

熱 學

北京師範學院物理系

目 录

第一章 温度和热量

- § 1. 温度-----
- § 2. 热量、比热-----
- § 3. 传热的三种基本方式-----

第二章 分子热运动的基本概念

- § 1. 物质由分子原子组成----- 21
- § 2. 分子的热运动----- 21
- § 3. 分子力----- 31
- § 4. 固体、液体、气体的分子运动----- 33

第三章 气体的性质

- § 1. 气体压强的测量----- 38
- § 2. 气体的状态方程----- 43
- § 3. 用气体分子运动论说明气体的压强--- 55

第四章 液体的性质

- § 1. 液体的压强----- 62
- § 2. 液体的浮力----- 70
- § 3. 液体的表面现象----- 74

第五章 固体的性质

§ 1. 固体的热膨胀	79
§ 2. 晶体和非晶体	86
§ 3. 晶体的空间点阵	88
§ 4. 固体中的扩散	92

第六章 物态变化

§ 1. 熔解和凝固	98
§ 2. 蒸发、饱和气	103
§ 3. 沸腾和凝结	111

第七章 热力学的物理基础

§ 1. 热力学第一定律	120
§ 2. 热力学第一定律对于理想气体的 等值过程的应用	123
§ 3. 卡诺循环, 热机的效率	126
§ 4. 热力学第二定律	130
§ 5. 热力学第二定律的统计意义	131

热学基础

热现象一般地是指和温度有关的现象。大自然中气温的变化、风雪雨露的生成都是热现象。在工业生产科学实验中也大量地存在着各种热现象。零件的加热，材料的提纯，金属的熔化和化工产品的制取，热机的运转……等等的过程中无不存在着热现象。因此，关于热现象的基本规律也是我们必备的基础知识的一部分。

本篇一开始先介绍最基本的概念：温度和热量，然后就介绍物质热运动的本质——分子运动的基本概念。接着分别介绍一些工程技术中常用的气体、液体和固体的基本性质，最后讲一下有关三态转化的基本规律。

第一章 温度和热量

本章要介绍温度和它的测量方法，热量和它的计算方法。这些都是关于热现象的最普遍的基础知识。热现象是物质热运动的表现。热量的传递本质上是物质热运动能量的传递，物质的热运动和机械运动是可以相互转化的，它们的数量关系用热功当量来表示。这些在本章内都有简要说明。最后，在本章内还要简单介绍一下在物体之间传递热量的三种基本方式。

§ 1 温度

一、温度

温度是指物体冷热的程度。在自然界，很多物理现象都和温度有密切关系。如在冬天，气温下降到一定程度，水就要结冰。在工业生产上更是要注意温度的高低。例如，零件的热处理就要求严格控制加热的温度（一般都用恒温加热炉）。在火力发电厂中，也要严格控制蒸汽的温度。化



图 1-1 水银温度计

工产品的生产和温度的高低有直接关系。许多材料的性能也无不与温度有关；等等。总之，在工业生产和科学实验中，都经常需要测量温度、控制温度。

温度的高低不能只凭人的感觉去判断，必须进行科学的测量。

测量温度的仪器叫做温度计。

最常用的温度计是水银温度计（图1.1）。它是利用水银热胀冷缩的性质来测量温度的。主要部分是一根内径很小而且很均匀的玻璃管，管的下端接一个玻璃泡。水银就装在玻璃泡内和细管的下部。细管上部是真空。玻璃管外附有刻度。随着温度的变化，水银的体积会膨胀或收缩，细管内水银面的位置也会随着变化。水银面所达到的刻度就指示出温度的数值。

还有一种常用的酒精温度计和水银温度计具有相同的构造和原理，只是用酒精代替水银来显示温度的高低。为了看得清楚起见常在酒精中加入红颜料。

用温度计测量温度是根据这样一条基本的实验规律：把两个温度不同的物体放在一起，经过一定的时间，它们会达到相同的温度。把温度计放到待测温度处，它最后也会变得和周围物体的温度相同。这时温度计指示的温度也就是待测的温度。由此可知，使用水银温度计时，应该把它的玻璃泡放到待测温度处，并且要过一会儿等它和周围的温度相同时，再读出温度的数值。

