

807

高等学校教材

材料工程导论

曲彦平 张义顺 编



机械工业出版社

本书共7章,主要阐述了钢铁冶金、铸造、锻压、焊接、金属材料热处理、表面工程技术、非金属材料的基本涵义、分类、应用和发展,介绍了相关学科的某些基本概念和理论,分析了某些学科和专业的特点和适用范围。

本书是有关材料科学与工程相关专业的一本专业知识的基本教材,可供各大专院校有关专业师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

材料工程导论/曲彦平,张义顺编. —北京:机械工业出版社,2001.1
高等学校教材
ISBN 7-111-08621-X

I. 材… II. ①曲…②张… III. 工程材料-高等学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第78979号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:余茂祚 版式设计:冉晓华 责任校对:张莉娟
封面设计:方 芬 责任印制:郭景龙
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2001年3月第1版·第1次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·7印张·167千字
0 001—4 000册
定价:12.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

《材料工程导论》是为了更好地执行国家教委新的专业目录而编写的。该教材主要介绍了与材料科学与工程相关学科及领域的基础理论、基本工艺、专业特点及学科的发展方向和动态，旨在增强学生对专业的认识，建立专业概念，以便尽早地使学生了解专业、认识专业，增加对专业的兴趣，为以后的学习奠定基础。

《材料工程导论》是一门专业认识基础课，涵盖了材料科学与工程、冶金学、机械学、物理学、化学、物理化学等学科和领域。本书共分7章，其中第1、5、6、7章由曲彦平编写，第2、3、4章由张义顺编写，曲彦平主编。

在本书的编写过程中，参阅和引录的一些主要文献资料列在书末参考文献中。成书过程中沈阳工业大学的王宗杰、韩行霖、于海鹏等教授、专家对本书的有关章作了认真和细致的审校，提出了许多宝贵意见，在此，我们谨向他们表示衷心的感谢。

由于我们学识和水平所限，经验不足，书中难免有缺点和错误，恳切希望专家和读者批评指正。

编 者

第1章 钢铁冶金

1.1 钢铁冶金概述

1.1.1 钢铁冶金的发展与现状

钢铁冶金这门学科具有悠久的历史，距今已经历了有数千年的发展过程。人类早在公元前 3000 多年就会用铁了。那时的铁是天空落下的陨铁，人们利用稀有的自然铁制作简单的工具。人类学会由矿石炼铁大约在公元前 1500~1400 年，而真正形成现代钢铁生产技术仅约 100 多年。世界各国钢铁冶金发展的历史虽各有不同，但大致都经历了下面三个阶段：

第一，把铁矿石放在火床中冶炼成粘饼状熟铁或软钢的时代（约 1300 年）。

第二，把铁矿石装入高炉中冶炼成液态生铁，再将生铁冶炼成软钢的时代（1400~1900 年）。

第三，以生铁、海绵铁或废钢为原料，在平炉、转炉、电炉中冶炼成钢或合金钢的时代（1900~2000 年）。

近年来许多新技术的发展和应用，使钢铁冶金获得了迅速的发展，整个钢铁领域正在发生一系列重大变化。现代钢铁生产的一般流程，如图 1-1 所示。

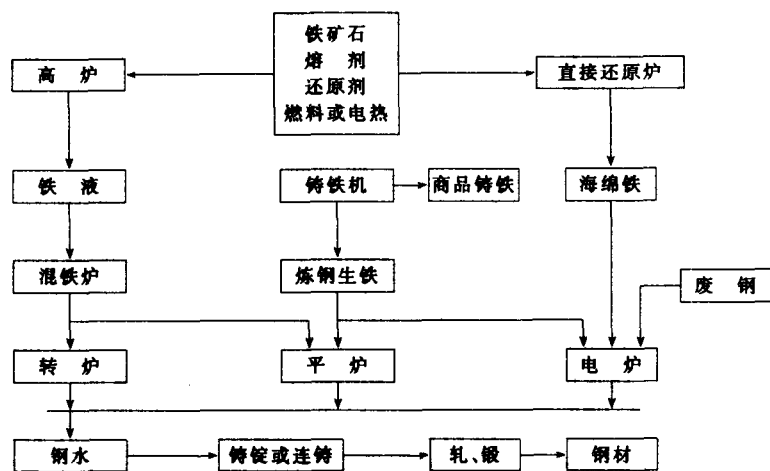


图 1-1 现代钢铁生产流程

由图可见，现在实际上存在着两种不同的钢铁生产工艺流程，即：

(1) 矿石—生铁—钢，即以高炉—转炉为主的流程。

(2) 矿石—海绵铁—钢，即以直接还原为主的流程。

传统的高炉—转炉炼钢流程，工艺成熟，可大规模生产，是现代钢铁生产的主要形式。新兴的直接还原—电炉炼钢流程，规模较小，目前还正在发展，是钢铁生产的重要补充。

我国是世界上最早发明钢铁冶炼技术的国家，我们祖先早在 3300 多年前就会利用陨铁进

行锻造加工，制造嵌有铁刃的铜钺。我国冶铁业正式兴起于春秋时期（即公元前 700~600 年），这比欧洲要早 1900 多年。战国初期产生了生铁柔化技术，使硬而脆的白口铸铁变成适于制造工具的展性铸铁，这比西方要早 2300 年。战国后期产生了最古老的炼钢方法——块炼钢渗碳钢及其淬火工艺。汉朝先后出现了铸造性能好的灰铸铁和球墨铸铁，又有铸铁脱碳钢、炒钢和百炼钢兴起。在公元前后（西、东汉之间）发明了水力鼓风炉，大大推动了炼铁技术的进步，这比欧洲要早 1200 多年。到南北朝又发明了灌钢，这是古代世界炼钢技术的突出成就。隋、唐以后至明末，我国钢铁产量大幅度上升，质量提高，品种多样，冷锻、冷拔、大型铸件和锻件等金属加工工艺都有进一步发展。我国古代钢铁冶金技术居于世界领先地位。到公元 1100 年，我国生铁年产量已达到 4000 多 t，居当时世界首位。公元 1200 年，我国冶炼生铁技术传入欧洲，而欧洲直到公元 1300~1400 年才能冶炼生铁。自清朝中期起，日趋没落的封建社会禁锢着钢铁冶金技术的进步。而欧洲则由于产业革命的兴起，迅速推动了钢铁工业的发展。我国现代工业始于 19 世纪末 20 世纪初。1890 年建立汉阳钢铁厂。1915~1934 年间，先后在本溪、鞍山、武汉、北京、太原等地建立了一些钢铁厂。但由于帝国主义、封建主义和官僚资本主义的腐朽统治，我国钢铁工业处于奄奄一息的状态。1943 年是解放前钢产量最高的一年，生铁产量仅有 180 万 t，钢产量达到 90 万 t，居世界第 16 位。而到 1949 年，生铁产量仅有 25.2 万 t，钢产量为 15.8 万 t，退居第 26 位。解放后，经过三年经济恢复时期和第一个五年计划（1953~1957 年），我国钢铁生产和技术取得了巨大的成就，向着世界先进水平迅速发展。1979 年，我国钢产量达到 3448 万 t，占世界钢产量的 4.64%，仅次于前苏联、美国、日本和德国，居世界第五位。1983 年，我国钢产量达到 4002 万 t，跃居世界第四位。1986 年，我国钢和生铁产量分别达到 5205 万 t 和 5008 万 t，分别为解放前历史最高年产量 1943 年的 58 倍和 28 倍，进一步巩固了我国钢铁工业在世界上的地位。到 1994 年，我国钢产量超过 9200 万 t，居世界第二位，铁产量超过 9400 万 t，居世界第一位。1995 年，钢铁产量进一步增加，钢产量居世界第二位，铁产量达到 1 亿 t 以上。1998 年我国钢铁产量均达到 1 亿 t 以上，成为世界钢铁产量的第一大国。

