

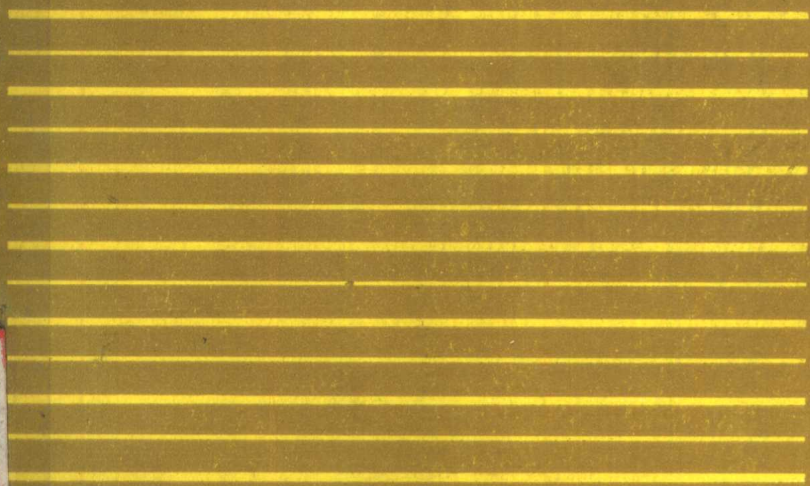
• 高等学校教学用书 •

钢铁冶金学

(第二册)

钢铁冶金原理与工艺

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

高等学校教学用书

钢铁冶金学

(第二册)

钢铁冶金原理与工艺

刘冀琼 等译

冶金工业出版社

(京)新登字036号

高等学校教学用书
钢铁冶金学
(第二册)
钢铁冶金原理与工艺
刘冀琼 等译

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷33号)

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张28 3/4 字数689千字

1992年5月第一版 1992年5月第一次印刷

印数00,001~3,000册

ISBN 7-5024-0967-X

TF·225 (课) 定价7.30元

译者序

这是一本由美国钢铁公司组织编写的有关钢铁工业的巨著，原书名《Making, Shaping and Treating of Steel》。它涉及四方面的内容，即钢铁冶金的原材料及辅助材料；钢铁冶炼过程；钢的成形；钢的热处理及合金钢。为了方便不同兴趣的读者阅读，将全书按上述四个方面分册译成中文出版。本书是其中第二册。

该书第一版是在1919年由美国卡内基钢铁公司出版的。读者对象原是销售人员及用户，后来内容不断更新扩展，并多次修订。从1951年第六版起，美国钢铁公司接管了该书的出版工作，它邀请了钢铁冶金各方面的专家共同执笔，因而使内容的深度方面大大提高，并且还不断地修订，读者对象也改变了，现在已成为培养冶金系大学生及黑色冶金工程师的主要参考书，在美国享有“钢铁工业圣经”的誉称。

本书是根据1985年第十版译成的，它反映了自1971年第九版出版以来钢铁冶金工业的巨大变化，即第三世界钢铁工业的崛起，石油危机所引起的能源价格上涨，环境问题的严峻性，世界范围的销售竞争，因而本书的内容也做了很大的调整，补充了连铸技术及盛钢桶冶金技术方面的内容，因而更增加了该书的先进性。

该书对我国的大学生及钢铁冶金工程师是一本难得的绝好的参考书，使读者对国外（尤其是美国）冶金工业的发展有一清晰的概念，对掌握现代冶金技术，实现钢铁工业的现代化也是大有益处的。

参加本册翻译工作的有：第十三章三、四节王秋芬；第十四，十五章董学经；第十六，十七章，十八章一、二、三节，十九章李臻；第十八章四、五、六节张磐；第二十章二、三节程志宏；其余各章节刘冀琼。

目 录

第十三章 钢铁冶金物理化学	1
第一节 热化学及基础知识	1
第二节 冶金体系的性质	42
第三节 炼铁反应	95
第四节 炼钢反应	126
第五节 钢的盛钢桶处理	148
第六节 钢中的夹杂物	169
第十四章 直接还原和直接熔融过程	180
第一节 绪言	180
第二节 历史发展及背景	180
第三节 直接还原法——还原气体在还原炉外产生	186
第四节 直接还原法——在还原炉内从碳氢化物中产生还原气	197
第五节 直接熔融还原	208
第六节 等离子法	213
第十五章 高炉炼铁	217
第一节 生铁的生产及品种	217
第二节 高炉生产简介	219
第三节 高炉本体结构	221
第四节 高炉辅助设备	238
第五节 高炉的化学过程	251
第六节 高炉操作	256
第七节 高炉配料	266
第八节 改进高炉操作的先进技术	268
第十六章 氧气炼钢法	271
第一节 绪言	271
第二节 原料	273
第三节 顶吹氧气炼钢法	277
第四节 底吹氧气炼钢法	283
第五节 复合吹炼法	285
第六节 过程控制	289
第十七章 平炉炼钢法	292
第十八章 电炉炼钢法	298
第一节 电炉炼钢的历史与现状	298
第二节 三相直接电弧炉的冶金过程	303
第三节 三相直接电弧炉的机械装置及辅助设备	312
第四节 三相直接电弧炉的电气系统及设备	326

