

中等专业学校教学用

炼 钢 学

上 册

冶金工业出版社

中等专业学校教学用书

炼 钢 学

上 册

北京钢铁学校 韩至成 主编

冶金工业出版社

中等专业学校教学用书

炼 钢 学

上 册

北京钢铁学校 韩至成 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 12 7/8 字数 302 千字

1980年1月第一版 1980年1月第一次印刷

印数00,001~10,000册

统一书号: 15062·3536 定价 1.10 元

前 言

本书系根据1978年冶金工业部教材会议制订的中等专业学校炼钢专业教学计划编写的，可作为炼钢专业的教材使用，也可供炼钢工人和技术人员参考。

全书分上下两册。上册主要内容有：炼钢原理、氧气转炉炼钢及化铁炉。下册主要内容有：平炉炼钢、电炉炼钢、钢的浇注、转炉车间及其设备。

本书力求反映现代冶金技术理论，介绍先进工艺、先进设备。

本书上册由北京钢铁学校韩至成编写；下册平炉炼钢及钢的浇注由包头钢铁学校游慧玲编写，电炉炼钢由太原冶金工业学校张承武编写，钢的品种质量由张承武和韩至成合编，转炉车间及其设备由重庆钢铁学校郑沛然编写。全书由韩至成任主编。在编写过程中曾得到很多单位的大力支持，特此表示衷心的感谢。由于编写时间仓促和编者水平所限，缺点错误之处希读者批评指正。

编 者

一九七九年二月

绪 论

一、我国钢铁工业发展概况

我国是一个生产和文化发展很早的国家。我们的祖先什么时候开始冶炼钢铁，现在尚不能作出确切的回答。但是，根据出土的历史文物和考古工作者的研究，可以断定，远在2500年以前的春秋战国时代，人们已广泛地使用铁器，也就是说已掌握了冶炼钢铁的技术。例如，春秋初期齐国的管仲在他的著作《管子》的《轻重篇》里，就谈到当时用钢铁的情况：农民种地要用铁锄、镰刀，做车子的工人要用铁斧、锯子、钻子，人们从事家务劳动，也要用铁刀子、锥子、针等。全国解放后，我国各地陆续发现了许多战国时代的铁器，种类很多，有农具也有兵器等。古代钢铁制品的性能也很好，如人们称赞古代的宝剑能“陆断马牛，水击鹄雁”。一些大型铸件如铁佛、铁人、铁兽等，有的高达数十尺，铸工精妙、细致，连头发、衣褶都表现得很清楚。这些都充分说明我国古代劳动人民的卓越智慧和精湛技巧。

但是，几千年封建制度的统治，尤其是近百年来封建主义、官僚资本主义和帝国主义三座大山的剥削压迫，严重地阻碍了我国钢铁工业的发展。历代统治者，害怕农民掌握武器，起来造反，而禁止开矿。一直到清末，因为外有帝国主义的侵略，内有农民革命运动的兴起，清朝统治者处于内外交困的境地。为了镇压太平天国等农民运动，才派洋务派张之洞在湖北开办了第一个钢铁厂，到1900年钢的年产量才几千吨。

从1890年到1949年新中国成立，前后五十多年全国总共才生产了760万吨钢。建国以来，我国钢铁工业有了迅速的发展。1978年我国钢产量已突破3000万吨。但是目前我国钢铁工业的水平，距世界先进水平还相差很远，我们还要作很大的努力才能适应把我国建设成为社会主义四个现代化强国的需要。

二、各种炼钢方法简介

炼钢的方法很多，但在目前生产中大量使用的却没有几种。这要从炼钢技术的发展来了解它。

炼钢技术的发展是与炼铁紧密联系在一起的。人们最早用的铁为熟铁。古代人在山坡上挖掘的土坑里放入木炭和铁矿石，点火并鼓入空气进行冶炼。由于冶炼温度低，得到的是海绵状的熟铁，叫做“毛铁”。用锤子锻打后可制造工具。随着铁需要量的增加，建造的炉子越来越高，变成“高炉”。炉子大了，产量增加，炉子增高，炉内温度也逐步升高，炼出的铁不再是海绵状而是液体铁了。这种铁冷却后很脆，不能锻造成器具，叫做“生铁”。以后人们把冷却后的生铁块放在另外的炉子中用木炭熔化，并利用铁矿石作氧化剂把生铁中的碳和其它杂质（硅、锰、硫、磷等）氧化掉，又得到可锻的熟铁，这种方法叫做精炼法。由于木炭缺乏，到十八世纪改用煤作燃料，叫做搅拌法。

