

职业技术学院教学用书

炼钢原理与工艺

刘根来 主编



LIANGANG YUANLI YU GONGYI

冶金工业出版社

职业技术学院教学用书

炼钢原理与工艺

主 编 刘根来
主 审 曲 英

北 京
冶金工业出版社
2004

内 容 提 要

本书为职业技术院校教学用书，主要内容包括：装料、供氧、造渣、硅与锰的氧化、碳氧反应及脱碳工艺、脱磷、脱硫、脱氧及非金属夹杂物、钢中气体、温度控制、调整成分和出钢等。在内容的安排上，注重职业技术教育的特点，力求少而精，通俗易懂，理论联系实际，注重应用，便于读者学习掌握炼钢生产的基本原理。

本书可供职业技术院校教学之用，亦可作为钢铁企业工人技术培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

炼钢原理与工艺/刘根来主编. —北京：冶金工业出版社，
2004.9 (2004.10 重印)
职业技术学院教学用书
ISBN 7-5024-3578-6

I. 炼… II. 刘… III. 炼钢—专业学校—教材 IV. TF7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 075057 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号，邮编 100009)

责任编辑 宋 良 美术编辑 李 心

责任校对 王永欣 李文彦 责任印制 李玉山

北京兴华印刷厂印刷；冶金工业出版社发行；各地新华书店经销

2004 年 9 月第 1 版，2004 年 10 月第 2 次印刷

787mm×1092mm 1/16；14.75 印张；353 千字；222 页；2001～5000 册

26.00 元

冶金工业出版社发行部 电话：(010)64044283 传真：(010)64027893

冶金书店 地址：北京东四西大街 46 号(100711) 电话：(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题，本社发行部负责退换)

前 言

本书是根据职业技术学院钢铁冶炼专业“炼钢原理与工艺”课程教学基本要求编写的教学用书,是我们借鉴加拿大 CBE 模式,在广泛了解我国炼钢生产现状、分析了炼钢工岗位能力要求的基础上,精选内容编写而成。全书以炼钢生产过程为主线,原理渗透于工艺之中,突出理论的应用性,力求体现本次教改的思路、职业教育的特点和时代的特征。

本书的绪论部分及第 1、2、3、4、12 章由山西工程职业技术学院刘根来编写,第 5 章由首钢工学院张宏文编写,第 6、7 章由山西高级冶金技校冯志刚编写,第 8、9 章由河南省工业学校陶林编写,第 10、11 章由贵州冶金职业技术学院耿鹏编写。全书由刘根来主编。

在编写过程中,各参编院校的有关领导都给予了大力的支持;本书初稿由北京科技大学曲英教授主审,并提出了许多有益的修改意见。在此一并致谢。

受编者学识水平及对本次职业教育课程改革理解深度所限,疏漏及不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2004 年 7 月

目 录

绪论	1
1 装料	4
1.1 电炉炼钢原料及装入方法	4
1.1.1 电炉炼钢原料	4
1.1.2 配料计算	6
1.1.3 电炉的装料方法及要求	10
1.2 转炉炼钢原料及装入制度	11
1.2.1 转炉炼钢原料	11
1.2.2 转炉的装入制度	13
2 供氧	16
2.1 熔池内氧的来源	16
2.1.1 吹入氧气	16
2.1.2 加入铁矿石和氧化铁皮	17
2.1.3 炉气传氧	17
2.2 杂质元素的氧化方式	17
2.2.1 直接氧化	17
2.2.2 间接氧化	18
2.3 转炉的供氧制度	18
2.3.1 供氧强度	19
2.3.2 供氧压力	20
2.3.3 枪位及其控制	20
2.3.4 复吹转炉的底部供气制度	24
2.4 电弧炉的供氧工艺	26
2.4.1 吹氧操作	26
2.4.2 加矿方法	27
2.4.3 炉气的传氧过程	28
3 造渣	30
3.1 造氧化渣	30
3.1.1 造氧化渣的目的及要求	30
3.1.2 造渣材料及其用量	31
3.1.3 炉渣组成对石灰溶解的影响	35
3.1.4 转炉的造渣制度	37
3.1.5 电炉熔化期和氧化期的造渣工艺	38
3.1.6 氧化渣的渣况判断	39
3.1.7 氧化渣的泡沫化	40

