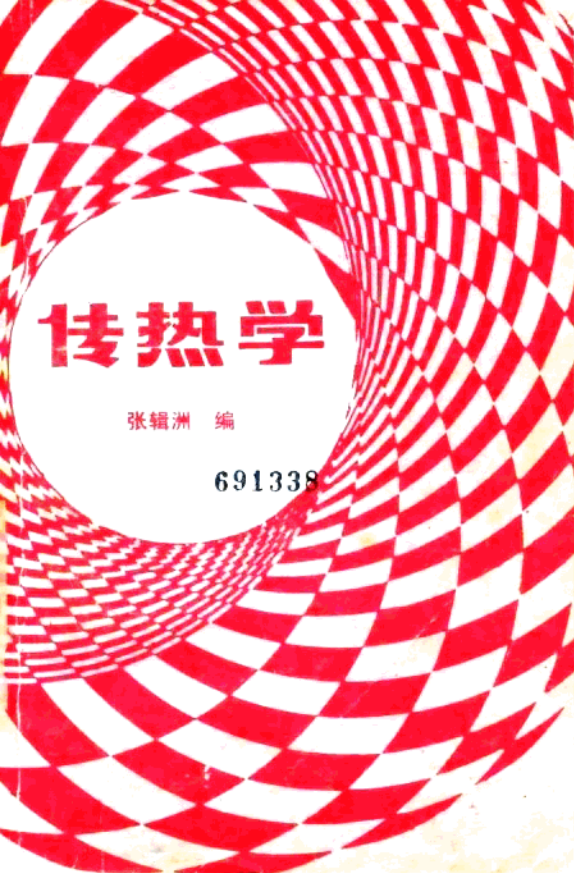




传热学

张辑洲 编

691338

前 言

本书是根据1983年为国防科技工业节能技术服务中心所属大专班制订的教学大纲，总结本人及教研室其他同志多年教学经验编写而成的。在编写过程中，以加强基础、培养学生解决实际问题的能力作为指导思想，从生活和生产实践的感性认识出发，进而阐明理论，精选内容，深入浅出加以讲解。

在书中编者对基尔霍夫定律的表述方法及两物体间辐射换热计算的条件作了新的探讨。

本书阐述了工程中常见的导热、对流换热、辐射换热及传热问题的基本原理和计算方法，此外还对新型余热回收装置——真空相变式热水器及高效传热元件——热管的原理和特点做了简单的介绍。

本书采用法定单位制，附有例题及习题。

本书可作为动力类大专班及非动力类大学本科教材，也可供从事热工技术的工作者和自学者参考。

本书由余其铮同志主审，并经马义伟、刘纪福、王克光诸同志详细审阅。他们提出许多宝贵意见，在此表示谢意。

由于编者水平所限，书中不足之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

1985. 12

主 要 符 号

符 号	名 称	单 位
A	吸收率	
a	导温系数	m^2/s
b	温度系数	$1/^\circ C$
C	辐射系数	$W/(m^2 \cdot K^4)$
$C_{\bullet}$	黑体辐射系数	$W/(m^2 \cdot K^4)$
c_p	定压比热	$J/(kg \cdot ^\circ C)$
D	直径	m
D	穿透率	
d	直径	m
E	辐射力	W/m^2
$E_{\bullet}$	黑体辐射力	W/m^2
E_{λ}	单色辐射力	$W/(m^2 \cdot \mu m)$
F	表面积	m^2
f	横截面积	m^2
G_m	质量流速	$kg/(m^2 \cdot s)$
G	流量	kg/s
G	投射辐射力	W/m^2
g	重力加速度	m/s^2
H	高度	m
h	高度	m
J	有效辐射力	W/m^2
k	传热系数	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
k_l	单位管长传热系数	$W/(m \cdot ^\circ C)$
L	长度	m
l	长度、定型尺寸	m
m	冷却率	$1/s$