二、摄氏温标与绝对温标

温度计的刻度是怎么标定的呢？最常用的标定的方法如下。在标准大气压下，先把温度计的玻璃泡插入冰和水的混合物中，待水银面稳定后，刻下水银面的位置，记作0度（图1.2甲）。再把温度计的玻璃泡插入正在沸腾的水里，刻下这时水银面的位置记作100度（图1.2乙）。然后在0度和100度之间划分成相等的一百分，每一等分就叫1度。还可以用同样分度的大小继续标出0度以下和100度以上的温度。这种标定温度的方法叫做摄氏温标，也就是国际百度温标。用摄氏温标表示温度的时候，在数字后面写一个

字母C，“度”用小圆代替。例如，在标准大气压下的水的结冰温度记作 0°C ，沸腾温度记作 100°C ，铁的熔解温度记作 1535°C 等。比 0°C 还要低的温度读作“零下”多少度或“负”多少度，例如北京地区冬季气温有时可下降到 20°C （或负 20°C ，记作 -20°C ）。

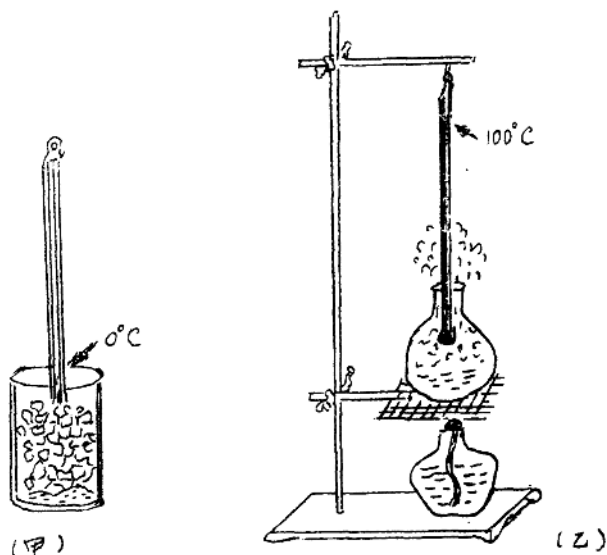


图 1.2 摄氏温标定义法

在生产、科学实验和热学理论中，还常用到另一种温标，叫做绝对温标，用字母K表示。这种温标的每一度的大小和摄氏温标的一度相等（也是把水的结冰温度到沸腾温度之间分成一百个等分，每一等分叫1度），但起算点不同。绝对温标不是以水的结冰温度为零点，而是以 -273.15°C 为零度，叫做绝对零度。

同一温度可用摄氏温标表示，也可以用绝对温标表示。例如水的结冰温度是 0°C ，也就是 273.15 K ；沸腾温度是 100°C ，也就是 373.15 K 。（图 1.3）通常用小写字母 t 代表摄氏温度的数值，大写字母 T 代表绝对温度的数值。对于同一个温度，两种温标的数值之间有如下的关系：

