

高等学校教学用书

电炉炼钢学

A. Д. 克拉瑪洛夫 著

上海交通大学鋼鐵冶金教研組譯



北京科学教育編輯室

PDG

高等学校教学用书



电 炉 炼 钢 学

A. И. 克 拉 馬 洛 夫 著

上海交通大学钢铁冶金教研组译

北京科学教育編輯室



本书系根据苏联国立黑色及有色冶金科技书籍出版社出版的克拉瑪洛夫教授 (A. Д. Крамаров) 著的“电炉炼钢学”1958年版译出。原书經苏联高等教育部审定为黑色金属冶炼专业的教科书。本书叙述了电炉炼钢的物理化学过程和熔炼工艺的基础, 研讨了各种特殊钢种的熔炼特点。

本书系供冶金学院或多种性工业大学中“黑色金属冶炼”专业的学生使用, 亦可供冶金工业部門工程技术人员参考。

本书由上海交通大学冶金系鋼鐵冶金教研組譯出, 参加譯校工作的有宋孟偉、王一仁、袁濟、張群玉、朱新运、張祖賢、馬啟、倪永輝和程鑒琦等。

电 炉 炼 钢 学

A. Д. 克拉瑪洛夫著

上海交通大学鋼鐵冶金教研組譯

北京科学教育編輯室出版

商务印书館上海厂印刷

新华书店上海发行所发行

开本: 850×1168 1/32 印張: 13 字數: 307,000

印數: 801—1,600

1961年8月第1版 1962年7月上海第2次印刷

定价 1.85 元

緒 言

机械制造工业的迅速发展,对合金钢的需要量大大增加。现代运输设备,动力装置,电气设备,化工设备和金属切削工具等,都需要合金钢来制造。为了满足机械制造工业的需要,冶金工业生产了大量各种牌号的特殊钢——高强度钢、不锈钢、变压器钢、高速钢和其他各种钢种。这些钢种所具有的特殊性能是依靠镍、锰、硅、铬、铝、钨、钼、钒、钛和其他元素使钢合金化而得到的。而对于熔炼合金钢来说,电炉是最理想的设备。

电炉比其他炼钢炉更易得到高温。

在熔炼末期炉内的还原性气氛,允许在电炉中用铝、钛、钒等与氧有高亲和力的元素来使钢合金化;同时,在还原气氛下还能熔炼含硫量低的钢。由于这些有利条件,使得目前高合金钢的熔炼只在电炉内进行。在电炉中,也能顺利地熔炼低合金钢。

电弧的作用原理是1803年由B. B. 彼得洛夫首先发现的。他指出了利用电弧来熔炼金属的可能性。但是由于缺乏廉价的电能,直到十九世纪末,还没有进行过电炉炼钢。到二十世纪初,随着动力设备的飞跃发展和对合金钢需要量的激增,电炉炼钢才开始获得广泛的发展。

第一座工业用电炉的建成在法国是1902年,在美国是1906年,在俄国是1910年于奥布霍夫斯基工厂。1916年俄国仅有12座电炉,其总容量为26吨。伟大的十月革命后,电炉在苏联迅速发展起来。1956年,苏联各工厂已有659座电炉,总容量达2186吨。在1955年已炼出了3,412,000吨电炉钢。现在各电冶

金工厂能够生产各种牌号的合金鋼。

在鑄鋼車間,电炉也被广泛地采用,且逐渐代替了平炉和小型貝氏轉炉。

根据苏共第二十次党代表大会的決議,計劃大大增加电炉鋼的生产。在1956—1960年內,电炉鋼应增加79%,而其中不銹鋼和耐熱鋼的生产应增加到3.2倍。

电炉设备的改进和近年来电炉炼鋼工艺的革新,大大地降低了电炉鋼的成本,在許多情况下电炉鋼并不比平炉鋼貴。苏联动力工业的发展如斯大林格勒水电站、布拉茨克水电站和其他一些巨大水电站的开始发电,大大提高了我国电能的生产,从而降低电炉鋼的成本。这些条件使得在电炉中不但对熔炼合金鋼,而且对熔炼普通牌号的碳素鋼在經濟上也是合算的。这就为更迅速地发展电炉生产創造了条件。

本书将闡明电炉炼鋼生产的工艺原理。各种牌号鋼的熔炼工艺虽然不一,但炼鋼时在液态金属中的物理化学过程都是服从于同一規律的。因此本书由两部分組成:第一部分叙述了炼鋼过程的物理化学基础;第二部分是叙述各种不同用途的鋼的生产工艺。

