

金属材料生产及检验

北京航空学院 姜驰风 宋作舟 合编



国防工业出版社

编写说明

《金属材料生产及检验》是根据三机部所属院校的有关教师讨论拟订的教学大纲编写的。

本教材第一、二、三、六章由姜骥凤编写，第四、五章由宋作舟编写。

教材初稿经西北工业大学顾开道、吴诗淳审阅，并经过有关院校部分教师开会审查。

本教材在编写过程中，得到有关院校和工厂的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于我们的水平有限，书中难免有不少的缺点和错误，诚恳地希望广大读者批评指正。

编者

一九七九年十月



▲ 752053

概 述

在现代工业中常用的金属材料分为两大类：即黑色金属和有色金属，前者主要是指生铁和钢，后者主要是指铜、铝、镁、钛等。

生铁和钢是用途最广的金属材科。无论是建筑工厂、铺设铁路，还是兴修水利工程、制造工农业的各种机器、汽车、轮船、飞机、坦克和大炮等都需要钢和生铁。在国民经济中需要钢铁的数量是相当大的。例如铺设一公里长的铁路线所需要的钢轨、垫板、道钉等就要消耗约 100 吨以上的钢材。生产一辆解放牌汽车，制造一台东方红拖拉机或一台燃气涡轮发动机需要 3 吨左右的钢铁材料。由此可见，钢铁生产量的水平，是衡量一个国家工业水平高低的重要标志之一。工业发展历史证明，冶金工业在国民经济中占有重要的地位，它是发展机械制造和航空工业，实现我国社会主义四个现代化的重要基础之一。

1978 年我国钢、生铁和钢材的产量都完成了国家计划（钢 2800 万吨，生铁 2950 万吨，钢材 1900 万吨），钢产量为 3178 万吨。我国钢产量为世界第五位，次于苏联（15200 万吨），美国（12630 万吨），日本（10210 万吨）和西德（4250 万吨）。1978 年世界钢产量约为 71220 万吨。

目前我国拥有重点产钢企业 26 个，重点产生铁企业 20 个，重点产钢材企业 26 个，遍及全国各地。上海宝山钢铁总厂将是我国第一座具有七十年代先进技术水平的现代化钢铁联合企业，已经全面动工，建成后，计划每年产钢和生铁各 600 万吨。

随着国防工业，原子能工业及科学技术的发展，向冶金工业提出了超高级合金钢和新材料的要求。

在航空工业中，除了常用的钢，铝合金外，广泛发展应用镍基合金，钛合金，铝合金，钛合金和钴合金等。

金属（和合金）材料生产过程大致如下：

矿石 → 冶炼 → 铸锭 → 轧制 →

金属（和合金）材料（棒材，板材，管材和各种型材）。

金属（和合金）材料经过铸造、锻压等加工制成各种机械零件。

本课程主要讨论金属的冶炼，钢锭的浇注，铸造工艺，压力加工基本理论，压力加工工艺和材料的检验六部分。

目 录

概 述

第一章 金属的冶炼

第一节 生铁的冶炼	1
第二节 炼钢的基本原理	4
第三节 转炉炼钢	10
第四节 平炉炼钢	12
第五节 电炉炼钢	14
第六节 钢的真空处理	17
第七节 真空冶炼	22
第八节 电渣冶炼	23
第九节 铝的冶炼	25
第十节 钛的冶炼	28

第二章 钢锭的浇注

第一节 钢锭浇注设备	31
第二节 钢锭分类及浇注方法	32
第三节 钢锭的凝固及其结构	36

第三章 铸造工艺

第一节 铸件的应用	43
第二节 铸造过程的基本原理	44
第三节 铸件的制造	62

第四章 压力加工的基本理论

第一节 金属压力加工分类	83
第二节 金属的塑性变形	84
第三节 金属的冷变形	95
第四节 加工硬化金属在加热时的变化	98
第五节 金属的热变形	101

第五章 压力加工工艺

第一节 轧制	109
第二节 挤压	130
第三节 锻造	151
第四节 冷拉与冷冲压简介	173

第六章 金属材料的检验

第一节 低倍检验	179
第二节 高倍检验	184
第三节 钢的缺陷	185
第四节 无损探伤	202

第一章 金属的冶炼

金属冶炼是从天然矿石中提取纯金属和炼制合金的方法。本章主要讨论生铁和钢的冶炼方法,以及各种方法对钢的质量的影响。同时还介绍铝、钛的冶炼方法。

第一节 生铁的冶炼

一、铁的性质

纯铁是光亮的银白色金属。铁的比重为7.86,熔点为1534℃。在高温下铁易被氧化形成四氧化三铁(Fe_3O_4)。在自然界中,铁以化合物状态存在,其形式主要为磁铁矿(Fe_3O_4)和赤铁矿(Fe_2O_3)等。

铁和碳构成铁碳合金。在工业上广泛应用的钢和生铁,都是铁碳合金。通常,生铁和钢主要是按其含碳量的多少来区分的。生铁中的含碳量比钢中多,含碳量等于或大于2.06%的铁碳合金称为生铁,含碳量小于2.06%的称为钢。