1.1.2 钢铁冶金在国民经济中的地位

材料、能源、信息是现代社会发展的三大支柱产业。而钢铁材料又是材料中的重中之重。钢铁工业是基础工业，对国民经济的发展和国防建设有着重要作用。工农业生产要机器，国防建设要武器，各行各业，乃至日常生活都离不开钢铁。这首先是因为钢铁材料具有良好的力学性能和物理化学性能，如强度高，韧性好，其中加入某些合金元素后，还能耐热、耐蚀、抗磁等；又易于进行热加工和冷加工，如铸造、锻压、拉拔、轧制、切削、焊接等，所以能满足人们的各种需要，目前尚不能为其它金属材料所代替。其次，从资源上来看，铁的蕴藏量极为丰富，含铁矿物在地壳中不仅藏量大，而且分布比较集中，世界上就有许多储量在 10 亿 t 以上的大型铁矿床，因此，比其它金属矿物（如钛、地壳中含量也不少，其质量分数占 0.6%，但分散）易于开采、冶炼和加工。故钢铁的生产成本比其它金属低得多。由于钢铁“质优价廉”，所以被广泛应用，成为社会物质文明必需的材料。从这个意义上说，当今的时代仍然是“钢铁时代”。人们可依据一个国家的钢铁产量，推测其经济发展水平。

近年来，由于西方一些国家对钢铁材料进行限量生产，因此，西方一些未来学派学者断言，钢铁工业是夕阳工业，这是不符合实际的。钢铁工业必将随着人类文明和进步而继续发展。

1.2 高炉炼铁

1.2.1 高炉炼铁的生产工艺过程及特点

高炉炼铁的本质在于用焦炭做燃料和还原剂，在高温下，将铁矿石或含铁原料中的铁从氧化物或矿石状态还原为液态生铁，所以，高炉炼铁的本质是铁的还原过程。而炼钢则为多余或无用元素和有害杂质的氧化去除过程。高炉炼铁生产过程见图 1-2。

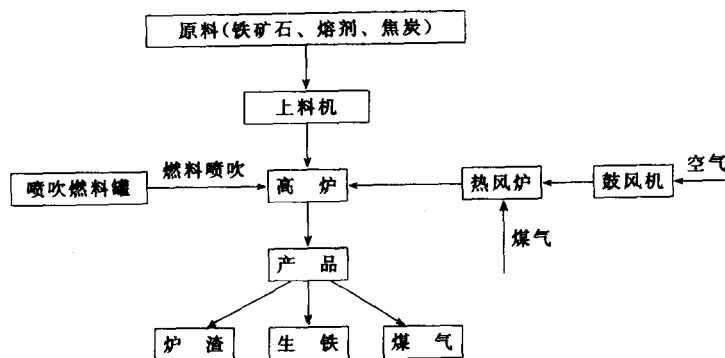


图 1-2 现代高炉炼铁生产流程图

高炉冶炼过程是一个连续的、大规模的、高温生产过程。炉料（矿石、熔剂、焦炭）按照确定的比例通过装料设备分批地从炉顶装入炉内。从下部风口鼓入高温热风使焦炭燃烧。燃烧产生的高温还原性煤气，在上升过程中与下降的炉料相遇，使其加热、还原、熔化、造渣，产生一系列的物理化学变化，最后生成液态渣、铁，聚集于炉缸，周期地从高炉排出。上升的煤气流由于将能量传给炉料，温度不断降低，成分逐渐变化，最后变成高炉煤气从炉顶排出。

高炉炼铁同平炉、转炉、电炉周期性的炼钢迥然不同。它一经开炉就必须夜以继日、成年累月连续地进行生产。除了计划检修和特殊事故暂时休风外，一般要一直生产到一代寿命終了时才停炉。这种生产的连续性决定了生产负荷的繁重和规模的巨大。在现代生产水平条件下，一座有效容积为 1513m^3 的高炉，其昼夜吞吐量高达 12000t 以上。即使是一座 100m^3 的小高炉，其昼夜吞吐量也达 1300t 。显然这样繁重的连续的大规模的高温生产，单靠人工是无能为力的，必然导致高度的机械化和自动化。

1.2.2 高炉炼铁原料和燃料

1.2.2.1 铁矿石

1. 铁矿石 天然铁矿石按其主要矿物分为赤铁矿、磁铁矿、褐铁矿和菱铁矿等几种。

赤铁矿：又称红铁矿，其主要含铁矿物为 Fe_2O_3 ，其中铁的质量分数为 70% ，氧的质量分数为 30% ，常温下无磁性。但 Fe_2O_3 有两种晶形：一为 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ，一为 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 。在一定温度下，当 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 转变为 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 时，便具有了磁性，质软较易破碎。

磁铁矿：主要含铁矿物为 Fe_3O_4 ，具有磁性。其化学组成可视为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$ ，其中 $w(\text{FeO}) = 31\%$ ， $w(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 69\%$ ；铁总的质量分数为 72.4% 。这种矿物与 TiO_2 和 V_2O_5 共生，叫钒钛磁铁矿；只与 TiO_2 共生的叫钛磁铁矿。我国四川攀枝花地区蕴藏量十分丰富。

褐铁矿：通常指含氧化铁的总称。如 $3\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 称为水针铁矿； $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 才称褐

铁矿。这类矿石一般含铁较低，但若事先经过焙烧去除结晶水后，含铁量显著升高。

菱铁矿：又称碳酸铁矿石，因其晶形为菱面体而得名。其化学组成 FeCO_3 ，其中 $w(\text{FeO})=62.1\%$ ， $w(\text{CO}_2)=37.9\%$ 。常混入 Mg 、 Mn 等的矿物。一般含铁较低。但若受热分解放出 CO_2 后，不仅品位显著升高，而且组织变得更为疏松，很易还原，所以这种矿石一般要先经焙烧处理。

2. 铁矿石准备处理流程 对天然富矿（如含 $w(\text{Fe}) > 50\%$ 以上），须经破碎、筛分，获得合适而均匀的粒度；同时还须混匀，以获得稳定的化学成分。这对使用多种矿石的高炉尤为必要。对于褐铁矿、菱铁矿和致密的磁铁矿还应进行焙烧处理，以去除其结晶水和 CO_2 ，提高品位，疏松组织，改善还原性，提高冶炼效果。

对贫铁矿的处理要复杂得多。一般必须经过破碎、筛分、细磨、精选，得到铁的质量分数为 60% 以上的精矿粉，经混匀后进行造块，变成人造富矿，再按高炉粒度要求进行适当破碎、筛分后入炉。冶炼前铁矿石处理的一般工艺流程如图 1-3 所示。