在此我們謹向技术科学博士 C. H. 西脫里克教授、H. M. 丘依加教授、Ю. A. 苏利脫教授、副教授、技术科学副博士 A. M. 列維思、Л. Я. 李培尔曼、H. B. 托尔斯多古卓夫、A. B. 維思聶雅科夫、工程师 A. H. 米列尔、A. M. 列別捷夫、B. H. 基梅尔曼、Л. И. 丹杰尔、A. H. 格拉卓夫、B. Я. 蒙那斯坦爾斯基、П. M. 达尼洛夫、A. Д. 契尔欽柯、E. H. 謝留金、H. H. 克拉斯諾良特采夫表示感謝,感謝他們提出寶貴的意見。

作 者

目 录

緒言	7
----	---

第一篇 电炉炼鋼的物理化学过程

过程的一般特征	1
第一章 基本的物理化学規律	4
气体反应的平衡	4
平衡常数的間接确定	5
多相反应的平衡	6
溶质的活度	8
氧化物的分解	15
氧在鉄中的溶解度	18
鉄中杂质对氧在鉄中的活度和溶解度的影响	24
溶解在金属中的氧化物的分解压力	29
平衡常数和温度的关系	30
第二章 炼鋼过程的炉渣	33
酸性炼鋼渣	33
二氧化硅在酸性渣中的溶解度	33
熔炼过程中酸性炉内炉渣成分的变化	34
酸性渣的流动性	35
氧在酸性渣和鉄水之間的分配	36
酸性渣中氧化亚鉄、氧化鉄和二氧化硅的活度	37
碱性炼鋼渣	37
碱性渣的化学成分	37
炉渣的碱度及氧化性	38
碱性渣的流动性	39
氧在鉄和碱性渣間的分配	40
氧化亚鉄在碱性渣中的活度	41

第三章 氧化过程	45
碳的氧化	47
氧化亚铁从炉渣向金属中的转移	47
氧和碳的相互作用及所生成的一氧化碳的排出	48
沸腾期钢液中氧的含量	52
碳氧化过程的一般特征	56
硅和锰的氧化及还原	58
锰在酸性炉内的氧化及还原	58
锰在碱性炉内的氧化及还原	61
硅在酸性炉内的氧化及还原	63
硅在碱性炉内的氧化	67
磷的氧化	67
磷氧化反应的平衡条件	67
金属中所含杂质对钢脱磷的影响	72
炉渣碱度和氧化亚铁含量对钢脱磷的影响	78
温度对钢脱磷的影响	76
炉渣粘度对钢脱磷的影响	76
渣量对钢脱磷的影响	76
铬的氧化	77
酸性炉内铬的氧化	78
碱性炉内铬的氧化	79
第四章 液体钢中气体的排除	82
液体钢中氢的去除	82
液体钢中氮的去除	93
第五章 钢的脱氧	97
铁在渣的作用下含氧量的减少	98
在温度不变时用加入各种脱氧剂的方法使铁中含氧量降低	100
用锰脱氧	100
用硅脱氧	101
用硅和锰脱氧	104
用铝脱氧	106
用钛脱氧	107
当用硅和锰脱氧的液体铁的温度降低时非金属(渣)夹杂的形成	108
硅和锰的脱氧能力	108

用硅和锰脱氧时夹杂物从铁中析出的条件.....	110
在用硅和锰脱氧的金属中铝对夹杂形成过程的影响.....	113
非金属夹杂在不同含碳量的钢中的形成和析出.....	116
脱氧后钢中非金属夹杂的排除.....	118
第六章 钢的脱硫	122
硫在熔炼过程中从钢水往炉渣的转移.....	122
钢中硫化物夹杂的形成.....	125
在不含锰的铁中硫氧夹杂的析出.....	125
钢液中硫锰反应的平衡条件.....	127
钢凝固时硫化物夹杂的析出.....	129
钢凝固时硫氧化物夹杂的析出.....	131

第二篇 电炉炼钢工艺

第七章 结构钢的性能和缺陷	133
结构钢的性能.....	133
结构钢的缺陷.....	143
白点.....	143
层状断口.....	143
岩石状断口.....	147
夹层.....	147
非金属夹杂.....	149
发裂.....	154
偏析缺陷.....	156
第八章 碱性电弧炉中结构钢的熔炼	157
氧化法熔炼结构钢的工艺.....	157
补炉.....	157
炉料的成份和装料.....	160
炉料的熔化.....	162
氧化期.....	165
氧化期向熔池吹氧.....	173
氧化渣的排除.....	175
还原期.....	176
钢的合金化.....	188
出钢前的附加脱氧.....	192