生铁和钢,因其含碳量不同,而引起性能的变化。生铁的熔点为1100~1200℃,性质脆而硬,无韧性,不能轧制和锻造。生铁的铸造性良好,故常用于铸造机器零件。钢的熔点比生铁高,为1450~1500℃,强度高,塑性好,韧性强,可以锻造、轧制和铸造。钢的性能比生铁优越,用途更为广泛。但钢的价格比生铁贵。

二、高炉炼铁的过程

生铁是高炉的产品。炼铁的原料为铁矿石、焦炭和石灰石。炼铁时,原料按一定比例,每隔一定时间从高炉(图1-1)炉顶装入,逐渐下降,热空气从高炉下部的风咀鼓入,逐渐上升。原料和气流形成对流,充分接触并发生一系列化学反应,冶炼成生铁。铁矿石中难熔的脉石(主要为 SiO_2)与石灰石分解后的氧化钙(CaO)结合成炉渣。炉渣的比重小,熔化后浮在生铁液体的表面。生铁和炉渣分别从高炉下部的出铁口和出渣口定时(一般间隔2~4小时一次)流出。流出的生铁液体可直接送往炼钢车间进行炼钢,或浇注成生铁铸锭,供铸造车间作为铸铁零件的原料之用。

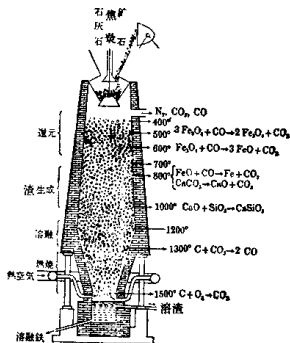


图1-1 高炉示意图

容积为1500~1700立方米的高炉,每昼夜大约生产2300吨~2600吨生铁。每生产一吨生

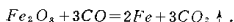
铁大约需要1.6吨铁矿石、0.5焦炭和0.2吨石灰石。

最大高炉的容积，日本太钢制铁所为5070立方米，日产生铁12000吨，美国伯利恒钢公司为3680立方米，我国上海宝山钢铁总厂将建的为4063立方米，高120米，年产300万吨生铁。

高炉生产最主要的技术经济指标是高炉利用系数和焦比。每昼夜每一立方米容积生产的生铁数量叫做高炉利用系数。如高炉容积为1500立方米，每昼夜生产2250吨生铁，则高炉利用系数为1.5吨/米³·日。每生产一吨生铁所消耗的焦炭数量称为焦比。焦炭的消耗量越少越好。75年美国焦比平均为611公斤/吨，利用系数为1.5吨/米³·日，日本焦比为443公斤/吨，利用系数为2吨/米³·日。78年我国高炉焦比平均为529公斤/吨，利用系数平均为1.57吨/米³·日。我国某炼铁厂的一高炉焦比降到351公斤/吨，利用系数达3.15吨/米³·日，创造世界先进水平。

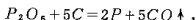
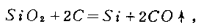
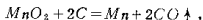
三、炼铁的物理化学过程

炼铁的基本原理是还原作用。在高炉内，铁矿石（ Fe_2O_3 ）经过空气与焦炭燃烧生成的一氧化碳气体（或碳）的还原作用，还原成铁，其反应如下：



三氧化二铁被一氧化碳还原分三步进行， Fe_2O_3 相继还原成 Fe_3O_4 ， FeO ，最后还原成 Fe （见图1—1）。由于高炉内存在着大量的一氧化碳和焦炭，因此还原出来的铁吸收碳，就成为生铁。正是由于碳能较多地溶于液体铁中，所以从高炉中冶炼出来的只能是生铁。

铁矿石中除了铁的氧化物以外，还伴有其它脉石，如二氧化锰（软锰矿）、二氧化硅、磷酸钙和硫化铁等。因此在还原氧化铁的同时，也还原了锰、硅和磷的氧化物，反应如下：



还原出来的锰、硅和磷溶于生铁中。脉石中的硫化铁直接溶于生铁中。这就是为什么在生铁中除了碳以外，还常伴有杂质锰、硅、磷和硫的原因。余下的没有被还原的脉石与石灰石分解后的氧化钙结合成易熔炉渣。锰、硅、磷和硫在铁中的含量，取决于原料中脉石数量、炉内温度和炉渣成分。原料中的磷，差不多完全被还原溶入生铁中。铁矿石中的锰（70~80%），被还原进入生铁中。炉内温度高和炉渣碱度大即炉渣中氧化钙含量多于二氧化硅的含量时，有利于锰的还原，生铁中含锰量就高。炉内温度高和酸性炉渣即炉渣中二氧化硅多时，有利于硅的还原，生铁中硅含量就高。原料中的硫少量的转入铁中，大部分的硫可以形成硫化钙（ CaS ），它不溶于铁中而进入渣中。遗憾的是高炉冶炼时一般为酸性炉渣，大部分的硫就难以形成硫化钙进入渣中，而留在铁中。可见，在高炉炼铁过程中，控制炉温和炉渣成分，尤其是炉渣成分是极其重要的。它们决定着生铁的成分和质量。

