

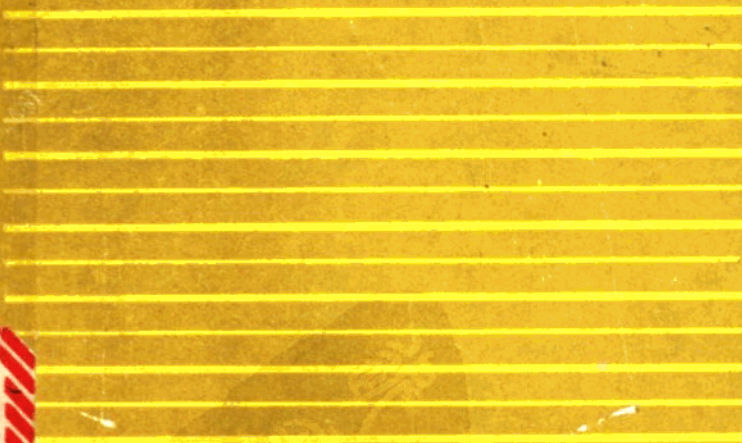
730780

● 高等学校教学用书 ● /

钢铁冶金学

(炼铁部分)

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

前 言

本书系钢铁冶金专业《钢铁冶金学》(炼铁部分)课程的教学用书。

自一九七九年开始,将炼铁、炼钢和电冶金专业合并为钢铁冶金专业。作者编写的《钢铁冶金学》(炼铁部分)初稿,曾在北京钢铁学院和包头钢铁学院的部分年级试用。一九八七年在包头钢铁学院召开了全国高等院校钢铁冶金专业教学研讨会,为提高本课程教学质量,参加研讨会的11所院校的代表共同拟订了统一的《钢铁冶金学》教学大纲。本书系在原试用教材的基础上,根据会议制订的教学大纲重新编写的。

按照钢铁冶金专业教学计划和本课程教学大纲的要求,本书重点阐述炼铁过程的基本理论和工艺,主要内容包括含铁原料的造块、炼铁原理、工艺操作及高炉作业的能量利用分析,并结合钢铁工业的最新发展,对数学模型、高炉过程自动控制及非高炉法炼铁(包括直接还原及熔融还原)作了简要介绍。

由于授课时间的限制,凡物理化学、冶金过程热力学和动力学(钢铁冶金原理)和传输原理等内容已在有关课程中讲授,不再重复,只着重于这些内容在炼铁中的应用;炼铁设备结构和工艺操作的内容在有关课程(如冶金单元设计、钢铁厂设计原理、钢铁冶金实验技术等)和生产实习中讲述。为提高学生的运算能力和适应炼铁技术的发展,作者较多地应用数学计算来讲述冶金过程化学反应、能量利用和工艺过程。

本书初稿完成后,其主要章节曾在北京科技大学钢铁冶金专业和武钢、宝钢、湘钢的继续工程教育中试用。本书定稿前于一九八八年三月开过审稿会,有重庆大学裴鹤年、华东冶金学院糜克勤、唐山工程技术学院(原河北矿冶学院)全泰铨等同志参加,他们对本书提出了许多宝贵意见。在编写过程中,得到北京科技大学冶金系和炼铁教研室的同志们的大力支持,书中应用了他们的一些科研成果,也应用了我国兄弟院校和炼铁界的同行们的成果,编者在此表示衷心的感谢。

本书第一章由齐宝铭编写,第二、五章由王筱留编写,第三、四、六章由齐宝铭、王筱留编写,第七章由齐宝铭和秦民生编写,第八章由杨乃伏编写,全书由王筱留主编。

本书作为钢铁冶金专业四年制本科生教材,也可供继续工程教育、函授、夜大、职大、大专师生以及有关工程技术人员和科学工作者参考。

限于作者水平,书中难免有不妥或错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

1990年6月

目 录

第一章 概论	1
1.1 钢铁工业在国民经济中的地位	1
1.2 中国钢铁工业的概况	1
1.3 钢铁联合企业中的炼铁生产	2
1.4 高炉冶炼过程概述	3
1.4.1 含铁原料及其他辅助原料	3
1.4.2 高炉燃料	11
1.4.3 耐火材料	15
1.4.4 高炉产品	19
1.4.5 高炉冶炼的主要技术经济指标	23
1.4.6 炉内主要过程	27
第二章 铁矿粉造块	30
2.1 粉矿造块的意义和作用	30
2.2 造块的基础理论	31
2.3 烧结过程	31
2.3.1 一般工艺过程	31
2.3.2 烧结过程的主要反应	32
2.3.3 烧结过程的固结	38
2.3.4 烧结过程中的传输现象	45
2.3.5 烧结工艺	49
2.4 球团过程	53
2.4.1 生球成型	53
2.4.2 生球干燥	57
2.4.3 球团矿的焙烧固结	59
2.4.4 球团工艺	61
2.4.5 特种造块方法	64
2.5 烧结矿和球团矿的质量检验	66
2.5.1 冷态物理机械性能	66
2.5.2 热态及还原条件下的物理机械性能	67
2.5.3 冶金性能	68
2.6 高炉炉料结构	69
2.6.1 高碱度烧结矿的冶金性能	69
2.6.2 酸性氧化球团矿的冶金性能	71
2.6.3 高碱度烧结矿配加酸性球团矿组成的综合炉料的冶金性能	72