贫铁矿 → 破碎 → 筛分 → 细磨 → 选矿 → 精矿粉 → 混匀 → 造块（烧结矿或球团矿） → 筛分 → 贮藏 → 过筛 → 称量 → 入炉
 天然富矿 → 破碎 → 筛分 → 混匀 → 贮藏 → 过筛 → 称量 → 入炉

图 1-3 铁矿石准备处理的一般流程

很难用一种模式流程来处理各种矿石。必须依据矿石的品位、类型、特性和工厂的条件进行具体分析，精心设计，才能使所选流程因地制宜，切合实际。在一般情况下，由于天然富矿资源有限，而其冶金性能也不如人造富矿优越，所以绝大多数现代高炉都用人造富矿，或大部分用人造富矿，兑加少量天然富矿冶炼。在这种情况下，钢铁厂便有人造富矿和天然富矿两种处理流程。

1.2.2.2 熔剂

1. 种类 由于矿石脉石和焦炭灰分多是酸性氧化物，所以主要用碱性熔剂，如石灰石（ CaCO_3 ）、白云石（ $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ）等。石灰石资源很丰富，几乎各地都有；白云石则不然。由于白云石同时含有 CaO 和 MgO ，可以代替部分石灰石，以使渣中含有一定数量的 MgO ，改善渣的流动性，从而促进脱硫。这一效果在使用高 Al_2O_3 矿石，炉渣 Al_2O_3 高时特别显著。渣中 Al_2O_3 高时也可使用硅石、硅砂等石英质酸性熔剂洗炉。一般情况下不用酸性熔剂。即使是用高碱度或熔剂性矿石冶炼时，为了获得适宜的炉渣碱度，也只是采用兑入酸性矿石的方法。用酸性熔剂是不合理、不经济的。

2. 对碱性熔剂的质量要求 碱性氧化物的含量高，酸性氧化物的含量低。一般要求 $w(\text{CaO} + \text{MgO}) > 50\%$ ， $w(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) \leq 3.5\%$ 。否则，自耗大，降低其有效熔剂性能。

磷、硫含量低、强度高、粒度均匀、粉末少，一般石灰石的粒度为 25~75mm，小高炉为 10~30mm，最好是与矿石粒度一致。

1.2.2.3 高炉燃料

1. 焦炭 焦炭是高炉冶炼的主要燃料和能源基础。焦炭在高炉冶炼过程中具有三大作用：

(1) 作为燃料 燃烧后发热，产生冶炼所需的高温。

(2) 作为还原剂 焦炭中的固定碳和它燃烧后生成的 CO 是铁矿石还原所需的还原剂。

(3) 作为料柱骨架 高炉内是充满炉料和熔融渣、铁的一个料柱，焦炭约占料柱体积的 $1/3 \sim 1/2$ ，对料柱透气性有决定性影响。

2. 高炉对焦炭质量的要求

- (1) 含碳量高，灰分低。
- (2) 含硫等有害杂质少。
- (3) 成分稳定。
- (4) 强度高，块度均匀。

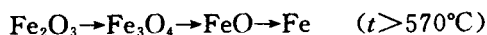
3. 喷吹用燃料 向高炉内喷吹辅助燃料可代替部分焦炭，大幅度降低铁焦比。目前喷吹的燃料已占高炉全部燃料用量质量分数的 10%~30%，有的达 40%~50%。喷吹用燃料来源广泛，有固、液、气体三种。

(1) 气体燃料 用于喷吹的有天然气、焦炉煤气、热转化气（如裂化天然气，重油裂化气）等。

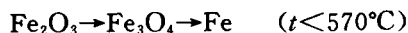
(2) 液体燃料 常用于喷吹的有重油，有时还用柴油、焦油。

(3) 固体燃料 常用于喷吹的是无烟煤粉、次烟煤。如长焰煤、气煤等。

1.2.3 铁氧化物还原的一般规律



在 $t < 570^\circ\text{C}$ 时，还原顺序不经 FeO 阶段，而按以下方式进行：



在高炉条件下，由于磁铁矿 (Fe_3O_4) 的还原在 570°C 以上才开始，因此铁氧化物的还原主要按第一种方式进行。

1.2.4 高炉炼铁产品

高炉冶炼的主要产品是生铁。炉渣和煤气为副产品。

1.2.4.1 生铁

生铁是碳及其它一些元素的合金。一般生铁中 $w(\text{Fe})$ 为 94% 左右， $w(\text{C})$ 为 4% 左右。其余为硅、锰、磷、硫等少量元素。生铁和钢在化学元素成分上的差别如表 1-1 所示。

表 1-1 生铁和钢化学成分的一般比较 (质量分数) (%)

成 分	C	Si	Mn	P	S	备 注
生 铁	>2.11	>0.5	0.5~2.0	<0.1~0.4	<0.07	酸性炼钢生铁中 $w(\text{P}) < 0.07$
钢	<2.11	<0.4	0.3~0.8	<0.05	<0.05	生铁锰量不作要求

一般说来，生铁和钢的化学成分主要差别是含碳量，其次是钢中的有害元素含量（如 P、S）要尽量低。按金属学铁-碳平衡相图，钢和生铁的分界线是 $w(\text{C}) = 2.11\%$ ，即在一般的钢中碳的质量分数不超过 2.11%，超过就是生铁。在铸铁中，碳的质量分数最高不超过 5.0%。因为 $w(\text{C}) > 5.0\%$ 时，铸铁很脆，没有实用价值。实际上，高炉生铁中碳的质量分数在 2.5%~4.5% 范围，钢中碳的质量分数在 0.03%~1.6% 范围。碳的质量分数在 1.6%~2.5% 之间的钢铁材料，由于缺乏实用性，一般不进行工业生产。由于含碳量的不同，钢和生铁在性能上的差别主要是钢可以塑性加工，而生铁则不能。

除含碳量外，差别大的还有磷。生铁中的磷含量取决于原料含磷量。采用低磷矿石不难炼出 $w(\text{P}) < 0.07\%$ 的生铁。由于炼钢方法的进步，对生铁含磷量的要求有所放宽。

随着高炉冶炼水平的提高,炼钢生铁中 Si 的质量分数可达 $0.1\% \sim 0.3\%$, S 的质量分数可达 $0.02\% \sim 0.04\%$, 已经达到普通钢铁要求。但生铁含碳量高。这是由高炉冶炼过程本质所决定的, 因为高炉内主要是还原气氛, 焦炭中的一部分碳元素必然要渗入铁中, 所以铁矿石经过高炉还原后只能得到生铁, 而不能一步炼成钢。

生铁种类按用途分为三种:

1. 炼钢生铁 作为转炉、平炉热装炼钢的原料。一般 $w(\text{Si}) = 0.6\% \sim 1.6\%$, $w(\text{S}) < 0.07\%$ 。它约占生铁产量的 $80\% \sim 90\%$ 。按炼钢方法不同, 炼钢生铁一般分为如下几种:

(1) 酸性转炉炼钢生铁(贝氏铁) 应含较高的硅 [$w(\text{Si}) = 0.9\% \sim 2.0\%$] 以供给炼钢过程的热能。而含磷、硫应特别低 [$w(\text{P}) < 0.07\%$, $w(\text{S}) < 0.05\%$]。因酸性转炉难以脱磷、脱硫。随着氧气顶吹转炉炼钢的发展, 这种炼钢方法已基本淘汰。

(2) 碱性转炉炼钢生铁(托马斯铁) 特点是磷的质量分数高 ($1.60\% \sim 2.0\%$) 而硅的质量分数低 ($0.2\% \sim 1.6\%$)。因为这种炼钢法的热能相当一部分要靠氧化来提供, 而硅的氧化物则严重侵蚀碱性炉衬。

(3) 碱性平炉炼钢生铁 要求含硅较低, 以减少渣量、铁损和熔炼时间。磷的质量分数一般在 0.3% 左右, 可用绝大多数的铁矿石炼成。含硫应尽可能低。酸性平炉炼钢法由于对生铁 P、S 含量要求严格, 至今已不多用。碱性平炉钢的比例也随着氧气顶吹转炉炼钢法的发展而逐渐减少。

(4) 氧气顶吹转炉和顶底复合吹炼转炉炼钢生铁 由于铁液预处理和转炉联合炼钢新工艺的发展, 对铁液成分的要求日趋放宽。因此, 在氧气顶吹转炉和顶底复合吹炼转炉中, 可用一般的生铁来吹炼成钢, 近年来这种炼钢方法已占主要地位。

2. 铸造生铁 又称为翻砂铁, 用于铸件生产。其主要特点是含硅较高, 其质量分数在 $1.25\% \sim 4.25\%$ 之间。每增加 $w(\text{Si}) = 0.5\%$, 递增一个牌号。硅在铁中能促进石墨化, 即使化合碳游离成石墨碳, 增强铸件的韧性和耐冲击韧度, 并易于切削加工。含一定量的锰可减少硫的有害作用。含适量的磷可增加铁液流动性, 改善其铸造性能。铸造生铁约占生铁产量的 10% 左右。

3. 特殊生铁 如锰铁、硅铁、镜铁 [$w(\text{Mn}) = 10\% \sim 25\%$] 等, 为高炉冶炼的铁合金, 用作炼钢。

1.2.4.2 高炉渣

按照冶炼矿石品位的不同, 冶炼每吨生铁产生渣量为 $0.3 \sim 0.8\text{t}$ 之间。高炉渣的主要成分是 CaO 、 MgO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 等。高炉每天所产生的渣量是相当大的, 过去未得恰当处理, 大部分抛弃, 不仅占地而且造成公害。如今可在炉前水冲处理, 制成水渣, 做成水泥和建筑材料。另外, 酸性渣可在炉前用蒸汽吹成渣棉, 做成绝热材料。目前高炉渣已变废为宝, 变害为利, 被广泛利用, 从而降低了生铁成本, 增加了企业盈利。近年来, 国内外已开始研究“熔渣粒化”新技术, 这不仅利用了渣, 而且还将回收其大量的潜热, 达到综合节能的目的。我国有许多元素共生的复合矿石, 冶炼时, 炉渣中富集了许多宝贵元素(如稀土、钛等)。因此, 广泛开展炉渣综合利用的研究, 提取这些有益元素具有重要意义。

1.2.4.3 高炉煤气

冶炼 1t 生铁可产生 $2000 \sim 3000\text{m}^3$ 的高炉煤气, 其中含有质量分数约 25% 的 CO , $1\% \sim 4\%$ 的 H_2 , 还有少量甲烷(CH_4)等可燃气体, 其发热值约为 $3000 \sim 4000\text{kJ/m}^3$ 。一座日产 2000t

生铁的高炉，每日产生的高炉煤气相当于 500t 标准煤（每千克标准煤发热量为 29300kJ）。或至少相当于 500t 原煤。对此巨大的能量，必须加以回收，充分利用。但从高炉排出的煤气中含有大量的炉料粉尘，须经过一系列除尘处理，使其含尘量降到 $10\sim 20\text{mg}/\text{m}^3$ ，方能使用。一般高炉煤气总量的 $1/3$ 左右用于自身热风炉的加热，其余可提供动力、炼焦、烧结、炼钢、轧钢等部门使用。清除的炉尘可用于烧结生产。

1.2.5 高炉技术经济指标及国内外冶炼水平

高炉冶炼的主要任务是以最低的消耗（包括能源、原料、耐火材料等），多出铁，出好铁，达到优质、高产、低耗的目的。为了衡量高炉生产水平的高低，通常采用如下的技术经济指标：

1. 有效容积利用系数 η_u

$$\eta_u = P/V_u \quad (1-1)$$

式中 P ——生铁日产量 (t/d)；

V_u ——高炉有效容积 (m^3)。

由式 (1-1) 可见，有效容积利用系数就是 1m^3 有效容积一天产生生铁的重量 (t)。利用系数越大，生铁产量越高，高炉生产率也就越高。 P 和 η_u 都是生产率指标。对一定容积的高炉， η_u 随 P 成正比地增加。对容积不同的高炉， P 无可比性，而 η_u 则可比。目前世界主要产铁国家年平均高炉有效容积利用系数为 $2.0\sim 2.5\text{t}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ ，先进高炉达 $2.8\sim 3.2\text{t}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ 。

2. 铁焦比 K

$$K = Q/P \quad (1-2)$$

式中 Q ——每日消耗焦炭量 (t/d)。

可见，铁焦比就是生产 1t 生铁所消耗的焦炭重量 (t)。在工厂习惯用 kg/t 来表示。显然铁焦比越低越好。在喷吹燃料条件下，不能只用铁焦比来表达，须用燃料比 ($K_{\text{燃}}$)，即每吨生铁耗用各种入炉燃料之总和。 $K_{\text{燃}} = (\text{焦炭} + \text{煤粉} + \text{重油} + \cdots)(\text{kg}/\text{t})$ 。

国外铁焦比日本最低，近年来一般在 $400\text{kg}/\text{t}$ 左右，燃料比一般在 $450\text{kg}/\text{t}$ 左右。我国重点企业年平均铁焦比为 $500\text{kg}/\text{t}$ ，居世界中等水平。

3. 冶炼强度 I

$$I = Q/V_u \quad (1-3)$$

可见，冶炼强度就是 1m^3 高炉有效容积每天消耗焦炭的重量 (t)。它是标志高炉强化程度的指标之一。目前国内外高炉冶炼强度的数值一般约在 $1.0\text{t}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ 左右。

由式 (1-1)、式 (1-2) 和式 (1-3) 可推导出利用系数、铁焦比和冶炼强度三者之间的关系为

$$\eta_u = I/K \quad (1-4)$$

可见，利用系数 η_u ，与冶炼强度 I 成正比，与铁焦比 K 成反比，要提高利用系数，强化高炉生产，应从降低铁焦比和提高冶炼强度两方面来考虑。在当前能源紧张的情况下，首先应考虑降低铁焦比。

4. 生铁合格率 根据国家标准，在一定期间（日、旬、月等）内，合格生铁占生铁总产量的百分数称为生铁合格率。此外，还有优质率，即优质生铁占生铁总量的百分数。合格率和优质率都是生铁质量指标。另外，对生铁质量的考查主要看其化学成分（如 S 和 Si）是否符合国家标准，一般合格率应在 99% 以上，甚至 100%。