四、高炉生铁

高炉冶炼的生铁有两种：铸造用生铁和炼钢用生铁（见表1—1和表1—2）。

铸造生铁是应用于铸造零件。铸造生铁含硅量较多，达1.26~4.25%，含碳量一般在2.80~3.50%之间。生铁中碳以两种形态存在，一种是碳和铁成化合物即 Fe_3C 形态存在；一种是碳以游离状态即石墨形态存在。铸造生铁中由于硅的含量较多，碳以片状石墨形态存在，断面呈灰色，故又称为灰口生铁或灰口铸铁。

表1-1 普通铸造生铁

铁 号		化 学 成 分 %									
		硅	锰			磷				硫	
牌 代 号 号		1 组	2 组	3 组	1 级	2 级	3 级	4 级	1 类	2 类	3 类
					不大于	普 通	高 磷		不 大 于		
铸 40 Z40	3.76~4.25	≤0.5	0.51~ 0.9	0.91~ 1.3	0.1	0.11~ 0.3	0.31~ 0.7	0.71~ 1.2	0.02	0.03	0.04
铸 35 Z35	3.26~3.75										
铸 30 Z30	2.76~3.25								0.03	0.04	0.05
铸 25 Z25	2.26~2.75										
铸 20 Z20	1.76~2.25								0.04	0.05	0.06
铸 15 Z15	1.26~1.75										

表1-2 炼 钢 生 铁

铁 种	铁 号		化 学 成 分 %						
	牌 代 号 号	硅	锰	磷			硫		
				1 级	2 级	3 级	1 类 不	2 类 大	3 类 于
碱性平炉	碱平08 P08	≤0.09	不 规 定	≤0.15	≤0.2	≤0.35	0.03	0.05	0.07
	碱平10 P10	0.91~1.20							
炼钢生铁	碱平13 P13	1.21~1.40							
酸性侧吹 转炉炼钢 生 铁	酸转13 S13	1.01~1.60	0.50—1.00	≤0.07					
	酸转18 S18	1.61~2.00							
碱性侧吹 转炉炼钢 生 铁	碱转08 J08	0.60~0.90	不 规 定	/	/	0.81~1.60	0.04	0.06	0.08
	碱转10 J10	0.91~1.20			0.41~0.8	0.81~1.60			
	碱转13 J13	1.21~1.50		≤0.4	0.41~0.8	/			
	碱转18 J18	1.51~1.90		≤0.4	/	/			

炼钢生铁主要用作炼钢的原料，但也有极少数用于铸造零件。这种生铁含锰量较高，含硅量较低。含碳量在4%左右，其中碳常以碳化三铁(Fe_3C)形态存在，性较硬而脆，断面呈

银白色，故又称为白口生铁或白口铸铁。

五、高炉炼铁新工艺

现代高炉冶炼工艺为了提高生产率和降低价贵的焦炭用量，采用了一些有效措施，如改进炉料准备方法，提高风温（空气温度），向高炉内喷吹燃料，富氧送风以及操作自动化等。

由于钢铁工业的迅速发展，冶金焦炭的消耗量逐年增加，世界各国炼焦煤的资源日益缺乏。采用向高炉内喷吹燃料的方法，可大幅度降低焦炭消耗量，同时提高了高炉的生产率。它是现代高炉生产中一项重大的技术革新。从二十世纪五十年代末试验成功后，喷吹技术得到迅速的发展。目前喷吹燃料技术在外国（如日本和欧洲）普遍应用。我国自1962年试验成功后，迅速发展，各高炉相继采用。

喷吹的燃料有喷油，喷天然气，沥青，煤焦油和煤粉（喷入量为121公斤/吨）等。主要以各国燃料资源情况而定，如美国 and 苏联主要喷吹天然气，西欧和日本主要喷吹重油。有的工厂试验认为，在一般情况下，如喷入20公斤液体燃料可节约30~40公斤焦炭，并提高了高炉生产率。

富氧鼓风能大大地提高生产率。但由于氧气价格较贵，限制应用。近年来制氧方法的发展，大量利用价廉的氧气，使富氧鼓风方法更加切实可行。如采用6%的富氧鼓风，生产率可提高20~25%。喷入燃料和富氧鼓风相互补充，是最近几年高炉生产迅速发展的主要因素。

不久的将来，可能研究成功用原子能炼铁，用原子能代替焦炭的问题。

第二节 炼钢的基本原理

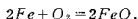
生铁炼成钢的基本原理是氧化作用。前面已经讨论过生铁与钢的主要区别在于含碳量不同，含碳量多的为生铁，含碳量少的为钢。因此，只要把生铁中的碳量降低到2.06%以下，就成为钢。降低生铁中的含碳量，采用氧化方法。生铁中的碳依靠纯氧，空气和铁矿石（ Fe_2O_3 ）中的氧，氧化除去，与此同时，生铁中的杂质（ Mn 、 Si 、 P ）也被氧化除去；硫与氧化钙作用生成硫化钙（ CaS ），成为炉渣除去，这样生铁就冶炼成钢。这种钢总称为碳素钢（或称碳钢）。由于钢中含碳量不同，又可分为低碳钢（含碳量 $<0.25\%$ ），中碳钢（含碳量在0.25~0.6%之间）和高碳钢（含碳量 $>0.6\%$ ）。在钢中加入合金元素铬、镍、锰、硅、钼、钒、钴、钛、铝、铜、铌和锆（ Cr 、 Ni 、 Mn 、 Si 、 W 、 Mo 、 V 、 Co 、 Ti 、 Al 、 Cu 、 Nb 和 Zr ）等，就称为合金钢。