第三章 高炉冶炼过程的物理化学	74
3.1 蒸发、分解与气化.....	74
3.2 还原过程.....	76
3.2.1 铁的氧化物及其特性.....	76
3.2.2 铁氧化物还原的热力学.....	77
3.2.3 气固相还原反应的动力学.....	85
3.2.4 其他元素的还原.....	94
3.2.5 炉缸中液态渣铁间的氧化还原反应——耦合反应.....	102
10 3.3 炉渣.....	106
3.3.1 炉渣在高炉冶炼过程中的作用.....	106
3.3.2 造渣过程简述.....	107
3.3.3 终渣的主要理化性能.....	108
3.3.4 炉渣去硫.....	110
3.3.5 炉渣排碱.....	127
3.4 碳的气化反应.....	129
3.4.1 固体碳气化的一般规律.....	129
11 3.4.2 风口前碳的燃烧.....	131
第四章 高炉冶炼过程中的传输现象	136
4.1 高炉中的动量传输.....	136
4.1.1 煤气流经固体散料层的一般规律.....	137
4.1.2 逆流运动中散料的有效重.....	140
4.1.3 散料的流态化.....	142
4.1.4 充液散料层的流体力学现象.....	143
12 4.1.5 高炉过程中的炉料下降.....	144
4.2 高炉内的热量传输.....	145
4.2.1 传热方程.....	146
4.2.2 水当量.....	147
4.2.3 高炉上下部热交换.....	148
13 4.2.4 高炉条件下的传热方式和给热系数.....	148
第五章 高炉冶炼能量利用	152
5.1 高炉冶炼能量利用指标.....	152
5.2 高炉能量利用计算分析.....	154
5.2.1 生产高炉的计算.....	154
5.2.2 设计高炉的计算.....	161
5.2.3 物料及热平衡计算举例.....	164
14 5.2.4 理论焦比计算.....	181
5.3 高炉能量利用图解分析.....	188
5.3.1 铁的直接还原度与碳消耗 (r_d-C) 图解.....	188
5.3.2 里斯特操作线图解.....	190
15 5.3.3 理查特 (Reichardt) 区域热平衡图解分析.....	202

5.3.4	操作线和区域热平衡图解联合分析	205
第六章 高炉炼铁工艺		
6.1	高炉炼铁生产的原则	207
6.2	高炉操作制度	209
6.3	高压操作	216
6.4	高风温操作	220
6.5	喷吹补充燃料	225
6.6	富氧和综合鼓风操作	230
第七章 高炉过程数学模型概述		
7.1	数学模型及其功用与分类	233
7.2	高炉过程的特点	233
7.3	高炉过程模型及控制模型概述	234
第八章 非高炉炼铁		
8.1	直接还原	238
8.1.1	直接还原概况	238
8.1.2	气基直接还原法	242
8.1.3	煤基直接还原法	249
8.1.4	直接还原铁的性质与应用	257
8.2	熔融还原法	261
8.2.1	一步法熔融还原	262
8.2.2	二步法熔融还原	264
参考书目及文献		267

冶炼概论：
研究如何经济地从矿石或某些原料中取得金属或金属化合物，并使之加工成适合于人们需要的材料。

② 铁与钢的区别：含C量大于2%为生铁，含C量小于2%为钢。

第一章 概论

① 就金属而言，铁在自然界中的蕴藏量仅次于铝，居第二位。

1.1 钢铁工业在国民经济中的地位

任何国家是否发达的标志主要是其工业化的水平，即工业生产在国民经济中所占的比重以及工业的机械化、自动化程度。而劳动生产率是衡量工业化水平极为重要的标志之一。为达到较高的劳动生产率需要大量的机械设备。钢铁工业为制造各种机械设备提供最主要的材料，属于基础材料工业的范畴。钢铁还可以直接为人民的日常生活服务，如为运输业、建筑业及民用品提供基本材料。故在一定意义上说，一个国家钢铁工业的发展状况也反映其国民经济发达的程度。

衡量钢铁工业的水平应考察其产量（人均年占有钢的数量）、质量、品种、经济效益及劳动生产率等各方面。纵观当今世界各国，所有发达国家无一不是具有相当发达的钢铁工业的。

钢铁工业的发展需要多方面的条件，如稳定可靠的原材料资源，包括铁矿石、煤炭及某些辅助原材料，如锰矿、石灰石及耐火材料等；稳定的动力资源，如电力、水等。此外，由于钢铁企业生产规模大，每天原材料及产品的吞吐量大，需要庞大的运输设施为其服务。一般要有铁路或水运干线经过钢铁厂。对于大型钢铁企业来说，还必须有重型机械的制造为其服务。此外，建设钢铁企业需要的投资大，建设周期长，而回收效益慢。故雄厚的资金是发展钢铁企业的重要前提。

钢铁之所以成为各种机械装备及建筑、民用等各部门的基本材料，是因为它具备以下优越性能，并且价格低廉：

钢铁
优越性

1. 有较高的强度及韧性；
2. 容易用铸、锻、切削及焊接等多种方式进行加工，以得到任何结构的工部件；
3. 所需资源（铁矿、煤炭等）贮量丰富，可供人类长期大量采用，成本低廉；
4. 人类自进入铁器时代以来，积累了数千年生产和加工钢铁材料的丰富经验。自古至今，与其他工业相比，钢铁工业生产规模大、效率高、质量好和成本低，具有无可争辩的竞争优势。

到目前为止还看不出，有任何其他材料在可预见的将来，能代替钢铁现有的地位。

1.2 中国钢铁工业的概况

中国是使用铁器最早的国家之一，春秋晚期（公元前六世纪）铁器已较广泛地得到应用。西汉时期盐铁官营，冶铁工业得到较大的发展，并在规模及生产技术等方面达到较先进的水平。据资料，当时已有了炉缸断面面积8.5米²的高炉。中国的这种领先的优势一直延续了两千年，直到明代中叶（约十七世纪初）西方资本主义世界的产业革命兴起时为止。

近代由于封建主义的束缚，外加帝国主义的掠夺和摧残，中国工业生产及科学技术的发展极度缓慢，到1949年中国的钢铁工业技术水平及装备极其落后，钢的年产量只有25万吨。

新中国成立后至1960年，我国逐步建立了现代化钢铁工业的基础，年产量比1949年增加了40多倍，达到了一千万吨以上。某些生产指标接近了当时的世界先进水平，中国具备了独立发展自己钢铁工业的实力。

1960到1966年间，在困难的条件下，我国的钢铁工业，继续得到了发展，如炼铁方面以细粒铁精矿粉为原料的自熔性及超高碱度烧结矿，向高炉内喷吹煤粉以及成功地冶炼了一些特有的复合矿石等。