5. 休风率 就是高炉休风时间占规定作业时间的百分数。降低休风率，即提高作业率是

增产节约的重要途径。一般休风率应在 2% 以下。

6. 生铁成本 就是生产 1t 生铁所需的费用。这是衡量高炉生产经济效益的重要指标。成本越低, 经济效益越高, 说明高炉生产效果越好。

7. 高炉一代寿命(炉龄) 从高炉点火到停炉大修之间的历程, 或高炉相邻两次大修之间的冶炼时间叫做高炉一代寿命。寿命越长, 则一代炉龄产铁量越高, 各项耗资相对越少, 经济效益越好。一般大高炉一代寿命在 10 年左右, 有的高达 18 年。我国武汉钢铁集团公司一座高炉寿命则长达 20 年(含中修)。近年来国际上对炉龄提出了新概念, 即在一代寿命之内无中修。应争取一代无中修高炉寿命达到 8~10 年。值得提出的是, 宝山钢铁公司 1 号高炉(4063m³)为我国目前第一座 4000m³ 级高炉。1985 年 9 月 15 日开炉生产后一年内达到各项设计指标。1986 年取得了好成绩, 其中 12 月份平均日产生铁 8674t, 利用系数 2.135t/m³·d, 综合铁焦比 491kg/t, 是国内最好水平。这证明我国已完全具备了掌握和管理像宝山钢铁公司这样现代化大型企业的能力, 对我国钢铁工业的发展将产生深远的影响。

1.2.6 非高炉炼铁概述

非高炉炼铁法是指不采用高炉而将矿石直接还原成铁或钢的方法, 此法在很早以前就被人们采用了。相对于以高炉为中心的间接法而言, 这种方法可称为直接炼铁法或直接还原法。

自从 20 世纪初为了获得生产特殊钢的原料和充分利用当地资源而将非高炉炼铁法用于工业生产以来, 特别是在瑞典, 直接炼铁法得到了迅速的发展, 诸如韦伯(Wiberg)法和(Hoganas)法直至今仍在继续运用于生产中。在第二次大战前, 大多数方法是以煤和电为能源的。在战后, 改进的回转炉与电炉相结合的电炉炼铁法开始投入实际工业生产。从 1950~1960 年开始研制以天然气和石油作还原剂的直接炼铁法, 到 1970 年代又进一步发展到了在工业规模上采用竖炉法和流化床法。

非高炉炼铁法, 虽然很早就对它进行了研究, 但工业化生产的规模很小。1972 年世界粗钢产量为 63000 万 t, 而还原铁的产量仅为 300 万 t。1975 年已投产的还原铁成套装置的年产量能力为 800 万 t, 正在建造中的或者已签订合同的生产能力为年产 1400 万 t。若将计划中的生产能力也包括在内, 则可以预计, 在不久的将来还原铁的生产能力将有相当大的增加。

主要非高炉炼铁法的概况如表 1-2 所示。

表 1-2 主要非高炉炼铁法的概况

还原装置	生产方法	还原剂	国 别	装置数	年产能力/万 t
固定床	Hoganas	焦炭	瑞典	2	10
	HyL	天然气	墨西哥	5	140
			巴西	1	25
			美国	3	40
	Midrex	天然气	德国	1	40
竖 炉			加拿大	1	40
	Armco	天然气	美国	1	33
	Purofer	天然气	德国	1	16
	Wiberg	焦炭	瑞典	3	9
流化床	HIB	天然气	委内瑞拉	3	100 (合计)
	FIOR	天然气	委内瑞拉	1	
		煤	新西兰	1	13

(续)

还原装置	生产方法	还原剂	国 别	装量数	年产能力/万 t
回 转 炉	SL-RN	粉尘处理 煤	巴 西	1	7
			日 本	1	35
	Krupp		南 非	1	15
电 炉	ELKEM	煤	南斯拉夫	5	50
	High. Steel	煤	南 非	5	110

近年来,在固定床、竖炉和流化床中使用天然气作为还原剂还原矿石的方法已成为非高炉炼铁主流。但采用固体还原剂的回转炉法在回收钢铁厂所产生的粉尘方面,也正在重新引起人们的注意。不管采用哪种方法,现在规模最大的成套装置已达到日产量 1000~1200t。

1.3 炼钢

1.3.1 炼钢用原材料

原材料的质量及供应条件对炼钢生产的各项指标有重大的影响。保证原材料的质量,不单是指化学成分和物理性质应符合技术要求,而且其化学成分和物理性质应保持稳定。这是保证按计划品种顺利进行生产,达到优质、高产、低耗、低成本的前提条件。必须大力改善我国炼钢原材料的供应和管理,积极发展入炉原料的预处理,提高原材料的质量。

炼钢的原材料可以分为金属料和非金属料两类。金属料主要指铁液(生铁)、废钢和铁合金;非金属料主要指造渣材料、氧化剂、冷却剂和增碳剂等。

1. 铁液 铁液是转炉炼钢的基本原料。铁液的成分和温度是否适当和稳定,对简化和稳定转炉操作并获得良好的技术经济指标十分重要。

在转炉生产过程中,应努力保证兑入的铁液温度高(1200~1300℃)而且稳定,以利于保持炉子“热行”,迅速成渣,减少喷溅。对于热量不富裕的小型转炉,铁液的高温尤其重要。除此之外,铁液的化学成分也应控制在一定的范围。铁液中的硅是重要的发热元素,硅的质量分数以 0.5%~0.8%为宜。铁液含硅量过高有很多缺点,如渣中 SiO₂ 增多,石灰消耗量增加,渣量增大因而使喷溅增大,随炉渣带走的铁损增多,加上硅本身的烧损使钢液收得率降低,炉衬侵蚀严重,寿命缩短,初期渣中 SiO₂ 超过一定浓度时,使石灰熔解困难,去除磷、硫的条件恶化,耗氧量增多和吹炼时间增长等等。相反,铁液含硅量过低,也会使石灰熔解缓慢,渣量过少也不利于去除磷、硫,而且炉渣覆盖钢液不足会引起金属喷溅,降低金属收得率。小型转炉铁液含硅量过低,不能保证正常的吹炼温度。特别是吹炼初期,不能保证熔池温度迅速升高到碳开始强烈氧化所要求的温度,熔池“冷行”和“平静”的时间增长,不利于早期快速成渣和去除磷、硫。铁液中的锰对顶吹氧气转炉用铁液的合理含锰量存在不同的观点。20 世纪 70 年代以来,美国有些钢铁厂向高炉加入锰矿把顶吹氧气转炉用铁液的锰的质量分数提高到 0.6%~0.9%,获得如下效果:化渣显著加快而氟石消耗量显著减少,并有利于去除硫和减少氧枪粘钢,炉龄显著延长,金属收得率提高,以及终点钢液残余锰量提高使锰铁消耗量降低等。铁液中的磷、硫是有害元素,磷是高炉中很难去除的元素。因此,只能要求进入转炉的铁液含磷量尽量稳定。对于中、高磷铁液或吹炼高碳低磷钢时,继续研究铁