熟铁的延展性好，但是很软，不能制造要求有相当硬度的工具。古代人很早就知道，熟铁和木炭在高温下接触能使熟铁吸收碳而导致金属强度增加。我国春秋时代著名的宝剑“干将”、“莫邪”以及国外的大马士革剑，就是用这种方法制造的，这种方法叫做“渗碳法”。在18~19世纪中期，渗碳法有了很大的发展，成为炼制弹簧钢、工具钢等的重要方法。但是渗碳钢成分不均匀，外部含碳量比内部高得多，以后就被其它方法代替了。

1740年出现了一种可以熔炼液体钢的方法，叫做坩埚法。在石墨或粘土制成的坩埚内放入生铁及废钢块，将坩埚置于炉内加热，使炉料熔化而得到钢液。坩埚钢可用于制造许多器具，尤其是制造质量较高的工具。到二十世纪出现电炉炼钢以前，坩埚法炼钢仍被广泛采用。由于坩埚冶炼，几乎没有杂质的氧化反应，因此，冶炼优质钢时必须用低磷、低硫及硅、锰含量不高的炉料。此外，生产费用较高，产量较低。

1856年出现了用铁水直接炼钢的方法，叫做底吹转炉炼钢法。最初的转炉是用酸性耐火材料制造炉衬，不能去除生铁中的磷，只能用于有低磷铁矿石的地方，这种炉子叫做酸性底吹转炉或贝氏炉。由于低磷铁矿石的缺乏，使这种炼钢方法受到限制。1874年将炉衬改为碱性耐火材料，这样，可以去除生铁中的磷，这种方法叫做碱性底吹转炉或托马斯炉。这种方法曾在西德、法国、比利时、卢森堡等国占有一定的比例。近年来尤其是采用了氧气底吹后，这种方法得到迅速发展。

根据我国原材料的情况，自1952年发展了一种碱性侧吹转炉炼钢法，空气从炉身的一侧吹入炉内，可采用低、中磷平炉铁水进行炼钢。改用氧气侧吹后各项经济指标有一定提高。

1864年出现了可以用废钢及铁水作为原料的平炉炼钢法。根据炉膛砌筑耐火材料的不同，可以分为碱性平炉和酸性平炉两种。酸性平炉不能去除磷、硫，对原材料要求严，但冶炼出来的钢质量好，适用于做大的轴类以及军工用途。碱性平炉炼钢法具有原料范围宽、设备能力大、产品种类多、质量好等优点，所以很快就发展成一种主要的炼钢方法。随着炼钢生产的不断发展，平炉容量不断增加，1942年以前即有了200~400吨的大平炉。1945年以后炉子容量超过了500吨，近年来最大的平炉容量达到了900吨。

五十年代以前，平炉钢在世界总钢产量中占绝对优势。随着制氧技术的发展，五十年代出现了一项新的炼钢技术即氧气顶吹转炉炼钢法（LD法）。这种新的炼钢方法生产效率高，一座300吨氧气顶吹转炉，吹炼时间仅需30分钟左右，比同容量的平炉熔炼时间缩短十几倍。另外，这种冶炼方法的钢质量也很好，生产成本低、投资少、基建快，所以大有取代平炉的趋势。近年来世界各国新建的氧气顶吹转炉已很多，而平炉基本上已停建。据统计1975年全世界钢产量为6.51亿吨，其中氧气顶吹转炉钢为3.4亿吨，约占总钢产量的51%。

在二十世纪初出现了电弧炉炼钢法。电弧炉用废钢作原料，它是冶炼高质量合金钢的主要方法。目前随着电力工业的发展，国外一些大型电弧炉已用来冶炼碳素钢。

总之，目前各国采用的主要炼钢法为：氧气顶吹转炉、平炉、电弧炉、底吹转炉等。为冶炼一些特殊钢或合金还采用真空感应电炉、真空电弧炉、电渣炉及各种炉外精炼法、电子轰击炉等。