1966~1976年间我国国民经济基本上处于停滞不前的状态。与迅速发展世界经济相比，我国与世界经济水平的差距扩大了，装备陈旧，机械化、自动化水平低，技术经济指标落后，效率低，质量差，成本高。

从1977年开始，特别是党的十一届三中全会以来，中国钢铁工业走向持续发展的阶段。1982年，中国钢的年产量已接近4000万吨，仅次于苏、美、日跃居世界第四位。现中国年产钢已超过6000万吨。一些先进的企业的技术经济指标已接近世界水平。1985/1986年世界主要国家及地区钢产量见表1-1。

表 1-1 世界主要国家或地区1985/1986年钢产量 (百万吨)

国家或地区	产 量	国家或地区	产 量	国家或地区	产 量	国家或地区	产 量
苏 联	154.5/160.4	波 兰	16.1/16.9	比 利 时	10.7/9.7	土 耳 其	5.0/6.0
日 本	105.3/98.3	英 国	15.8/14.8	南 非	8.5/9.1	瑞 典	4.8/4.7
美 国	80.1/73.9	捷 克	15.0/15.1	北 朝 鲜	8.4/8.6	奥 地 利	4.7/4.3
中 国	46.7/51.9	加 拿 大	14.5/14.1	东 德	7.9/8.0	南 斯 拉 夫	4.5/5.3
西 德	40.5/37.1	罗 马 尼 亚	13.8/14.0	墨 西 哥	7.3/7.2	卢 森 堡	3.9/3.7
意 大 利	23.7/22.9	西 班 牙	14.2/12.0	澳 大 利 亚	6.4/6.5	匈 牙 利	3.6/3.8
巴 西	20.5/21.2	南 朝 鲜	13.5/14.5	荷 兰	5.5/5.3	其 他	26.6/27.7
法 国	18.6/17.9	中 国 台 湾 省	11.1/11.9		5.1/5.2	世 界 合 计	717.0/712.0

将铁矿石冶炼成铁，再用高炉炼成铁水，再铸成铸锭或连铸

1.3 钢铁联合企业中的炼铁生产

或连铸坯，经轧制等工序进行加工

现代钢铁联合企业主要生产流程如图1-1所示。

取各种用途的钢

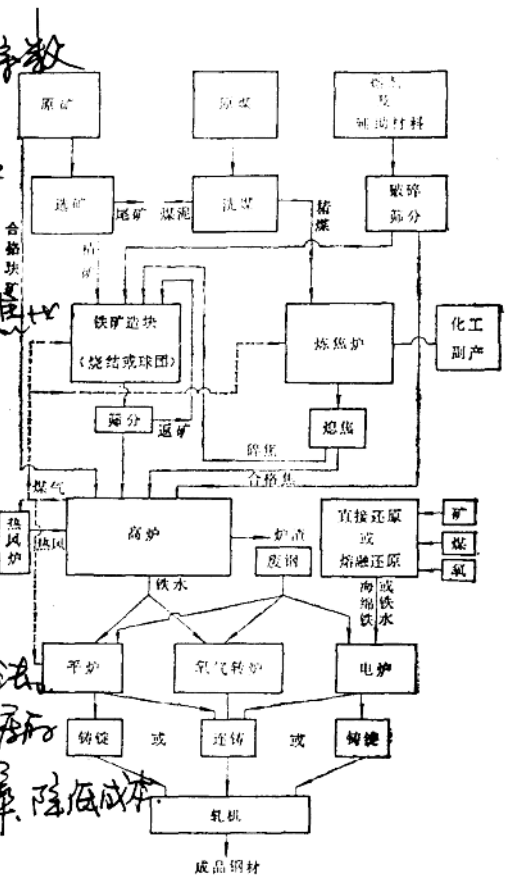
高炉是最多的流程线集结的焦点，还是联合企业中二次能源（煤气）的供应中心。故高炉是钢铁联合企业的关键部门，对整个企业均衡稳定生产有举足轻重的作用。

此外，将铁矿石冶炼为生铁的过程，也可通过直接还原（产品为固态海绵铁）或熔融还原（产品为液态生铁）等工艺来完成。

直接还原（或熔融还原）工艺的特点是，直接或间接地使用气体还原剂，代替高炉所必需的昂贵焦炭，可用天然铁块矿、粉矿或人造富矿（烧结或球团矿），有相当大的适应性，基建投资也较少。但其生产规模远较高炉为小，且尚有很多技术问题尚未解决，故在燃料消耗与成本等方面不如高炉优越。在目前焦煤资源尚能在一定时间内维持相当规模焦炭生产的条件下，高炉仍将占绝对优势。1984年世界所有直接还原产品的产量为920万吨，只占世界产铁总量的1%强。但随着焦煤资源的减少，特别在某些资源匮乏或幅员不大的国家或地区，其他非高炉炼铁法必将日益发展。

各种炼铁法其设备及生产方式差别很大，其原理是共同的。

- 钢铁联合企业发展趋势:
1. 大力发展精料。
 2. 大型化
 3. 降低焦比, 提高利用率
 4. 提高热风温度。
 5. 喷吹粉煤, 天然气, 重油, 和焦油等燃料, 以降低焦比
 6. 高压操作 → 降低焦比
 7. 设备改进。
 8. 电子计算机的应用。



- 炼钢技术今后发展趋势:
1. 喷吹转炉成为主要炼钢方法
 2. 采用大容量转炉, 提高生产率, 建设大型钢厂, 提高生产率, 降低成本
 3. ---
 4. ---
 5. ---

图 1-1 钢铁联合企业生产流程框图 (未包括蒸汽、水、电等)

1.4 高炉冶炼过程概述

为了深入理解并掌握高炉冶炼过程的原理, 首先从宏观上对高炉应有个整体的概念。如了解其投入、产出以及总体上的特点等。要求能具体而形象地描述各种反应在高炉内动态变化的过程。如原料在下降过程中, 其温度、成份及性状的变化; 煤气的产生及在上升过程中温度、压力、成份及体积的变化; 同时要了解在炉料与煤气逆流运动过程中热量、质量及动量的传递是如何发生的。冶炼过程的概述只是具体的、粗浅的感性认识, 但它是深入的理性认识的基础。