续表

N	功率	W
NTU	传热单元数	
p	压强 (压力)	Pa
Q	热量—热流量	W
q	热流密度、热负荷	W/m^2
q_l	单位管长热流量	W/m
R	半径	m
R	反射率	
R	热容量比	
R	全面积、全管长热阻	$^{\circ}C/W$
R_a	单位面积热阻	$m^2^{\circ}C/W$
R_l	单位管长热阻	$m^{\circ}C/W$
r	半径	m
r	气化潜热	J/kg
T	热力学温度	K
t_w	壁面温度	$^{\circ}C$
t_f	流体温度	$^{\circ}C$
U	湿周长	m
V	容积、体积	m^3
W	热容量	$W/^{\circ}C$
w	速度	m/s
α	换热系数	$W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$
β	体积膨胀系数	$1/^{\circ}C$
β	肋化系数	
δ	厚度	m
ε	黑度	
e	有效度	
η_j	肋效率	

续表

η_0	肋片总效率	
θ	无因次过余温度	
θ	过余温度	$^{\circ}\text{C}$
θ	润湿角	
λ	导热系数	$\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$
λ	波长	μm
μ	动力粘度	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
ν	运动粘度	m^2/s
ρ	密度	kg/m^3
ρ	电阻率	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
σ	表面张力系数	N/m
σ_0	黑体辐射常数	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
τ	时间	s
φ	角系数	
φ	角度	
ψ	冲击角度	
ψ	修正系数	

相 似 准 则

准则组成形式	名 称	物 理 意 义
$\text{Nu} = \alpha l / \lambda$	努谢尔特	对流换热与导热之比
$\text{Re} = w l / \nu$	雷 诺	惯性力与粘滞力之比
$\text{Pr} = \nu / a$	普朗特	流动边界层与热边界层厚度之比
$\text{Gr} = g \beta \Delta t l^3 / \nu^2$	葛拉晓天	浮升力与粘滞力之比
$\text{Fo} = \alpha \tau / l^2$	傅 里 叶	无因次时间
$\text{Bi} = \alpha l / \lambda$	毕 渥	导热热阻与换热热阻之比

目 录

第一章 绪论

- 1-1 传热学的研究对象及其在工程技术上的应用 (1)
- 1-2 热传递的三种基本方式及传热过程 (2)
- 1-3 单位制 (8)

第二章 稳态导热

- 2-1 导热基本定律——傅里叶定律 (12)
- 2-2 导热系数 (14)
- 2-3 导热微分方程式及边界条件 (16)
- 2-4 简单几何形状物体(平板、圆筒壁)稳态下的导热..... (20)
- 2-5 通过等截面棒的稳态导热 (33)
- 2-6 稳态导热的数值解法简介 (37)

第三章 非稳态导热

- 3-1 非稳态导热过程的特点 (49)
- 3-2 无限大平板的加热 (52)
- 3-3 有限大物体的非稳态导热计算 (61)
- 3-4 集总参数法 (65)

第四章 对流换热

- 4-1 对流换热概说 (70)
- 4-2 对流换热微分方程式组 (77)
- 4-3 对流换热实验研究方法 (81)
- 4-4 自然对流换热 (96)
- 4-5 流体受迫外掠物体时的对流换热 (102)
- 4-6 流体在管(槽)内受迫对流换热 (109)
- 4-7 沸腾和凝结时的对流换热 (116)
- 4-8 热管及真空相变式热水器工作原理 (127)

第五章 辐射换热

- 5-1 热辐射的基本概念 (134)

5-2 辐射的基本定律	(138)
5-3 任意放置的两黑体表面间的辐射换热	(145)
5-4 平均角系数的代数求解方法	(147)
5-5 两个灰体表面间的辐射换热	(151)
5-6 气体辐射	(170)

第六章 传热

6-1 复合换热	(180)
6-2 传热	(183)
6-3 传热的增强和减弱	(193)

第七章 换热器

7-1 换热器的种类	(201)
7-2 换热器热计算的类型、传热系数及平均温差	(203)
7-3 间壁式换热器的计算	(213)