在飞机结构中，有的螺栓、装配接头、垫片和在航空仪表中的转轴、弹簧等都用碳钢。飞机的起落架、机翼上的接头、航空发动机的燃烧室的涡轮器和锁片零件、压气机整流叶片、导向器零件、涡轮盘、导弹圆筒形壳体 and 燃烧室、航空仪表中的导磁材料等都采用合金钢。

一、硅、锰、碳的氧化

当炼钢炉内存在氧化气氛时，氧就不断地传入金属，而溶于金属中的元素也不断地被氧化。

当氧与生铁接触时，首先进行铁的氧化，反应如下：



所生成的氧化亚铁溶解于金属内，向铁水中扩散并将氧传递给杂质。杂质与氧有较大的亲和力，发生氧化。氧与金属液接触后，也可能直接氧化杂质。

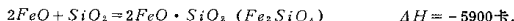
1. 硅的氧化

硅和氧的亲和力很大。故最易氧化，硅的氧化反应为：

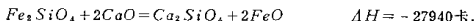


硅的氧化反应是放热反应，在冶炼初期炉温较低，有利于硅的氧化。

在碱性炼钢过程开始阶段，反应生成的二氧化硅，部分地与氧化亚铁化合：



其后，由于炉内加入一定量的石灰，并逐渐溶解，氧化亚铁则被更强的碱从铁橄榄石驱逐出来，反应如下：



在碱性炉渣中，氧化钙能和二氧化硅生成复杂而稳定的化合物，从而固定炉渣中的二氧化硅。这样在碱性炼钢过程中，实际上硅的还原是不可能的，也就是说，碱性炉渣是硅氧化的重要条件。因此钢中硅的浓度能降低到极微量。

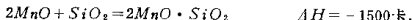
2. 锰的氧化

锰和氧的亲和力比较大，也容易氧化。锰的氧化反应为：

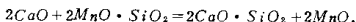


由反应式可知，低温钢液有利于锰的氧化。同时，炉渣中含有氧化亚铁多，氧化锰少和钢液中锰量高，也是锰氧化的有利条件。

当炉渣中存在二氧化硅时，则发生下列反应：



然而，在碱性炉炼钢过程中，由于渣中有大量的氧化钙存在，又有下列反应：



可见，碱性炉渣能促使自由的氧化锰增多。这是不利于锰的氧化的。当炉温升高时，氧化锰还会被还原出锰来，



上式是吸热反应，炉温越高，氧化锰还原越显著。所以在炼钢过程中，锰就不象硅那样能降低到极微量。在熔化期，电炉一般能氧化掉锰为原含量的50—60%，平炉一般为60—80%。

3. 碳的氧化

碳的氧化是炼钢过程中的一个最重要的反应。碳的氧化反应为：



碳的氧化不仅是把金属料中含碳量降低到所需的规定范围，更主要的是氧化反应所生成

的一氧化碳气泡，从熔池中排出，使液体金属受到搅动，引起熔池的沸腾现象。因而促使钢液中气体和非金属夹杂的排除，均匀钢液的温度。所以碳的氧化对成品钢的质量有很大关系。

在炼钢过程中，碳的氧化反应是复杂的物理化学过程。其反应由下面三个步骤组成：

1. 氧化亚铁从炉渣扩散到钢液中，



2. 钢液中的氧与碳反应，形成一氧化碳，



3. 一氧化碳以气泡状态自钢液中逸出，



以上反应的总和为：



氧化亚铁自渣中转移至钢液的过程是扩散过程。这一转移是由于钢液中氧含量低于与炉渣保持平衡条件的氧含量而引起的。扩散先在渣中、在炉渣与钢液的交界面进行，然后再在钢液内部进行。液体中的扩散速度进行得较慢，只有当氧浓度差很大时，其速度才能增加。

决定碳氧化反应（4）的速度主要取决于反应（1）。为了增加反应（1）的扩散速度就必须提高熔池的氧化能力。

目前广泛采用吹氧方法，提高碳氧化的速度。如在电炉炼钢过程中，氧气从炉门（门吹）或从炉顶（顶吹）吹入。吹氧时碳氧化速度一般为0.033~0.044% C/分钟。

二、磷、硫的去除

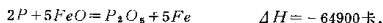
钢在冶炼时，除了要保证主要的化学成分以外，在钢中有害杂质磷、硫和气体（ N_2 、 H_2 、 O_2 和CO等）以及氧化物夹杂要少。因为这些杂质和夹杂的存在会降低钢的质量。一般以含硫量不超过0.03%的钢称为优质钢。

1. 磷的去除

磷在钢中是一个有害的元素，只有对于某些特殊的钢种才把磷当作合金成分使用。例如在制造易切削钢时，磷可作为合金元素加入，含量可达0.13~0.15%。

磷能很显著地降低钢的机械性能，特别是冲击韧性。当钢中含碳量越高，磷的危害性就越严重。钢件在冷加工时，就会产生“冷脆”现象，使钢件报废。磷在钢中偏析程度很大，仅次于硫，所以含磷较多时，就更加剧了它对钢的危害性。所以对磷的含量要求很严。对普通钢一般要求磷小于0.035%，对高级质量钢要求小于0.03%。

