

合金热力学

理论及其应用

翟启杰 关绍康 商全义 编著

冶金工业出版社

内容简介

本书共分 9 章,包括:绪论、热力学基础、溶液、相图热力学、相变热力学、界面热力学、熵与结构、焓与结构以及非平衡态热力学和耗散结构简介等。

本书可供铸造、金属塑性加工和焊接等材料加工类的科研人员和工程技术人员阅读,也可供大专院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

合金热力学理论及其应用/翟启杰等编著. —北京
冶金工业出版社,1999. 8

ISBN 7-5024-2384-2

I. 合… II. 翟… III. 合金-金属学:热力学
N. TG111. 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 45220 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 张登科 美术编辑 王耀忠 责任校对 栾雅谦 责任印制 牛晓波
北京源海印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1999 年 8 月第 1 版, 1999 年 8 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 5.875 印张; 156 千字; 180 页; 1-1500 册

14.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64013877

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

合金热力学是金属材料研究的重要基础,能熟练应用合金热力学理论来分析和解决问题,是材料科学与工程专业研究人员应该具有的能力和素质。因此,无论是大学教育还是研究生教育均对该方面能力的培养给予了足够的重视。但是,需要注意的是,这一重要的基础理论在材料科学与工程研究中的应用却显不足,在铸造、金属塑性加工和焊接等材料加工类学科研究中的应用则更少。近 10 年来,我们将这门重要的基础理论运用到我们所从事的研究中,取得了一定的进展,在研究工作中,我们深深感到合金热力学的伟大力量和无限深奥,同时也感到我们在这方面知识的浅薄。

本书采用理论与应用相结合的方式,简要介绍了合金热力学的基本理论及其应用,其中包括作者近年来获得的一些研究成果。考虑到合金热力学的发展,本书还简要地介绍了非平衡热力学、耗散结构的基本概念和基本理论。我们愿以此书抛砖引玉,为推动合金热力学在我国材料研究中的应用做出一点贡献。

全书共分 9 章,第 1 章、第 3 章的第 1~5 节由翟启杰编写,第 3 章第 6 节由朱玉龙、翟启杰共同编写,第 5 章第 7 节由于艳、翟启杰共同编写,第 5 章第 8 节由曾奇、翟启杰共同编写,第 5 章第 9 节由刘国均、翟启杰共同编写,第 5 章的第 1~6 节、第 6 章和第 9 章由关绍康编写,第 2 章、第 4 章、第 7 章和第 8 章由商全义编写。全书由翟启杰统稿。

胡汉起教授和宋波博士分别审阅了本书的初稿,提出了不少中肯的意见,在此表示衷心的感谢。

另外,借此机会,我们要特别感谢长期以来对我们的工作给予指导和帮助的前辈和同事,特别要感谢胡汉起教授、沈宁福教授、安阁英教授、韩其勇教授、熊楚强教授、宋波博士、范鹏博士等。

本书受编著者水平所限,疏漏和不妥之处难免,敬请读者批评指正。

作 者

1999 年 4 月

目 录

1 绪论	1
2 热力学基础	4
2.1 热力学第零定律——温度和压力的关系	4
2.2 热力学第一定律——能量关系	10
2.3 热力学第二定律——过程方向	15
2.4 功函和自由能	18
2.5 热力学第三定律——熵值计算	22
3 溶液	24
3.1 偏摩尔量	24
3.2 化学位与相平衡	26
3.3 拉乌尔定律和亨利定律——溶液的蒸气压	28
3.4 理想稀溶液、理想溶液、活度	30
3.5 规则溶液	34
3.6 热力学溶液理论在 Fe-C-M 合金研究中的应用	35
4 相图热力学	47
4.1 相图与 $\Delta_{\text{mix}}G_{\text{m}}-x_B$ 图、 a_B-x_B 图的关系	47
4.2 应用 $\Delta_{\text{mix}}G_{\text{m}}-x_B$ 图绘制相图	51
4.3 计算平衡相的活度并绘制相图	56
4.4 计算平衡相的组成并绘制相图	59
4.5 铁碳相图	66
5 相变热力学	72
5.1 金属的组织结构特点	72
5.2 新相的形成	73
5.3 凝固热力学	78
5.4 脱溶分解	86
5.5 增幅分解	88
5.6 先共析固溶体的沉淀	90