第五节	感应电炉炼钢工艺	341
第六节	真空、保护气氛和自耗电极熔炼炉	342
第十九章	二次炼钢或盛钢桶冶金	346
第二十章	用铸锭与轧制法生产半成品钢	366
第一节	钢的凝固	366
第二节	大方坯、板坯以及小方坯的轧制	377
第三节	半成品钢的精整和冷却	409
第二十一章	半成品钢的连续铸造	418
第一节	前言	418
第二节	铸造工艺、设备及操作	427
第三节	生产率、产品质量与自动化	435
第四节	连铸装置的实例	442
第五节	其它连铸方法	447

第十三章 钢铁冶金的物理化学

前 言

作者撰写本章的时候,是企图把讨论的范围限制在冶金系的大学生及研究生,以及那些对冶金学有一些科学基础人员的中等水平,也就是假定读者已具有化学、物理及数学的基本知识。因此本章只专门讨论冶金过程的化学问题。

本章共分六节。第一节简要地讨论热力学的基本概念及物理化学。第二节讨论冶金系统的一些性质,所谓冶金系统是指金属与合金、炉渣、耐火材料与气体,所谓系统的性质是指相平衡、热力学、扩散、表面张力及粘度。本章的第三节涉及高炉及直接还原法炼铁的基本反应。第四节涉及炼钢过程的反应,特别着重于新型炼钢工艺,如BOP法及Q-BOP法。第五节讨论有关脱氧反应及盛钢桶内反应的问题,包括氧传感器(氧探头)、脱氧平衡、盛钢桶内脱硫与除气。在第三、四、五节中着重讨论的是化学反应,而不是讨论过程本身。与这些反应本身有关的问题,将在本书其他各章中叙述。第六节讨论钢中的非金属夹杂物。

第一节 热化学及基础知识

一、一些热力学概念

1. 理想气体及非理想气体 作为一种特例,让我们讨论一种气体,它符合简单的气体定律,即波义尔(Boyle)定律(1662年)及盖吕萨克(Gay-Lussac)定律(1802年),这种气体称之为理想气体,它应满足下式:

$$PV = nRT \quad (1)$$

式中P、V、T相应为压力、体积及绝对温度; n是任意的摩尔数; R是摩尔气体常数。

根据阿佛加德罗(Avogadro)定律(1811年),一摩尔的理想气体(含有 $N = 6.0243 \times 10^{23}$ 个气体分子)在一个大气压及273.16K(0℃)下,占有22.414升的体积。如使用这种单位制, $R = 0.08205 \text{ l/K} \cdot \text{mol}$ 。在国际单位制中,P的单位是 N/m^2 ($1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$, 1大气压 $= 1.01325 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \equiv 1.01325 \text{ bar}$), V的单位是 m^3 , 那么 $R = 8.314 \text{ J/K} \cdot \text{mol} \equiv 1.987 \text{ cal/K} \cdot \text{mol}$ 。

设某气体混合物含有1、2、3……几种气体,其摩尔数分别为 n_1 、 n_2 、 n_3 ……,在总压力为P下所占据的体积为V,则各组成气体的分压力为:

$$p_1 = P \frac{n_1}{n_1 + n_2 + n_3 + \dots} \quad (2)$$

$$p_2 = P \frac{n_2}{n_1 + n_2 + n_3 + \dots}$$

由道尔顿 (Dalton) 定律 (1801年) 知

$$P = p_1 + p_2 + p_3 + \dots \quad (3)$$

再利用理想气体公式, 可得

$$p_1 V = n_1 RT, \quad p_2 V = n_2 RT \quad (4)$$

一般说来, 对于易液化的气体, 以及在低温和高压下, 理想气体方程有了明显地偏差。而当温度提高、压力下降时, 气体的性质就趋于理想化了。所以, 气体的非理想性程度取决于气体的本性、温度和压力。这主要是由两个原因造成的: (1) 范德华力; (2) 不同种类气体分子或原子间的化学相互作用。

