



[苏] M. Ф. 西多連柯 著

电炉炼钢的理论與工艺

长城特殊钢公司
第一钢厂 科学技术协会

电炉炼钢的理论与工艺

〔苏〕M. Ф. 西多連柯著

黄希祐 译

杨德鑫 校

长城特殊钢公司
第一钢厂 科学技术协会

本书简介

本书为苏联国内推荐的钢铁冶金专业的教学参考书，全书共分7章。主要讲述钢液和熔渣的结构及性质，氧、碳、磷、氮、氢在电炉炼钢过程中反应的理论基础以及电炉炼钢生产工艺的特点。

本书是大专院校钢铁冶金专业的教学参考书，亦供从事电炉炼钢的科研和工程技术人员使用。

序

本书是著者在荣膺劳动红旗勋章的莫斯科业余冶金学院（МБМИ）的讲稿。著者在编写本书中引用了该院图书馆内的专著和期刊，著者本人的研究成果，以及从事电炉炼钢理论和工艺方面的学院和工厂的实验研究结果。

本书适用于电炉炼钢专业的学生，但亦可供学习其他炼钢方法时参考。编写本书时考虑了学生已学习过《物理化学》、《冶金过程理论》、《普通冶金学》或《氧气转炉、平炉及电炉炼钢》这些课程。

本书主要是在现代物理化学的基础上讲述电弧炉炼钢过程的理论，并结合苏联及其国外工厂的实践进行阐述。

著者认为本书所讲授的分析冶金过程的方法是很重要的。

著者对МБМИ的获得俄罗斯联邦功勋科学技术活动家称号的炼钢教研室主任В. А. 库德林教授、Б. В. 林切符斯克教授、И. А. 马吉德松副教授、В. А. 卡尔梅柯夫副教授表示感谢。他们在著者编写本书中提出了建议和参加了讨论。

著者还要感谢Г. Н. 伊莱斯柯蒙教授，他积极地参加了本书内容的讨论。

著者对列宁格勒工学院《炼钢及冶金炉教室》的全体同人、А. X. 武拉日格尔吉夫和О. В. 特拉文教授致以谢意，他们对本书作了宝贵的评论。

绪 言

苏联的钢产量占世界第一位，近几十年来氧气转炉炼钢和电炉炼钢发展很快。电炉钢的产量在世界产钢量中的比率也在不断增长。

苏联在1981年—1985年及到1990年期间社会经济发展的主要方向是优先发展电炉炼钢和提高电炉钢在钢总产量中的比例。

电炉炼钢的发展和电能的增长密切相关。苏联的电能生产占世界的首位，这就给电炉炼钢的发展奠定了强大的基础。因而能建立大型的电弧炉和增加变压器的单位功率。此外，还实现了操作过程的机械化，控制过程的自动化，利用炉外精炼钢液法来提高钢的质量，采用连续铸钢及防止金属的二次氧化来提高钢的年产量。

美国工程师凯克林在1847年首次进行了用空气吹炼铁水的实验。英国的机械师贝氏麦在1855年首次在酸性转炉内炼成了钢，这是由于偶然选用了成分合格的生铁。但是取得这项专利的瑞典工程师盖罗先根据贝氏麦的冶炼规程并未得到合格的钢。仅是由于盖罗先的辛勤劳动及顽强的努力，在改变转炉的结构及采用合格成分的生铁后，才在1858年成功地炼出了合格的钢。

1864年法国工程师马丁利用德国学者威尔曼，西门氏的废气预热空气的原理，在火焰反射炉炉膛内熔炼出了钢。英

国的化学家托马斯在1878年于烧结白云石炉衬的转炉内完成了生铁的冶炼。

1867年，维尔涅尔。西门氏在柏林科学院发表了他发明的直流发电原理。这一发明能使电能广泛地用于工业中。他设计的电炉具有直立的碳质电极和碳质坩埚。但是这种炉子和同时期的其他结构的电炉一样，还不能熔炼出纯铁或低碳钢，因为金属熔体受到了电极和坩埚的增碳。1899年法国工程师爱拉发明的有两个直立电极的电炉，是近代电炉炼钢发展的基础。这种电炉采用了电流为2—3千安、电压为45伏的直流电流供电（其后改用了80—110伏的交流电源）又采用了预熔炉料。爱拉的主要功绩是利用炉渣把炉气与金属液隔开，因而后来能炼出一定化学成分和不同性质的钢。他在1900年在萨沃伊工厂中利用这种新的电炉炼钢法炼得的钢制成了第一个车箱。