3.2 造还原渣	45
3.2.1 还原渣的种类及其特点	45
3.2.2 造还原渣的材料	46
3.2.3 电炉还原期的造渣制度	47
3.2.4 造还原渣的操作程序	48
3.2.5 还原渣的渣况判断	49
4 硅、锰的氧化	51
4.1 硅的氧化	51
4.2 锰的氧化	52
5 碳氧反应及脱碳工艺	53
5.1 碳氧反应	53
5.1.1 碳氧反应在炼钢中的作用	53
5.1.2 碳氧反应的热力学	53
5.1.3 碳氧反应的动力学	58
5.2 转炉脱碳工艺	64
5.2.1 吹炼中的脱碳速度及其控制	64
5.2.2 终点碳的控制	65
5.3 电弧炉脱碳工艺	65
5.3.1 加矿脱碳	66
5.3.2 吹氧脱碳	66
5.3.3 矿、氧综合脱碳	68
5.3.4 净沸腾	68
5.3.5 氧化终点碳的控制	69
5.4 电炉返回法冶炼不锈钢的脱碳工艺	70
5.4.1 脱碳保铬理论	70
5.4.2 高铬钢液的脱碳工艺	72
5.5 VOD 炉脱碳工艺	73
5.5.1 真空吹氧脱碳的特点	73
5.5.2 真空吹氧脱碳工艺	73
5.5.3 VOD 炉精炼工艺分析	74
5.5.4 真空吹氧精炼终点碳的判断	75
5.6 AOD 炉脱碳工艺	76
5.6.1 氩氧精炼原理	76
5.6.2 氩氧混合脱碳工艺	76
6 脱磷	78
6.1 磷对钢性能的影响	78
6.1.1 钢中磷的危害性	78
6.1.2 钢中磷的有益作用	79
6.2 脱磷反应	79
6.2.1 氧化脱磷	79

6.2.2 还原性脱磷	84
6.3 转炉脱磷工艺	85
6.3.1 造渣方法及其脱磷效率	85
6.3.2 吹炼过程中磷的变化规律	86
6.3.3 回磷及其防止措施	88
6.3.4 铁水预脱磷	89
6.4 电弧炉脱磷工艺	90
6.4.1 熔氧结合脱磷工艺	90
6.4.2 非正常炉况的脱磷工艺	91
6.4.3 喷粉脱磷工艺简介	92
7 脱硫	95
7.1 硫对钢性能的影响	95
7.1.1 钢中硫的危害性	95
7.1.2 钢中硫的有益作用	96
7.2 脱硫反应	96
7.2.1 碱性氧化渣脱硫	96
7.2.2 碱性还原渣脱硫	98
7.2.3 金属元素脱硫	100
7.3 原料含硫量对脱硫的影响	101
7.4 转炉脱硫工艺	101
7.4.1 成渣速度与熔池搅拌对脱硫的影响	101
7.4.2 吹炼过程中硫的变化规律	102
7.4.3 转炉中的气化去硫	102
7.4.4 铁水预脱硫	103
7.4.5 钢液炉外脱硫	110
7.5 电炉脱硫工艺	111
7.5.1 电炉还原期的脱硫	111
7.5.2 电炉出钢中的脱硫	112
7.6 精炼炉脱硫工艺	114
7.6.1 LF 精炼炉简介	115
7.6.2 LF 炉精炼工艺	115
7.6.3 LF 炉的脱硫分析	117
8 脱氧与非金属夹杂物	120
8.1 脱氧的目的和任务	120
8.1.1 钢中氧的危害性	120
8.1.2 脱氧的目的和任务	120
8.2 各元素的脱氧能力和特点	121
8.2.1 元素的脱氧能力	121
8.2.2 各元素的脱氧特点	122
8.3 脱氧产物的上浮与排除	125