安德瑞斯 (Andrews) 在1869年根据对CO₂的压力-体积-温度关系的研究, 首先揭示了气体液化的条件。图13-1即为CO₂的压力-体积等温曲线。在温度低于临界温度T_c, 每一条等温线都明显地包括了三个部分。例如等温线abcd相应地表示下列条件下的压力-体积关系: ab为蒸气, bc为蒸气与液体共存, cd为液体。由于液体CO₂相对说来是不能压缩的, 所以等温线的cd部分近于一垂直线。V₁及V₂相应为饱和蒸气及液体在其各自的蒸气压下的比容。随着温度的提高, 液体与蒸气的比容差逐渐缩小了。到了T_c温度, 液体和蒸气彼此不能再区分开了。在T_c温度以上, 蒸气就不能液化了, 故T_c称为临界温度。此时液体的最高蒸气压力为临界压力P_c; 临界体积V_c为一摩尔液体 (或气体) 在临界温度及压力下的体积。从这种临界概念出发, 安德瑞斯把低于或高于临界温度下的气态分别称为蒸气及气体, 这可由图13-1的竖影线区所示。

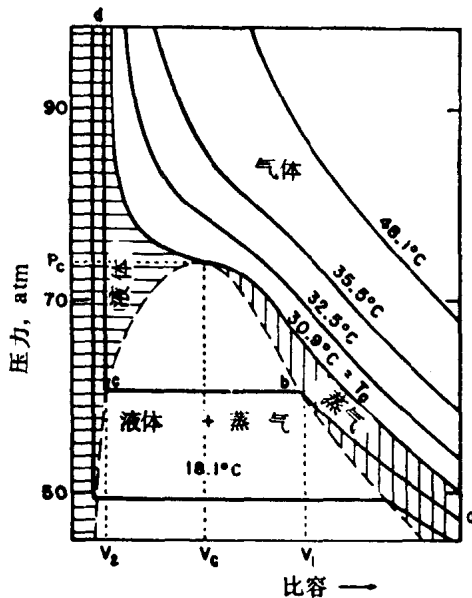


图 13-1 Andrews的CO₂等温线 (1869年)

在刚刚超过临界温度T_c, 等温线上就出现一个转折, 这说明气体的性质是非理想性

的。一摩尔气体的压力-体积-温度关系及它向液态的转变可以用1880年范德华提出的公式最简单（但也是粗略地）表示之：

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \quad (5)$$

式中 a 、 b 对于某一种气体为一常数。在临界温度（即在此温度之上气体不能液化），导数 $(\partial P/\partial V)_T$ 及 $(\partial^2 P/\partial V^2)_T$ 必为零，因此由公式（5）可以得出临界等温线的临界点表达式：

$$P_c = \frac{a}{27b^2}, \quad V_c = 3b, \quad T_c = \frac{8a}{27Rb} \quad (6)$$

另外还有一些气态公式，这里就不再赘述了。 a 、 b 值可以在一些参考书中查到。一般常见气体的临界常数如表13-1所示。应当注意到，临界比值 $P_c V_c / RT_c$ 。（即临界点的可压缩因数）大约为0.29。对于一些球形及非极性的简单气体及蒸气，即单原子气体及部分双原子气体，此0.29常视为通用常数。

另外一个造成气体非理想化的原因是不同种类气体分子或原子间的化学作用。这将在以后加以讨论。

2. 热容 物质热容的定义是物质温度升高一度所需的热量。一克物质的热容称为比热容。而一克分子（简称为1摩尔）物质的热容称为摩尔热容。

对于一种理想气体，恒压摩尔热容 C_p 与恒容摩尔热容 C_v 之差等于摩尔气体常数

$$C_p - C_v = R \quad (7)$$

在低温高压下，摩尔热容之差稍高于 R ，这里因为它已脱离理想状态了。

表 13-1 某些气体的临界常数

气 体	T_c (K)	V (cm^3/mol)	P_c (atm)	$P_c V_c / RT_c$
氢	5.3	57.8	2.26	0.300
氟	44.5	41.7	25.9	0.296
氩	150.7	75.2	48.0	0.291
氦	33.3	64.5	12.8	0.304
氮	126.1	90.0	33.5	0.292
氧	154.4	74.4	49.7	0.292
二氧化碳	304.3	95.6	73.0	0.279
一氧化碳	134.2	90.0	35.0	0.286
甲烷	190.7	98.7	45.8	0.288
水蒸气	647.0	45.0	217.72	0.185

杜隆 (Dulong) 及帕特 (Petit) 于1801年由实验得出一经典定律。它指出：“所有固体元素每克原子的热容量均相等。”尽管在室温绝大多数固体元素的原子热容均为 $6.2 \pm 0.4 \text{ cal/K} \cdot \text{mol}$ ，但是还有一些例外。例如在 25°C ，铍、硼、碳（金刚石）及硅的原子热容分别为 3.93 、 2.65 、 1.45 及 $4.73 \text{ cal/K} \cdot \text{mol}$ 。