连续炼钢法，尤其是运用原子能炼钢的方法也在着手研究。

各种炼钢法概要列表如下：

炼 钢 方 法	分 类	主 要 特 点
转 炉	顶 吹 底 吹 (包括空气吹炼的酸、碱性及氧 气底吹法) 侧 吹 (包括空气侧吹和氧气侧吹)	共同特点: 设备简单, 投资少, 收效快, 冶炼时间短, 生产率高, 成本低, 无须外来热源, 仅依靠铁水物理热和 元素氧化放热而炼钢。 实践证明, 氧气转炉与铁水预处理及真空处理相配合, 可炼一些特殊钢。
平 炉	固定式、倾动式、双床(按炉体结 构形式不同)。碱性、酸性(按所 用耐火材料性质)	平炉是由炉顶、炉膛、炉头、上升道、蓄热室、沉渣 室、烟道等部分组成, 平炉冶炼中, 化学反应虽然也能放 出热量, 但由于炉体庞大, 散热面积大, 仅由废气、漏气 和炉衬所引起的热损失, 就比化学反应所产生的热量多三 倍以上, 所以, 平炉必须用燃料作为热源炼钢。
电 弧 炉	碱性、酸性氧化法, 返回法(按 操作方法)	以电能作为热源, 是目前冶炼特殊钢的主要方法
真 空 自 耗 (真空电弧炉)		开始主要用于重熔钛、锆、钽等高活性金属, 之后在冶 炼镍基和钼基高温合金以及轴承钢、工具钢等一般钢种中 也得到了广泛应用。炉体不用耐火材料。
电 渣 重 熔	可按电源、结构、结晶器不同形 式分为多种	是在水冷结晶器内利用电流通过熔池渣层时产生的电阻 热, 使插在熔池内的金属电极(即钢锭)端部逐步熔化, 金属液滴经渣液洗涤后, 在结晶器内自下而上地凝结成组 织均匀致密优质的钢锭。
真空感应炉	分批熔炼炉、半连续熔炼炉、连续 熔炼炉(根据操作特点划分)	利用真空状态下的电磁感应作用在金属炉料中产生交变 感应电流, 依靠炉料本身的电阻热以熔炼金属或合金并浇 注成锭, 也是最早的一种真空冶炼方法。
真空电子束 (电子轰击)		在真空炉壳内的阴极由高熔点的金属丝或金属片制成, 当通以高压直流电并加热到高温时, 即发射高速电子流, 这 种电子流被金属炉料吸收时, 即可将炉料熔化, 其熔滴落入 水冷结晶器中凝固成锭, 然后通过抽锭设备将锭抽出来, 由于电子束冶炼是在真空下进行的, 没有接触耐火材料, 液体金属脱气和去除夹杂时间充分, 又在水冷结晶器中凝 固, 所以, 锭子结构良好, 成分均匀, 清洁度高, 一般用 于冶炼难熔金属。
其它炼钢法	双联炼钢法, 混合炼钢法	双联法可包括: 平炉-电弧炉、转炉-电弧炉、双壳炉- 钢包精炼炉(桶炉)。 混合炼钢法包括: 电炉-平炉、电炉-电炉和电炉-转炉。

目 录

绪论

第一篇 炼钢的基本原理

第一章 物理化学原理概要	1
第一节 化学热力学	1
第二节 化学反应动力学	5
第二章 金属熔体的物理化学性质	7
第一节 熔铁的结构	7
第二节 熔铁的物理性质	8
第三节 元素在铁液中的溶解度和溶解自由能变化	15
第三章 炼钢熔渣	17
第一节 熔渣来源、组成和作用	17
第二节 液体熔渣结构的基本理论	19
第三节 熔渣相图	23
第四节 熔渣的化学性质	26
第五节 熔渣的物理性质	32
第四章 炼钢的基本反应	41
第一节 炼钢的基本任务	41
第二节 硅、锰的氧化还原	42
第三节 碳的氧化反应	45
第四节 去 磷	52
第五节 去 硫	56
第六节 钒的氧化还原	61
第七节 铬的氧化还原	64
第五章 钢的脱氧	68
第一节 脱氧的目的与任务	68
第二节 各种脱氧方法的基本特点	70
第三节 各元素单独脱氧和复合脱氧的特点	72
第四节 脱氧反应动力学	76
第六章 非金属夹杂物	82
第一节 钢中非金属夹杂物分类及存在形态	82
第二节 非金属夹杂物对钢性能的影响	85
第三节 脱氧过程(钢包脱氧—镇静—浇注及钢的凝固)氧及其夹杂物变化的规律	87
第四节 提高钢清洁度的主要方向	88
第七章 钢中气体	90
第一节 钢中的氮	90
第二节 钢中的氢	98
第八章 真空冶金物理化学	101
第一节 真空脱气	101

第二节	真空脱氧	103
第三节	真空下脱碳	104
第四节	真空处理时钢液与耐火材料、非金属夹杂物的反应, 钢液中非金属夹杂物的去除	105
第五节	真空下钢液中合金元素的蒸发	107
第六节	真空脱氧、脱气动力学	109