这种新的炼钢法最初并未引起冶金工作者的重视，因为当时的炼钢方法——平炉法、托马斯法及坩埚法——能满足工业上所需要的钢。但列姆沙伊特优质钢厂的德国工程师林坚别尔格的远景是要实现爱拉的想法。他认为迅速改建坩埚炉无论从钢的质量或是从钢的产量方面都不能满足日益发展的汽车工业的需要。1905年他的工厂建成了爱拉式结构的容量为0.5吨的二相电炉，并在1906年进行了首次熔炼。多里沃—多勃罗沃尔斯基在1891年发明的三相交流电，能够建立三相电炉。于是在1910年，在马克也夫建成了第一座容量为3吨的这种电炉。大约与此同时，季斯先工厂建成了两座容量为6吨的电炉。1912年在这个工厂内又建成了容量为25吨的电炉。1915年在德国及1916年在美国，电炉炼钢的

生产量已超过了坩埚钢的产量。

因此，在19世纪末到20世纪初，完成了三种主要的炼钢方法，这些炼钢方法盛行了大约半个世纪。其中平炉炼钢法首先得到大量的发展，而电能的不足和其价格的昂贵阻碍了电炉炼钢法的推广。1927年钢的总产量为10000万吨，其中电炉钢的产量为100万吨。由于托马斯钢的含氮量高，其性能已不符合工业的要求。于是，总结平炉及电炉吹氧的多年经验是必要的，从而在1952年于林茨城的工厂实现了从转炉顶吹入氧气的炼钢法，这称为LD法或氧气转炉法。从这时起平炉钢的产量开始减少，而氧气转炉钢和电炉钢则增加。电炉钢在世界钢产量中的比例不断提高（表1）。如利

表1 世界电炉钢的产量

年	电炉钢的产量		年	电炉钢的产量	
	百万吨/年	占世界钢产量的%		百万吨/年	占世界钢产量的%
1960	36.3	11.0	1979	150.0	20.0
1970	83.0	14.1	1982	180.0	21.2
1977	116.0	18.7	1983	149.5	23.2

用现有的工艺方法及增加金属的资源，电炉钢可达到钢总产量的45%。

电炉钢生产的迅速发展和下列的主要因素有关：

1. 能够熔炼过剩的废钢，因为电炉的炉料组成可以是100%的废钢。由于氧气转炉炼钢的生产率高，平炉炼钢生产的减少及由于技术进步造成机器构件的提前老化而使折

旧期限缩短，均造成了大量的废钢。氧气转炉的热平衡表明，转炉仅能利用金属总量的20~25%的废钢（设想可增加到40—50%*）

2. 电炉熔炼技术经济指标的改善。这是由于增加了电能的生产及降低了电能的成本，提高了变压器的功率和电炉的容量，改进了电炉的结构和熔炼工艺的结果。由于上述原因以及发展了钢包冶金（真空冶金、吹氩、喷粉），就可能在大量电炉内熔炼品种众多的钢——由碳钢到合金钢。

3. 利用了金属化的炉料——海绵铁或金属化球团。前者来自铁矿石的还原，而后者由还原含有氧化铁及煤的球团矿而获得。在和大气接触时不可能熔化金属化的炉料，因为在高于250℃的温度下，被还原的铁已开始强烈地氧化了。只有将其加入到已熔化的金属中才可能利用这种炉料。因此在这种情况下，电炉是熔炼金属化炉料炼钢的理想设备。