另一个普遍规律是1865年提出的柯普 (Kopp) 定律。它指出：“在常温下，某一固体化合物的摩尔热容等于其组元的原子热容之总和”。因为对于合金来说，有关其 C_p 的数据很少或几乎没有，所以由柯普定律得出的近似结论就可以推广到合金中去。这就是说，其

热容量是其原子百分数的线性函数。

最早对热容进行详细理论推导的是爱因斯坦 (Einstein) (1907年)。这个理论的处理方法后来被德拜 (Debye) 于1912年变化了一下。他指出下列的固体摩尔热容的表达式可以成功地用于很低的温度下,

$$C_v = \frac{12}{5} \pi^4 R \left(\frac{T}{\theta} \right)^3 \quad (8)$$

即
$$C_v = 464.5 \left(\frac{T}{\theta} \right)^3 \quad (9)$$

式中 θ 对于某一种固体是一常数, 它具有温度的量纲, 因之称为物质的特性温度。所以若做 C_v 与 T/θ 的关系图, 则对于所有的固体元素可得到同一条曲线。这个结论从本质上说也可以用于同位素固体 (立方系)。在德拜的推论中曾假定: 对于固体, C_v 只不过是原子在晶格中 (假定为一连续弹性体) 振动的贡献。在这个近似的结论中, 并没有考虑电子对 C_v 的贡献, 也没有考虑晶格结构及结构缺陷对 C_v 的作用。从金属的自由电子理论可以得出, 电子对热容的贡献是与低温下的绝对温度成正比的。因此对于非异常固体, 即没有异常居里点, 无晶格缺陷者,

$$C_v = 464.5 \left(\frac{T}{\theta} \right)^3 + \gamma T \quad (10)$$

式中的 γ 值取决于材料的种类, 在 $1 \times 10^{-4} \sim 50 \times 10^{-4} \text{ cal/K}^2 \cdot \text{mol}$ 之间。随着温度的提高, 电子对热容的贡献就变得不那么明显了。在接近室温时, 德拜公式降到 $C_v \rightarrow 3R$, 即接近于杜隆及帕特公式的值。

一般说来, 热容都是在恒压下测得的, 所以为了利用公式 (10), 就得利用热力学关系式从 C_p 计算 C_v ,

$$C_p - C_v = \frac{\alpha^2}{\beta} VT \quad (11)$$

式中 α 是热膨胀系数; β 是压缩系数。

在超过 25°C 较高的温度, 晶格与电子对恒压热容 C_p 的贡献可以用经验公式来表达:

$$C_p = a + bT - cT^{-2} \quad (12)$$

式中 a 、 b 、 c 对于某一物质均为常数, 它们可以通过在一个较宽的温度范围内从实验数据求出。

3. 焓 (热函) 一个系统的能量 (常称为内能或固有能) 包括除动能以外的所有形式的能量。在系统与环境之间任何能量交换, 均会造成状态的变化, 主要表现为热与功。

例如有一系统抵抗外压 P 而膨胀, 体积增加了 ΔV , 系统所做的功 $W = P\Delta V$ 。因为这个功是系统对环境所做的功, 所以当系统从状态 A 变为状态 B, 系统吸收了热量 q , 增加的内能 ΔE 为:

$$\Delta E = E_B - E_A = q - P\Delta V = q - P(V_B - V_A) \quad (13)$$

$$(E_B + PV_B) - (E_A + PV_A) = q \quad (14)$$

对于恒压下的一个无限小的转变, 可以写成

$$\delta E = \delta q + PdV \quad (15)$$

E + PV用单一的符号H来表示, 那么

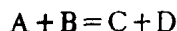
$$H = E + PV \quad (16)$$

$$\Delta H = (E_B + PV_B) - (E_A + PV_A) \quad (17)$$

函数H称之为热函或焓。由于绝大多数的量热法都是在恒压条件下进行的, 除了体积变化外不包含其他的功, 所以称 $\Delta H = q$ 为热函。但是焓有一个总的名词, 它应包括有压力变化的过程。

焓是系统的容量性质, 与能量一样, 我们只能测出热函的变化, 而不能测出其绝对值。因此人们对每一个元素都选用一个标准参考状态, 元素的热函的任何变化, 都可与其标准状态作比较。而将此变化记为 ΔH° 。均取元素的自然状态为标准状态, 因此元素在标准状态下的热函为零。一个化合物的形成热就是其组元在标准状态下形成一摩尔化合物时, 所吸收或放出的热量。