8.3.1	脱氧产物的上浮速度	125
8.3.2	促使脱氧产物上浮的措施	126
8.4	常用的脱氧方法	128
8.4.1	沉淀脱氧	128
8.4.2	炉渣脱氧	129
8.4.3	喷粉脱氧	131
8.4.4	喂线脱氧	133
8.4.5	真空脱氧	133
8.5	钢中的非金属夹杂物	136
8.5.1	钢中非金属夹杂物的来源	136
8.5.2	钢中非金属夹杂物的分类	136
8.6	夹杂物对钢性能的影响	141
8.6.1	夹杂物对钢力学性能的影响	141
8.6.2	夹杂物对钢工艺性能的影响	143
8.7	减少钢中夹杂物的途径	144
8.7.1	减少钢中的氧化物夹杂	144
8.7.2	减少钢中的硫化物夹杂	145
9	钢中气体	146
9.1	氢的来源及其对钢质量的影响	146
9.1.1	钢中氢的来源	146
9.1.2	氢在钢中的溶解	146
9.1.3	氢对钢质量的影响	148
9.2	氮的来源及其对钢质量的影响	149
9.2.1	钢中氮的来源	149
9.2.2	氮在钢中的溶解	149
9.2.3	氮对钢质量的影响	151
9.3	钢液脱气	151
9.3.1	常压下的钢液脱气	151
9.3.2	真空脱气	153
9.3.3	吹氩脱气	159
9.3.4	配有吹氩(或电磁)搅拌的真空脱气	161
9.4	减少钢中气体的措施	164
9.4.1	加强原材料的干燥及烘烤	164
9.4.2	采用合理的生产工艺	165
10	温度控制	167
10.1	温度控制的重要性	167
10.1.1	温度对冶炼操作的影响	167
10.1.2	温度对成分控制的影响	167
10.1.3	温度对浇注操作和锭坯质量的影响	168
10.2	出钢温度的确定	168

10.2.1	钢液熔点的计算	168
10.2.2	钢液过热度的确定	170
10.2.3	出钢及浇注过程中的温降值	170
10.3	熔池温度的测量	171
10.3.1	仪表测温及其特点	171
10.3.2	目测估温及其影响因素	172
10.4	转炉炼钢中的温度控制	174
10.4.1	终点温度的控制	174
10.4.2	过程温度的控制	179
10.4.3	熔池温度的计算机控制	180
10.5	电炉炼钢中的温度控制	185
10.5.1	普通三相交流电弧炉的温度控制	185
10.5.2	大型直流电弧炉的温度控制	190
10.6	钢包精炼炉的温度控制	192
10.6.1	影响钢包精炼炉熔池温度的因素	192
10.6.2	钢包精炼炉温度控制的基本原则	193
10.6.3	钢包精炼炉的温度控制方法	193
11	调整成分	195
11.1	钢液合金化概述	195
11.1.1	钢液合金化的任务与原则	195
11.1.2	钢的规格成分与控制成分	195
11.1.3	合金元素在钢中的主要作用	195
11.1.4	对合金剂的一般要求	197
11.2	常用合金剂简介	197
11.2.1	铁合金	197
11.2.2	其他合金	199
11.2.3	纯金属	200
11.3	合金的加入方法	200
11.3.1	合金元素与氧反应的热力学分析	200
11.3.2	合金的加入时间与加入方法	200
11.3.3	合金的收得率及其影响因素	203
11.4	合金加入量的计算	206
11.4.1	钢水量的校核	206
11.4.2	低合金钢和单元高合金钢的合金加入量计算	207
11.4.3	多元高合金钢的合金加入量计算	211
11.5	成分出格及其防止措施	215
11.5.1	成分出格的一般原因及防止措施	215
11.5.2	电炉钢成分出格的原因及对策	215
12	出钢和分渣技术	218
12.1	转炉出钢	218

12.1.1 转炉出钢的条件..... 218

12.1.2 出钢要求及挡渣出钢 218

12.2 电炉出钢 220

12.2.1 电炉出钢的条件..... 220

12.2.2 出钢的方式与要求 220

参考文献 222

绪 论

从 1855 年英国冶金学家亨利·贝塞麦发明酸性底吹空气转炉炼钢方法至今，现代炼钢生产在不断探索中发展了近一个半世纪。设备的不断更新和工艺的不断改进，使钢的产量大幅提高，质量日益改善。目前主要的炼钢方法有氧气转炉炼钢法、电弧炉炼钢法以及炉外精炼技术。炼钢的生产流程主要有以下两种：