第二篇 转 炉 炼 钢

第九章	氧气顶吹转炉炼钢	110
第一节	炼钢用原材料与铁水预处理	110
第二节	氧射流与熔池相互作用的基本规律	116
第三节	氧气顶吹转炉吹炼工艺	121
第四节	炉 龄	169
第五节	顶吹转炉炉型和尺寸计算	174
第十章	其它氧气转炉炼钢法简介	179
第一节	氧气底吹转炉炼钢法	179
第二节	氧气侧吹转炉炼钢法	183
第十一章	化铁炉	187
第一节	化铁炉构造	187
第二节	化铁炉用原料	189
第三节	化铁炉熔化原理	190
第四节	化铁炉内金属成分的变化	194

第一篇 炼钢的基本原理

第一章 物理化学原理概要

第一节 化学热力学

一、主要的物理化学概念

1. 系与相 用来研究物理或化学变化的一组物质通称为系。例如，炼钢炉内的金属、炉渣、炉衬及炉气就是一个系。如果一个系中的所有部分的物理性质是一致的，没有分界面，这个系就称为均一系。例如，水与酒精的混合物就是均一系。

如果一系中各个组成部分是各不相同的，则称为不均一系。炼钢炉中的金属、炉渣、炉衬及炉气属于不均一系。

不均一系中的均一部分称为均相。相有均相与非均相。

2. 溶液 由两种或两种以上的物质构成的，其成分可变的均匀混合物称为溶液。例如，熔渣、钢液均可称为溶液。

液态溶液的浓度常用重量百分数或克分子分数来表示。活度与浓度关系为：

$$a = \gamma \cdot N \quad (1-1)$$

式中 a ——活度；

γ ——活度系数；

N ——浓度。

当 $\gamma > 1$, $a > N$, 为该溶液对理想溶液有正偏差。

当 $\gamma = 1$, $a = N$, 该溶液为理想溶液。

当 $\gamma < 1$, $a < N$, 为该溶液对理想溶液有负偏差。

3. 比热 物质的比热，是指一单位（克或克分子）物质升高温度（摄氏或华氏）一度所需要的能量：

$$C_P = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \quad (1-2)$$

式中 C_P ——为等压比热；

H ——为焓（热含）；

T ——为温度。

通常将比热表示成温度的一个函数，即：

$$C_P = a + bT - cT^{-2}$$

4. 焓（热含） 焓的定义为：

$$H = U + PV \quad (1-3)$$

式中 H ——系统的焓；

U ——系统的内能；

P ——压力；

V ——体积。

等压过程的热效应应等于系统的焓的改变。

单位质量的物质，在等压下从 T_1 加热到 T_2 时，其热含的改变可由比热在 T_1 和 T_2 之间的积分来求出：

$$H_{T_2} - H_{T_1} = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (1-4)$$

因为只有能量的差值才能测定，所以必须选择一种标准参考状态，以使焓的改变可以有一定的参考基础。以标准状态（例如298K和一大气压下的纯物质、元素或化合物）为参考点的热含变化为：

$$H_T^\circ - H_{298}^\circ = \int_{298}^T C_p dT \quad (1-5)$$

5. 反应热 等压反应， $A + B = C + D$

它的反应热 ΔH° 由反应物和产物的生成热来导出：

$$\Delta H^\circ = \Delta H_C^\circ + \Delta H_D^\circ - (\Delta H_A^\circ + \Delta H_B^\circ) \quad (1-6)$$

式中的元素生成热取为零。

反应热是温度的一个函数，并由下式求得：

$$\Delta H_{T_2}^\circ = \Delta H_{T_1}^\circ + \int_{T_1}^{T_2} (\Delta C_p) dT \quad (1-7)$$