5.7	热力学理论在生核处理研究中的应用	92
5.8	铸铁的一次结晶	103
5.9	铸铁的二次结晶及组织	114
6	界面热力学	122
6.1	金属的表面张力	122
6.2	金属的液固界面张力及润湿现象	128
6.3	金属的晶界能	136
6.4	金属表面的吸附	142
7	熵与结构	149
7.1	置换固溶体和空位固溶体的组态熵	149
7.2	间隙固溶体 α -Fe-C 系的组态熵	151
7.3	有序固溶体的组态熵	152
8	焓与结构	155
8.1	结合键及晶体的类型	155
8.2	结合力与结合能	159
8.3	元素的电负性——化学亲合力因素	161
8.4	准化学处理——二元置换固溶体的固溶度	162
9	非平衡态热力学和耗散结构简介	167
9.1	热力学的发展概况	167
9.2	非平衡态热力学的一些基本概念	168
9.3	耗散结构	172
9.4	非平衡态相变及其应用	176
	参考文献	180

1 绪 论

把数量不等的金属元素合在一起，就形成了合金。其中含量最多的元素叫做基元素，其余元素叫做合金元素或杂质。比如，钢和铸铁是铁基合金，其中铁是基元素，碳是合金元素，而硫磷等是杂质元素。随着对合金使用性能要求的不同，合金元素和杂质可以互相转化。

作为一种重要的工程材料，合金有四个重要的概念和共性问题：性能、结构、过程和能量。

性能是材料的一种参量，用于表征材料在给定外界条件下的行为，它是随着材料的内因和外因而改变的。对于合金而言，当外界条件一定时，其性能取决于合金的内部结构。

结构是指组成合金的粒子种类、数量以及它们在运动中的排列方式。习惯上我们把前两者叫做成分，后者叫做组织结构。在从能量的角度研究合金的合金热力学这门学科时，我们把合金的成分、组织、结构这三者统称为结构。

事实上，近代科学技术的发展已经打破了组织与结构的界限。过去人们把可以借助于某种仪器直接观察到的形貌称为组织，而把通过仪器测定后推测得到的原子排列方式称为结构。随着电子显微技术的进步，目前人们已经可以运用高分辨的电子显微镜或场离子显微镜直接观察结构，因此已经没有必要再区分组织和结构了。

事物由一种状态到达另一种状态需要经历一种或一系列过程。对于过程而言，有三个重要的问题：方向、途径、结果。这三个问题遵循着三条原理：

(1)方向——沿着能量降低的方向发生；

(2)途径——沿着阻力最小的途径进行；

(3)结果——过程的结果是适者生存。

即所谓：能量降低、捷足先登、适者生存。

能量的概念是在力学中提出的，它表征把物体由一种状态改变为另一种状态需要做的功，即所消耗的能。在力学中能量转化和守恒已早为大家所熟知。合金中各种结构的形成及各种过程的变化都涉及到能量的变化，能量决定着合金结构的稳定性。如图 1-1 所示，我们可以从能量的观点理解合金结构的稳定性。

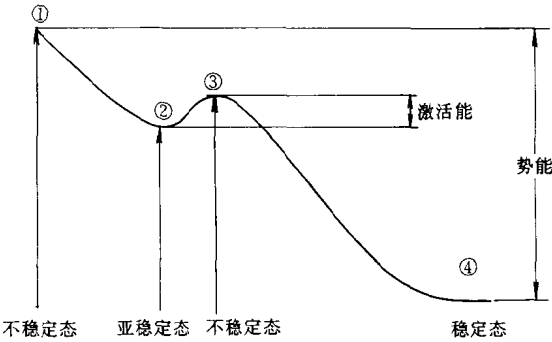
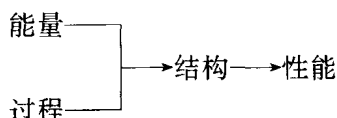


图 1-1 状态稳定性示意图

首先，我们把图 1-1 看作一个小球由高处滚落而下，在①处小球可以自发地滚落到②处，但是，虽然小球在②处的势能高于④处，但是小球却不能自发地由②处滚到④处，而首先必须有能力越过③处所产生的能垒。克服能垒所要求的能量我们称作激活能。如果②处的小球具有这样的能量，便会由②处越过③处而到达④处，否则，小球只能停留在亚稳定的②处。小球的激活能可以由外界提供，也可以由它在①处时的势能转化而来，小球到达③处后，便可以自发地到达④处。由此可见，对于小球来说，②处是亚稳态，①和③处都是不稳态，只有④处是稳定态。小球最有可能的位置是④处，②处也有存在的可能，但是绝对不会在①处和③处停留。如果把小球视为晶体中的原子，则不难理解原子在晶体中的运动及其能量关系。从能量的角度看问题，晶体中的微观世界和我们所通晓的宏观力学是何等相似。