$$T = 273.15 + t \quad (1.1)$$

在不需要很精确的情况下，一般就认为绝对温度的数值比摄氏温度的数值大 273 度。例如，我们说水银的凝固温度是 -39°C ，也就是 234°K ，等。

既然绝对温标和摄氏温标每一度都表示同样的温度差，它们只是零点定得不一样，那么，为什么要采用绝对温标呢？这在第三章 §2 有简略的说明。

〔注〕

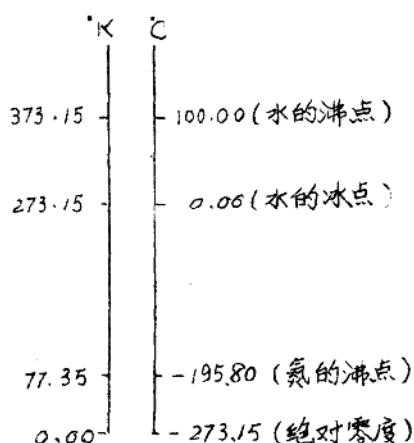


图 1.3 摄氏温标和绝对温标的对应关系

三、几种常用温度计

水银温度计和酒精温度计是利用水银和酒精的热胀冷缩的性质制成的。实际上，温度的变化不仅会引起物体体积的变化，而且还会引起其他物理性质的变化，如金属的电阻、热电偶的热电势、气体的压强、加热后物体的颜色等都随温度而变化。这些变化中的任何一种都可以利用来反映温度的高低，因而做成了各种不同的温度计。

水银温度计和酒精温度计的优点是构造简单，价格便宜，使用方便。它们的缺点是测温范围有限（在标准大气压下水银冷到 -39°C ）

〔注〕除了摄氏温标和绝对温标外，英美等国还用一种华氏温标，以字母 F 表示。它的标度法是：规定在标准大气压下水的结冰温度是 32°F ，沸点温度是 212°F ，中间划分 180 等分，每一等分叫做华氏 1 度。华氏温度和摄氏温度的关系如下：

$$\text{摄氏温度数值} = \frac{\text{华氏温度数值} - 32}{1.8}$$

就要凝固，热到 357°C 就要沸腾；而酒精热到 78°C 就要沸腾，冷到 -114°C 也要凝固），而且不好遥测（在远处测量），不好对温度进行自动记录与自动控制。

在工业技术中最常用的温度计还有热电偶温度计和电阻温度计。

热电偶温度计是利用热电偶的温差电动势随温度变化的性质来测量温度的。

热电偶温度计的优点是：能测量的温度范围广；它的焊点可以作得很小，可测量很小空间中的温度或逐点测量各点的温度，并且因焊点小，可以很快和被测处达到相同的温度，因而能够迅速地反映被测处温度的变化情况；同时由于热电偶把温度的变化变成了电压的变化，因而配合适当装置就可以用于温度的遥测、自动记录和控制等。

常用的几种热电偶的一般性质如表 1.1 所示。使用时可根据不同的温度范围选用合适的热电偶。

表 1.1 几种热电偶的一般性质

热电偶材料	长期使用测温范围	短期可测温度	热电势(平均值)
铂铑—铂	$-20^{\circ}\text{C} - 1300^{\circ}\text{C}$	1600°C	~ 0.009 毫伏/度
镍铬—镍铝	$-50^{\circ}\text{C} - 1000^{\circ}\text{C}$	1300°C	~ 0.041 毫伏/度
镍铬—考铜	$-50^{\circ}\text{C} - 600^{\circ}\text{C}$	800°C	~ 0.078 毫伏/度
铜—康铜	$-100^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$	500°C	~ 0.042 毫伏/度

电阻温度计是利用金属的电阻随温度变化的性质来测量温度的。常用的金属丝是铜丝，镍丝或铂丝。

电阻温度计的优点是：可以作得很精密，也可以用于温度的遥测、自动记录和控制等。

几种电阻丝通常在如下的温度范围内使用：

铂丝: $-200^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$

铜丝: $-50^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$

镍丝: $-50^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$

除了用金属丝作的电阻温度计外,还有半导体电阻温度计.它也是利用了电阻随温度而变化的性质.不同的是,半导体的电阻是随温度的升高而减小的.

习 题

1. 锡的熔化温度是 338.0°C , 铁的熔化温度是 1530°C , 二氧化碳气体变成液体的温度是 -65°C , 试用绝对温标表示这些温度.

2. 氧在 90.19°K 时变成液体, 在 54.86°K 时变成固体. 氯气在 4.26°K 时变成液体, 在 1.16°K 变成固体. 试用摄氏温标表示这些温度.