苏联建立了世界最大的奥斯科尔河无焦电冶金公司。在第一批联合企业内建成了有4个150吨电炉的炼钢车间，除废钢外，还利用了金属化球团作炉料，规定用两台真空装置及四座吹氩设备对钢水进行炉外处理。

4. 小型钢厂的建设。新型金属加工厂的出现和远离复杂冶金中心的建筑工业的扩大，使冶金产品向这些地区的供应困难，并且从这些地区运出产生的废钢和金属废料的运输费用也高，因而在这些地区建设大型的冶金工厂是不经济的。因此，为了利用当地资源，开始建设年产5到50万吨，

* 根据100%转炉利用废钢的经验估计。

甚至是90万吨的小型钢厂。小型钢厂的特点是产品的品种和销售区有限。建设小型钢厂的想法并不是新颖的，早在30年代美国就出现了，但它们仅是在采用了生产力高的单渣熔炼法的电炉及连续铸钢法之后才得到大量的发展。第一台连续铸钢设备是1953年在诺沃土尔斯克冶金工厂内开始投产的，而在1958年美国的弗罗达第一座小型钢厂才开始投产。到1981年，美国的小型钢厂已达到年产钢1千万吨。在70年代初，法国、意大利、英国而后西德也开始出现了小型钢厂。

小型钢厂常包括有炉料准备车间，有2或4座生产力很高的电炉的炼钢车间及一或两台浇铸坯尺寸为 80×80 ， 110×110 ， 130×130 mm等的4流连铸机。有时紧接在连铸机后安装了能把金属轧制成，例如， 100×100 mm钢坯的轧机。在这种情况下，可把金属的轧坯送入轧机，生产型材、盘条、角钢、线材及满足邻近地区需要的各种产品。如果小型钢厂布置在铁矿开采地附近，那么可采用生产金属化球团的设备，而电炉最适合的生产率就决定于这种设备的生产能力。在70年代初，西德建成了一所小型钢厂，电炉采用金属化球团为炉料。电炉工艺的灵活性大，所以它是保证产品达到理想目标的最佳设备。

在苏联的白俄罗斯、摩尔达维亚及远东地区建立了三个小型钢厂。

目 录

第一章 金属	(1)
1. 晶体.....	(1)
结构 (1), 能量 (3), 缺陷 (5), 多晶体 (5), 固 溶体 (6), 扩散 (7), 导电性 (9), 导热性 (10)。	
2. 熔体.....	(11)
熔化 (11), 结构 (13), 溶液 (16), 表面张力 (22), 粘度 (29), 扩散 (33), 炉料的熔化 (39), 合金 化 (46)。	
3. 蒸气.....	(54)
蒸气的形成 (54), 结构 (56), 温度的影响 (58), 溶液 的蒸发 (60), 烟尘的形成 (64)。	
第二章 炉渣	(66)
1. 结构.....	(66)
键型 (66), 成分 (70), 熔体 (73), 溶液 (75), 非化 学计量性 (79), 金属液—熔渣的界面 (80)。	
2. 性质.....	(81)
表面张力 (81), 粘度 (84), 密度 (88), 扩散 (89), 导电性 (90), 界面张力 (92), 乳化作用 (95)。	
3. 熔渣的形成.....	(97)
石灰 (97), 润湿 (99), 溶解 (101), 熔渣成分的影	

响(109),耐火材料的作用(110),熔化期(112),氧化期(113),还原期(113)。

第三章 氧..... (115)

1. 金属..... (115)

溶液(115),性质(117),氧和炉衬的作用(123)。

2. 熔渣..... (124)

溶液(124),性质(130),氧化性(137)。

3. 元素的氧化..... (139)

铁(139),硅(148),锰(150),铬(159),多组分的熔体(161)。

第四章 碳..... (163)

1. 金属..... (163)

溶液(163),性质(165),氧的影响(171)。

2. 用铁矿石氧化..... (172)

热力学(172),气泡(179),金属—熔渣的界面(197),动力学(201),温度的影响(207),熔化期(209),氧化期(209)。

3. 吹氧氧化..... (210)