液炉外脱磷是必要的；从氧气转炉诞生以来，从未停止提高氧气转炉内去硫效率的研究，然而收效甚微。实际上，顶吹氧气转炉单渣法操作的去硫率的质量分数很少超过 40%。在热量富裕的大中型转炉中，虽然采用双渣法或多渣法造高碱度渣的操作，可以把金属中的硫去得很低，但会降低炉子生产率，增加原材料消耗，并使各项经济指标显著恶化。近年来，用户对钢材性能的要求越来越高，对低硫钢 $[w(S) < 0.010\%]$ 的需求急剧增多。因此，必须降低入炉铁液的含硫量。对用于吹炼低硫钢的铁液，要求硫的质量分数小于 0.015%，甚至更低。

2. 废钢 废钢是电炉炼钢的基本原料。正因为如此，进年来由于废钢市场价格偏低，才使电炉炼钢的比重增加。废钢用量约占钢铁料质量分数的 70%~90%。氧气转炉用铁液炼钢时，由于热量富裕，可以加入质量分数多达 30%的废钢，作为调整吹炼温度的冷却剂。采用废钢冷却，可以降低钢铁料、造渣材料和氧气的消耗，而且比用铁矿石冷却的效果稳定，喷溅少。

废钢的质量对炼钢的技术经济指标影响很大，而废钢的来源往往很杂，因此废钢的管理和加工非常重要。废钢入炉前应仔细检查，严防混入封闭器皿、爆炸物和毒品，注意防止混入铅、锌、锡、铜等有色金属。此外，应尽量减少废钢带入的泥沙、耐火材料和炉渣等。

3. 铁合金 炼钢生产中广泛使用的铁合金和脱氧剂有：锰铁、硅铁、铬铁；脱氧剂有：硅锰合金、硅钙合金、硅锰铝合金，以及铝、锰、镍、钴等金属。铁合金大部分是在消耗大量电能的矿热炉中用碳作还原剂冶炼，有些含碳量很低的合金还要先冶炼中间合金再用金属热还原等方法生产，铝、镍等金属则是用电解法生产，价格昂贵。同一合金的不同牌号中，合金元素含量越高，碳、磷等杂质含量越低，价格越高。生产中，应该按所炼钢种的要求选用适当的牌号，以降低钢铁成本。

4. 造渣材料

(1) 石灰 是碱性炼钢方法基本的造渣材料。它由石灰石煅烧而成 ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$)，来源广，价廉，有相当强的脱磷和脱硫能力，不危害炉衬。对石灰的要求：CaO 含量高， SiO_2 和 S 的含量尽可能低。终渣碱度为 3.0，石灰中 SiO_2 的质量分数增加 1%，有效 CaO 的质量分数将减少约 3%。石灰含硫量高，意味着石灰的脱硫能力低，甚至反而增硫。冶炼低硫的钢种，对石灰的含硫量应有严格要求。石灰容易受潮粉化，变成硝石灰 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)，应尽量使用新烧的石灰，采用密闭的容器贮存和运输。这对电炉炼钢尤为重要。

(2) 氟石 是普遍应用的熔剂，其主要成分为 CaF_2 。它的熔点很低（约 930℃），还能使 CaO 和阻碍石灰熔解的正硅酸钙 (Ca_2SiO_3) 熔点显著降低，而且作用迅速，因而能加速石灰的熔解，迅速改善碱性炉渣的流动性。转炉炼钢要求快速造渣，氟石成为必备的材料。但大量使用氟石会降低炉渣粘度，增加喷溅，加剧对炉衬的侵蚀。电炉炼钢用的氟石，使用前应经过烘烤。

(3) 白云石 近年来，国内外氧气转炉车间普遍采用白云石 (MgCO_3)、白云石质的石灰等含 MgO 的造渣材料。加入一定量白云石代替部分石灰，增加渣中 MgO 含量，可以减少炉衬中的 MgO 向炉渣中转移，而且还能促进前期化渣，减少氟石用量和稠化终渣，减轻炉渣对炉衬的侵蚀，延长炉衬寿命。

5. 氧化剂

(1) 氧气 现在，氧气已经成为各种炼钢方法中氧的重要来源。炼钢用的氧气一般由厂内附设的制氧车间供应，用管道输送。实践表明，吹氧炼钢时钢中的含氮量与氧气的纯度有

密切关系。一般要求氧气的纯度（体积分数）应大于 98%。冶炼含氮量低的钢种时，氧气纯度（体积分数）应大于 99.5%。氧气的使用压力一般为 0.6~1.2MPa。

(2) 铁矿石、氧化铁皮 平炉和电弧炉炼钢已普遍应用氧气。为了改善脱磷条件，还需要使用一定量的铁矿石。作为氧化剂而使用的铁矿石，要求含铁量高， SiO_2 、磷和水分尽量少，使用前应加热。有时也利用轧钢和锻造车间的氧化皮代替部分铁矿石，但氧化铁皮潮湿，油污较多，使用前必须烘烤。

6. 冷却剂 除废钢外，转炉炼钢常用的冷却剂有：富铁矿、团矿、烧结矿、氧化皮、石灰石等。用富铁矿等炼铁原料或氧化铁皮作冷却剂，主要是利用它们所含的 Fe_2O_3 ，氧化金属中的杂质时要吸收大量的热。这部分炼铁原料可以直接炼成钢，并且利用了其中的氧；与废钢比较，加入时可以用装料机或桥式起重机，不必倒炉停吹；它们同时又是助熔剂，有利于造渣。缺点是带入的脉石使石灰的消耗量和渣量增大；一次加入矿石过多会使氧化期增长、产生严重喷溅等。

7. 还原剂和增碳剂 电弧炉炼钢使用的还原剂和增碳剂有石墨、炭粉、氟石、电石、硅铁粉、硅钙粉、铝粉等。它们的粒度应小于 0.5mm，使用前要烘烤。

应当指出，原材料供应条件的稳定性对炼钢生产，特别是转炉炼钢非常重要。最大限度地缩小入炉原材料的成分及物理性质的波动范围，保证相邻炉次原料的稳定，可以大大简化炼钢工艺操作，消除或减少补吹和后吹次数，提高终点碳和温度的合格率，缩小不同炉次钢材的化学成分和力学性能的波动，获得优良的技术经济指标。实践表明，保证原材料的质量和稳定性也是转炉炼钢采用计算机控制，实现自动化生产的必要条件。