1.4.1 含铁原料及其他辅助原料

1. 铁矿石 如以年产5000万吨生铁计, 需原矿1亿5千万到2亿吨。

地壳中Fe的贮量比较丰富, 按元素总量计占4.2%, 仅次于O₂、Si及Al居第四位。但在自然界中Fe不能以纯金属状态存在, 绝大多数形成氧化物、硫化物或硫酸盐等化合物。不同的岩石含Fe品位可以差别很大。凡在当前技术条件下, 可以从中经济地提取出金属

铁的岩石称为铁矿石。这样，铁矿石中除有含Fe的有用矿物外，还含有其他化合物，统称为脉石。常见的脉石有SiO₂、Al₂O₃、CaO及MgO等。

(1) 铁矿石的分类。世界上常用的铁矿石有赤铁矿、磁铁矿、褐铁矿和菱铁矿等。各种矿石的主要特征列于表1-2。

矿石长期在自然界中受到氧化，磁铁矿常转化为半假象赤铁矿或假象赤铁矿。所谓“假象”赤铁矿，是指从化学成份上Fe₃O₄已氧化为Fe₂O₃，但仍保留了原磁铁矿结晶结构的特征。一般以矿石中全含铁量(Fe_总)与FeO量的比值判别磁铁矿受到氧化的程度。

$$\begin{aligned} Fe_{总}/FeO > 7.0 & \quad \text{称为假象赤铁矿} \\ 7.0 > Fe_{总}/FeO > 3.5 & \quad \text{称为半假象赤铁矿} \\ Fe_{总}/FeO < 3.5 & \quad \text{为磁铁矿} \end{aligned}$$

其中 Fe_总——矿石中含Fe总量，%；

FeO——矿石中FeO含量，%。

表 1-2 不同种类铁矿石的特征

矿石名称	矿物名称及化学成份	理论含Fe%	密度 t/m ³	颜色	条痕	实际富含Fe %	强度及还原性
磁铁矿	磁铁矿 Fe ₃ O ₄	72.4	5.2	黑或灰有光泽	黑	45~70	坚硬、致密、难还原
赤铁矿	赤铁矿 Fe ₂ O ₃	70.0	4.9~5.3	红或浅灰	红	55~60	软、易破碎、易还原
褐铁矿	水赤铁矿 2Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O	66.1	4.0~5.0	黄褐 暗褐或棕黑	黄褐	37~55	疏松，易还原
	针赤铁矿 Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O	62.9	4.0~4.5				
	水针铁矿 3Fe ₂ O ₃ ·4H ₂ O	60.9	3.0~4.4				
	褐铁矿 2Fe ₂ O ₃ ·3H ₂ O	60.0	3.0~4.2				
	黄针铁矿 Fe ₂ O ₃ ·2H ₂ O	57.2	3.0~4.0				
	黄赭石 Fe ₂ O ₃ ·3H ₂ O	55.2	2.5~4.0				
菱铁矿	菱铁矿 FeCO ₃	48.2	3.8	灰带有黄褐	灰或带黄色	30~40	易破碎，焙烧后易还原

(2) 对铁矿石的评价。

1) 含Fe品位：矿石品位基本上决定了矿石的价格，即冶炼的经济性。市场上往往以含Fe量单位数计价。因为含Fe量愈高的矿石，脉石含量愈少，则冶炼时所需熔剂量和

形成的渣量也少,用于分离渣与铁所耗能量相应降低。含Fe量高并可直接送入高炉冶炼的铁矿石称为富矿;含Fe品位低需经富选才能入炉的为贫矿。划分富矿与贫矿没有统一的标准,此界限将随选矿及冶炼技术水平的提高而变化。

一般将含Fe $>$ 55%, S、P等杂质少的,可直接供平炉使用的称为平炉富矿。而含Fe $>$ 50%的称为高炉富矿。我国富矿贮量已很少,绝大部分为含Fe30%左右的贫矿,要经过富选才能使用。

2) 脉石的成份及分布: 铁矿石中的脉石包括SiO₂、Al₂O₃、CaO及MgO等金属氧化物,在高炉条件下,这些氧化物不能或很难被还原为金属,最终以炉渣的形式与金属分离。〔渣中碱性氧化物(CaO、MgO等)与酸性氧化物(SiO₂等)的量应大体相等。因为只有如此,渣的熔点才较低,粘度也较小,易于在炉内处理而不致有碍于正常操作。〕为此,实际操作中应根据铁矿石带入的脉石的成份和数量,配加适当的“助熔剂”,简称“熔剂”,以便得到性能较理想的炉渣。此外,造渣物的另一个重要来源——焦炭及煤粉灰份,几乎是100%的酸性氧化物,必须从其他炉料中摄取碱性成份。然而大多数铁矿石的脉石也是酸性氧化物。故通常要消耗相当数量的石灰石(CaCO₃)或白云石(CaCO₃、MgCO₃)等碱性物作为熔剂。若矿石的脉石成份中碱性物较多,甚至以碱性物为主,必然会节省为中和燃料灰份中的酸性造渣物所需外加的熔剂量,这是极为有利的。如果矿石带入的碱性脉石数量超过了造渣的总体需要量,也会给冶炼造成困难。我国有极少数地区性小矿,如河北省涿源的高MgO铁矿石,即属于此种类型。

有些矿石含Al₂O₃很高,也是不利的,因为Al₂O₃将大大地提高炉渣的熔点。印度产铁矿石及我国河北省承德地区平安堡矿即为此种类型。

含(CaO+MgO)量适当的矿石,可允许其含Fe量低些,冶炼仍然是经济的。用扣除(CaO+MgO)后的折算含Fe量对不同的矿石进行评价和对比是合理的。

矿石中脉石的结构和分布,特别对于贫矿,是很重要的特性。如果含Fe矿物结晶颗粒比较粗大,则在选矿过程中容易实现有用矿物的单体分离,从而使有用元素达到有效的富集。相反,如果含Fe矿物呈细粒结晶嵌布在脉石矿物的晶粒中,则要消耗更多的能量以细碎矿石才能实现有用矿物的单体分离。我国河北省冀东矿属于前者,而四川省攀西地区的钒钛磁铁矿属于后者。