一个反应的焓变就可以由反应产物与反应物之间的焓差求得。对于一个等温过程,



其焓变为

$$\Delta H^\circ = \Delta H_C^\circ + \Delta H_D^\circ - (\Delta H_A^\circ + \Delta H_B^\circ) \quad (18)$$

有两个基本热化学定律, 第一定律用焓专门来表示。拉瓦西 (Lavoisier) 及拉普拉斯 (Laplace) 于1780年提出的第一个原理指出: “一个化合物分解成元素所需的热量等于该化合物从元素形成时所放出的热量,” 即一个化合物的分解热在数值上等于其形成热, 只不过符号相反而已。第二个原理是赫斯 (Hess) 于1840年发现的, 它指出: “反应热只取决于始态及终态, 而与体系所经历的中间阶段无关。”

在恒容下能量随温度的变化, 或在恒压下焓随温度的变化即为体系的热容,

$$C_v = \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_v, \quad C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad (19)$$

对恒压下热容随温度的变化公式 (19) 进行积分, 可得出焓随温度的变化,

$$H_T^2 - H_T^1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (20)$$

通常在高温下, C_p 与温度的关系可用公式 (12) 表示, 则焓的增量就与温度有关。若 $T_1 = 298.16\text{K}$, 于是

$$H_T^2 - H_{298}^1 = a(T - 298.16) + \frac{b}{2}(T^2 - 8.89 \times 10^4) + c(T^{-1} - 33.54 \times 10^{-4}) \quad (21)$$

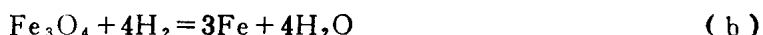
式中, 每一个物质的 a 、 b 、 c 值都要由实验来确定。

由上所述可以得出, 一个反应所伴随的焓变与温度的关系为

$$\Delta H_T^2 = \Delta H_{298}^1 + \int_{298}^T (\Delta C_p) dT \quad (22)$$

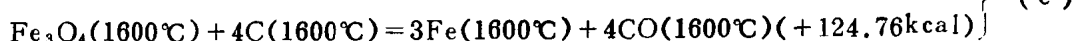
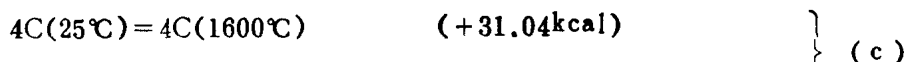
式中 ΔC_p 是反应产物与反应物热容之差。这个关系式是克希霍夫 (Kirchhoff) 于1858年首先发现的。尽管一物质的热函随温度的变化很明显, 但温度对反应热的影响却非常小, 这是因为任何反应的 ΔC_p 均很小之故。

下面举例说明两个反应在等温条件下的焓变。

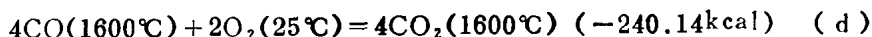


利用表13-3中的数据, 计算在900℃、1400℃及1600℃下反应物的焓, 并将结果列于表13-2中。可以发现, 从磁铁矿 (Fe_3O_4) 用CO还原为铁是一放热反应; 而在1600℃下, 用氢还原则是一个吸热反应。上述两过程中, 在900~1400℃之间, 还原所伴随的焓变并不大, 此时没有相变。另一方面, 当1600℃液态磁铁矿还原成铁时, 其焓变与固态还原时有明显的差异, 而在用氢还原时, 还会有少量的放热。

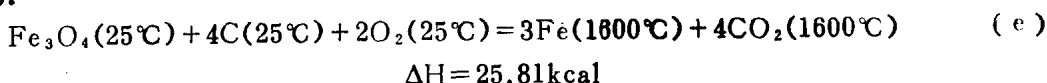
下面考虑另一个热平衡计算的实例, 即在1600℃液体磁铁矿被碳还原的情况。为了简化起见, 假定碳为石墨, 它在25℃时加入到熔体中的, 反应产生的是1600℃的液体铁及1600℃的CO。



反应的净吸热是 $\Delta H = 155.80\text{kcal}$ 。为了使系统保持在1600℃, 所需的热量是靠燃烧部分CO而得到的。如果所有的CO均与被喷入的25℃氧气燃烧, 则



反应热为 -240.14kcal , 从反应(c)与(d)之和可得到净反应热是 -84.34kcal 。另一方面, 将一摩尔的磁铁矿从25℃升温到1600℃然后熔化所需的热量是 110.15kcal 。由此可得, 25℃的反应物磁铁矿、石墨和氧气反应生成1600℃的液态铁和 CO_2 的热化学反应式为:



这个还原反应的机制很复杂, 而且还不能肯定, 它只能做为热平衡的计算实例而已。

4. 熵 熵的概念是由热力学第二定律引出的。能量消耗及能量转化构成了热力学第二定律的基础, 这个定律指出:“一切不受外界作用的天然过程都是自发(不可逆)的过程。”例如一种气体向另一种气体中扩散, 电从高电位流到低电位, 热量从系统的热端传入冷端。上述这些过程都是不可逆的, 也就是说, 如果不是受外界作用而引起系统发生变化, 这些过程都是不可逆转的。而对于一个可逆过程, 所有消散能量的根源必定消失。设想有一个过程, 它进行得无限缓慢, 则系统总是与其环境保持平衡。如果一旦由于环境发生了无限小的变化而使过程逆转, 则此过程称为可逆过程。当然了, 这只不过是实际过程中的一种想像的极限情况而已。

表 13-2 在不同温度下, 用CO或 H_2 等温还原磁铁矿的焓变

温 度 (°C)	ΔH_f° (kcal/mol)				反应(a)与(b)的焓变	
	Fe_3O_4	CO	CO_2	H_2O	(a)	(b)
900	-261.2	-27.01	-94.40	-59.50	-8.36	23.20
1400	-259.6	-27.85	-94.65	-60.00	-7.60	19.60
1600	-237.6	-28.21	-94.75	-60.16	-18.56	-3.04

卡诺 (Carnot) 于1824年提出热效率的概念。他研究一个在 T_1 及 T_2 温度间的可逆热循环, 此循环有四个步骤, 即两个等温步骤 (在 T_1 及 T_2), 及两个由 T_1 到 T_2 和由 T_2 到 T_1 ,

表 13-3 钢铁冶炼所涉及的一些元素及化合物的热力学数据

物 质	$-\Delta H_{f,298}^{\circ}$	S_{298}°	$C_p = a + bT - cT^{-2}$			温度范围 (°C)	t.p. (°C)	m.p. (°C)	b.p. (°C)	ΔH_t	ΔH_f	注 释
			a	$b \times 10^3$	$c \times 10^{-5}$							
Al	0	6.77	4.94	2.96	—	25—659		659	2467	2570		
Al ₂ O	-10000	52.16	7.00	—	—	659—2400						
Al ₂ O ₃	399600	12.2	8.22	0.44	0.87	25—1700		2030	dec.	(26000)		
Al ₂ S ₃	172900		27.49	2.82	8.38	25—1500	(1000)	1100	dec.			
AlN	76470	5.0	5.47	7.80	—	25—600		dec.				
Al ₄ C ₃	51500	(21.3)	24.08	31.60	—	25—320						
Al ₂ SiO ₅ (1)	1350*	22.3	46.24	—	12.53	25—1300						
(2)	1900*	20.0	45.52	2.34	16.00	25—1400						
(3)	600*	23.0	40.09	5.86	10.13	25—1300		1810				
Al ₂ SiO ₅ :			59.65	67.00	—	25—300						
B	0	1.40	4.13	1.66	1.76	25—2050		2050	(3900)	5300		
B ₂ O ₃ *	308100	12.9	7.50	—	—	2027—2700					* 晶态	
B ₂ O ₃ *	305500	18.6	8.73	25.40	1.31	25—450		450	(2300)	5500		
BN	60700	3.67	30.50	—	—	450—1700						
"B ₁ C"	12200	6.47	2.28	42.10	—	25—450		450	(2300)		* 非晶态	
Ba	0	16.0	30.50	—	—	450—1700						
"BaO"	133500	16.8	1.82	3.62	—	25—900						
BaS	108000	18.7	22.99	5.40	10.72	25—1450						
Ba ₃ N ₂	87000	36.4	5.36	3.16	—	25—370	370	710	1637	150		
BaSiO ₃	38000*	26.8	2.60	6.86	—	370—710						
Ba ₂ SiO ₄	64500*	43.5	7.50	—	—	710—1600						
BaTiO ₃		25.8	11.79	1.88	0.88	25—1700		1925	(2750)	13800		
Ba ₂ TiO ₇		47.0	29.03	2.04	4.58	25—1700	5, 120	1705			16, 47	
Ba ₂ TiO ₆			43.00	1.60	6.96	25—1700						