1.3.2 转炉炼钢

1.3.2.1 转炉炼钢的结构与发展

转炉炼钢方法多种多样，根据氧枪的安放位置，主要可划分三大类转炉炼钢方法，即顶吹氧气转炉炼钢、底吹氧气转炉炼钢和侧吹氧气转炉炼钢。其结构如图 1-4 所示。

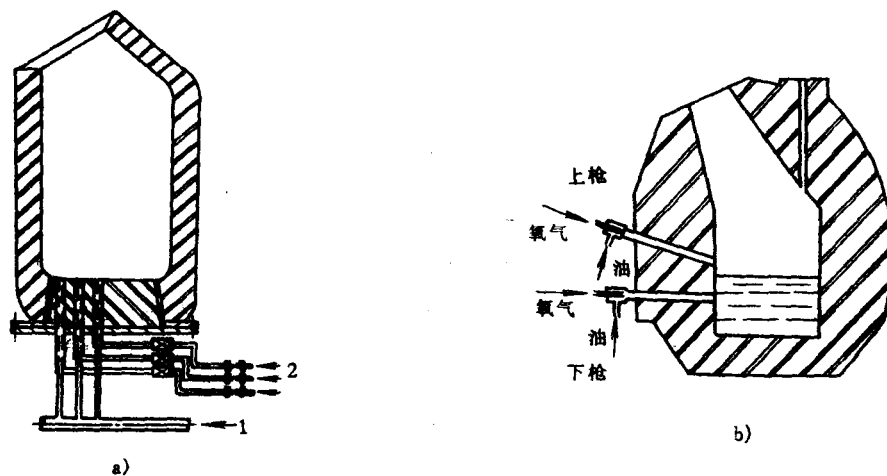


图 1-4 转炉结构示意图

a) 底吹氧气转炉 b) 侧吹氧气转炉

1952 年，奥地利投产使用顶吹氧气转炉炼钢方法，开创了炼钢生产的新阶段。转炉改用氧气吹炼，进一步发挥了转炉不用燃料、吹炼迅速和生产率高的优点，同时还改变了碱性转炉用空气底吹时“后吹”脱磷的工艺特征，可以使造渣脱磷与脱碳同时进行，甚至比脱碳提

前完成。这样,就使转炉炼钢可以处理不同成分的铁液,并利用原来消耗于加热氮气的热量用于加热废钢(废钢加入质量分数高达30%),改善了转炉炼钢对不同原材料条件的适应性。更重要的是钢中氮、磷、氧的含量低,质量好,不但能炼所有的平炉钢种,还能炼大部分合金钢种。此外,顶吹氧气转炉炼钢能控制环境污染和利用计算机进行自动控制。因此,它在绝大多数产钢国家中迅速发展,甚至迫使许多平炉车间停产或改为氧气转炉车间,顶吹氧气转炉钢的产量约占世界钢产量的一半,在各种炼钢方法中居首位。

尽管顶吹氧气转炉发展很快,成为全世界生产规模最大的炼钢方法,但它在吹炼高磷铁液方面并未获得满意的效果,这促使西欧一些富产高磷褐铁矿的国家在托马斯转炉(一种底吹空气转炉)上采用氧气炼钢的可能性。德国马克希米利安钢铁公司曾在25t托马斯转炉上进行试验,1968年又与加拿大空气液化气公司合作,试验获得成功。这种在托马斯法的基础上试验成功的底吹氧气转炉炼钢法被命名为OBM法。此后,法国、美国开发研制了LMS法和Q-BOP法等等,出现了底吹氧气转炉与顶吹氧气转炉竞争的态势,引起各国的重视。底吹氧气转炉除适合吹炼高磷铁液以及利用原有的车间改造托马斯转炉和平炉外,在用低磷铁液炼钢时,与顶吹氧气转炉比较,其突出优点是金属收得率高。生产实践表明,在用相同的铁液冶炼同一钢种时,在其它工艺参数相同的条件下,底吹转炉的金属收得率比顶吹的质量分数高1%~2%。此外,底吹氧气转炉由于吹炼平稳,也为提高供氧强度和缩短吹氧时间创造了条件。

1952年,我国试验成功碱性侧吹空气转炉吹炼中磷铁液,1958年普遍推广,成为国内中小企业的重要炼钢方法。但是,侧吹转炉用空气吹炼时,普遍存在炉龄短,吹损大等缺点。为此,在1973年首先在3t侧吹转炉上进行了吹氧炼钢的试验,随后在6~8t侧吹转炉上投入了生产。试验和生产结果表明,空气侧吹转炉改为氧气侧吹转炉是可行的。1977年,已经研制开发了双排氧枪侧吹转炉,1978年后,侧吹氧气转炉向大型化发展,转炉吨位可达150t以上。

1.3.2.2 氧气转炉炼钢工艺要点

1. 装料 装料工艺对转炉炼钢的技术经济指标有明显的影响。上炉出钢后,如炉子各部完好,便可立即装料。对使用废钢的转炉,如先装废钢后兑铁液,为了保护炉衬不被废钢击伤,应先加洁净的轻废钢,再加中型和重型废钢,过重的废钢,最好在兑铁液后加入。为了防止炉衬过分急冷,装完废钢后应立即兑入铁液。炉役末期,以及废钢装入量很大的转炉,均应先兑铁液后加废钢。不同的转炉,以及同一转炉在不同的生产条件下,都有其不同的合理的金属装入量。装入量过大,会使喷溅增加,熔池搅拌不好,造渣困难,炉衬特别是炉帽寿命缩短,供氧强度也因喷溅大而被迫降低。装入量过小,则会使炉产量减少。而且因熔池过浅,炉底容易受来自氧气射流区的高温和高氧化铁的循环流冲击,而损坏炉底。

2. 吹氧 氧气转炉炼钢以氧气作为基本的氧化剂。转炉的吹氧方法不同,炼钢过程的特点也不同。根据吹氧炼钢各时期的炉渣成分、金属成分和熔池温度不同,可将吹氧过程分为三个时期,即前期、中期和后期。吹氧前期的特点是硅迅速氧化,渣中 SiO_2 的含量大和熔池温度不高;中期的特点是强烈脱碳;后期因脱碳速度减慢,喷溅小,这时要进一步调整好炉渣的氧化性和粘度、脱磷和脱硫、准确控制终点温度。转炉炼钢的吹氧压力一般在0.6~1.2MPa。

3. 造渣 脱磷和脱硫主要是通过炉渣完成的。因此,必须精心控制成渣过程,使炉渣具

有去除磷、硫所要求的物理化学性质：适当的碱度、粘度和氧化性。此外，炉渣还应最少侵蚀炉衬，尽可能不引起喷溅，保证终点钢液适当的氧化性，随炉渣损失的金属最少等。可见，造好渣是炼好钢的重要保证。炉渣的物理化学性质决定于炉渣的成分和熔池温度。吹炼过程中随着熔池温度的变化相应控制炉渣成分，使炉渣的物理化学性质符合炼钢的要求，是造渣工艺的基本内容。

4. 温度及终点的控制 温度不仅是炼钢的物理化学反应重要的热力学参数，也是重要的动力学参数。它在炼钢过程中既是决定各元素的反应方向和程度以及各元素之间相对反应速度的重要因素，也是决定传热和传质速度的重要因素。因此，为了尽量去除钢中的有害杂质，保护有利元素的含量和提取某些合金元素（如钒、铌），并在炼钢过程中加速造渣、加速废钢熔化、减少喷溅、延长炉龄、消除事故，都必须控制好吹炼过程的温度。除了控制好吹炼温度外，尤其要控制好出钢温度。出钢温度过低会造成固炉、短锭、盛钢桶底部凝钢及钢锭的各种低温缺陷；过高则会造成跑钢漏钢、钢锭上涨、粘模及钢锭的各种高温缺陷，并影响炉衬和氧枪寿命。根据实际经验，一般的出钢温度范围在 $1460\sim 1560^{\circ}\text{C}$ 之间。