喷枪(210),吹氧区(215),热交换区(219),动力学(221),C—Cr—Ni熔体(225),熔化期(226),氧化期(226),喷粉(227)。

第五章 磷..... (230)

1. 金属..... (230)

溶液(230),性质(231),和炉衬的作用(232)。

2. 熔渣..... (232)

溶液(232), 性质(236)。

3. 磷的氧化..... (237)

热力学(237), 动力学(246), 金属成分的影响(247), 熔渣成分的影响(247), 温度的影响(249), 熔化期(249), 氧化期(250), 喷粉料(251)。

第六章 氮..... (253)

1. 金属..... (253)

溶液(253), 性质(255)。

2. 熔渣..... (257)

溶液(257), 性质(259), 渣中氮的溶解(262)。

3. 溶解..... (264)

氧的影响(264), 硫的影响(265), 电弧的影响(265), 动力学(267), 熔化期(276), 还原期(276), 出钢与浇铸(276), 机械性质(277)。

4. 氮化物..... (277)

热力学(277), 氮化物的形成(280), 晶粒的影响(282), 机械性质(283), 用合金进行氮化(284), 喷粉(284)。

5. 脱氮..... (285)

动力学(285), 氧化期(286), 吹氩(291), 喷粉(299), 真空处理(299)。

第七章 氢..... (302)

1. 金属..... (302)

溶液 (302), 性质 (310)。

2. 熔渣..... (313)

溶液 (313), 性质 (319), 溶解 (322)。

3. 溶解..... (324)

氧的影响 (324), 熔渣成分的影响 (325), 动力学 (325), 熔化期 (328), 还原期 (328), 出钢与浇铸 (328), 金属的质量 (328)。

4. 脱氢..... (329)

动力学 (329), 氧化期 (330), 出钢与浇铸 (333), 合成渣 (333), 吹氩 (334), 喷粉 (337) 真空处理 (337)。

附 录..... (344)

推荐的参考书..... (348)

第一章 金属

1. 晶体

结构 原子具有为带负电的电子所围绕的正电荷的核。核的直径约等 10^{-14} — 10^{-15} m。因为电子很小，而运动的速度又很高（约 10^6 m/S），所以常不把它看做孤立的质点，而看做以电子云形式分布的、具有波动性质的负电荷单位。电子云不象刚球，它的大小和形状却能随着原子间作用力的特点而改变。静止电子的质量规定为 9.11×10^{-31} kg，电子的电荷为 1.6×10^{-19} C。此电荷称为单位电荷，规定用（1—）表示。电子通过电势差为1V时的能量变化称为1电子伏特（eV）*。

把价电子从孤立的中性或正电荷的原子移至无限远的距离时所需的能量称为离化能或离化势（ U_i ），而此过程则称为离子化。从原子分离第一个电子所消耗的能量称为第一离化势。当原子电荷的绝对值等于电子的电荷时，规定用（1+）符号表示。分离第二个、第三个电子等所需要的能量则依次称为第二、第三个离化势等。离化势从一个起，依次增加，因为要从已形成的正离子再分离出电子就要消耗更多的能量。离化势愈小，则电子就愈易分离。铁的第一离化势等于7.89eV，而镍的为7.63eV。

* 见附录 1。

在一定的条件下，具有一定物理性质的每种材料称为物质。物质量的单位采用摩尔（mol）。物质的这个量表示它含有的原子、分子、离子或其它结构单位的数与0.012kg 碳的同位素 C^{12} 所含的原子数相同。一摩尔任何物质所含有的质点数称为亚弗加德罗常数， N_A ，它等于 6.022×10^{23} 。

摩尔物质的量称为摩尔量。铁的一摩尔量等于0.055847kg。

一摩尔物质占有的体积称为摩尔体积（量纲为 m^3/mol ）。

质点的质量由摩尔量对亚弗加德常数之比确定。铁原子的质量等于 $m_{Fe} = 0.055847 / 6.022 \times 10^{23} = 9.27 \times 10^{-26} kg$ 。金属的原子相互结合时，并不放出价电子，而是这些价电子成为集体所公有。金属键是由正离子对在离子间运动的价电子