附录

表 1 金属材料的密度、比热容和导热系数	(224)
表 2 保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	(226)
表 3 保温、建筑及其它材料的密度和导热系数	(227)
表 4 干空气的热物理性质 ($p = 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$)	(228)
表 5 在大气压力下烟气的热物理性质	(229)
表 6 在大气压力 ($p = 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$) 下过热水蒸气 的热物理性质	(229)
表 7 饱和水的热物理性质	(230)
表 8 干饱和水蒸气的热物理性质	(231)
表 9 几种饱和液体的热物理性质	(233)
表 10 液态金属的热物理性质	(234)
表 11 各种材料的辐射黑度 ε	(235)
表 12 双曲线函数值	(236)

主要参考文献	(237)
--------------	-------

第一章 绪 论

1-1 传热学的研究对象及其在工程技术上的应用

一、传热学的研究对象

我们知道，“科学研究的区分，就是根据科学对象所具有的特殊的矛盾性。因此，对于某一现象的领域所特有的某一种矛盾的研究，就构成某一门科学的对象。”〔1〕

在观察热现象时，人们发现热总是自发地由高温物体（或物体的高温部分）传向低温物体（或同一物体的低温部分）。可以说，温度差是传热的“动力”。同时也发现，热在传递过程中，总是存在着“阻力”（与流动现象中的流动阻力、电现象中的电阻相类似）。我们把热在传递过程中所遇到的阻力称为热阻。传递热量的多少，除了取决于温度差外，还取决于热阻。热量、温度差与热阻三者之间存在着一定的内在关系。或者说，传热学是研究热能传递规律的一门科学。此即为热现象所具有的特殊的矛盾性。因此说，传热学的研究对象是这三者之间存在的内在规律。

二、在工程技术上的应用

凡是有温度差存在的地方，就一定有热能传递现象产生。因此，传热学在工程技术上有着广泛的应用。可以说，在现代工程技术领域中无一不涉及到传热学知识。

生产实践中的传热问题，归结起来有两类：一类是根据给定的温度差，实现所要求传递的热量；或者根据要求的传递的热量，实现所希望的温度差。解决这类问题的关键是需要一个具有

一定热阻的换热系统（设备）。实质上是已知热量和温度差求热阻。另一类是在给定的换热系统（设备）中，由已知的温度差，来确定所传递的热量；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是事先知道换热系统（设备）的热阻。实质上是已知热阻和温度差求热量，或者是已知热阻和热量求温度差。

从节约能源和提高经济效益出发，处理实际传热问题有两方面内容。其一是力求使传热过程增强，在一定的温差下减小热阻，使传递的热量增大，从而减小设备材料的消耗。另一方面是力求使传热过程减弱，减少不必要的热损失，节约能源。

在分析传热问题时，除要遵循换热基本规律外，还需应用能量守恒原理。只有把能量守恒原理和换热基本规律结合起来，才能解决实际传热问题。

1-2 热传递的三种基本方式及传热过程

一、热传递的三种基本方式

对热能传递过程的观察和研究发现，根据物理过程的不同，热量传递可分为三种基本方式：热传导（导热）、热对流和热辐射。

1. 导热

导热是指温度不同的两物体直接接触时（或者同一物体内部的温度不同的相邻部分之间）所发生的热传递现象。

例如手持铁棒的一端，加热另一端，经过一段时间，手就有灼热的感觉。这种热能由棒的一端传至另一端，再由棒传到手上的现象，均属导热现象。

在实际工程上，如锅炉中热由炉墙的内壁面传到外壁面的现象，热力管道中热由内壁面传至外壁面的现象，都是导热过程。

导热过程与物体的宏观运动无关。热之所以能够传递，是组成物体的微观粒子运动的结果。因此，只要有温度差存在，导热过程可以在任何物体中发生。

在气体中，热传导主要依靠原子或分子的热运动；在液体中，热传导主要依靠弹性波的作用；而在固体中，热传导主要依靠原子的振动和自由电子的运动。

固体平壁中进行的导热过程最为简单。可以想像，当平壁内各处温度不随时间变化时，平壁两侧面的温度差越大，壁越薄，壁的面积越大，则在单位时间内通过此平壁的导热热量就越多。可以用下式来表达：

