消去 t_{w1} 和 t_{w2} 得

$$Q = \frac{(t_{f1} - t_{f2}) F}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \text{W} \quad (5)$$

令

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (6)$$

则

$$Q = \frac{\Delta t}{\frac{1}{kF}}$$

式中, $\Delta t = t_{f1} - t_{f2}$;

k ——传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

由上式可见, 传热过程的热阻为

$$\frac{1}{kF} = \frac{1}{\alpha_1 F} + \frac{\delta}{\lambda F} + \frac{1}{\alpha_2 F} \quad ^\circ\text{C}/\text{W}$$

在上述传热过程中, 热量依次经过三个热阻, 是热阻串联的情况。这和电流依次流过串联电阻的情形相同, 所以传热的总热阻是三个分热阻, 即左侧板面的对流换热热阻 $\frac{1}{(\alpha_1 F)}$ 、平板的导热热阻 $\frac{\delta}{(\lambda F)}$ 及右侧板面的对流换热热阻 $\frac{1}{(\alpha_2 F)}$ 之和。

五、单位制

本书采用国际单位制(SI)。由于我国正处于由工程单位制向

国际单位制过渡的阶段，为了读者能顺利阅读本书和其它有关文献，本书对传热学中使用的单位给出两种单位制的换算表。下面先对换算关系做简短的说明。

国际单位制中的基本单位有：

长度——米，m；时间——秒，s；温度——开，K；质量——千克，kg。

工程单位制中的基本单位有：

长度——米，m；时间——秒，s；温度——摄氏度， $^{\circ}\text{C}$ ；重量——千克力，kgf。

比较这两种单位制可以发现，米、秒相同，而温度单位之间有下述关系：

$$T = 273.15 + t$$

式中， T ——绝对温度，K；

t ——摄氏温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

此两种温度的起算点不同，但温度的间隔相同，即

$$\Delta T = \Delta t \quad \text{K 或 } ^{\circ}\text{C}$$

因此，对于温差来说，两种温度单位均可用。综上所述可知，对于仅由基本单位米、秒和 $^{\circ}\text{C}$ 或 K（对于温度差而言）组成的导出单位，两者不用换算，但在牵涉到力的单位时就需要换算。在传热学中常用到的和力有关的单位为下列各项。

国际单位制单位：

力——牛， $\text{N}[\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2]$ ；

压力——帕， $\text{Pa}[\text{N}/\text{m}^2 \text{ 或 } \text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)]$ ；

热量、能量——焦， $\text{J}[\text{N}\cdot\text{m} \text{ 或 } (\text{kg}\cdot\text{m}^2)/\text{s}^2]$ ；

功率——瓦，W。 $1\text{W} = 1\text{J}/\text{s}$ ；

压力单位帕[Pa]太小，国际单位制中还规定用 10^5 帕作为压力单位，称为巴；

$$10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$$

工程单位制单位:

质量——千克力·秒²/米, $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$;

压力——千克力/厘米², at 、 kgf/cm^2 ;

热量——卡或千卡, cal 或 kcal ;

能量——千克力·米($1 \text{ kcal} = 427 \text{ kgf} \cdot \text{m}$), $\text{kgf} \cdot \text{m}$;

功率——瓦或千瓦($1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 860 \text{ kcal}$), W 或 kW 。

和力有关的单位的换算关系式共有三个, 如表 1。

表 1

国际单位→工程单位	工程单位→国际单位
$1 \text{ N} = \frac{1}{9.81} \text{ kgf} = 0.102 \text{ kgf}$	$1 \text{ kgf} = 9.81 \text{ N}$
$1 \text{ kJ} = 0.239 \text{ cal}$	$1 \text{ kcal} = 4.187 \text{ kJ}$
$1 \text{ J/s} = 1 \text{ W} = 0.86 \text{ kcal/h}$	$1 \text{ kcal/h} = 1.163 \text{ J/s}$

用以上换算关系式也可进行其它物理量的换算, 换算结果列于下表 2:

表 2

物理量	符号	换 算 系 数		
		国际单位制	米制工程单位制	英制工程单位制
压 力	p	$\text{bar} \quad 10^5 \text{ N/m}^2$	kgf/cm^2	lbf/in^2
		1	1.020	14.504
		0.981	1	14.223
		0.069	0.070	1
运动粘度	ν	m^2/s	m^2/s	ft^2/s
		1	1	10.764
		0.0929	0.0929	1

续 表

物理量	符 号	换 算 系 数		
		国际单位制	米制工程单位制	英制工程单位制
动力粘度	μ	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$	$\text{kgf}\cdot\text{s}/\text{m}^2$	$\text{lbf}\cdot\text{s}/\text{ft}^2$
		1	0.102	0.672
		9.807	1	6.590
		1.488	0.152	1
热 量	Q	kJ	kcal	Btu
		1	0.239	0.948
		4.187	1	3.968
		1.055	0.252	1
比 热 容	c	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$	$\text{kcal}/(\text{kgf}\cdot^{\circ}\text{C})$	$\text{Btu}/(\text{lbf}\cdot^{\circ}\text{F})$
		1	0.239	0.239
		4.187	1	1
热流密度	q	W/m^2	$\text{kcal}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$	$\text{Btu}/(\text{ft}^2\cdot\text{h})$
		1	0.860	0.317
		1.163	1	0.369
		3.155	2.713	1
导热系数	λ	$\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$	$\text{kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$	$\text{Btu}/(\text{ft}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$
		1	0.86	0.578
		1.163	1	0.672
		1.731	1.488	1
对流换热 系 数	α	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$	$\text{kcal}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$	$\text{Btu}/(\text{ft}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{F})$
		1	0.86	0.176
		1.163	1	0.205
		5.678	4.882	1
功 率	N	W	kcal/h	$\text{lbf}\cdot\text{ft}/\text{s}$
		1	0.86	0.738
		1.163	1	0.858
		1.356	1.166	1