铁水→铁水预处理→氧气转炉→初炼钢水→炉外精炼→精炼钢水→连铸机→连铸坯废钢→电弧炉→
初炼钢水→炉外精炼→精炼钢水→连铸机→连铸坯

氧气转炉包括氧气顶吹转炉、氧气底吹转炉、氧气侧吹转炉及顶底复吹转炉等。氧气顶吹转炉最早是由奥地利钢铁联合公司于 1952 年和 1953 年分别在 Linz 和 Donawitz 两地建成并投入生产，故常简称为 LD。它的主要原料是铁水，同时可配加 10%~30% 的废钢；生产中不需要外来热源，依靠吹入的氧气与铁水中的碳、硅、锰、磷等元素反应放出的热量使熔池获得所需的冶炼温度。其突出的优点是生产周期短、产量高；不足之处是生产的钢种有限，主要冶炼低碳钢和部分合金钢。此外，20 世纪 70 年代初诞生的顶底复吹转炉，近年来已有长足的发展，其中顶吹氧气底吹惰性气体搅拌已成为目前的主要炼钢方法。

电炉炼钢法是以电能为主要能源、废钢为主要原料的炼钢方法，1897 年产生于德国。其显著的优点是，熔池温度易于控制和炉内气氛可以调整，故而常用来生产优质钢和高合金钢。此外，它不像氧气转炉那样需配建一套庞大的炼铁生产系统，同时本身的设备也比较简单，因而投资小，建厂快。20 世纪 60 年代以来，电弧炉在向大型化发展的同时，采用了高功率（400~700kVA/t）-超高功率（700~1000kVA/t）的供电系统、水冷炉壁、助熔技术、自动化操作及炉底出钢、炉外精炼等技术，使其“电能耗高、生产率低”的状况得到了明显的改观。目前一些大型电弧炉已大量用于冶炼碳素钢，电炉钢的产量占世界钢产量的比例逐年增加。

所谓炉外精炼，是指从初炼炉即氧气转炉或电弧炉中出来的初炼钢水，在另一个冶金容器中进行精炼的工艺过程。精炼的目的是进一步去气、脱硫、脱氧、排除夹杂物、调整及均匀钢液的成分和温度等，提高钢水质量；同时，缩短初炼炉的冶炼时间，使炼钢和连铸的作业周期能协调起来。精炼的手段有真空、吹氩、搅拌、加热、喷粉等。近 30 年来，炉外精炼技术得到了迅速发展，具体方法多达 30 余种。常见的有钢包吹氩及 CAS、真空脱气法如 RH 法和 DH 法、钢包炉精炼法如 LF 法和 ASEA-SKF 法、真空氧气脱碳法（即 VOD 法）、氩氧混合脱碳法（即 AOD 法）以及喷粉、喂线等。实际生产中可根据生产条件选配合适的精炼方法，比如小型转炉可选用钢包吹氩、喂线等，大型转炉可选用 RH、CAS 等，电弧炉则选用 LF 等。

在炼钢生产技术的发展过程中，各种炼钢方法凭借各自的优势进行竞争和发展。20 世纪 50 年代，氧气顶吹转炉以其优质、高产、低成本的优点击败了曾经垄断了炼钢生产长达多半个世纪的平炉而成为主要的炼钢方法之一。炉外精炼技术出现后，“氧气转炉→炉外精炼”的炼钢工艺得到了迅速的发展，使其“品种少”的状况明显改善；而且钢的质量进一步提高，已能代替电弧炉生产大部分优质钢和合金钢。尽管电炉钢的比例不断增大，但目前世界上氧气转炉钢的产量仍占总产量的 60% 左右。

电弧炉炼钢法是生产优质钢、高合金钢的传统方法，但近年来大部分优质钢已由“氧气转

炉→炉外精炼”的工艺流程生产。所以目前除少数高合金钢外，电弧炉炼钢的传统模式——熔化→氧化→还原，已不再固定不变，将有碍高功率输入的还原熔炼分解到钢包二次精炼中进行，电弧炉仅作为熔化、脱磷的容器即初炼炉。目前，电弧炉的合理容量已达 80 吨左右；为了和连铸生产配合，每炉钢的生产周期，已从传统工艺的 5 小时左右缩短到 1 小时左右；每吨钢的电耗也相应地从 800kWh 左右降低到了 400kWh 左右。加之水电工业的发展使得电价下降，以及充分再循环利用铁的再生资源——废钢，使得电炉炼钢得以稳步发展，目前电炉钢产量已达总产量的 30% 以上。