磷在钢中与铁结合成 FeP ， Fe_2P 或 Fe_3P 的化合物。一般来说，磷在液体钢中，多半以磷化三铁（ Fe_3P ）形式存在。为了要把磷从钢中除去，使它进入炉渣中，首先使磷氧化，反应为：



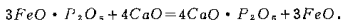
生成的五氧化二磷不溶解于钢中而转入炉渣。渣中五氧化二磷与氧化亚铁反应，



从上面两个反应方程式看出，氧化亚铁量越多，除磷反应进行越有利，同时这两个反应均是放热反应，故低温的条件对除磷反应也是有利的。

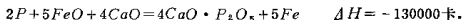
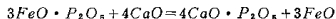
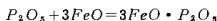
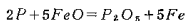
炉渣中的氧化亚铁和 $3FeO \cdot P_2O_5$ 在高温条件下都是不稳定的，磷可能按上述反应的逆向进行从炉渣中还原出来，进入钢中。所以一定要把五氧化二磷形成稳定的化合物，固定在炉渣中。

当炉渣中有足够高的碱度时，渣中含有的自由氧化钙就能与五氧化二磷结合，生成稳定的化合物，其反应为：



因此，在炼钢过程中，还需要依靠氧化钙才能更好地除磷。

由此可见，在炼钢过程中，除磷的过程是通过下列反应程序进行的：



在炼钢实际操作中，当炉温还没有升高，就在低温度时，即把炉渣扒出炉外，避免温度升高时，有磷的还原。

2. 硫的去除

一般认为，钢中含锰量不高时，硫主要以硫化铁 (FeS) 的形式存在于钢中。硫化铁无限溶于液体铁中，但在固态铁中溶解度极小 (0.015~0.020%)。硫化铁的熔点为 1193℃。因此当钢液结晶时，硫化铁与铁形成易熔的共晶体析出于铁的晶界上，在热加工时加热到低熔共晶温度 (985℃) 以上，晶界熔化，加工时破裂，造成钢的热脆。由于硫有一系列的缺点，因此冶金工作者力求使硫从铁中转入炉渣中去除之。

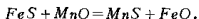
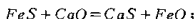
硫由钢液扩散到炉渣中



在炼钢温度下，硫化铁在钢和渣中都有很大的溶解度，硫化铁在渣和钢中的分配系数为 $(FeS)/[FeS] = 0.33$ ，此值很低。在平衡条件下炉渣中的含硫量低于钢液中的含硫量，所以以硫化铁的形态把硫由钢液排除到炉渣中是不可能的。

要很好地去除硫，提高硫在钢液和炉渣中的分配系数，即改变去除硫的条件，可以利用溶于炉液而不溶于钢液的硫化物特性。硫化钙 (CaS) 和硫化锰 (MnS) 具有这样的特性，它们能溶于炉渣而不溶于钢液。

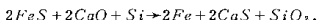
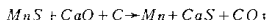
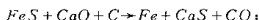
在炉渣中含有大量的碱性氧化物 (MnO , CaO) 时，与硫化铁反应为：



由此可见，提高炉渣中碱性氧化物的含量，特别是增加氧化钙，能促进去硫反应的进行。从反

反应式还可以看出，氧化亚铁浓度低也有利于除硫。当钢液中含硫很高时，如果在除硫过程中，炉渣很好地进行脱氧，减少氧化亚铁量，则除硫反应可以进行得很完全。

当炉渣中加入碳、硅和氧化钙时，除硫的反应为：



反应生成物一氧化碳呈气体逸出，二氧化硅和氧化钙结合成稳定的 $2CaO \cdot SiO_2$ ，所以这些除硫反应可认为是不可逆的。

一般炼钢过程主要是氧化作用，因此，很好地除去硫就不是很容易之事。只有在电炉炼钢时，才能很好地去硫。电炉通常可以把硫除到0.02~0.025%，甚至降到0.01%。

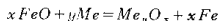
三、脱氧

进行炼钢时，为使生铁中的杂质氧化到规定的程度，就必须保证不断地供应氧。进入溶池内氧的来源，可以为炉内气体中的氧化性气体，如过剩空气中的氧，燃烧产物 CO_2 ， H_2O ，也可以为随炉料加入炉内的氧化物，如铁矿石，轧钢屑等。为了强化炼钢过程，有时也采用吹入压缩空气或纯氧。

钢冶炼结束时，钢中杂质已基本上去，达到了规定的要求，但在钢液内却残留有氧化亚铁。一般认为氧是以氧化亚铁(FeO)的形态溶于钢中的。氧在铁液内的溶解度，随温度的提高而增加，见图1—2。在温度1600℃时，与铁液内氧化亚铁平衡的氧气的压力(约为 10^{-8} 大气压)是很低的。这时溶解在铁液内的氧约为0.23%。

钢中氧的存在会降低钢的机械性能。因此在钢冶炼结束后需要进行脱氧。如一般熔炼的平炉钢中，氧含量不应超过0.02~0.03%。

钢液的脱氧过程，就是利用与氧亲和力比铁大的元素，直接或间接地从钢液中夺取以氧化亚铁形式存在的氧，其反应可用下面通式表示：



Me 是指脱氧元素。生成的 Me_yO_x 也是一种氧化物，在钢中也是一种非金属夹杂，有害于钢的质量。因此，在脱氧过程中不但要去除钢液中残留的氧，而且也要从钢液中排出脱氧产物。