式中的 ΔC_p 是产物和反应物的比热之差。

6. 自由能 对于等压系统，吉布斯自由能 G 的定义为：

$$G = H - TS$$

式中 G ——自由能；

S ——熵。

一个系统等温地由状态 A 变到状态 B 时，自由能的改变为：

$$G_B - G_A = \Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1-8)$$

等温等压下发生的任一自发过程总是伴有自由能的减少。

7. 标准自由能 若化学反应中涉及的元素或化合物处于其标准状态（通常为1大气压下纯的固体、液体或气体的稳定形态），则伴随的自由能变化应写成：

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (1-9)$$

ΔG° 实质上是温度的线性函数，故常用如下形式表示 ΔG° 随温度的变化：

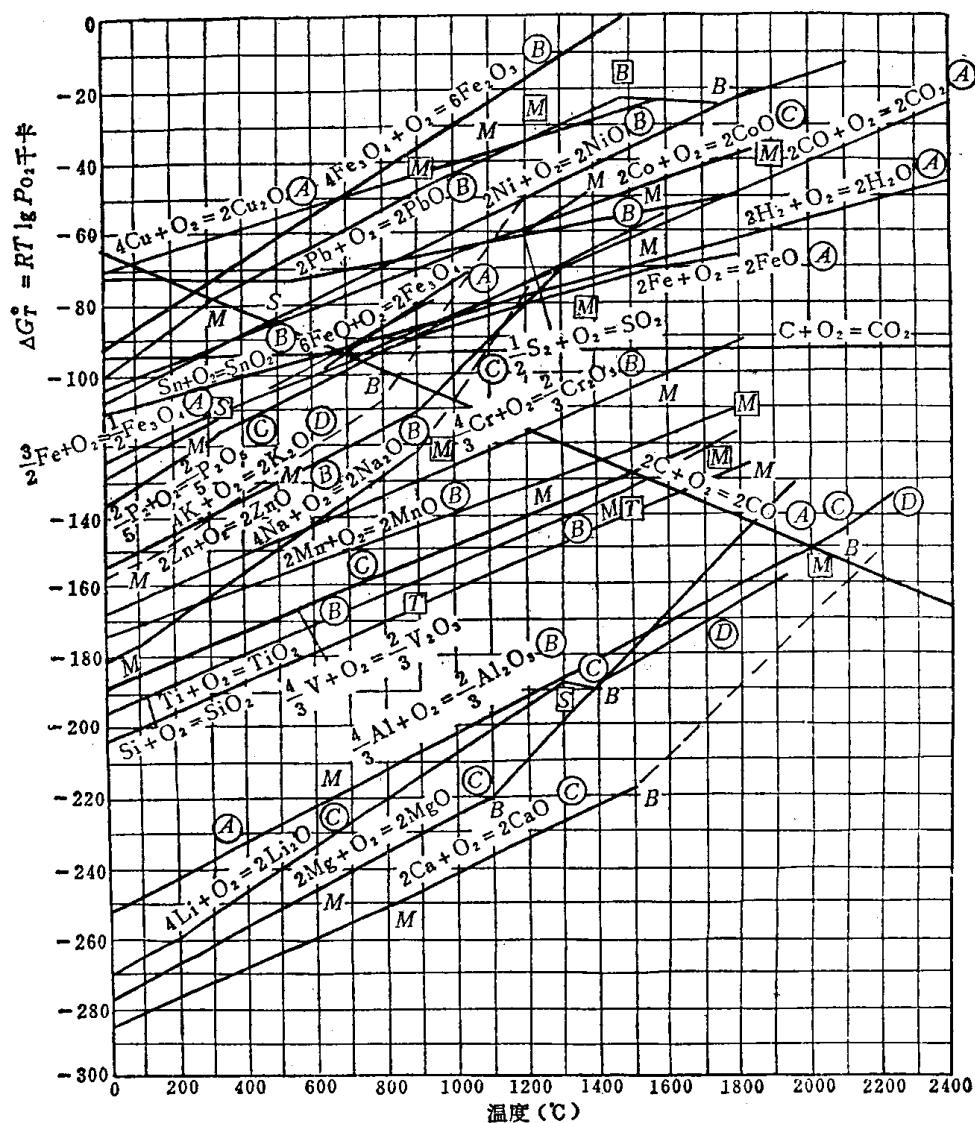
$$\Delta G^\circ = A + BT \quad (1-10)$$

二、化学反应的可能性和限度

1. 化学反应的可能性 炼钢炉内的反应可近似地认为是在恒温恒压下进行的。炉内反应能否进行，可以根据自由能的改变来判断。在指定的温度和压力条件下，反应的自由能变化负值愈大，它发生的趋势也愈大。

各种化学反应的自由能变化，可以用图形简便地表示出来。最早由埃林厄姆(Ellingham)发表的图表明一定类型的化合物（例如各种元素的氧化物）的标准生成自由能与温度的关系。该图指出了这些元素氧化的相对趋势，也直接表示了反应发生的条件。

图1-1即表示氧化物标准生成自由能随温度变化的埃林厄姆图。



	准 确 度	状态改变	元素	氧化物
符号说明	(A) ±1千卡	熔点	M	$\boxed{M}$
	(B) ±3千卡	沸点	B	$\boxed{B}$
	(C) ±10千卡	升华点	S	$\boxed{S}$
	(D) >±10千卡	转变点	T	$\boxed{T}$