3. 用一个温度计能测量另一物体的温度是根据什么规律? 各种温度计是利用了物体的那些性质测量温度的?

4. 试比较水银温度计、酒精温度计、热电偶温度计及电阻温度计的测温范围.

§ 2 热量 比热

一、热量

在日常生活和工业生产中,常常需要改变物体的温度.最常用的方法就是给它加热.如要烧开水,就把水壶放在炉子上加热.水的温度升高是因为它吸收了炉子传给它的热.如果水壶中水的质量不同,使水升高的温度不同,那么,加热的时间就不同.这说明在不同的情况下,炉子传给水的热的多少不同.所传热的多少叫热量.

计算热量的单位常用[大卡](或叫[千卡]).1大卡是使1公斤水温度升高 1°C 所需要的热量.

1 大卡的千分之一叫 1 [卡]。1 [卡] 也就是使 1 克水温度升高 1°C 所需要的热量。

物体温度降低时，它要向外放出热量。例如一杯水，放在桌子上慢慢冷下来，是由于它把热量放出来传给了周围的空气等。钢制零件淬火时，温度骤然降低是由于零件放入油或水中后，把热量急速地传给了油或水的缘故。

1 公斤水的温度降低 1°C 时，放出的热量也是一大卡。

要把温度和热量这两个概念区别开。温度说明物体所处的状态，是指它当时的“冷热程度”。例如我们说：水沸腾时的温度是 100°C ，是讲水在这时的情况。但是，不能用热量来说明物体的状态，只能说明物体状态发生变化时（在温度改变时）它吸收或放出多少热量。从能量转化的观点看，科学已经证明：传递热量的过程（包括吸热和放热）本质上是物体之间由于温度的不同而传递能量的过程，而热量就是在这个过程中由高温物体向低温物体所传递的能量的多少。例如，一公斤水从 100°C 降到 80°C 放出 20 大卡的热量，实质上是说它把 20 大卡的能量传给了它周围温度较低的物体（关于热和功的关系，本节后面还要讲）。

练习题 20 公斤水从 20°C 升高到 80°C 需要吸收多少热量？

二、燃烧值

最常用的取得热量的方法是燃烧木柴、汽油、煤等燃料。各种燃料燃烧时放出的热量不同。如烧一公斤汽油就比烧一公斤木柴放出的热量大得多。

一公斤燃料完全燃烧时所放出的热量叫做这种燃料的燃烧值（又叫发热量），单位是 [大卡 / 公斤]。燃烧值是表明燃料优劣的一个重要指标。在设计和使用各种锅炉、蒸汽机或内燃机时都需要知道所使用燃料的燃烧值。几种常用燃料的燃烧值如下表

表 1.2 常用燃料的燃烧值

燃料	燃烧值(大卡/公斤)	燃料	燃烧值(大卡/公斤)
干木柴	3000	酒精	7200
褐煤	4000	柴油	10200
标准煤	7000	汽油	11000
无烟煤	8000	铀	$\approx 1.9 \times 10^{10}$

二. 比热 热容量

当我们给物体加热以改变物体的温度时, 常常需要进行热量的计算. 物体吸收的热量决定于什么因素呢?

经验告诉我们, 物体的温度升高得越多, 它所需要吸收的热量也越多. 物体吸收的热量和它的温度的升高成正比.

烧开水时小壶开得快, 大壶开得慢. 这说明要升高相同的温度, 质量大的水吸收的热量多. 物体吸收的热量和物体的质量成正比.

把质量相同的不同的物质加热, 例如把 0.2 公斤的水和 0.2 公斤的油分别倒入烧杯内在相同的酒精灯上加热, 就会看到, 使它们升高相同的温度, 水需要的时间比油的长些, 即水吸收的热量比油吸收的多些. 这说明, 质量相同的物质升高相同的温度时所吸收的热量和物质的种类有关.