5. 脱氧和合金化 在转炉炼钢过程中，不断向金属熔池吹氧，金属液中必然残留有一定量溶解的氧。如果不将这些氧脱除到一定程度，就不能顺利进行浇注，也不能得到性能优良的钢锭。而且，残留在固体钢中的氧还会使钢老化，增加钢的脆性和电阻率，并影响钢的磁性，等等。在出钢前，或者在出钢、浇注过程中，加入一种或几种与氧的亲合力比铁强的元素，使金属中的含氧量降低到要求限度，这一操作过程称为脱氧。并且往往在脱氧的同时使钢中的硅、锰及其它合金元素的含量达到成品钢规格的要求，完成合金化任务。

1.3.3 电炉炼钢

1.3.3.1 电炉炼钢的特点和应用

电炉炼钢主要是指电弧炉炼钢。其结构如图 1-5 所示。它是利用电弧产生的高温来熔化炉料和提高钢液过热温度的。由于不用燃料燃烧的方法加热，故容易控制炉气的性质，可按照冶炼的要求，使之成为氧化性或还原性。炉料熔化以后的炼钢过程是在炉渣的覆盖下进行的。由于电弧的高温是通过熔渣传给钢液的，炉渣的温度很高，具有高的化学活泼性，因而有利于炼钢过程中冶金反应的进行。电弧炉依照所采用炉渣和炉衬耐火材料的性质而分为碱性电弧炉和酸性电弧炉。碱性电弧炉具有较强的脱磷和脱硫的能力，对炉料的适应能力较强。电弧炉作为炼钢设备的另一优点是热效率高，特别是在熔化炉料时，其热效率高达 75%。酸性电弧炉对炉料限制很严，很少采用。电弧炉炼钢通常是指碱性电弧炉炼钢。电弧炉炼钢当前的发展方向是采用大功率和大容量的电弧炉，不仅能提高生产能力，而且能降低炼钢的耗电量。目前我国已经设计制造了容量为 $150\sim 250\text{t}$ 的电弧炉。国外已有容量达到 300t 以上的大型电弧炉。此外，在电弧炉熔炼过程控制方面，由目前的半自动控制向全自动控制发展。目前电弧炉炼钢过程只有维持电弧稳定性的电极升降动作是自动控制的，而现代化的新型电弧炉则利用电子计算机对炼钢的全过程，包括电压的变换等进行自动控制，使电炉始终处在最优化的条

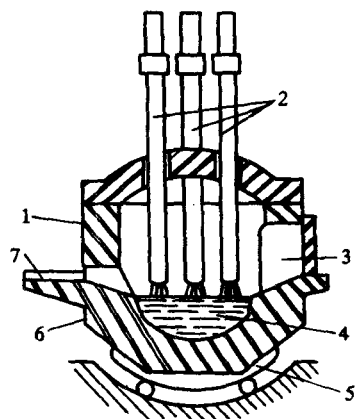


图 1-5 电弧炉结构示意图

1—炉墙 2—电极 3—炉门 4—钢液
5—倾斜机构 6—电弧 7—出钢口

件下工作，从而加速炼钢过程和节约电力消耗。

1.3.3.2 碱性电弧炉氧化法炼钢工艺要点

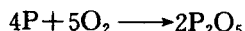
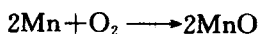
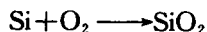
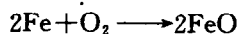
在炼钢工艺上有两种基本方法，即氧化法和不氧化法。两种方法的区别在于炼钢过程中是否有氧化期。此外还有一种吹氧返回法。这种方法也有氧化期，是从氧化法演变出来的，所以实际上也是氧化法，只不过是工艺条件方面与一般的氧化法有一些不同而已。

氧化法炼钢是最基本的炼钢方法。用这种方法能冶炼碳钢、低合金钢和高合金钢。氧化法炼钢工艺过程包括补炉、装料、氧化期、还原期和出钢。下面按操作顺序来说明氧化法炼钢工艺的要点。

1. 补炉 要使电弧炉优质、高产、低消耗，必须延长炉衬寿命。而要延长炉衬寿命，必须重视炉衬的维护。冶炼过程中炉衬受到供电、温度、炉渣性质、机械冲击和冶炼操作等的综合影响。若操作不当，炉衬会受到严重损坏，使冶炼过程难以控制，甚至发生事故。如用返回法吹氧冶炼不锈钢，氧化末期的温度约达 1700°C ，若不注意操作，温度超过 1800°C ，就可能使炉衬损坏。再如炉底有深坑不及时修补，就会造成钢液成分不稳定或不均匀，冶炼含钨量高的钢种时更为严重。炉衬混入铅时还可能造成炉底漏钢。冶炼过程中，炉衬在高温下不断受到化学侵蚀和机械冲刷，每炼一炉钢后，炉衬都受到不同程度的损坏。炉渣中常含有 $w(\text{MgO})=8\%\sim 10\%$ ，就是镁质炉衬被侵蚀的结果。所以，每炉出钢后都要及时补炉，这是保证冶炼正常进行和延长炉衬寿命的重要措施。从生产中总结的补炉原则是“高温、快速、薄补”。补炉材料在高温下才能与原有的炉料烧结成一个整体。一般认为镁砂的烧结温度约为 1600°C ，白云石的烧结温度约为 1540°C 。补炉时由于电极升出炉外停止供电，补炉材料的烧结全靠上一炉出完钢后的余热。因此必须趁炉体在高温状态时迅速完成补炉操作。一般要求补炉后炉膛温度仍高于 1200°C ，若低于 1000°C ，补炉材料的烧结很差，不但起不到补炉的作用，反而影响冶炼下一炉钢的炉渣控制。同样，为了保证烧结良好，补炉材料不能一次投入过厚，一般约为 $10\sim 25\text{mm}$ 。

2. 装料 装料操作影响炉料的熔化、合金元素的烧损及炉衬寿命。对装料的要求是速度快、密实、布料合理、尽可能一次装完。其中强调“快”是因为现在大多采用炉顶装料，炉盖打开后，炉膛温度从 1500°C 左右迅速降低到约 800°C ，此时散失的热量将在熔化期由电弧热弥补，使耗电增加，冶炼时间延长。炉料的分布，根据国内各厂的经验，一般先在炉底上均匀地铺一层石灰，其质量分数约为装料量的 $1.2\%\sim 1.5\%$ ，以减轻炉料对炉底的冲击，同时可以提前造渣。石灰上铺小块料，同样也是为了保护炉底。小块料上再装大块料和难熔料，并布置在电弧高温区，以加速熔化。中块料一般装在大块料的四周或它的上面，以填充大块料四周的空隙。最上面再铺剩余的小块料。炼钢工人将布料总结为下部致密、上部疏松、中间高、四周低、穿井快、不搭桥、炉门口无大料，熔化时最省电。

3. 熔化期 熔化期的任务是将固体炉料熔化成钢液，并进行脱磷。炉料熔化后形成钢液熔池。在熔化过程中，炉料中的铁和硅、锰、磷等元素被炉气中的氧所氧化，其反应为：



氧化结果生成 FeO 、 SiO_2 、 MnO 及 P_2O_5 等氧化物与加入的石灰（主要成分是 CaO ）化