图 1-1 氧化物标准生成自由能随温度的变化

关于图1-1的几点说明:

(1) 图中所列的 ΔG° 是指由稳定单质与分压为1个大气压, 1克分子的氧化合成氧化物的自由能变化。

(2) 图中直线发生的转折现象, 是由于参加反应的物质在转折温度时, 发生了相变。物质的聚集状态不同, 其自由能 G° 及 ΔG° 的数值当然也不同, 因此 $\Delta G^\circ-T$ 的关系在转折点(即相变点)处要发生变化。

(3) 图中这些元素的氧化物均为纯物质。

ΔG° 是氧化物稳定性的量度, 即某元素与氧亲和力大小的量度。若 ΔG° 负值越大, 说明该元素与氧的亲和力越大, 氧化物稳定性越大。从图中各条直线来看, 除CO线随温度

由图1-2可见,各元素与硫的结合能力可按以下次序增大: Pt、Hz、Ag、Pb、Co、Fe、Cu、Zn、Mn、Al、Na、Mg、Ba、Sr、Ca、Ce。

可见Mg、Ca与硫有很强的结合能力,当形成MgS和CaS时能稳定存在。实际生产中Mg可作为铁水炉外脱硫剂,石灰中CaO与铁水作用进行脱硫正是由于能形成稳定的MgS及CaS,而且它们不溶于铁液中。

2. 化学反应进行的限度 大多数的化学反应都具有可逆性,反应可以向某一方向进行,也可以向相反方向进行。在某一定条件下,若正方向反应速度和逆方向反应速度相等,反应双方物质的浓度长时间保持不变,当物质系统达到了这一状态时,即称为化学平衡。

反应物(始态) $\longrightarrow$ 产物(末态)

始态的自由能为 G_1 即 $G_{\text{反}}$,末态的自由能为 G_2 即 $G_{\text{产}}$,反应过程自由能变化为:

$$\Delta G = G_2 - G_1 = G_{\text{产}} - G_{\text{反}}$$

若 $\Delta G < 0$, 即 $G_{\text{产}} < G_{\text{反}}$ 反应自动进行;

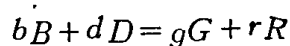
若 $\Delta G > 0$, 即 $G_{\text{产}} > G_{\text{反}}$ 反应逆向进行;

若 $\Delta G = 0$, 即 $G_{\text{产}} = G_{\text{反}}$ 反应达平衡状态。

由于炼钢反应可近似地认为是在恒温恒压下进行的,可用 $(\Delta G)_{T,P} = 0$ 来表示反应达平衡状态。此式称为平衡的热力学条件。即在恒温、恒压下化学反应达平衡状态时其自由能变化等于零。

当化学反应达平衡状态时,各物质的浓度存在什么样的定量关系呢?这可用平衡常数表示式来说明。

对于任一化学反应:



$$K = \frac{G^g \cdot R^r}{B^b \cdot D^d} \quad (1-11)$$

式(1-11)为平衡常数的表示式,可理解为:在一定温度下,反应达平衡时,其平衡常数等于产物浓度(或分压力)适当方次的乘积与反应物浓度(分压力)适当方次的乘积之比。

由该式可看出: K 值越大,表示反应达到平衡时产物越多,余下的反应物越少。显然,可根据 K 值的大小来衡量反应进行的限度。

一切平衡都只是相对的与暂时的。化学平衡只是在一定条件下的动平衡。当条件改变时,体系原来的平衡就被破坏,反应物与产物又互相转化,直到与新的条件相适应,体系又达到新的平衡。我们把体系的原有平衡状态被破坏后又重新达到另一个新的平衡状态的过程称之为平衡移动。可以认为,温度、浓度、总压的改变将会使原有平衡发生移动,移动的方向总是朝着抵消这些因素改变的方向,一直达到建立新的平衡为止。这就是吕·查德里平衡移动原理。

第二节 化学反应动力学

化学反应动力学主要研究反应的机理和反应速度。许多冶金反应均属于多相反应,它们往往进行在相界面上。

一般说来，在相界面上进行的反应与下列因素有关：

- (1) 反应物向相界面的扩散速度；
- (2) 在相界面上的化学反应速度；
- (3) 生成物离开相界面的扩散速度；
- (4) 当有新相产生时，新相的产生速度。