在炼钢过程中，脱氧的方法有两种：

- 1) 沉淀脱氧。
- 2) 扩散脱氧。

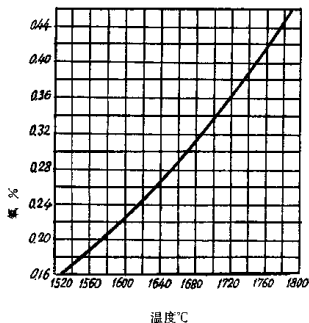
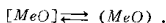
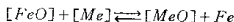


图1—2 氧在铁液内的溶解度

1. 沉淀脱氧

沉淀脱氧方法的原理是将块状脱氧剂如硅铁、锰铁、铝或硅锰、硅锰铝等加入钢液中，其脱氧元素还原溶解于钢中的氧化亚铁，生成在钢中有很小溶解度的氧化物而排至炉渣内。这种生成的氧化物应具有化学反应中的沉淀的性质，就是说应自钢中分出，但这种沉淀物的比重较钢液比重为小，因此能浮至炉渣之中。

沉淀脱氧的过程一般可以下式表示：



钢液中为脱氧而加入的 $[Me]$ 越多，系留在钢液中的 $[FeO]$ 将越低，即脱氧越完全。

这种沉淀脱氧方法的优点是脱氧速度快，但其缺点是脱氧产物易留在钢中而使非金属夹杂物增多。

脱氧生成的氧化物比钢液轻，有可能从钢液中浮到渣中。这样，这些氧化物上浮的速度决定了钢液纯净的程度。来不及浮出的，就在钢中造成了夹杂。

氧化物夹杂上浮到炉渣中的速度服从于斯托克斯定律：

$$V = K \cdot \frac{2}{9} \cdot \frac{g}{\eta} \cdot r^2 \cdot (d_{\text{金}} - d_{\text{渣}})$$

式中： V —上浮速度；

r —微粒半径；

g —重力速度；

$d_{\text{金}}$ 和 $d_{\text{渣}}$ —钢液和夹杂物的比重；

η —钢的粘度。

k —常数，接近于 1。

从式中可看出，钢液的粘度越小，氧化物夹杂的比重越轻，半径越大，则上浮到渣中的速度也就越快。

钢液的温度高粘度就小。在实际操作中要求有一定高的温度（太高对钢质量也是不利的），以活跃钢液和延长钢液在锭模内凝固时间，使钢液中夹杂来得及上浮。

钢的比重一般为 $6.9 \sim 7.2$ 克/厘米³。而一般氧化物的比重：氧化锰为 $d_{MnO} = 5.4$ 克/厘米³；三氧化二铝为 $d_{Al_2O_3} = 3.8$ 克/厘米³；二氧化硅为 $d_{SiO_2} = 2.2$ 克/厘米³。可见氧化物的比重波动不大，所以在在这方面改进也不会显著地提高上浮速度。

氧化物夹杂微粒半径的大小将极大地影响着上浮速度。上浮速度与微粒半径的平方成正比。为了提高钢的纯洁性，必须创造有利于脱氧生成物颗粒增长的条件。

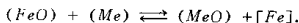
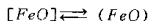
脱氧能力愈强的元素，它的氧化物熔点也就愈高，如氧化锰（ MnO ）熔点为 1550°C ，二氧化硅（ SiO_2 ）为 1710°C ，三氧化二铝（ Al_2O_3 ）为 2050°C 。因此单独用一种强脱氧剂时，生成固态的微粒氧化物，不能很好地排出。采用两种或两种以上脱氧元素组成的复合脱氧剂，形成两种以上脱氧产物而组成低熔共晶，有利于脱氧产物的集聚和上浮。现在广泛地采用复合脱氧剂如硅锰合金等脱氧。

2. 扩散脱氧

氧化亚铁在钢液与炉渣中均能溶解，温度一定时，两者间浓度的比为一常数：

$$[FeO]/(FeO) = L_{FeO}.$$

如渣中氧化亚铁的浓度得以减少，钢液中的氧化亚铁就会扩散到渣中维持其平衡分配。因此，可利用碳粉、硅铁粉等脱氧剂脱除渣中的氧化亚铁，使渣中的氧化亚铁不断减少，钢液中的氧化亚铁也就不断地扩散到炉渣中，而使钢液进行了脱氧。这种方法称为扩散脱氧。它一般可以下式表示：



由于脱氧反应在渣中进行，就避免了钢中夹杂物的生成。

扩散脱氧方法的缺点是脱氧时间长，延长了熔炼时间，降低炉子的生产率，同时消耗大量的脱氧剂。

现代炼钢的方法有三种即转炉炼钢法，平炉炼钢法和电炉炼钢法。

这三种炼钢法所用的炼钢炉的炉衬是碱性的（主要成分是氧化镁）或酸性的（主要成分是二氧化硅）耐火材料。因此又有碱性的转炉、平炉、电炉和酸性的转炉、平炉和电炉之分。

在酸性炼钢炉中炼钢时，不可能去除生铁中的硫和磷。因为在这种炉子中加入大量的氧化钙后会与酸性的二氧化硅炉衬作用，将炉子侵蚀坏。当生铁中硫和磷的含量极少，在炼钢时不需要将它们去除时，才用这种酸性炼钢炉炼钢。实际上含硫和磷极少的生铁是很少的，所以大部分采用碱性的炼钢炉炼钢。下面主要讨论碱性的转炉、平炉和电炉炼钢法。