不同的炼钢方法，其冶炼过程各不相同。即使是同一炼钢方法，对于不同的钢种，其生产过程也不尽相同。炉外精炼的方法更是多达几十种。这里仅将氧气顶吹转炉、电弧炉及钢包精炼炉的基本冶炼过程分别简述如下。

氧气顶吹转炉的炼钢过程 氧气顶吹转炉炼钢的基本过程是：装料（即加废钢、兑铁水）→摇正炉体→降枪开始吹炼并加入第一批渣料→（吹炼中期）加入第二批渣料→（终点前）测温、取样→（碳、磷及温度合格后）倾炉出钢并进行脱氧合金化。

起初，氧气顶吹转炉炼钢中的冷却剂的加入量及供氧量等全凭操作者的经验确定，因此很难一次同时命中终点碳和终点温度。一般都是在终点前测温、取样，根据检测到的信息再凭经验进行相应的修正操作，使冶炼过程到达终点。这种传统的操作方法既费时费力，又增加原材料消耗。1959 年，美国的琼斯·劳夫林钢铁公司首次对转炉炼钢过程进行计算机静态控制，即根据原材料条件、所炼钢种吹炼终点的温度和含碳量要求，利用计算机求出冷却剂的加入量、供氧量及各种造渣材料的用量，并按计算结果进行装料和吹炼；冶炼中则同传统的做法一样，凭操作者的经验进行修正操作。随着电子计算机技术和检测技术的迅速发展，目前已能利用计算机对炼钢过程进行动态控制，即在利用计算机进行装料计算的基础上，吹炼过程中计算机凭借检测系统提供的钢液成分、熔池温度及炉渣状况等有关量随时间变化的动态信息，及时对吹炼参数如枪位、氧压等进行修正，使冶炼过程顺利地到达终点。应用电子计算机控制转炉炼钢过程，可显著提高和稳定钢的质量、降低原材料消耗、提高劳动生产率和改善劳动条件。

为了改善吹炼末期因金属含碳量低，脱碳速度下降，熔池搅拌功率不足的状况，现在顶吹转炉都增加了底部吹氮、氩等气体搅拌。

电弧炉的炼钢过程 电弧炉炼钢，按照生产工艺的不同可分为氧化法、不氧化法和返回吹氧法三种。

氧化法治炼是电弧炉炼钢的传统方法，其生产过程主要由装料、熔化期、氧化期、还原期和出钢五个阶段组成。它的最大特点是有一个氧化期，通过向熔池吹氧、加矿进行脱碳、脱磷，同时使熔池沸腾以去除钢中的气体和非金属夹杂物。因此，氧化法治炼可以用普通废钢为原料，获得含磷量及气体和夹杂物都较低的钢，这也就是一般钢种大多采用氧化法治炼的原因。其缺点是如果炉料中配有合金钢返回料，则其中的一些合金元素会被氧化而损失于炉渣之中。现代超高功率电炉都采用去掉还原期的氧化法生产。

不氧化法是用合金钢返回料如切头、切尾、废锭、注余及汤道等冶炼合金钢的一种生产工艺，目的是回收利用原料中的合金元素。与氧化法相比，其冶炼过程中无氧化期，炉料熔化完毕经还原脱氧、调整成分和温度后即可出钢，因此冶炼时间比氧化法短，生产率较高。此外，由于回收利用了炉料中的合金元素，可减少铁合金的用量，生产成本也比氧化法低。低合金钢、不锈钢、高速工具钢等都可以用该法治炼。其不足之处在于冶炼中不能去除钢中的磷、气体及夹杂物，因此对炉料的质量要求十分严格，只能使用清洁、无锈、含磷低的返回废钢，有时还不得不配用工业纯铁；同时，钢液成分基本上取决于配料成分，这就要求配料计算要十分