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

式中 Q ——单位时间内由导热传递的热量，称为热流量

Δt ——平壁两侧面的温度差

δ ——平壁的厚度

F ——平壁的面积

λ ——比例常数，它表征材料的导热性能，称为导热系数。

将式 (1-1) 改写为

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

此式类似于欧姆定律的表示式

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

温度差 Δt 类似于电位差 ΔV ， Q 类似于电流 I ， $\frac{\delta}{\lambda F}$ 类似于电阻

R ，即前面提到的热阻。这是个很重要的概念，用它分析一些换热问题很方便。后面还会看到，热阻与电阻相类似，也可以串联和并联。

通过平壁导热时，整个壁面的热阻为 $\frac{\delta}{\lambda F}$ ，而单位面积的热阻为 $\frac{\delta}{\lambda}$ 。其它形状物体导热时，热阻有另外的表达形式。

由式 (1-1a) 的变形

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

可知，热阻 $\frac{\delta}{\lambda F}$ 的物理意义是指单位时间内，传递单位热量所需的温度差，它起阻止热量传递的作用。

2. 热对流

热对流是指温度不同的流体各部分以微团形式发生相对位移而引起热传递现象。热对流只能发生在液体或气体中。由于流体微团在改变空间位置时不可避免的要和周围流体相接触，因而热对流的同时一定伴有导热过程。

在工程上通常比较关心的是流动着的流体与温度不同的固体壁面相接触时，它们之间所发生的热传递现象。我们把这种热传递过程称为对流换热，有时也叫对流放热。对流换热过程是热对流和导热的综合过程。

例如，当凉风吹过脸面时，有凉爽的感觉；而当热风吹过脸面时，就觉得热烘烘的。这种凉爽与热烘烘的感觉，就是对流换热的结果。

在工程上，管内流动的热水与管内壁面间的热交换过程、暖气片外壁面与房屋内冷空气间的热交换过程，均属于对流换热过程。

经验表明，对流换热量的大小与壁面面积、壁面与流体间的温度差成正比。早在1701年，牛顿提出了计算对流换热的公式（称为牛顿公式）

$$Q = \alpha(t_w - t_f)F \quad (1-2)$$

式中 Q ——对流换热量

t_w, t_f ——壁面平均温度和流体的平均温度

F ——换热面积

α ——比例系数，称为平均对流换热系数

将式 (1-2) 变为

$$Q = \frac{\Delta t}{\frac{1}{\alpha F}} \quad (1-2a)$$

分母 $\frac{1}{\alpha F}$ 称为对流换热的热阻。

3. 热辐射

由物理学中知道，当物体温度高于绝对零度时，它就不间断地以电磁波形式向周围空间辐射能量。由物体的热状态所激发的电磁波，当它达至另一物体表面时，被其吸收而又重新转变为热能。具有这种性质的电磁波通常称为热射线。热射线传播过程叫热辐射。借助热射线来传递能量的过程与热传导和对流换热相比较具有不同的本质。热辐射过程不仅有热能的传递，而且伴有能量形式的转变，即由热能转变为辐射能，再由辐射能重新变为热能，最终实现热能的传递。此外，热传导与对流换热的实现必须借助于介质，而热辐射过程的实现不需要介质。因此，有时将前者称为接触换热，而将后者称为不接触换热。