前面我们介绍了性能、结构、过程和能量四个概念，在这四个概念中，性能决定于结构，而结构决定于能量和过程，即：



因此，研究合金，从形式和目的看，是研究合金的结构和性能，而从根本上讲是研究合金的能量和过程，这就是合金热力学所要解决的问题，也是这门学科的意义所在。

合金热力学应用了热学两方面的理论——热力学和统计物理学。热力学是现象理论，它所依据的是从无数经验中总结出的三个定律，然后依此演绎出许多描述物质平衡性质的关系式。热力学的优点是高度的可靠性和应用的普遍性，但它不考虑物质的结构，不能给出物质结构的具体知识。统计物理学正好弥补了热力学的这个缺点，它从体系的具体结构去计算热力学函数。

将合金热力学应用到材料研究中，可以帮助我们认识材料组织的形成和转变的规律和机制，而编著本书的主要目的是帮助读者掌握热力学原理和将热力学原理应用到材料研究中的方法。

基于上述目的，本书在热力学原理的介绍上，力求通俗易懂，考虑到工科院校学生基础知识结构特点，本书以热力学为主线，首先简要地回顾一下热力学的基础知识，在此基础上着重介绍与金属材料密切相关的溶液热力学、相图热力学、相变热力学、界面热力学以及结构热力学。考虑到材料的实际制备过程是非平衡过程，为帮助读者了解平衡热力学的局限性，建立非平衡热力学的思想，本书在最后1章中对非平衡热力学做了简要的介绍。本书在一些章节中安排了一定的篇幅，介绍合金热力学在材料研究中应用的实例，这部分内容大多来自于作者和作者指导的研究生们从事的研究工作，其中有些内容可能不很成熟，希望以此抛砖引玉，帮助读者架起连接合金热力学与材料研究的桥梁。

2 热力学基础

热力学的有关基本概念和基本定律是合金热力学的基础，为帮助读者更好地掌握本书的内容，首先简要回顾一下热力学基本概念和基本定律。

2.1 热力学第零定律——温度和压力的关系

2.1.1 热平衡及热力学第零定律

物体的冷热程度叫做温度。通常我们用摄氏温度来表示温度，并规定在一个大气压下纯水的冰点是 0°C ，沸点是 100°C 。

冷热不同的物体相接触，它们的温度就会逐渐接近，最后达到一致，这就是所谓的热平衡。这个自然界里常见的规律在热力学里是一个十分重要的定律——热力学第零定律：一切互为热平衡的物体具有相同的温度。该定律是研究一切热现象的基础。

假设有 A 和 B 两个物体，二者的温度分别为 t_1 和 t_2 ，如果 $t_1 > t_2$ ，二者接触时热就会由 A 流向 B，A 的温度就会降低，而 B 的温度就会升高，最后达到平衡温度 t 。设达到热平衡时，A 和 B 之间的热交换量为 Q ，则 A 流向 B 的热量为

$$Q = m_A c_A (t_1 - t) \quad (2-1)$$

B 由 A 得到的热量为

$$Q = m_B c_B (t - t_2) \quad (2-2)$$

式中 m_A 、 m_B ——分别为物体 A 和 B 的质量，

c_A 、 c_B ——分别为物体 A 和 B 的比热容，

t ——热平衡后物体的温度。

合并二式，可得式 2-3，即

$$t = \frac{m_A c_A t_1 + m_B c_B t_2}{m_A c_A + m_B c_B} \quad (2-3)$$

式 2-3 告诉我们两个结论：

(1) 两个温度不同的物体相接触，二者的热平衡温度与二者

的质量、比热容和初始温度有关，如果已知这些参数，其平衡温度可以通过式 2-3 计算出来。

(2) 当 $m_A > m_B$ 时, $t = t_1$ 。这个结论是测量温度的理论基础。温度计可以反映人体的温度是因为人体的质量远远大于温度计的质量。热电偶可以反映一包钢液的温度是因为一包钢液的质量远远大于热电偶的质量。但是，当被测物体的质量较小时，我们就不能忽视测量物体本身对温度的影响。比如，用热电偶测量一个直径不大的石英管里金属液的温度，就需要通过热平衡计算被测金属液本身的温度。