的吸引力而产生的结合力。价电子是公有化了的，不再与任何一个离子结合，所以金属键没有方向性。金属键中不发生离子化，否则离子将彼此排斥。因此一般认为金属是由中性原子（质点）组成的。

原子在空间的规则排列称为晶格，它使晶体有一定的形状。晶体是由占有晶体整个体积的、在三维方向上、以一定距离呈现周期重复而有序排列的原子所构成。这种状态称为远程有序。如以设想的直线把晶格上的最邻近原子中心联接

而构成的体积，原称为晶格的单位晶胞。单位晶胞的棱长称为晶格常数。离某原子最近是有相同距离的原子数称为配位数（K）。

晶格中每个原子在一定位置附近以每秒约 10^{13} 次的频率不断振动。振动的频率决定于原子间的作用力，而在晶格的键力减弱时减小。振动的振幅则和温度有关。每个原子的振动在极大程度上决定于它周围其它原子的振动。每个振动原子的平均位置称为晶格的结点。结点之间的空间称为结点间位。当所有的结点为一种原子所占据，而并不对其平衡位置移动时则称这种有严格周期性的晶格为理想晶体。

能量 晶体的全部能量由内能和表面能组成。内能包括金属原子和公有化电子相互作用的势能以及振动的原子和运动的电子的动能。原子在结点上的分布要符合于它和公有化的电子有最大的作用能和最小的相互势能的原理。因此，势能决定了晶体的结构。内能与体积、压力、温度及物质的质量有关。故为比较方便计，常用摩尔内能表示。内能包含自由能和结合能，前者是温度不变时原子间键分裂或电子运动产生的能量，后者决定于质点的无序热运动及它们相对分布的能量，这种能量在温度不变时不能自发地转变为其他形式的能。晶体或熔体的内能等于它的热函（焓），因为晶体或熔体的体积在压力改变时实际上没有变化（《焓》一词是指任何形式的能——化学能、机械能、电能——转变成当量的热能）。焓可表示为

$$H = G + TS \dots \dots \dots (1)$$

式中 H——焓，J/mol； G——自由焓，J/mol； TS——结合能，J/mol； T——温度，K； S——熵，J/(mol·K)。

如前所述，任何形式的能均可转变为热能。但热能却不

能实现相反的等量转变，因为有部分的能量会因质点的无序热运动而耗散。熵是该温度下1K的结合能量，它是一种形式的能不能自发转变为其他形式的能的量度。我们可把它分为振动熵、平移熵、转动熵及键熵和组态熵。体系的熵乃是上述诸种熵的总和。

在晶体体积内，每个原子和其周围所有的原子，以对称的键力保持在一定的位置上。位于晶体表面的原子仅与晶体体积内的原子和位于同一平面上的原子相结合，因而作用在表面原子上的力是不对称的。这些原子不能具有相当于平衡的状态和最小的能量。作用在每个原子上的等效力力图把表面原子拉入晶体内。表面原子的配位数较小。与位于晶体内的原子相比，表面原子的能量与缺少的键数成正比增加。这种过剩的能量称为表面能，它是自由焓的一种。铁的表面自由焓

在1360—1400℃时为2.15—2.30J/m²，镍在1250℃及1450℃的表面自由焓分别为1.850和1.725J/m²。

因为表面的原子具有自由键，所以能和其他相的原子和分子作用。其他相的原子或分子为静电力保持在表面上的现象称为物理吸附，它的键力不大。当其他相的原子或分子因

形成化学键，更多的是形成共价键，而被保持在表面时，可观察到化学吸附。化学吸附的键能比物理吸附的键能要大得多。

电子能从表面层逸出，保持在离开晶体几个原子间距的地方。逸出的电子和金属内的正电荷之间的吸力又力图使电

* 参看附录1。