* (1) 红柱石
* (2) 蓝晶石
* (3) 硅线石
从氧化物
Al₂O₃ +
SiO₂ 的生
成热
莫来石

* 由其氧化物
* 由其氧化物

续表 13-3

物 质	$-\Delta H_f^\circ$	S_f°	$C_p = a + bT - cT^{-2}$		温度范围(°C)	t.p. (°C)	m.p. (°C)	b.p. (°C)	ΔH_f	ΔH_f	注 释
			a	$b \times 10^3$							
Be	0	2.28	4.58	2.12	1.14	1254	1286	(2400)	3500		
BeO	143100	3.37	7.50	—	1283—2400		2530	4120	17000		
BeS	55900	8.4	8.45	3.17	25—900						
Be ₃ N ₂	140600		8.16	—	25—500						
Be ₂ SiO ₄	12000*	15.4	22.84	—	25		1560				*由其氧化物
C(1)	0	1.36	4.03	1.14	2.04		sub.	(4350)*	(33000)*		(1) 石墨 *升华点 (2) 金刚石
C(2)	-454	0.58	2.27	3.06	1.54						
CO	26420	47.3	6.79	0.98	0.11	-212	-205	-192			
CO ₂	94050	51.1	10.57	2.10	2.06		sub.	-79			
CS	-55000	50.3	7.39	1.02	0.51						
CS ₂	-21000	56.8	12.45	1.60	1.80		-112	46	1050		
COS	33900	55.3	11.33	2.18	1.83		-139	-50	1130		
CH ₄	17890	44.5	5.65	11.44	0.46	-253	-183	-162			
Ca	0	9.95	5.25	3.44	—	440	850	1492	270	2070	
			2.68	6.80	—						
			7.40	—	—						
CaO	151500	9.5	11.67	1.08	1.56		2600	(3500)	19000		
CaS	110000	13.5	(10.20)	(3.80)	—						
Ca ₃ N ₂	105000		20.44	22.00	—		1195				
CaC ₂	14100	16.8	16.40	2.84	2.07	447	3300		1330		
			15.40	2.00	—						
CaF ₂	292000	16.5	14.30	7.28	0.47	1151	1418	2500	1140	7100	
			25.81	2.50	—						
			23.90	—	—						
CaAl ₂	54000						1079				
CaSi	36000						1240				
CaSi ₂	36000						1020				

续表 13-8

物 质	$-\Delta H_{298}^{\circ}$	S_{298}°	$C_p = a + bT - cT^{-2}$			温度范围(°C)	t.p. (°C)	m.p. (°C)	b.p. (°C)	ΔH_f	ΔH_t	注 释
			a	$b \times 10^3$	$c \times 10^{-5}$							
Ca_2Si	50000						910					*由其氧化物
$Ca_3Al_2O_6$	1600*	49.1	62.28	4.58	12.01	25—1500						*由其氧化物
$CaAl_2O_4$	3700*	27.3	36.00	5.96	7.96	25—1500						*由其氧化物
$CaAl_2O_7$		42.5	66.09	5.48	17.80	25—1500						
$Ca_3B_2O_6$	60000*	43.9	56.44	10.42	13.02	25—1487		1487		35490		*由其氧化物
			94.00			1487—1700						
$Ca_2B_2O_5$	45800*	34.7	43.75	11.50	10.69	25—531	531	1312		24090	1100	*由其氧化物
			52.29	2.40	—	531—1312						
			68.20	—	—	1312—1700						
CaB_2O_4	29400*	25.1	31.02	9.76	8.07	25—1152		1152		17670		*由其氧化物
			61.70	—	—	1152—1700						
CaB_2O_7	42900*	32.2	51.34	19.16	17.16	25—987		987		27060		*由其氧化物
			106.30	—	—	987—1700						
$CaCO_3(1)$	288400	21.2	20.13	10.24	3.34	25—300	50	dec.		45	45	(1) 顽石
(2)		22.2	24.98	5.24	6.20	25—900	50	dec.				(2) 方解石
$Ca(OH)_2$	237500	19.9	19.07	10.80	—	25—400		dec.		38110		*由其氧化物
$Ca_2Fe_2O_5^*$	9880	45.1	59.24	—	11.68	25—1435		1435				
			74.20	—	—	1435—1700						
$CaFe_2O_4$	14580	34.7	39.42	4.76	3.66	25—1237		1237		25870		
			54.90	—	—	1237—1700						
$Ca_4P_2O_9$	172910*	57.6	48.24	39.68	5.00	25—1100	1100			3700		*由其氧化物
$Ca_3P_2O_8$	162680*	45.2	79.00	—	—	1100—1300						*由其氧化物
			53.03	14.76	11.16	25—1140	1140	1353		24100		
$Ca_2P_2O_7$			76.15	—	—	1140—1353						
			96.80	—	—	1353—1430						
$CaSO_4$	342400	25.5	16.78	23.60	—	25—1100	1193	1465	dec.	(6700)		*由其氧化物
Ca_3SiO_5	27000*	40.3	49.85	8.62	10.15	25—1500						*由其氧化物
Ca_2SiO_4	30200*	30.5	34.87	9.74	6.26	25—697	697, 1437	2130		440, 3390		*由其氧化物