2.1.2 温度与体积的关系（盖·吕萨克定律）

人们都知道热胀冷缩现象，它告诉我们温度对物体的体积有影响。19 世纪有人精确地测量了 O_2 、 H_2 、 CO_2 、空气等气体随温度的体积变化，发现了一个重要的现象：从 $0^\circ C$ 开始，温度每升高 $1^\circ C$ ，气体的体积增加 $1/273$ ，近年更精确地测定为 $1/273.16$ 。由此得出了气体体积与温度的关系为

$$V_t = V_0 + V_0 \frac{t}{273.16} = V_0 \left(1 + \frac{1}{273.16} t \right) \quad (2-4)$$

式中 V_t , V_0 ——分别是 $t^\circ C$ 和 $0^\circ C$ 时气体的体积。

式 2-4 反映了恒压下气体体积与温度的关系，这个关系又叫做盖·吕萨克（Gay-Lussac）定律：恒压下，任何气体温度升高 $1^\circ C$ 所引起的体积膨胀量都等于它们零度时体积的相同分数。由于查理士（Charles）曾获得了相同的结果，这个定律又叫做查理士定律。

由 (2-4) 式知，如果 $t = -273.16^\circ C$ ，则 $V_t = 0$ ，这是不可能的。因此 $-273.16^\circ C$ 是不可能到达的温度，这个温度定义为绝对零度。以绝对零度为起点的温度叫做绝对温度，用 K 表示。热力学上一般都采用绝对温度作为温度单位，它与摄氏温度之间有以下关系

$$T = t + 273.16$$

2.1.3 气体状态方程

由 (2-4) 式可得

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{t + 273.16}{273.16} = \frac{T}{T_0} \quad (2-5)$$

即

$$\frac{V_1}{T} = \frac{V_0}{T_0} = \frac{V}{T} = A(\text{常数}) \quad (2-6)$$

又根据玻意尔 (Boyle) - 马略特 (Marriott) 定律

$$PV = B(\text{常数}) \quad (2-7)$$

将以上二式合并, 分别得

$$V = AT \quad (2-8)$$

$$V = B/P \quad (2-9)$$

体积的变化可以分两步进行: 第一步, 恒温下 V 随 P 变化; 第二步, 恒压下 V 随 T 变化。

第一步, 由 (2-9) 式得

$$\left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T = - \frac{B}{P^2} = - \frac{V}{P} \quad (2-10)$$

第二步, 由 (2-8) 式得

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = A = \frac{V}{T} \quad (2-11)$$

整个体积的变化是这两步变化的和, 即

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T dP + \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P dT \quad (2-12)$$

将 (2-10) 式和 (2-11) 式代入 (2-12) 式得

$$dV = - \frac{V}{P} dP + \frac{V}{T} dT \quad (2-13)$$

或

$$\frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = \frac{dT}{T} \quad (2-14)$$

积分得

$$\ln V + \ln P = \ln T + I$$

即

$$PV = Te^I \quad (2-15)$$

式中 I ——积分常数。

当气体量为 1mol 时, (2-15) 式中的 e^I 用 R 表示, 即

$$PV = RT \quad (2-16)$$

若体积内含有 $n\text{mol}$ 气体, 则

$$PV = nRT \quad (2-17)$$

R 是一个重要的常数, 叫做气体常数, $R=8.314\text{J/K} \cdot \text{mol}$ 。

R 的物理意义是使 1mol 气体的温度变化 1K 所需要的能量。

(2-16) 式和 (2-17) 式反映了气体状态参数 P 、 V 、 T 三者之间的关系, 叫做气体状态方程。根据这个方程, 确定 P 、 V 、 T 三者之间任何两个都可以确定气体的状态。

需要注意的是, 在上述推导中, 我们忽略了气体分子之间的作用, 这种分子之间的作用可以忽略的气体, 我们称作理想气体。因此以上二式又叫做理想气体方程。当压强较大时, 恒温下 PV 之积不再是常数, 而是 P 的函数。在解决实际问题时, 当压强不大时, 我们都将实际气体作为理想气体来处理。