整个反应速度取决于最慢的一步。至于如何判断要由反应的类型来确定。

在冶金反应中，通常化学反应速度是较高的，所以决定反应速度的因素通常是扩散或新相的生成过程。

1. 扩散定律 在稳定扩散的条件下，物质的扩散速度可由费克第一定律来确定：

$$\frac{dm}{dt} = -DS \frac{dc}{dx} \quad (1-12)$$

即扩散速度与扩散物质所经过的截面积 S 和浓度梯度 $\frac{dc}{dx}$ 成正比。

式中 $\frac{dc}{dx}$ ——浓度梯度。由于扩散总是由浓度大的地方向浓度小的地方进行，所以浓度梯

度为负值，因此在方程式右边加一负号，使扩散速度保持正值；

S ——为扩散物质所经过的截面面积；

D ——为扩散系数。

研究得知：

$$D = \frac{T}{6\pi r \eta}$$

式中 T ——温度；

r ——扩散质点的半径；

η ——介质的粘度。

由费克第一定律可以看出，增大扩散物质经过的截面积；提高浓度梯度；以及适当的改变介质的温度、粘度和扩散质点的半径，从而增大扩散系数；这些都有利于加快物质的扩散速度。

炼钢过程是多相反应体系，加速反应物质的扩散传递就可强化冶炼过程。

以上指的是稳定扩散的情况。若为不稳定扩散（即扩散物质进入某一区域和同一时间从这个区域离开的数量不相等）时，物质的扩散速度为：

$$\frac{dm}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2}$$

这就是费克第二定律，不同条件下可得到各种形式的扩散方程式。

2. 表面现象 物质内层分子受它周围分子的作用力，平均说来，在各个方向上是相同的；可是物质表面层分子，在一般情况下，受内部分子的吸引比受外界的吸收要大。这样表面分子会被内部分子拉紧，产生了一个缩减表面的倾向，也就是增加表面必须消耗一定的能量，即表面自由能。

表面能也可以看为是作用于表面上每单位长度的力。

$$\frac{\text{尔格}}{\text{厘米}^2} = \frac{\text{达因} \times \text{厘米}}{\text{厘米}^2} = \frac{\text{达因}}{\text{厘米}} = \sigma$$

σ 称为表面张力，它的单位可用达因/厘米或尔格/厘米²来表示。

表面张力是用来表明分界面的能量。事实上，它只有当一个体系中至少有两个互相接触的相时，才有实际意义，所以广义的说，应称为界面张力。在冶金过程中，界面张力具有实际的意义有： $\sigma_{\text{固-液}}$ ； $\sigma_{\text{液-液}}$ ； $\sigma_{\text{液-气}}$ 三种。

界面张力既然是以两个互相接触的相的存在为先决条件，故界面张力的大小是随接触的相的物质不同而不同。

根据热力学第二定律，降低表面张力的过程是自发的。如果某一溶质能降低溶剂的表面张力，这个溶质就会被吸附到表面上，直到和浓度均匀化的趋向达到平衡为止，这种现象称为吸附现象。降低表面张力的物质称为表面活性物质。例如炉渣中FeO越高其表面张力越小。对钢液而言碳、氧、磷、硫都是降低表面张力的物质。溶液表面张力的大小，除受成分影响外，还和温度等有关。

表面张力的增大或减小，不仅对新相生成有影响，且对相间反应（如非金属夹杂物和气体从钢中的排除，泡沫渣的形成，炉衬的侵蚀等）有直接的影响。

第二章 金属熔体的物理化学性质

第一节 熔铁的结构

金属能够以三种状态存在：即气态、液态和固态。对纯铁或钢来说，当然也如此。处于液态的熔铁结构与气态和固态有何区别呢？

实验证明：熔铁的内部结构近似于固态而远异于其气态。譬如有人测定纯铁的气化热是81.3千卡/克分子，而熔化热仅为3.63千卡/克分子。一般认为纯铁的熔化热仅为气化热的1/25左右。纯铁熔化时体积变化仅为3.5%，电阻增加9%。纯铁在熔化时这些性质的变化，远较其气化和升华时的变化小得多。这就表明铁原子之间的结合力在液态和固态中无太大的差别。由此可以认为，熔铁的结构状态接近于固态。

应该指出：目前虽然借助于X射线、电子射线和中子射线的衍射等方法，对固态铁和铁合金结构的研究有了初步了解，但由于在高温下实验极其困难，所以对熔铁结构了解得很不够。

为了研究熔铁的结构，有人对低熔点金属(如Na)进行X射线衍射的研究。发现熔融金属中原子的配位数(晶格中的任一原子，其周围紧邻的、等距离的原子数目，称为配位数。配位数减少，即结构的致密度减小)有若干减少，而邻近原子间的平均距离有若干增加。这说明熔融金属中原子间形成孔隙，使金属的自由体积增加。如图2-1所示。