此外,有用矿物及脉石矿物的结构又决定了矿石的致密程度,影响矿石的机械强度及还原性。〔矿石要具有一定的机械强度,但不宜过度致密,难以进行加工和被还原。〕

3) 有害元素的含量: 矿石中除去不能还原从而造渣的氧化物外,常含有其他化合物,可以被还原为元素形态。其中有的可与Fe形成合金,有的则不能,有些则是有害的。

常见的有害元素是S、P;较少见的有碱金属(K、Na等)以及Cu、Pb、Zn、F及As等。

S、P、As和Cu易还原为元素并进入生铁,对铁及其后的钢及钢材的性能有害。碱金属及Zn、Pb及F等虽不能进入生铁,但易于破坏炉衬,或易于挥发并在炉内循环累积造成结瘤事故,或污染环境有害人身健康。事先用选矿法除去这些有害杂质,或困难很大,或代价太高。迫使高炉炉料中不得不限制这些矿石用量的百分比,从而极大地降低了这些矿石的使用价值。

各种有害杂质的界限含量见表1-3。

4) 有益元素: 有些与Fe伴生的元素可被还原并进入生铁, 并能改善钢铁材料的性能。这些有益元素有Cr、Ni、V及Nb等。还有的矿石中的伴生元素有极高的单独分离提取的价值如Ti, 及稀土元素等。某些情况下, 这些元素的品位已达到可单独分离利用的程度, 虽然其绝对含量相对于Fe仍是少量的, 但其价值已远超过铁矿石本身, 则这类矿石应作为宝贵的综合利用的资源。

表 1-3 矿石中有害杂质的危害及界限含量

元素	允许含量 (%)	危害及某些说明	
S	≤0.3	使钢产生“热脆”, 易轧裂。	
P	≤0.3	对酸性转炉生铁	磷使钢产生“冷脆”。 烧结及炼铁过程皆不能除磷。 矿石允许含P量可按下式计算 $P_{\text{Fe}} = \frac{P_{\text{Fe}} - P_{\text{Fe}} \times \text{Fe}_{\text{Fe}}}{\text{Fe}_{\text{Fe}}} (\%)$
	0.03~0.18	对碱性平炉生铁	
	0.2~1.2	对碱性转炉生铁	
	0.05~0.15	对普通铸造生铁	
	0.15~0.6	对高磷铸造生铁	
Zn	≤0.1~0.2	Zn900℃挥发, 上升后冷凝沉积于炉墙, 使炉墙膨胀, 破坏炉壳。烧结时可除去50~60%的Zn	
Pb	≤0.1	Pb易还原, 比重大与Fe分离沉于炉底, 破坏砖衬, Pb蒸汽在上部循环累积, 形成炉瘤, 破坏炉衬	
Cu	≤0.2	少量Cu可改善钢的耐腐蚀性。但Cu过多使钢热脆, 不易焊接和轧制。Cu易还原并进入生铁。	
As	≤0.07	砷使钢“冷脆”不易焊接。生铁含[As]≤0.1%。炼优质钢时, 铁中不应有[As]。	
Ti	(TiO ₂) 15~16	钛降低钢的耐磨性及耐腐蚀性。使炉渣变粘易起泡沫。含(TiO ₂)过高的矿应作为宝贵的Ti资源	
K,Na		易挥发, 在炉内循环累积, 造成结瘤, 降低焦炭及矿石的强度。	
F		氟高温下气化, 腐蚀金属, 危害农作物及人体, CaF ₂ 侵蚀破坏炉衬	

5) 矿石的还原性: (矿石在炉内被煤气还原的难易程度称为“还原性”)。冶炼易还原的矿石, 可降低碳素消耗量。矿石的还原性与其结构, 特别是开口的微气孔率及气孔的分布状态有关。一般赤铁矿不如磁铁矿致密, 还原性好。褐铁矿及菱铁矿在炉内受热后, 其所含碳酸盐及结晶水或分解或挥发, 留下孔洞, 形成疏松多孔的结构便于煤气的渗透。故此类型矿石表现为还原性好。

6) 矿石的高温性能: 矿石是在炉内逐渐受热、升温的过程中被还原的。矿石在受热

及被还原的过程中及还原后都不应因强度下降而破碎，以免矿粉堵塞煤气流通孔道而造成冶炼过程的障碍。

为了在熔化造渣之前，矿石更多地被煤气所还原，矿石的软化熔融温度不可过低，软化与熔融的温度区间不可过宽。这样一方面可保证炉内有良好的透气性，另一方面可使矿石在软熔前达到较高的还原度，以减少高温直接还原度，降低能源消耗。

(3) 国内外铁矿石贮量及产量。我国的铁矿石资源尚丰富。1982年底已探明保有储量为443亿吨。其中工业储量占54%，居世界前列。近年来年产铁矿石都在8500万吨以上。但由于我国钢铁工业自1980年后发展很快，而矿山由于所需投资大，建设周期长，赶不上钢铁工业发展的速度。故目前铁矿石尚不能自给自足，每年约进口1000万吨以上。

我国知名的铁矿按储量大小，计有：

1) 东北鞍山地区：总储量约100亿吨以上。主要是鞍山地区的贫矿，包括东鞍山、西鞍山、齐达山，弓长岭等。本溪南芬地区有部份富矿、且质量极佳、含杂质极少、为炼制高纯净钢的原料。

2) 攀西地区：我国西南地区攀枝花钒钛磁铁矿储量在80亿吨以上，是罕见的丰富的V、Ti资源，是极有综合利用价值的复合矿石。

3) 冀东地区：以河北省迁安矿区为主，储量数十亿吨，为贫磁铁矿。河北省尚有邯郸、邢台矿区及宣化的庞家堡贫赤铁矿及承德地区的钒钛磁铁矿等小型矿区。

4) 海南岛：海南岛是我国少有的富矿产地之一。

5) 西北地区的内蒙古包头白云鄂博及甘肃镜铁山矿区，为两大复合矿。白云鄂博矿虽只有数亿吨的储量，但却含有极丰富的稀土族元素和Nb、CaF₂以及其他有用金属。酒泉的镜铁山矿则含有BaSO₄。