综上所述, 在计算物体吸收的热量时, 必须把温度升高的多少、物体质量的大小以及是什么物质等这些因素都考虑在内. 正是因为这样, 我们引入“比热”这个物理量.

1 公斤物质温度升高 1°C 时所吸收的热量叫做这种物质的比热. 常用小写字母 c 来表示比热, 它的常用单位有 [大卡/公斤·度] 和 [卡/克·度]. 同一物质的比热用这两种单位表示时, 数值是

一样的。

铁的比热是 0.11 大卡 / 公斤 · 度，就表示 1 公斤的铁的温度升高 1°C 时所吸收的热量是 0.11 大卡。水的比热是 1 大卡 / 公斤 · 度。

实验证明，1 公斤的物质温度降低 1°C 所放出的热量的数值也等于比热的数值。例如 1 公斤铁温度降低 1°C 放出的热量是 0.11 大卡。

许多种物质的比热已通过实验测定，记在有关手册中以备查用。下表列出常见的几种物质的比热。

表 1.3 几种物质的比热 (大卡 / 公斤 · 度或卡 / 克度)

氢 (压强不变)	3.41	空气 (压强不变)	0.24	铜	0.093
氮 (" " ")	1.25	混凝土	0.21	银	0.055
酒精	0.58	铝	0.21	汞	0.033
乙醚	0.56	玻璃	0.15 — 0.21	铂	0.032
冰	0.5	铁	0.11	铅	0.031

同一种物质的比热也不是固定不变的。例如，比热和温度就有关系。铝在 0°C 附近时比热是 0.208 大卡 / 公斤 · 度，在 600°C 附近时比热就变为 0.277 大卡 / 公斤 · 度。

技术中还常用到热容量这个概念。一个物体温度升高 1°C 所吸收的热量叫做这个物体的热容量。它的单位是 (大卡 / 度)。两个物体相比，吸收相同的热量时，热容量大的物体升高的温度少，而热容量小的物体升高的温度多。热容量越小，它的温度就越容易改变。

以 m 表示一个物体的质量，以 c 表示比热，以大写字母 C 表示这个物体的热容量，则

$$C = cm$$

(1.2)

如果取1〔克分子〕的物体，使 μ 表示物体的克分子量，则每1〔克分子〕物体，升高 1°C 时所需要的热量称为物体的分子热容量以 $C_{\text{分}}$ 表示则

$$C_{\text{分}} = \mu C$$

热
学
教
材
(二)

对于一定量的气体，在吸收热量时可能有不同的情况（体积不变或压强不变）升高相同的温度所需要的热量可能不同，所以就有不同的热容量一定容热容量和定压热容量。以符号 C_v 和 C_p 来表示，在等容变化过程中吸收的热量全部转化为气体的内能，而在等压变化过程中吸收的热量除转化为气体的内能外还需要一部分热能为反抗外力而作功，所以等压热容量要比等容热容量大些。即 $C_p > C_v$ 。

对固体和液体这两种热容量也应有所不同，由于它们的体积变化很小，所以实际的差别可以忽略不计。

四. 物体温度改变时吸热或放热的计算 热量平衡

我们用下述例子说明如何计算物体温度升高时所吸收的热量。

〔例〕求质量是25公斤的钢坯温度由 20°C 升高到 500°C 时所吸收的热量。已知钢的比热是0.12大卡/公斤·度。

解：根据比热的定义可知

1公斤的钢温度升高 1°C 时所吸收的热量是0.12大卡，那末，25公斤的钢坯温度升高 1°C 时所吸收的热量就是0.12大卡的25倍，即

$$0.12 \times 25 = 3.0 \text{ 大卡/度}$$

现在升高的温度不是 1°C ，而是 $500 - 20 = 480$ 度，因此所吸收的热量也应该是3.0大卡的480倍，即

$$3.0 \text{ 大卡/度} \times 480 \text{ 度} = 1.44 \times 10^3 \text{ 大卡}$$

一般地说，以 C 表示比热，以 m 表示物体的质量，以 t_1 和 t_2 分别表示物体起始和终了的温度，则这个物体由 t_1 升高到 t_2 的过程中所吸收的热量 Q 应该等于