第一章 一维稳态导热

1-1 傅里叶定律

阐述此定律前先引入传热学中常用的一些概念。

一、温度场

在所研究的换热系统中,一般地说,空间各点的温度不一定相同,而且同一地点的温度也可能随着时间的推移而改变。为了描述这些情况,现引入温度场的概念。所谓温度场,是指某一时刻对换热系统中空间一切点温度的总计,它的数学表示式为

$$t = f(x, y, z, \tau)$$

式中, x, y, z ——直角坐标系的坐标;

τ ——时间。

如果温度场不随时间变化,这种温度场称为稳定温度场。如果稳定温度场仅和二个或多个坐标有关,则称为二维或一维稳态温度场。一维稳态温度场的数学表示式为

$$t = f(x)$$

二、等温面和等温线

在某一时刻,将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。

显然,同一时刻的不同等温面或等温线不能相交,否则就意味着同一地点在同一时刻可以具有不同的温度。在连续的温度场中,等温面或等温线也是连续的,它们不能在温度场中断开。在同一个等温面上没有温度变化,因此也就没有热量传递,热量传递只发生在不同的等温面之间。

三、温度梯度

自等温面的某点出发,沿不同路径到达另一等温面时,将发现单位距离的温度变化 $\Delta t/\Delta l$ 具有不同的数值(Δl 为沿 l 方向等温面间的距离)。自等温面上某点到另一等温面的最短路径,是在该点处等温面的法线方向。当两等温面间沿法线方向的距离 Δn 趋于 0 时, $\Delta t/\Delta n$ 的极限称为温度梯度,表示为

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta t}{\Delta n} \right) = \text{grad } t = \frac{\partial t}{\partial n}$$

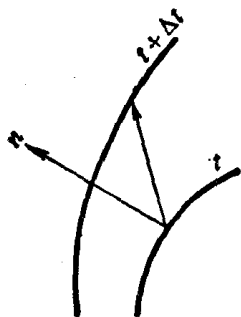


图 1-1 关于温度梯度的定义

温度梯度是向量,它位于等温面的法线上,指向温度增加的方向。

在不稳定温度场中,温度梯度始终和时间连系在一起。

四、热流密度

在单位时间内,经由面积 F 传递的热量称为热流量,用符号 Q 表示。热流量的单位为 W (工程单位制单位为 kcal/h)。

在单位时间内,经由单位面积传递的热量 $q = \frac{dQ}{dF}$ 称为热流密度或比热流量,它的单位为 W/m^2 。

热流密度是向量,它和温度梯度位于等温面的同一法线上,但指向温度降低的方向。

简略述明上述概念后,可以进而讨论傅里叶定律。

1. 傅里叶定律

傅里叶定律是在大量实验结果的基础上建立起来的,此后又不断为实验所证实。它指出了热流密度和温度梯度之间的关系。这一定律认为:在不均匀温度场中,由于导热所形成的某地点的热流密度正比于该时刻同一地点的温度梯度,写成等式则为

$$q = -\lambda \text{ grad } t = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1-1)$$

因为热流密度和温度梯度方向相反，所以式中出现负号。式中的比例常数 λ 是导热系数，它是物质的一个重要热物理性质参数，表明物质的导热能力——单位温度梯度时的热流密度。

各种物质的导热系数值均由实验确定。不同物质的导热系数值不同，各类物质导热系数值的范围示于图 1-2 中。

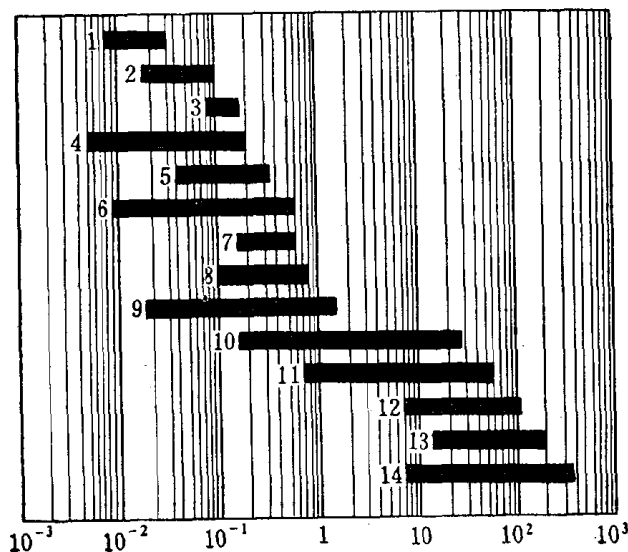


图 1-2 各种物质的导热系数^[3]

- 1.有机液体和蒸气；2.无定形保温材料；3.油；4.无机液体和蒸气；5.有机液体；6.无机液体；7.无机水溶液；8.有机水溶液；9.粉末；10.耐火材料；11.晶体；12.液态金属；13.工程金属；14.纯金属。

2. 导热系数

物质的导热系数不但因物质的种类而异，而且还和物质的结构、密度、湿度、温度等因素有关，此中尤其值得注意的是温度对它的影响。

纯金属的导热系数一般随温度升高而减小。这是由于金属的导热主要依靠自由电子，而温度升高时，晶格的振动阻碍了自由电