2.1.4 气体的结构、压强方程和能量

根据物质的分子运动模型, 物质结构有两个特点:

(1) 物质是由一些极小的粒子 (原子或分子) 组成的, 同一性质的物质粒子的大小、形状、质量和作用是一样的。

(2) 物质的微粒在不停地运动, 其方向是杂乱的, 在各个方向运动的几率是均等的。

根据这种结构模型, 我们可以这样理解物质的三种状态:

固体——它可以保持形状。因此推论固体中的原子或分子占据一定的平衡位置, 并围绕这个平衡位置作杂乱的振动。

液体——体积不变, 但形状随容器而变。因此推论液体中的原子或分子的结合仍很紧密, 但是没有长久的固定位置, 只是一段时间内每一原子或分子在一定的平衡位置附近振动, 而振动的位置却随时在改变。

气体——体积和形状都随容器而变。因此气体中分子之间相

互作用较小，运动很自由，没有平衡位置。

对于理想气体，进一步地有以下三个假设：

(1)理想气体的分子是完全弹性的小球，在彼此碰撞时动量和能量均守恒。

(2)理想气体的分子体积很小，与它所占据的空间相比可以忽略不计。

(3)理想气体的分子间距很大，它们之间的引力和斥力可忽略不计。

根据上述假设，可以计算容器内气体的压力和能量。以长方体容器为例，如图 2-1 所示的长方体容器，其体积 $V=l_x l_y l_z$ ，共有 N 个同类分子，每一分子的质量为 m 。首先来计算一个分子 α 对容器的压力：

该分子在 x 、 y 、 z 轴上的速度分量分别为 v_x 、 v_y 、 v_z ，由于碰撞是弹性的，分子在与容器的某一面碰撞后其在该方向上的分速度大小不变，方向相反。由此可得它的动量改变为

$$(-mv_x) - (mv_x) = -2mv_x$$

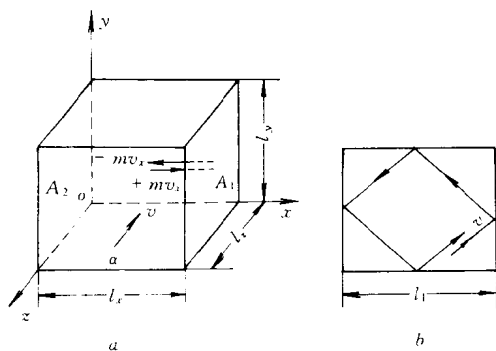


图 2-1 气体压强方程的推导

由图 2-1b 可知，不论该分子朝哪个方向运动，其在 x 方向上所经过的距离总是 $2l_x$ ，所需要的时间为 $2l_x/v_x$ 。根据动量原理，碰撞时分子动量的改变等于容器壁对分子 α 作用的冲量，此力的方

向是 $-X$ 方向。这时,分子对 A_1 面必有相等的反作用力,其方向是 $+X$,这种反作用力就是分子 α 在容器壁上的压力。

对于 N 个分子, A_1 面上所受到的压力应等于单位时间内全部分子与 A_1 面碰撞所引起的动量改变的总和,即

$$F = 2mv_{1x} \frac{v_{1x}}{2l_x} + 2mv_{2x} \frac{v_{2x}}{2l_x} + \cdots + 2mv_{Nx} \frac{v_{Nx}}{2l_x} \quad (2-18)$$

A_1 面所受到的压强为

$$\begin{aligned} P &= \frac{F}{l_y l_z} = \frac{m}{l_x l_y l_z} (v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \cdots + v_{Nx}^2) \\ &= \frac{Nm}{l_x l_y l_z} \left(\frac{v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \cdots + v_{Nx}^2}{N} \right) \\ &= \frac{Nm}{l_x l_y l_z} \bar{v}_x^2 \end{aligned} \quad (2-19)$$

根据假设(2)

$$\bar{v}_x^2 = \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2 = \frac{1}{3} \bar{v}^2 \quad (2-20)$$

而单位体积内的分子数 n 为

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N}{l_x l_y l_z} \quad (2-21)$$

将(2-21)、(2-20)式代入(2-19)式,得

$$P = \frac{nm}{3} \bar{v}^2 \quad (2-22)$$

或

$$P = \frac{2}{3} n \left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2 \right) \quad (2-23)$$