$$Q = cm(t_2 - t_1) \quad (1.3)$$

这是计算热量的一个重要公式。(当 c 的单位是“卡/克·度”时 m 的单位应该用“克”，而所得 Q 的单位就是“卡”)。

物体温度降低时放出的热量也可以用这个公式计算。不过此时 $(t_2 - t_1)$ 应该换成物体温度降低的度数。

在上一节我们已讲过，两个(或几个)温度不同的物体放在一起，它们的温度最后会变得相同。这实际上是在它们之间发生热量传递的结果。高温物体放出热量后温度降低，低温物体吸收热量后温度升高。这种热量传递要一直进行到各物体的温度相同时为止。物体之间放出或吸收的热量有什么关系呢？大量的实验指出：高温物体放出的热量等于低温物体吸收的热量。这个关系叫做热量平衡。这是一条关于热量传递的基本规律。在分析许多热现象时都要用到它。

由于传递热量的过程本质上是一种传递能量的过程，所以热量平衡实质上就是热现象中的能量守恒的一种表现。

(例) 一种粗略测定比热的方法如下：把质量 $m = 0.5$ 公斤的碎铜片加热到 $t_3 = 100^\circ\text{C}$ ，然后把它投入装有 $m_2 = 0.4$ 公斤水的容口内。若预先测得水的初温度是 $t_1 = 15^\circ\text{C}$ ，投入铜片后水温升高到 $t_2 = 23.4^\circ\text{C}$ 而停止，试求铜的比热。

解：铜片进入水中后，它们之间就交换热量。铜片放出热量，水吸收热量。这种热量交换一直进行到它们温度相同时为止。因此，水的最终温度 $t_2 = 23.4^\circ\text{C}$ 也就是铜片最终的温度。由公式(1.3)可知，水吸收的热量

$$\begin{aligned} Q_1 &= c_{\text{水}} m_2 (t_2 - t_1) = 1 \text{ 大卡/公斤度} \times 0.4 \text{ 公斤} \times (23.3 - 15)^\circ\text{C} \\ &= 3.36 \text{ 大卡} \end{aligned}$$

铜放出的热量为

$$\begin{aligned} Q_2 &= cm_1(t_3 - t_2) = c \text{ 大卡/公斤度} \times 0.5 \text{ 公斤} \times (100 - 23.4)^\circ\text{C} \\ &= 38.30 \text{ 大卡} \end{aligned}$$

根据热量平衡,

$$Q_1 = Q_2$$

$$3.36 = 38.3c$$

由此得出铜的比热

$$c = \frac{3.36}{38.3} = 0.09 \text{ 大卡/公斤} \cdot \text{度}$$

严格说来, Q_1 不等于 Q_2 . 因为铜片放出的热量除了被水吸收外, 还有一部分被装水的容器以及周围的空气所吸收. 但由于这些“散失”的热量较小, 在粗略计算比热时就忽略不计了. 在精确地测定比热时必须考虑它们的.

五. 热功当量

要改变物体温度, 最常用的一种方法是加热. 而早在十多万年前, 人类就知道了另外一种方法——摩擦生热. 我们知道, 光驱摩擦运动时是要消耗机械功的. 摩擦生热的事实说明机械功可以转化为热量.

热量转化为机械功的过程, 人类在生产斗争和科学实验中也实现了. 现在工业广泛使用的蒸汽机内燃机等都是利用燃料燃烧时放出的热量来作机械功的.