6) 华东及中南矿区：主要有南京及马鞍山附近的梅山、凹山，湖北的大冶、鄂山，广东韶关地区的大宝山矿等。

我国一些主要铁矿石的成份见表1-4。

世界上铁矿石储量丰富的国家有苏联、澳大利亚、巴西、加拿大和美国等。一些主要国家铁矿石的储量及1985、1986年矿石产量见表1-5。

(4) 矿石入炉前的加工处理。入炉原料成份稳定，即其成份的波动幅度值很小，对改善高炉冶炼指标有很大的作用。为此，应在原料入厂后，对其进行中和、混匀处理。即用所谓“平铺切取”法，将入厂原料水平分层堆存到一定数量，一般应达数千吨，然后再纵向取用。目前虽然从理论上几乎所有操作者都承认这一工序的必要性，但由于需要较大的场地和相当数量的机械设备（堆取料机及皮带运输机等），故除上海宝钢及武钢公司等以外，国内多数厂尚未实现此项工艺。

含铁品位较高，可直接入炉的天然富矿，在入炉前还要经过破碎、筛分等处理，使其粒度适当（冶炼时炉料的透气性要好，又容易被煤气还原）。

一般矿石粒度的下限为8mm，大可至20~30mm。<5mm的称为粉末，它严重阻碍炉内煤气的正常流动，必须筛除。粒度均匀、粒度分布范围窄、料柱孔隙度高，则料柱透气性好。而粒度小被气体还原时反应速度快，在矿石软熔前可达到较高的还原度，有利于降低单位产品的燃料消耗量。必须适当兼顾。

含Fe品位低的贫矿直接入炉冶炼将极大地降低高炉生产的效率，增加成本，必须经

表 1-4 我国一些主要铁矿石的化学成份

矿山名称	化 学 成 份, %											其 他	
	T·Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P				
弓长岭 (赤)	44.00	6.90	34.38	1.31	0.28	1.16	0.15	0.007	0.02				
弓长岭 (赤贫)	28.00	3.90	55.24	1.63	0.22	0.73	0.35	0.013	0.037				
东鞍山 (贫)	32.73	0.70	49.78	0.19	0.34	0.30		0.031	0.035				
齐大山 (贫)	31.70	4.36	52.94	1.07	0.84	0.80		0.010	0.050				
南芬 (贫)	33.63	11.90	46.36	1.425	0.576	1.593	Mn 0.037	0.073	0.056				
攀枝花钒钛矿	47.14	30.66	5.00	4.88	1.77	5.49	0.36	0.75	0.009				TiO ₂ : 15.46; V ₂ O ₅ : 0.48 Co: 0.024
庞家堡 (赤)	50.12	2.00	19.52	2.10	1.50	0.36	0.32	0.067	0.156				
承德钒钛矿	36.83		17.50	9.78	3.32	3.61	0.31	0.50	0.134				TiO ₂ : 9.49; V ₂ O ₅ : 0.41
邯 郸	42.59	16.30	19.03	0.47	9.58	5.55	0.11	0.208	0.048				
海南岛	55.90	1.32	16.20	0.95	0.26	0.08	Mn 0.14	0.098	0.070				
梅山 (富)	59.35	19.88	2.50	0.71	1.99	0.93	0.323	0.452	0.399				
武汉铁山矿	54.38	13.90	11.30					0.32	0.056				
马鞍山南山矿	58.66		5.38					0.005	0.650				
马鞍山凹山矿	43.19		14.12		9.30			0.113	2.855				TiO ₂ : 0.161
马鞍山姑山矿	50.82		23.40		1.20			0.056	0.26				
包头 (赤)	52.30	5.55	4.81	0.22	8.78	0.99	0.79	SO ₃ 0.213	P ₂ O ₅ 0.935				Fe: 5.87 Re ₂ O ₇ : 2.73 K ₂ O: 0.09Na ₂ O: 0.25
大宝山矿	53.05	0.70	3.60	5.88	0.12	0.12	0.048	0.316	0.124				Cu: 0.26; Pb: 0.072 As: 0.184

表 1-5 某些国家铁矿石储量及产量

国 别	年 产 量 (万吨)		储 量 (百万吨)	
	1985	1986	原 矿	含Fe
苏 联	24800.1	25197.0	59944	22680
中 国	8026.4	8229.6	9144	3175.2
其他东欧国家	1564.6	1625.6	914.4	304.8
澳大利亚	10007.6	9956.8	33528	18325.4
巴 西	12000.0	12801.6	15850	9797.8
美 国	4958.1	4135.1	25197	5352.5
印 度	4450.1	5181.6	7214	4354.6
加 拿 大	3992.9	4064.0	25502	8890.6
南 非	2438.4	2336.4	9449	5987.5
瑞 典	2042.2	1828.8	4674	2177.3
利比里亚	1534.2	1524.0	1626	725.8
委内瑞拉	1544.3	1727.2	2032	1088.6
法 国	1493.5	1432.4	2235	816.5
其他资本主义国家	7031.0	7112.0	12293.6	6299.2
世界合计	85882.5	87142.3	209296	99568

过选矿处理。由于将有用含Fe矿物与脉石单体分离的需要，往往需将原矿破碎到很细的粒度，如<200网目(0.074mm)，甚至325网目(0.044mm)。不同的选矿方法则可根据其所利用的有用矿物与脉石不同的特性之差异而分类。如利用不同的磁性、密度、表面吸附特性及电导率等，选矿法可分为磁选、重力选、浮选及电选等。

选矿后所得细粒精矿和天然富矿在开采、破碎、筛分及运输过程中所产生的粉末，都必须经过造块过程才能供高炉使用，即经过烧结或球团工艺过程。造块过程还提供调制矿石冶金性能的机会，以制成粒度、碱度、强度和还原性能等比较理想的炉料。