因此,压强正比于单位体积气体分子的平均平移动能。由于 $n = N/V$,代入上式得

$$PV = \frac{2}{3} N \left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2 \right) \quad (2-24)$$

对于 1mol 气体,含有 N_0 个分子,则其总动能为

$$U_k = \frac{1}{2} N_0 m \bar{v}^2 = \frac{1}{2} M \bar{v}^2 \quad (2-25)$$

式中 M ——气体的摩尔质量。

将上式代入 (2-24) 式, 并考虑 1mol 气体, 即 $N=N_0$, 则

$$PV = \frac{2}{3}U_k \quad (2-26)$$

对比上式及 (2-16) 式, 得

$$U_k = \frac{3}{2}RT \quad (2-27)$$

由此可以看出, R 与分子的动能 U_k 有关, 温度每升高 1K , 动能变化 $3R/2$ 。用 N_0 除 (2-27) 式得

$$\frac{U_k}{N_0} = \frac{3}{2} \frac{R}{N_0} T = \frac{3}{2} kT \quad (2-28)$$

式中 $k=R/N_0=1.3804 \times 10^{-23}\text{J/K}$, 是另一个重要的常数, 叫做玻尔兹曼常数。上式表明, 每个分子的动能与玻尔兹曼常数及温度呈正比。在金属中, 每摩尔原子也含有 N_0 个原子, 原子的振动、自由电子的运动所产生的动能都与 k 及 R 有关, 因此 R 和 k 在合金中也是重要的常数。

2.2 热力学第一定律——能量关系

2.2.1 几个常用的名词和概念

2.2.1.1 体系和环境

体系是指我们所研究的对象, 体系的周围叫做环境。之所以要区分这两部分, 是为了便于集中研究我们所选定的、或直接和我们工作有关的事物, 而同时又不忽视和它有联系的事物。

如何划分体系和环境范围要视具体情况而定, 并非一成不变。体系和环境的定义范围不同, 二者之间的联系就不同。为了描述体系与环境之间的关系, 我们把与环境之间既有物质交换, 又有能量交换的体系叫做敞开体系或开放体系。而把与环境之间只有能量交换, 而无物质交换的体系叫做封闭体系或关闭体系。如果体系和环境之间既无物质交换, 也无能量交换, 这种体系叫做隔离体系或孤立系。

比如, 把一杯水放在绝热箱里, 把水定义为体系, 则绝热箱

就是环境了。由于水蒸气可以进入到绝热箱里，水与绝热箱之间既有物质交换，又有能量交换，因此这里水就是敞开体系。如果把水装入一个不透气的瓶子里，那么水与绝热箱之间只能有能量交换，而不能有物质交换，此时水就是封闭体系了。如果把绝热箱及其中的东西一起当做一个体系，那么对于周围来说，整个绝热箱就是一个孤立系了。

2.2.1.2 状态、状态函数和过程

一定的物质在一定的条件下具有一定的性质，例如，1mol 氧在 0°C 和压强为 0.1MPa 的条件下，体积是 22.4L ，密度是 1.43g/L 。如果条件改变，这些性质也要变。为了概括体系的种种性质，我们使用了一个普通的名词——状态。当体系的各种性质都具有一定的数值时，我们说，体系处于一定的状态。当体系的性质改变时，我们说，体系的状态有所改变。

显然，体系的状态和性质是互相制约的。状态一定，体系的性质也就一定；状态改变，体系的性质也要改变。可见，体系的性质是由状态确定的。因此，体系的性质是状态的函数。我们把这些性质，不管是体系的温度、压力、体积、能量或其他，都叫做体系的状态函数。

体系由一种状态变化到另一种状态需要有个过程。但是，体系的状态函数取决于体系的状态，与变化的过程无关。

这里需要指出：热力学中所谓状态，都是指平衡状态，即在一定的条件下是稳定的、不随时间而改变的状态。

2.2.1.3 强度性质和广度性质

有两类状态性质：一类与体系的总量无关，例如温度、压强、比表面能、磁场强度等等，这类性质叫做强度性质。另一类则与体系的总量成比例，例如体积、面积、质量等等，这类性质叫做广度性质。

2.2.2 热、功和内能

物质运动时常伴有能量的转换或传递，例如，机械运动可使机械功通过摩擦转变为热，热传到水中可使水沸腾成为水蒸气，水