大量的科学实验还证明: 热量和机械功相互转化时它们在数量上有一定的关系, 即

$$1 \text{ 大卡热量} = 4.18 \text{ 千焦耳的功} \quad (1.4)$$

或 $1 \text{ 卡热量} = 4.18 \text{ 焦耳的功}$

这就是说在相互转化的过程中, 1 大卡热量消失时, 必产生 4.18 千焦耳的功; 相反的, 消耗 4.18 千焦耳的功, 必产生 1 大卡的热量.

4.18 千焦耳/大卡 (或 4.18 焦耳/卡) 叫做热功当量.

热和功相互转化说明了热运动和机械运动的相互联系和转化。热功当量表明了机械运动能量和热运动能量相互转化的数量关系，它充分说明了传递热量本质上是传递能量的过程。在科学发展史上，热功当量的测定对确立普遍的能量转化与守恒定律曾起过十分重要的作用。

习 题

1. 测量温度时，温度计的感温部分（如水银温度计的玻泡，热电偶温度计的焊点）和被测物体接触，它就从被测物体吸收热量而升温，升到与被测温度相同时，就能读出其温度数值。如果希望连续地测定被测物体温度的变化，要求温度计的感温部分的热容量大些还是小些，为什么？

2. 把一个5公斤的钢铸件退火时，先把它加热到 600°C ，然后再使它慢慢地冷却到 20°C ，求它在冷却过程中向外放出了多少热量。（钢的比热为 0.12 大卡/公斤·度）

3. 汽轮机受热部分由铸钢制成，质量为30吨。为了使汽轮机正常运行，需要在汽轮机启动前慢慢地加热进行暖机，若暖机前为 25°C ，暖机以后汽轮机的平均温度为 250°C ，求暖机时至少需要多少热量？

4. 把1.5公斤 85°C 的热水倒入3公斤 10°C 的冷水中，混合后的温度是多少？（散失的热量忽略不计）

5. 证明：(1) 1 大卡 $=427$ 公斤力米；(2) 1 焦耳 $=0.24$ 卡。

6. 某柴油机每小时消耗柴油195公斤，柴油燃烧发出的热量有30%变成了机械功。求这个柴油机每小时能作多少公斤力米的功？

7. 在热工和电工中，常用“瓩小时”作功的单位。 1 瓩 $=102$ 公斤力米/秒，试证明：

$$1 \text{ 瓩小时} = 860 \text{ 大卡}$$

8. 某发电机的输入功率是12000匹, 其中46.8%发电, 3.2%变为热量散失, 它每小时散失的热量是多少大卡? 若此发电机用空气冷却(风冷), 进入发电机的风温为 20°C , 出来的风温要求不超过 75°C , 问维持发电机正常运行需要供给的冷却风量至少要每小时多少立方米? (已知空气的比热为0.24大卡/公斤度, 空气的密度为1.293公斤/米³)

§ 3 传热的三种基本方式

大功率的晶体管(例如二极管和可控硅)都要安装在如图1.4所示的用铝制成的底座上, 而且在旁边还要安装一个电风扇. 这是要解决什么问题? 为什么底座要做成这种形状? 电风扇起什么作用?

在工业生产中, 常常需要研究在各种加热炉、冷却器、热交换器中热量是如何传递的. 在实际问题中, 传热过程都比较复杂. 但是, 对实验结果的分析指出, 各种传热过程都可以看成是三种基本的传热方式的组合. 这三种基本的传热方式就是: 热传导、对流和辐射.

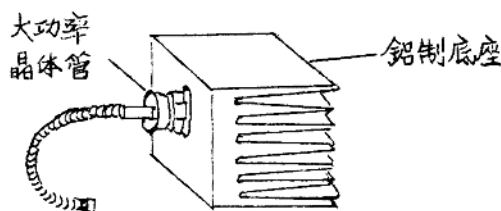


图1.4 大功率晶体管外形

一. 热传导

把铁棍的一端插入炉中. 过不久, 手拿的这一端就会感到热起来了. 这就说明热量经过铁棍传了过来. 这种热量从物体的一部分传到另一部分, 或从一个物体传到和它接触的另一个物体的传热方