精确，装料称量要绝对准确。为此，这种炼钢方法用得较少。

返回吹氧法也是利用合金钢返回料冶炼合金钢。与不氧化法不同的是，根据碳与氧的亲合力在一定温度下比某些合金元素如铬等与氧的亲合力大的原理，冶炼中当钢液温度上升到一定值时开始吹氧脱碳，不仅可以防止合金元素大量氧化，而且达到了强化冶炼过程和去除钢中夹杂物和气体的目的。其基本生产过程是：装料→熔化并升温→吹氧脱碳→预还原→脱氧及调整成分与温度→出钢。返回吹氧法常用于冶炼含有钨、铬、镍等不易氧化元素的高合金钢，如不锈钢、高速工具钢等。由于可以吹氧脱碳，炉料中不需配用价格很高的软铁，生产成本较低。同时，钢中的气体及夹杂物少而质量较高。必须指出的是，同不氧化法一样，返回吹氧法也不能有效地去磷。

钢包炉的基本精炼过程 钢包炉的精炼方法因所生产的钢种和精炼的目的不同而不同，多达近 10 种。但是，精炼的工艺手段不外乎真空脱气、电弧加热、吹氩或电磁搅拌、吹氧脱碳、加合金脱氧及调成分等。比如，ASEA-SKF 法配有真空脱气、电弧加热、电磁搅拌和添加合金等装置；LF 真空精炼法（有的 LF 炉为非真空精炼）则配备了真空脱气、电弧加热、吹氩搅拌、添加合金等装置；MVOD 法及 VOD 法还增加了吹氧脱碳装置。他们的精炼过程大同小异，较为常用的 LF 法的基本精炼过程为：

盛接初炼钢水并除渣→吹氩搅拌、真空脱气同时还原脱氧→吹氩搅拌、电弧加热并调成分→连铸。

应指出的是，在现代炼钢生产中，除极少数炉外精炼可以离线作业外，绝大多数都是在线进行，因此精炼时间必须与炼钢和连铸的作业时间协调。

复 习 思 考 题

1. 目前最主要的两种炼钢方法是什么，各有何优缺点？
2. 什么叫炉外精炼，常见的炉外精炼法有哪些？
3. 简述氧气顶吹转炉炼钢的基本过程。
4. 简述电弧炉氧化法冶炼的基本过程。
5. 简述 LF 法的基本精炼过程。

1 装 料

所谓装料，是指将炼钢所用的钢铁炉料装入炉内的工艺操作。不同的炼钢方法所用原料不同，装料的方法和要求也有所不同。

1.1 电炉炼钢原料及装入方法

1.1.1 电炉炼钢原料

电炉炼钢所用原料，主要有废钢、生铁和直接还原铁三种。

1.1.1.1 废钢

废钢是电炉炼钢的主原料，其质量好坏将直接影响钢的质量、生产成本和电炉的生产率。

A 废钢的来源

按其来源不同，废钢大致可分为返回废钢和外购废钢两类。

返回废钢来自本厂的冶炼车间和加工车间，如废钢锭、汤道、注余、废钢坯、切头、切尾、切边以及分析检验用过的试样等。按成分不同，返回废钢又可分为碳素返回钢和合金返回钢。这一类废钢的外形比较规则，质量也较好，一般都能直接入炉。

外购废钢的来源很广，有来自机械加工厂的边角料、车屑等；有各种废旧设备，如报废的车辆、船只和废旧的钢轨及建筑构件等；还有来自城市回收的日杂废品，如罐头盒、铁筒等。这一类废钢的质量较差，常混有易爆品、有害元素和非金属杂质，而且外形又极不规则、大小相差悬殊，需专门加工处理后方能入炉。

B 对废钢的要求

电炉炼钢对废钢的一般要求是清洁少锈，无混杂，成分明确，块度合适。具体地来讲，有以下几个方面：

(1) 废钢的表面应清洁少锈。如果废钢上粘有大量的泥沙、炉渣或耐火材料，不仅会降低炉料的导电性能，延长熔化时间；而且还会降低炉渣的碱度而影响去磷效果和炉衬寿命。

废钢表面的油污，冶炼时的高温会使其中的碳氢化合物分解而增加钢的含氢量。

铁锈是含水的铁氧化物，主要成分是 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ，废钢锈蚀严重时会增加钢的含氢量并降低炉料的回收率。