熔炼过程中金属和炉渣的温度	193
熔炼过程金属的搅拌	195
结构钢熔炼举例	199
不氧化法熔炼结构钢的工艺	203
电弧炉中结构钢熔炼的特殊操作	205
熔化期和氧化期合并熔炼	205
不排除氧化渣的氧化法熔炼	206
熔池吹氧的合金废料再熔炼	207
无扩散脱氧熔炼	207
沉淀脱氧和扩散脱氧的综合运用	207
用硅酸钡渣熔炼结构钢	208
氧化期和还原期的安全措施	209
第九章 结构钢的浇注	211
出钢	211
浇钢用的盛钢桶	211
在出钢和浇注过程中钢水的冷却	214
浇注方法	215
钢锭凝固的时间	216
钢锭的结晶结构	218
钢锭物理结构的缺陷	222
缩孔和疏松	222
裂纹	227
重皮	231
钢锭中的气泡	233
钢锭的化学不均匀性	234
偏析的原因	234
各种元素的偏析倾向	238
钢锭带状偏析的形成	238
浇注温度和速度的调节	242
钢锭和钢锭模	246
钢锭的重量	246
钢锭和钢锭模的形状和主要尺寸	246
钢锭模壁的厚度	250
钢锭模用生铁的成份	251
下注装置的准备	252

上注装置的准备	256
下注法的优缺点	256
惰性气氛下钢的浇注	257
連續鑄錠	268
澆注的安全措施	263
第十章 不銹鋼的性能和缺陷	265
不銹鋼的性能	265
不銹鋼的缺陷	272
晶間腐蝕	272
不銹鋼的低塑性	273
皮下氣的疏松	276
第十一章 不銹鋼的熔炼和澆注方法	276
用非合金廢料熔炼不銹鋼	276
用不銹鋼返回料以不氧化法熔炼不銹鋼	280
用二座炉子熔炼的金属在盛鋼桶內混合的方法熔炼不銹鋼	281
用不銹鋼返回料和熔池吹氧熔炼不銹鋼	282
用熔池吹氧法熔炼不銹鋼的工艺	286
不銹鋼熔炼举例	295
采用碳素鉻鉄熔炼不銹鋼	297
含碳量小于 0.03% 的不銹鋼的熔炼	297
不銹鋼的澆注特点	299
第十二章 高速鋼的熔炼特点	302
高速鋼的成份和性能	302
高速鋼的熔炼特点	304
第十三章 滾珠軸承鋼的熔炼特点	310
对滾珠軸承鋼的要求	310
滾珠軸承鋼的熔炼特点	312
第十四章 变压器鋼的熔炼特点	317
对鋼的化学成份的要求	317
变压器鋼的熔炼和澆注特点	318
第十五章 酸性电弧炉炼鋼	324

装料和炉料的熔化	325
熔炼的氧化期	327
钢的脱氧	330
在酸性电弧炉中采用合金废钢熔炼结构钢	334
酸性电炉中的吹氧熔炼	335
第十六章 无芯感应炉炼钢	337
无芯感应炉炉衬	339
无芯感应炉炼钢	341
真空感应炉炼钢	343
第十七章 联合炼钢法	349
平炉——电炉双联法	349
转炉——电炉双联法	350
平炉钢和电炉钢的混合炼钢	352
钢中气体在盛钢桶中和浇注过程中的排除	354
第十八章 电弧炉炼钢的技术经济指标	358
电炉生产率	358
钢的成本	361
第十九章 熔炼和浇注工艺过程和检查	365
熔炼和浇注过程的检查	365
軋材和鍛件质量的检查	369
应用放射性同位素来研究和检查冶金过程	371
工艺检查结果的统计处理方法	373
采用分离分析	374
采用关联分析	476
参考书	399

第一篇 电炉炼钢的物理化学过程

过程的一般特征

钢是碳、锰、硅、铬和一系列其他元素在铁中的固溶体。加入诸如碳、锰、硅、铬、镍、钨、钼和其他元素，是为了改善钢的物理和机械性能，并防止钢中各种缺陷的形成。在钢中加入某种合金元素的量取决于对钢的要求，并考虑到该合金元素对钢的性能的影响。