2. 熔剂 由于高炉造渣的需要，入炉料中常需配加一定数量的助熔剂，简称熔剂。最常用的是碱性熔剂，即石灰石(CaCO₃)、白云石[Ca(Mg)CO₃]等。

对熔剂质量要求主要是有效成份含量高。如对石灰石及白云石来说，即要求其有效碱度高。熔剂含有的碱性氧化物扣除其本身酸性物造渣需要的碱性氧化物后所余之百分数即为有效碱度。

$$(CaO + MgO)_{有效} = (CaO\% + MgO\%) - SiO_2\% \times R$$

式中CaO%、MgO%、SiO₂%分别为熔剂中各相应组分的重量百分含量，R为造渣所要求的炉渣碱度[(CaO + MgO)/SiO₂]。

其次，要求熔剂中含S、P等有害杂质的量尽可能低。

我国高炉冶炼用熔剂资源很丰富，质量亦属上乘。几乎在每个钢铁厂附近皆可找到较理想的熔剂资源点。

在主要使用天然富矿的高炉上，熔剂往往作为入炉原料的一种，单独加入炉内，且配用量也较多。这些碳酸盐在炉内受热分解，要消耗大量热能，而且这些热能是炉内燃烧昂贵的焦炭提供的。我国在某些对原料强度要求较低的小高炉上，使用预先在炉外已焙烧过的生石灰(CaO)代替CaCO₃入炉，可取得较为显著的降低焦炭消耗的效果，而对高炉操作没有明显的副作用。

大多数大中型高炉使用高碱度烧结矿作为主要含铁原料（平均占含铁原料的90%左右），已无须或只需加入少量的熔剂入炉。

在特殊情况下，如洗刷炉墙上的粘着物，或炉缸堆积，炉况不顺行时，要加入特殊熔剂，如萤石（ CaF_2 ）和均热炉渣（ FeO ）等。其目的是造成低熔点、低粘度的炉渣。但这些特殊熔剂只能作为短时期使用的炉料。

为了充分利用钢铁工业的废弃物以降低成本，近年来有些高炉以高碱度的转炉炼钢渣代替碱性熔剂。此法既利用了渣中的碱性氧化物又回收了渣中的 FeO 。

当冶炼含碱性氧化物脉石为主的矿石时，则熔剂应为酸性物，如常用的硅石（ SiO_2 ）等。生产中常以配用含酸性脉石的矿石代替，以降低成本。近年来，使用高碱度烧结矿冶炼铸造铁的高炉，为了提高生铁含 $[\text{Si}]$ ，常加入硅石，以提高（ SiO_2 ）的活度。

3. 锰矿 铸造及炼钢生铁都要求含有一定数量的 $[\text{Mn}]$ 。为此，入炉料中应配加相应数量的锰矿。而当高炉冶炼含 $[\text{Mn}]$ 高的铁合金时，如 Fe-Mn 或 Si-Mn 合金等，则锰矿即成为主要原料。

对锰矿的质量要求与铁矿类似。由于锰矿中往往含有相当数量的 Fe ，在冶炼要求含 $[\text{Mn}]$ 品位较高的合金时，可能由于矿石中含 Fe 过高而不合乎要求。锰矿允许的极限含 Fe 量按下式计算：

$$\text{Fe}_\% = \frac{100 - \{[\text{C}] + [\text{Si}] + [\text{P}] + [\text{S}] + [\text{Mn}] + \dots\}}{K} \% \quad (1-1)$$

$$K = \frac{[\text{Mn}]}{\eta \cdot \text{Mn}_\%} \quad (1-2)$$

式中 $\text{Fe}_\%$ ——Mn矿允许的极限含 Fe 量（%）；

K ——冶炼单位重量合金时锰矿消耗量；

$[\text{C}]$, $[\text{Si}]$, $[\text{S}]$, $[\text{P}]$, $[\text{Mn}]$ ……——合金中各相应元素含量%；

$\text{Mn}_\%$ ——锰矿含 Mn 品位，%；

η ——炉内 Mn 的回收率，炼锰铁时此值可达80~85%。

由于锰矿资源有限，不得不使用含 Mn 较低，而含 P 及含 Fe 较高的矿石。除含 $[\text{Mn}]$ 品位外，对 $[\text{P}]$ 含量要求较为严格。对高 P 锰矿要采用“两步法”予以处理。第一步，用高 P 高 Fe 锰矿直接入炉，而采用低温酸性渣操作以抑制 Mn 的还原。由于 Fe 、 P 极易还原，几乎100%还原进入铁，得到高 P 铁及富 Mn 渣，实现 Mn 与 Fe 、 P 的火法分离，并提高 Mn 的品位。第二步，富锰渣即可作为冶炼高 Mn 低 P 的合金的合格原料了。

4. 其他含 Fe 代用品 钢铁联合企业中，一些工序产生的含 Fe 废弃物尚有进一步利用的价值，如高炉炉尘、出铁场渣铁沟内的残铁、铁水罐内的粘着物、转炉炉尘和轧钢铁鳞等。其中有些可以经简单处理即可返回高炉，如大小适当的残铁；有的则必须经造块工序，作为混合料的一部分。

黄铁矿（ FeS_2 ）焙烧后，生成气态的 SO_2 是制取硫酸的原料气。而其固体残渣一般含 $\text{Fe} > 50\%$ ，可作为含 Fe 原料。但由于其残留的 S 量仍远远超过一般的铁矿石，只能限量地配入烧结或球团混合料。

1.4.2 高炉燃料

1. 焦炭 典型的高炉作业，其燃料为100%焦炭。

焦炭的应用是高炉冶炼发展史上一个重要的里程碑。古老的高炉使用木炭。十七、十八世纪随着钢铁工业的发展森林资源急剧减少，木炭的供应成了冶金工业进一步发展的限制性环节。1709年焦炭的发明，不仅找到了地球上储量极为丰富的煤炭资源以代替木炭的办法，而且焦炭的强度比木炭高。这给高炉不断扩大容积，扩大生产规模奠定了基础。目前，世界上最大的高炉容积已达5500m³，炉缸直径16m，日产铁量12000吨以上，是世界上最雄伟的单体工业设备。