物 质	$-\Delta H_{298}^{\circ}$	S_{298}°	$C_p = a + bT - cT^{-2}$		温度范围(°C)	t.p. (°C)	m.p. (°C)	b.p. (°C)	ΔH_f	ΔH_r	注 释
			a	$b \times 10^3$							
CaSiO ₃	21500*	19.6	32.16	11.02	697—1437	1190	1540		(1300)	(13400)	*由其氧化物
CaTiO ₃		22.4	26.64	3.60	1437—1700	1257			550		
			30.47	1.36	25—1180						
			32.03	—	25—1257						
					1257—1700						
Ce	0	16.6	5.70	3.98	25—730	730	804	2927	300	2200	
			8.20	—	730—804						
			8.00	—	804—2700						
Ce ₂ O ₃	429310	36.0	15.1	—	25—100		>2600				
CeO ₂	260200	17.7	—	—			2050				
Ce ₂ Si ₂	483180	43.1	—	—			1890				
Ce ₂ S ₃	346760	18.7	—	—			2450				
CeS	133420	—	—	—							
CeN	78000	—	—	—							
Cl ₂	0	53.3	8.85	0.16	25—3000		-101	-34	1530	4880	
Cl	-29000	39.5	5.53	-0.16	25—5000						
Co	0	7.2	4.74	4.00	25—437	437,1120	1495	2877	10510	4100	
			2.16	7.02	437—1120						
			17.49	-4.92	1120—1495						
			9.00	—	1495—2900						
			11.54	2.04	25—1700		1805	dec.			
			30.84	17.08	25—700		dec.	dec.			
CoO	57100	12.7	—	—							
Co ₂ O ₃	216300	24.5	—	—							
Co ₃ S ₄	197000	(110.0)	—	—							
Co ₃ Si ₁₁	20400	13.6	—	—							
Co ₃ S ₈	75000	—	—	—							
Co ₃ S ₇	33500	—	—	—							

续表 13-3

物质	$-\Delta H_{298}^{\circ}$	S_{298}°	$C_p = a + bT - cT^{-2}$			温度范围 (°C)	l.p. (°C)	m.p. (°C)	b.p. (°C)	ΔH_f	ΔH_f	注释
			a	$b \times 10^3$	$c \times 10^{-5}$							
Cr	0	5.7	4.16	3.62	-0.30	25—1903	1835	1903	2665	5000		
"Cr ₂ O ₃ "	27000	19.4	9.40	—	—	1903—2700	(2400)	dec.				
CrO ₂	13940		28.53	2.20	3.74	25—1500		185	dec.			
CrO ₃	13850	17.2	11.01	16.40	—	25—500						
"Cr ₂ N"	27300	18.0	12.20	—	—	25—500						
CrN	29400	8.0	29.35	7.40	5.02	25—1400		1520				
"Cr ₃ C"	16400	25.3	56.96	14.54	10.12	25—1200		1780				
"Cr ₇ C ₃ "	42500	48.0	30.03	5.58	7.40	25—1300		1890				
"Cr ₃ C ₂ "	21000	20.4	5.41	1.50	—	25—1084		1084	2547	3120		
Cu	0	7.97	7.50	—	—	1084—2500	(56)	1230	dec.	(13400)		
Cu ₂ O	40000	22.4	14.90	5.70	—	25—900		(1110)	dec.			
CuO	37100	10.2	9.27	4.80	—	25—980		1130	dec.	2600		
Cu ₂ S	19600	28.5	19.50	—	—	25—103	103, 350					
			23.25	—	—	103—350						
			20.32	—	—	350—1130		dec.				
CuS	12100	15.9	(10.60)	(2.64)	—	25—1000						
Fe	0	6.49	3.04	7.58	-0.60	25—769	760*, 1910, 1392	1537	3070	326, 215, 165	*居里点	
			11.13	—	—	769—911						
			5.80	1.98	—	911—1392						
			6.74	1.60	—	1392—1537						
			9.77	0.40	—	1537—2700		1977	dec.	7490	*Fe _{9.11} O ₁₀ , 维氏体 与铁平衡	
"FeO"	63800	18.7	11.66	2.00	0.67	25—1377						
			16.30	—	—	1377—1700						
Fe ₃ O ₄	267800	35.0	21.88	48.20	—	25—627	627	1897	dec.	33000		
			48.00	—	—	627—1597						