不同温度的两物体（或数个物体）间互相进行着热的辐射和吸收，由此引起的换热现象称为辐射换热。

例如，脸朝向打开的炉门，或靠近炽热物体时，就觉得特别烤烫。热由炉子内部或由热物体表面传递到脸上，主要依靠辐射换热过程。

在工程上，如锅炉炉膛内高温烟气与炉内壁面间的热交换，以及互不接触、温度不同的两固体表面间的热交换等都属于辐射换热过程。

当物体的温度大于绝对零度时，在单位时间内由物体的单位表面积向外发射的热能，通常称为辐射力，以 E 表示。经验与理

论证明，它与物体表面绝对温度的四次方成正比，即

$$E = C \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (1-3)$$

式中 T ——物体表面的绝对温度

C ——辐射系数，它取决于物体表面性质和状况，表征物体向外辐射能量的能力。

温度不同的两物体表面间的辐射换热量为

$$Q = C_r \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_{12} \quad (1-4)$$

式中 C_r ——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。

T_1, T_2 ——两物体的绝对温度

F_{12} ——物体1对物体2的相对面积

两物体间辐射换热量，总是与两物体表面绝对温度四次方之差成正比。

以上简略地说明了热传递的三种基本方式。实际的热量传递常常是由上述基本过程组合而成的复合过程。如前所述，对流换热过程就包括热对流和导热。有时对流换热过程还伴有辐射换热过程。实践证明，对于两种或者是三种基本方式同时起作用的复合换热过程，其总的换热结果，是组成过程的各基本方式单独作用结果的总和。

二、传热过程

在实际工程中，由于考虑的换热系统不同，往往是二种或三种基本换热方式同时出现的复杂的换热过程。

例如有一大平壁（见图 1-1），厚为 δ ，面积为 F 。平壁一侧有温度 t_{f1} （较高）的热流体在流动，另一侧有温度 t_{f2} （较低）的冷流体在流动，它们对两侧壁面的对流换热系数分别为 α_1 和 α_2 （在复合换热情况下， α 应是对流换热和辐射换热共同作用的结果）

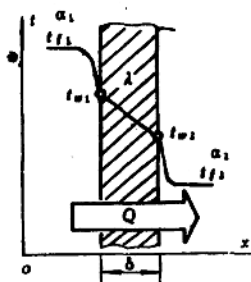


图 1-1 通过无限大平板的传热

果，详见第六章第一节）。在流体和平板的温度不随时间变化的情况下，热流体将热能以对流换热方式首先传递给左侧壁面，然后左侧壁面将热能以导热方式传递给右侧壁面，最后将同一热量又由右侧壁面以对流换热方式传递给冷流体，实现了热流体将热能传递给冷流体的热交换过程。我们把热流体通过固体间壁（将冷、热流体隔开的壁面）将热能传递给冷流体的过程称为传热过程。传热过程与基本换热方式不同之处，在于它有固体间壁和同时出现多种换热方式。

当流体和平壁的温度不随时间变化时，传热过程的传热量，按能量守恒原理，等于每个局部换热方式的换热量。即左侧热流体与壁面的对流换热量、间壁的导热量及右侧壁面与冷流体的对流换热量均相等，且也等于热、冷流体交换的传热量。

由热流体以对流方式传递给左侧壁面的热量为

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

由左侧壁面以导热方式传递给右侧壁面的热量为

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

由右侧壁面以对流方式传递给冷流体的热量为

$$Q = a_2(t_{w2} - t_{f2})F$$

上述三式中 t_{w1} 和 t_{w2} 为未知的壁面温度。联立各式后消去 t_{w1} 及 t_{w2} ，即得

$$Q = \frac{(t_{f1} - t_{f2})F}{\frac{1}{a_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{a_2}} \quad (1-5)$$

$$\text{令} \quad k = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{a_2}} \quad (1-6)$$

则式(1-5)可表为

$$Q = k\Delta t F \quad (1-7)$$

$$\text{或者写成} \quad Q = \frac{\Delta t}{\frac{1}{kF}} \quad (1-7a)$$

式中 $\Delta t = t_{f1} - t_{f2}$ 为热、冷流体平均温度的差

k ——传热系数

由上式看出，传热过程的总热阻为

$$\frac{1}{kF} = \frac{1}{a_1F} + \frac{\delta}{\lambda F} + \frac{1}{a_2F} \quad (1-8)$$