焦炭在高炉内的作用有：1) 在风口前燃烧，提供冶炼所需热量；2) 固体C及其氧化产物CO，是氧化物的还原剂；3) 在高温区，矿石软化熔融后，焦炭是炉内唯一以固态存在的物料，是支撑高达数十米料柱的骨架，同时又是风口前产生的煤气得以自下而上畅通流动的高透气性通路。

直到现在焦炭质量仍是限制高炉生产发展的因素之一。特别对于大型高炉，灰份高、强度差的焦炭往往给高炉作业造成麻烦。

(1) 高炉冶炼对焦炭质量的要求

1) 强度：焦炭在入炉前要经过多次转运，在炉内下降过程中承受越来越高的温度和越来越大的料柱的重力和摩擦力。如果焦炭没有足够的强度，则要被破碎，产生大量的粉末，导致料柱透气性恶化、炉渣粘稠、渣中带铁以及风渣口大量破损等。测量焦炭强度的办法是转鼓试验。自1979年7月份起，我国统一规定采用小转鼓(米库姆转鼓)。这是直径及长皆为1m的密闭转鼓，鼓内平行于轴线方向，每隔90°，在内壁上焊装四条100×50×10mm的角钢挡板，挡板高度为100mm。

试验开始时，鼓内装入>60mm的焦炭50kg，鼓以25转/分的速度，旋转4分钟。停转后将鼓内全部试样，以φ40mm及φ10mm的圆孔筛处理。大于40mm的焦炭重量百分数(记以M₄₀)为抗冲击强度的指标；而小于10mm的碎焦重量百分数(记以M₁₀)为抗摩擦强度的指标。我国冶金工业部颁布的焦炭转鼓指标如表1-6所示：

表 1-6 部颁焦炭强度转鼓指标

指 标		M ₄₀ (%)	M ₁₀ (%)
级 别			
I		≥76.0	≤8.0
II		≥68.0	≤10.0
III	a	≥64.0	≤11.0
	b	≥62.0	≤11.5

2) 固定C及灰份含量：良好的冶金焦应含固定C量高而灰份低。

一般干焦含85%左右的固定C，13%左右的灰份，其余为挥发份及硫。

焦炭含灰份高则意味着含C量低。前已述及，焦炭灰份主要由酸性氧化物构成，故在冶炼中需配加数量与灰份大体相等的碱性氧化物以造渣。焦炭含灰份量增加时，高炉实际

减量将以比灰份量两倍的比率增长。

此外，灰份高对焦炭强度有害。因焦炭是依靠C原子间形成平面网状结晶结构才具有强度的。如果C原子间充斥着其他惰性质点，必然阻断了C原子之间有效的结晶键的联结。实践证明，焦炭灰份含量与其强度之间呈简单的反比关系。

高炉冶炼的实践还证明，焦炭灰份每增加1%，焦比升高2%，高炉产量下降3%。

焦炭中灰份的含量主要是由原煤灰份含量及炼焦前最经济的洗煤工艺条件决定的。我国地方小型炼焦厂的焦炭含灰份很高。

3) 硫：焦炭带入的硫量，占冶炼单位质量生铁所需原料总含硫量的80%左右。

我国低硫煤的资源数量有限。每吨生铁入炉原料带入的总硫量（称为“硫负荷”，kg/t）增大时，对高炉是个沉重的负担。为了保证生铁含硫量低于国家标准，必须提高炉温和炉渣碱度。这些措施要额外消耗能量，使产量降低，焦比升高。冶炼实践说明，焦中含硫每提高0.1%，高炉焦比升高1.2~2.0%。

冶金部颁布的焦炭质量标准要求，一类焦 $S \leq 0.6\%$ ；三类焦 $S \leq 1.0\%$ 。

焦中含硫与灰份含量的条件类似，取决于原煤的含硫量及经济而合理的洗煤工艺条件。

4) 挥发份含量：焦炭中挥发份含量代表焦炭在制造过程中受到干馏后的成熟程度。一般焦炭中挥发份含量为0.8~1.2%。原煤中挥发份含量很高，在干馏过程中，大部份逸出。当挥发份在焦中残留量高，如 $>1.5\%$ ，则说明干馏时间短，往往不能构成结晶完善程度好、强度足够高的焦炭。挥发份过低，也会形成小而结构脆弱的焦炭。故要求焦炭挥发份含量适当，主要是防止挥发份过高。

目前我国钢铁厂使用的焦炭，挥发份有升高至1.5~2.0%的趋势，这主要是由于配煤中气煤的比率增高，而并未相应延长结焦时间所致。

5) 成份和性能的稳定性和粒度：与所有入炉原料相同，焦炭成份和性能波动会导致高炉冶炼行程不稳定，对高炉提高生产效率及降低燃料消耗量十分不利。与铁矿石及熔剂等不同，焦炭不能采用大型露天料场堆存，用混匀中和的办法减少其成份的波动。这是由于与高炉配套的焦炉没有很大的生产能力，足以维持相当规模的焦炭贮存量；更为重要的原因是，焦炭长期贮存会降低其品质。所以对焦炉生产的稳定性提出了更高的要求。

与含铁原料一样，焦炭的平均粒度及粒度分布范围，随冶炼技术的进步，近年来有逐步缩小的趋势。

有两方面的因素对焦炭的平均粒度提出了不同的要求：

一是缩小焦炭粒度。缩小焦炭粒度可使焦炉产品中成品率提高，降低焦炭成本，这是纯经济因素的考虑；从冶炼过程考虑，为了加速炉内传热和传质过程，铁矿石的粒度在逐渐缩小，并确实取得了降低吨铁能耗的效果。而焦炭粒度应与缩小了的矿石粒度相适应，二者粒度维持恰当的比值，可以减少焦炭及矿石层在炉内相互混合，从而降低炉料透气性的程度。

但另一种的理由则认为，矿石与焦炭在炉内毕竟是分层装入的，焦与矿互相混合只发生在两层交界处的局部，而单独成层的是多数。焦炭粒度越大则焦炭分层的透气性越好。在软熔带中则焦窗的透气性良好；在软熔带以下只有焦炭构成的料柱内产生液泛的可能性