钢中也常会有一些有害的杂质：磷、硫、氧、氢和氮的存在。这些杂质是由炉料和炉气带入钢中的。根据对钢的性能的不同要求，允许钢中存在某一定量的有害杂质。

电炉工作者的任务是熔炼出符合一定要求的化学成分和结构的钢来，同时力求消耗最少的原料、电能和劳动力。

电炉炼钢的原料是废钢、生铁、铁合金和各种造渣材料——石灰、铁矿石、萤石等。

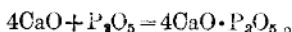
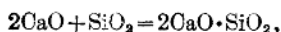
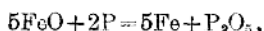
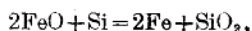
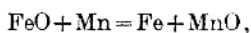
在电弧炉及感应炉内，分别依靠电弧所发出的热量及电磁感应应在炉料中所产生的涡流而加热、熔化炉料。

熔化时，由于空气中的氧和金属相互作用，使铁和炉料中的铝、硅、锰以及其他元素氧化。熔化期，要往炉内加入石灰，使在氧化过程中由于杂质的氧化所生成的氧化物与石灰作用形成炉渣并复盖住钢液。这种炉渣主要成分是氧化钙、二氧化硅和氧化亚铁。金属在熔化时从空气中吸收了一些氮气、氢气和氧气。当然，金属中的氮、氢和氧也有一部分是从炉料中来的。

熔化后，钢水中磷、硫的含量通常是超过允许的标准值，同样其他元素的含量也不符合该钢种所规定的成分。

为了去除有害的杂质，必须在熔池内首先进行氧化过程，然后再进行还原过程。进行氧化过程的那段时间叫做氧化期，进行还原过程的那段时间则叫作还原期。熔化完毕后紧接着的便是氧化期。

如上所述，炉渣内有氧化亚铁和氧化钙，为了增加炉渣中这些氧化物的含量，通常往炉内补加铁矿石和石灰。氧化亚铁和金属中的那些与氧的亲合力比铁大的杂质起作用，结果发生下列的反应：



碳氧化而生成的一氧化碳以气泡的形式从钢中逸出，这些气泡先上浮至熔池表面，然后排入炉气，而其他氧化物则转入炉渣内。钢水中所析出的气泡搅拌钢水，促使了其他氧化反应的加速进行。金属中气泡的排出与液体的沸腾很相似，这时氮气和氢气从钢水中扩散到一氧化碳气泡中去，从而降低了钢中氮、氢的含量。因而，碳的氧化反应也促使钢中氮气和氢气的排除。

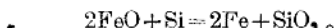
氧化期能从钢中除去部分的硫，这些硫在钢中是以硫化铁形式存在的，硫化铁和氧化钙以下列反应起作用：



硫化钙不溶于钢水中，因而进入炉渣。

氧化期结束后，钢水中的碳和有害杂质降低到所要求的范围，

于是从炉内扒出氧化渣，熔炼就进入了还原期。在扒出氧化渣之后，为了造含氧化亚铁低的还原渣，往炉子内加入石灰和废耐火粘土磚。因此在还原期氧化亚铁从鋼水轉入炉渣。往炉渣的表面加焦炭粉和硅鉄，焦炭中的碳和硅鉄中的硅則按下列反应使渣中的氧化亚鉄还原：



渣中的氧化亚鉄含量的不断减少，就导致鋼中氧化亚鉄含量的逐渐降低。

在还原期进一步去硫是以下面反应进行的：



这个反应在氧化期同样进行，但是在还原期中则进行反应的条件更为有利。

在氧化期和还原期中向熔池内加入鉄合金以及其他加入料使得鋼水达到所要求的化学成分。

还原过程結束和所有加入料溶解后，則进行出鋼和澆注。在出鋼和澆注时，鋼中的元素可能被空气中的氧再次氧化。

鋼水在結晶时会造成其物理和化学性能的不均匀，这就使得鋼的性能变坏，也是鋼中出現各种缺陷的原因。

在整个熔炼过程中以及在鋼的澆注和結晶期間，必須創造条件以发展其有利过程和抑止其有害过程的进行。因此，必須要知道改变外界条件对电炉炼鋼所发生的化学反应过程的影响。

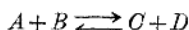
本书第一篇便是研究控制电炉熔炼过程的基本的物理化学規律以及各种因素的影响。

第一章 基本的物理化学规律

气体反应的平衡

气相中的反应和所有均匀反应一样,都不能进行到底,即参加反应的原始物质不能完全转变为生成物。

如果在一定温度下两气态物质反应按下列反应式进行:



则反应一直进行到参加反应的物质的分压和反应产物的分压间达到平衡时为止。平衡不应理解为反应的完全停止,而应这样理解:因由左向右的反应而消失的 A 、 B 的量和生成的 C 、 D 的量相应地等于由相反方向进行的反应,即从右向左所生成的 A 、 B 的量和所消失的 C 、 D 的量。平衡时,气体分压之间的关系由质量作用定律决定。

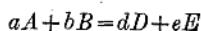
上述反应根据质量作用定律得:

$$\frac{p_C \cdot p_D}{p_A \cdot p_B} = K_p,$$

式中 p_A 、 p_B 、 p_C 、 p_D —物质 A 、 B 、 C 、 D 的分压;

K_p —用分压表示的平衡常数。

对于较复杂反应



质量作用定律可写成下列的方程式:

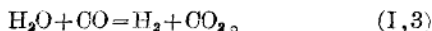
$$\frac{p_D^d \cdot p_E^e}{p_A^a \cdot p_B^b} = K_p$$

写成这种形式的质量作用定律,只适用于参加反应的气体

服从于理想气体定律。冶金过程，一般在很高的温度下进行，参加反应的气体压力又不高。在这样的条件下，所有的气体都服从理想气体定律。因此，在研究冶金炉内所进行的气体反应时，可以没有限制的应用质量作用定律。

平衡常数的间接确定

在由 H_2 、 O_2 、 CO 、 CO_2 和 H_2O 组成的系统中，可进行下列反应：



反应方程式 (I, 3) 是反应方程式 (I, 1) 和 (I, 2) 的差。如果反应 (I, 1) 和 (I, 2) 平衡，则反应 (I, 3) 也平衡。平衡时，反应气体的分压可以下列确定平衡常数的方程式表示出来：

$$\frac{p_{H_2}^2 \cdot p_{O_2}}{p_{H_2O}^2} = K_{p_1}, \quad (I, 4)$$

$$\frac{p_{CO}^2 \cdot p_{O_2}}{p_{CO_2}^2} = K_{p_2}, \quad (I, 5)$$

$$\frac{p_{CO_2} \cdot p_{H_2}}{p_{CO} \cdot p_{H_2O}} = K_{p_3} \quad (I, 6)$$

以方程 (I, 5) 除方程 (I, 4) 得：

$$\frac{p_{H_2}^2 \cdot p_{CO_2}^2}{p_{H_2O}^2 \cdot p_{CO}^2} = \frac{K_{p_1}}{K_{p_2}} = K_{p_3}^2$$

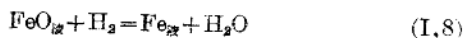
由此确定了三个平衡常数间的关系

$$K_{p_3} = \sqrt{\frac{K_{p_1}}{K_{p_2}}}. \quad (I, 7)$$

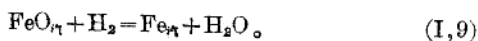
因此，知道了两个反应的平衡常数，就能计算出第三个反应的平衡常数。这种方法可用以确定那些直接用实验所不易确定的平衡常数。

多相反应的平衡

当参加反应的物质处于不同相内的时候,这种反应称之为多相反应。例如,



在这个反应中,参加反应的物质除气体外还有液态物质:铁和氧化亚铁。由于液体的蒸发,在气相中除有氢和水蒸汽外还有铁和氧化亚铁的蒸汽存在。在气相中还发生氢还原氧化亚铁的反应,其反应式为:



液体的蒸发一直到液体上面的空间被这种物质的蒸汽所饱和为止。恒温时,所有纯物质(液体或固体)的饱和蒸汽压为一定值。某些物质的蒸汽压和温度的关系如图 1 [1]所示。在 1600°C (1873°K) 时铁的蒸汽压等于 0.1 毫米,而锰为 35 毫米,即均为可量度的值。

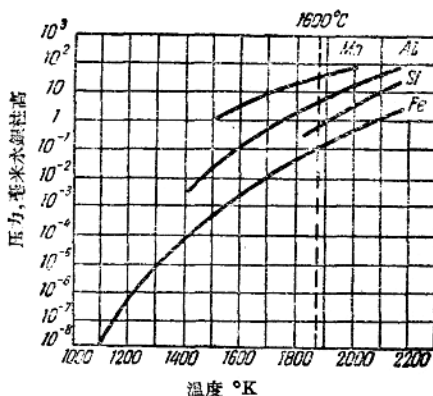


图 1. Fe、Si、Al 和 Mn 的饱和蒸汽压和温度的关系。