可见，热量依次经过三个热阻，是热阻串联的情况，和电工中电流通过串联电阻情况相类似。所以，传热过程的总热阻为各局部热阻之和。

不同的换热方式遵循着不同规律。后面我们将依次分别进行讨论。

1-3 单位制

在选定基本单位之后，按一定的物理关系可得出一系列的导出单位。这样，基本单位和导出单位构成一个完整的体系，称为单位制。随着基本单位选择的不同可构成不同的单位制。我国过

去用工程单位制，目前实行的是法定单位制。与传热学有关的基本单位有：

长度——米 [m]；
 时间——秒 [s]；
 质量——千克 [kg]；
 温度——开 [K]。

有关的导出单位有：

力——牛顿， $N[kg \cdot m/s^2]$ ；
 压力——帕， $Pa[N/m^2]$ ；
 热量、功、能量——焦， $J[N \cdot m]$ ；
 功率——瓦， $W[J/s]$ 。

由于我国正处于由工程单位制改用法定单位制的过渡阶段，本书采用了法定单位制，而读者在工作、学习中还经常会遇到采用工程单位制的情况，所以在这里给出与本书关系较密切的物理量的两种单位制换算关系，见表 1-1，以方便读者。

表 1-1 单位制换算

物理量	由工程单位制换算为 法定单位制	由法定单位制换算为 工程单位制
力	$1\text{kgf} = 9.80665\text{ N}$	$1\text{N} = 0.10197\text{kgf}$
压力	$1\text{kgf/cm}^2 = 98066.5\text{Pa}$	$1\text{MPa} = 10.197\text{kgf/cm}^2$
热量	$1\text{kcal} = 4.1868\text{kJ}$	$1\text{kJ} = 0.2388\text{kcal}$
机械功	$1\text{kgf} \cdot \text{m} = 9.80665\text{J}$	$1\text{J} = 0.10197\text{kgf} \cdot \text{m}$
电功	$1\text{kW} \cdot \text{h} = 3600\text{kJ}$	$1\text{kJ} = \frac{1}{3600}\text{kW} \cdot \text{h}$
功率	$1\text{kcal/h} = 1.163\text{W}$ $1\text{kgf} \cdot \text{m/s} = 9.80665\text{W}$	$1\text{kW} = 860\text{kcal/h}$ $1\text{W} = 0.10197\text{kgf} \cdot \text{m/s}$
导热系数	$1\text{kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ $= 1.163\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	$1\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ $= 0.86\text{kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$

续表

对流换热系数	$1\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ $= 1.163\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$1\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ $= 0.86\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$
传热系数	$1\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ $= 1.163\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$1\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ $= 0.86\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$
热阻	$1\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$ $= 0.86\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$	$1\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ $= 1.163\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$
热流密度	$1\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ $= 1.163\text{W}/\text{m}^2$	$1\text{W}/\text{m}^2$ $= 0.86\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
温度差	$1^\circ\text{C} = 1\text{K}$	$1\text{K} = 1^\circ\text{C}$

习 题

1-1 举出在生活或生产中三种换热方式的实例。

1-2 如图 1-2 所示, 封闭夹层中充满流体。顶与底的温度分别为 t_1 与 t_2 , (a) 与 (b) 的换热情况有无区别? 属何种换热方式? 欲测流体的纯导热系数, 宜采用哪种加热方式?

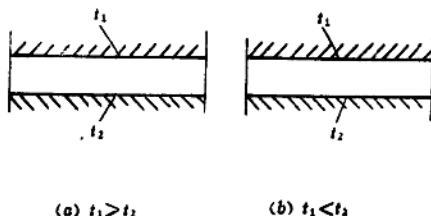


图 1-2 题 1-2 附图

1-3 一高温工件置在车间地面上。试指出工件与哪些方面发生何种换热?

1-4 冬、夏二季室内气温皆为 20°C 。试问为什么夏季穿单衣舒服, 而冬季要穿毛衣才觉得舒服?