第三节 转 炉 炼 钢

1855年英国的亨利·贝氏麦发明了用空气吹炼生铁而成钢的方法。贝氏麦炼钢法的发现是钢铁工业上的一个根本改变，使冶金工业有了很大的发展，人们由此可获得大量的廉价的钢。因此贝氏麦炼钢法是现代炼钢法的开始。

贝氏麦所用的炼钢炉称为转炉，其炉衬是酸性耐火材料，故又称为酸性转炉炼钢法。这种炼钢法由于酸性炉衬，不能除去生铁中的磷和硫，其发展就受到了很大的限制。

为了补救这点缺点，在1874年托马斯完成了碱性转炉炼钢法，又称托马斯炼钢法。所用设备与贝氏麦相似，但用碱性耐火材料做炉衬，在转炉中能加入石灰造成碱性炉渣，能除去生铁中的磷和硫。

一、转炉吹炼法

转炉炼钢的主要原料为液体生铁。液体生铁自炉咀倒入转炉（见图1—3）内，通过炉底（或炉子侧面）吹入空气使铁液氧化。铁液中杂质按其氧化物稳定性大小先后氧化除去，即硅和锰先被氧化除去，最后碳被氧化除去。冶炼成钢。为了去除生铁中的磷，可以加入石灰或石灰石，形成碱性炉渣，使磷成为磷酸钙去除。由于炉内大量吹入空气，氧化作用强烈，故虽是碱性炉渣，去硫还是有限

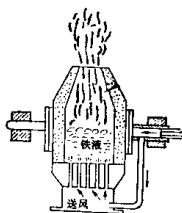


图1—3 转炉

的。

杂质的氧化放出大量的热，足以使铁液保持熔融状态，并在后期温度提高到 1640°C 左右，因此不需要用燃烧来加热。

杂质氧化结束后，倒出钢液，并加入适量的脱氧剂以脱去钢液中残留的氧，然后浇铸成钢锭。这种炼钢法冶炼的时间很短。30吨容量的转炉，由装料到出钢总共时间约为20分钟左右。

二、钢的质量和用

转炉主要冶炼含碳最低的钢(低碳钢)。钢中含氧和氮较多，尤其是氮最多，约为0.015%左右。这主要是由于空气吹入钢液，空气中有大量氮之缘故。因此钢的质量较差，强度、延伸率、冲击韧性较低。这种钢应用于强度要求不太高的地方。一般作线材，钉子，焊接钢管，钢轨以及农业机器等各种零件之用。

三、转炉炼钢法的优缺点

转炉炼钢的优点是设备简单，冶炼时间短，生产率高，不需要燃料，钢的成本低。缺点是钢中含氮量多，钢的质量低，由于冶炼时间短，钢液的化学成分不易准确控制，较难以应用废钢作为炼钢原料。

四、纯氧顶吹转炉炼钢法

由于转炉含氮量高等缺点，这就限制了它的应用和发展。为了提高钢的质量曾进行过很多的努力，直到五十年代初，氧气转炉炼钢法在工业上才取得了成功。现已广泛地采用纯氧顶吹转炉炼钢法，使转炉炼钢获得新生。氧气顶吹转炉钢的产量占整个钢的年产量的比例很大。如苏联占75年钢产量的34.2%，美国占84%，日本占将近100%。

最早的大容积纯氧顶吹转炉为30吨，后来发展到50吨转炉，最大的为300吨。我国一般为30吨。最近将在上海宝山地区新建两座容量为300吨的纯氧顶吹转炉，建成后每年钢产量约为600万吨。

纯氧顶吹法是将铁液(约70~90%)和废钢(约30~10%)装入转炉(图1—4)后，把转炉转到垂直位置，引入氧气的喷枪自炉咀插入炉内，开始供氧。喷枪喷嘴在液体上面1~1.5米的范围内，氧气压力为6~10公斤/厘米²。铁液中杂质氧化结束后，转动炉子，倒出炉渣、取样及测量温度。必要时向转炉内加脱氧剂，合金元素。调整钢液成分，进行出钢。300吨转炉冶炼时间为40~45分钟。

纯氧顶吹转炉炼出来的钢，含氮量少。如在低碳钢中，含氮量波动在0.001~0.002%的范围内，在个别情况下，钢中含氮量甚至小于0.001%。图1—5为不同炼钢法冶炼的钢中的含氮量。钢的质量与平炉钢相同甚至比平炉钢好。

纯氧顶吹炼钢法可以用10~30%废钢作为原料。采用废钢预热，则废钢量可达35%。目前不但能冶炼低碳钢、高碳钢，甚至能冶炼合金钢，如铬钼合金钢，滚珠轴承钢，电机钢等。