由图可以看出：在固态金属中原子呈“远距有序排列”，即原子间在很大范围内作有规则的排列。而在熔融金属中原子则呈“近距有序排列”，即原子间只在很小的体积范围内作有规则的排

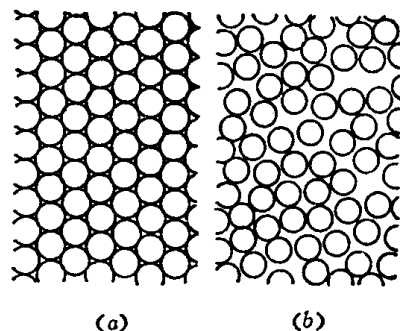


图 2-1 纯金属的原子结构(二元模型)
(a) 固体；(b) 液体

列。

处于液态的熔铁其结构虽然近于固态，但它们之间仍存在一定的差别。主要标志是：

1. 液态时铁原子的不规则排列占主导地位。它不象固态时在很大范围内原子作有规则的排列；

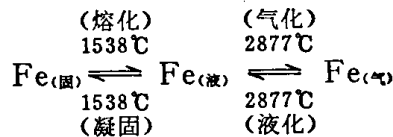
2. 液态铁原子的相对位置没有固态铁原子那样稳定。固态铁原子只在平衡位置上以一定振幅作振动，而液态铁原子可以相对滑动，即熔铁有一定的流动性；

3. 由于熔铁中铁原子间距较大，排列又不太规则，所以，异类原子在熔铁中易于扩散和均匀分布。

上述这些特性说明，熔铁中铁原子活动能力较大，具有比固态铁中铁原子较高的能量。

总之，液态铁和固态铁只不过是同一物质呈两种不同形态存在而已。两种形态可以相互转化。当温度降低到一定程度时，熔铁中铁原子由不太规则堆积的液体状态，转变为有规则排列的晶体状态，这一过程称为熔铁的结晶。相反，当温度升高时，固态铁中原子在晶格结点上的振动幅度增大，原子之间的距离增大，空位数目增多。当达到熔化温度时，原子的振动能力大到难以继续长时间维持作有规则排列的程度，这时固态铁就由晶体转变为液体。因而铁的晶体结构遭受破坏的过程，乃是铁的熔化过程。当然，液态铁当温度极高而达到其气化条件时，亦可变为气体状态。

铁的固-液、液-气转变温度如下：



第二节 熔铁的物理性质

一、密度

密度是纯铁或钢的重要物理性质之一。正确地测定纯铁或钢的密度，对于研究熔铁的结构、粘度、表面张力以及分析熔钢与非金属夹杂物、炉渣之间因密度不同而发生的分离等现象有重要意义。

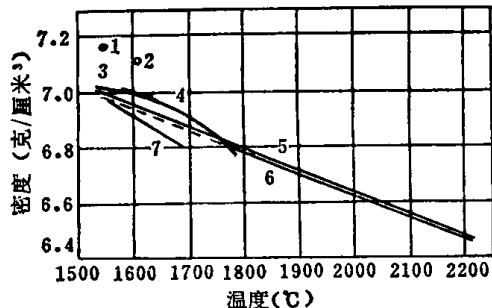


图 2-2 纯铁的密度

1—扎米列夫，鲍贝尔和扎拉夫斯基；2—伐道林和易新；
3—佛罗贝尔格和维贝尔；4—维尔特曼，费利柏夫和萨
马林；5—基尔辛鲍姆和凯亥尔；6—斋藤，佐久间；
7—勒克斯

由于高温下测定熔融铁合金的密度困难较大，各研究者测定的数据有较大区别。如图 2-2 所示。但根据最近的研究结果，一致认为在1550℃附近时，纯铁的密度大致是7.0克/厘米³左右。

液态、固态纯铁的密度或钢的密度与温度、成分有密切关系。

1. 纯铁或钢的密度与温度的关系 图

2-2可明显看出，随着温度的升高，纯铁密度明显下降。相反，温度降低则使其密度提高。钢液或固态钢的密度与温度的关系也如此。由图2-3可以看出，不同含碳量钢的比容(密度的倒数)和温度的关系。随着温度的增加，钢的比容增加，即密度降低。但在同一温度