目前，在各种炼钢方法中，纯氧顶吹转炉发展最快，电炉也得到一定的发展，而平炉则在逐渐减少，这是世界钢铁工业发展的总趋势。

纯氧顶吹转炉之所以成为世界最主要的炼钢方法，最主要原因是它的钢质量高，不但能

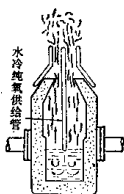


图1—4 纯氧顶吹转炉

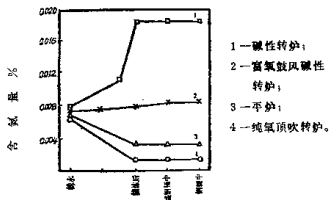
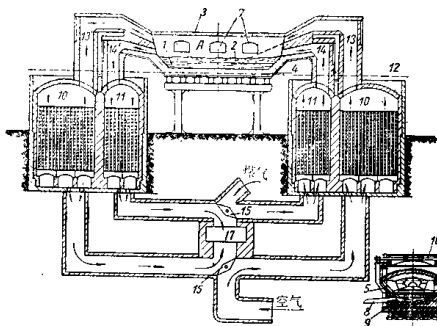


图1—5 不同冶炼方法对低碳钢中含氮量的影响

炼所有平炉钢种，而且能炼大部分的电炉钢种。其次，能全盘自动控制，生产稳定，产量高，成本低。

第四节 平炉炼钢

平炉炼钢法是现代采用的一种炼钢方法。过去，大约80%的钢是在平炉（见图1—6）内炼出来的。这种方法不但能用生铁，而且也能应用废钢作为炼钢的主要原料。进行冶炼时，采用燃料加热，能获得优质钢。由于纯氧顶吹转炉炼钢法的应用，平炉钢产量所占的比重有所下降。



1—熔化金属；2—熔渣；3—炉顶；4—炉膛；5—后墙；6—前墙；7—装料口；8—出钢和出渣口；9—耐火材料；10—空气蓄热室；11—煤气蓄热室；12—工作台水平线；13、13'—进空气道和出废气道；14、14'—进煤气道和出废气道；15—变向活门；16—煤头；17—烟道。

图1—6 平炉

一、冶炼方法

平炉炼钢的主要原料是液体生铁和废钢，也可以用全部废钢作为原料，其它还有铁矿石和造渣材料（如石灰石、萤石）等。原料自平炉的装料口（又称炉门）装入炉内，利用煤气或重油加热，使原料熔化。废钢和生铁液中的杂质依靠煤气燃烧后废气中的残留氧和加入炉内的铁矿石（ Fe_2O_3 ）中的氧进行氧化。杂质的氧化物（如 SiO_2 、 MnO 、 P_2O_5 等）与加入炉内的造渣材料结合成为炉渣，浮在钢液表面，碳被氧化成一氧化碳和二氧化碳气体逸出之。

金属材料中杂质的氧化，从装料起火焰通过金属材料表面，炉气中的氧直接氧化杂质。当熔池中炉渣形成，并覆盖在钢液表面上后，炉气中的氧就无法直接氧化钢液中的杂质，而是通过炉渣来进行，即炉气中的氧先作用于炉渣，通过炉渣再作用于钢液（见图1—7）。

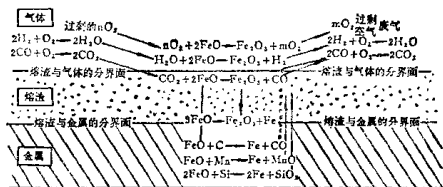


图1—7 炉气供氧示意图

炉气中的氧（ O_2 、 CO_2 、 H_2O ）与炉渣接触时，在炉渣与气体交界面上将渣中的氧化亚铁（ FeO ）氧化成三氧化二铁（ Fe_2O_3 ）。由于炉渣表面层三氧化二铁的浓度增高，故经炉渣扩散至下层，并在炉渣与钢液的交界面上与液体金属铁起反应而又被还原为氧化亚铁。

这样，在炉渣——金属液交界面上的氧化亚铁平衡状态与在气体——炉渣交界面上的情况完全相反。因此就产生一个不断的循环：一方面由到达炉渣表面上的气体引起 $FeO \rightarrow Fe_2O_3$ 的氧化反应；另一方面，与此同时又在炉渣的下层由熔池的铁将 Fe_2O_3 还原成 FeO 。这些氧化亚铁一部分返回炉渣上层再被氧化进行循环；另一部分或者直接在金属的交界面上与金属中的杂质起反应，或者熔于钢液后与杂质起反应，而将熔池中的杂质氧化。氧化所生成的氧化物（如 MnO 、 SiO_2 、 P_2O_5 ）进入炉渣；而一氧化碳是气体，穿过炉渣进入炉气。

通过氧化亚铁扩散将金属液中的杂质氧化，其速度较慢。为了加速氧化提高生产率，现正采用吹入空气，氧化杂质。

为了更好地去除杂质硫和磷，在炉渣中需加入较多的氧化钙（ CaO ）。只有在炉渣中氧化钙的含量多于二氧化硅时（称为碱性渣），才可能使硫和磷组成硫化钙和磷酸钙进入炉渣中。在平炉炼钢中，钢中硫和磷的含量可降低到0.03%左右。