(2) 废钢中不应混有铅、锡、砷、铜、锌等有色金属。铅的密度高达 10.3t/m^3 ，而熔点仅 327.4°C 且不溶于钢液，易沉积在炉底的缝隙中而引发漏钢事故；锡、砷和铜易引起钢的热脆；锌的沸点仅 907°C ，极易汽化，在炉气中被氧化成 ZnO ，对炉盖尤其是硅砖炉盖有严重的损害作用。

另外，废钢中还不得混有密封的容器、爆炸物和有毒物，以确保生产安全。

(3) 化学成分要明确。废钢应分类堆放，而且化学成分明确，以保证配料成分准确无误。

(4) 废钢的块度要合适。如果废钢的块度过大，装料时易损坏炉衬，而且冶炼中熔化困难；反之，则会导致二次装料，延长冶炼时间，增加电耗。

因此，对进厂的废钢尤其是外购废钢应进行必要的加工处理，如用水冲洗、火烧、切割、落锤破碎、打包等，以满足上述要求。

1.1.1.2 生铁、废铁和软铁

在电弧炉炼钢中，生铁一般是用来提高炉料的配碳量的，由于其硫、磷含量高，通常生铁的配入量不超过炉料的 30%，其成分应符合炼钢生铁国家标准即 GB717—82 的要求。为了降低生产成本，可在炉料中配入部分废铁如废旧的锭模、中注管外壳、锭盘及各种废铸件等来代替生铁。

软铁也称工业纯铁，其成分除铁外仅含有微量的其他元素，质地特别软。软铁在电弧炉炼钢中用于不氧化法配料，目的在于调低炉料的含碳量。软铁的生产成本较高，价格较贵，故应尽量少用。软铁的熔点较高，使用时块度应小些；同时，软铁不得露天存放以免生锈。

随着对钢质量要求的不断提高和废钢资源的短缺，近年来电弧炉也开始用高炉或 COREX 等熔融还原法生产的铁水进行热兑来炼钢。它具有不含残余元素、物理热和化学热高等优点，因而可以大幅降低电耗和电极消耗、缩短电炉冶炼时间等。目前，国内已有数座使用铁水热兑的电弧炉，铁水比一般为 20%~30%。铁水的成分应符合 GB717—82 的要求，详见表 1-1。

表 1-1 炼钢生铁国家标准 (GB717—82)

铁 种			炼钢用生铁		
铁 号			L04	L08	L10
化学成分/%	Si		≤0.45	>0.45~0.85	>0.85~1.25
	Mn	一组	<0.30		
		二组	>0.30~0.50		
		三组	>0.50		
	P	一级	<0.15		
		二级	>0.15~0.25		
		三级	>0.25~0.40		
		特类	≤0.02		
	S	一类	>0.02~0.03		
		二类	>0.03~0.05		
		三类	>0.05~0.07		

1.1.1.3 直接还原铁脱碳粒铁

随着电炉钢产量和连铸比的增加，以及各行业对钢质量要求的不断提高，电炉冶炼优质钢所需的返回废钢日益减少，而外购废钢逐渐增加。而废钢的循环利用，使得其中的有色金属元素如铅、锡、砷、铜、锌、铬、镍、钼、钒等逐渐积累，以至于采用 100% 的废钢做原料时，这些有色金属元素的含量不能满足技术条件的要求，从而促使在电弧炉炼钢中应用直接还原铁，以冲淡有色金属元素的浓度。近年来，电弧炉炼钢使用直接还原铁的数量逐年提高，我国也有数家钢厂的电弧炉使用了直接还原铁。

直接还原铁 (DRI) 是在回转窑或竖窑内，以铁矿石或精矿粉球团为原料，在低于炉料熔点的温度下，以 CO 或 H₂ 或焦炭做还原剂来还原铁氧化物得到的金属铁产品。铁矿石直接还原得到的是海绵状的金属铁，称之为海绵铁；由精矿粉先造球再直接还原得到的球状产品，称为金属化球团。

电弧炉炼钢对直接还原铁的要求是：全铁大于 87%，硫含量低于 0.03%，磷含量不超过 0.08%，脉石含量尽量低；粒度为 8~22mm。

应当指出，直接还原铁生产要消耗大量能源，其单位能耗并不比高炉少；加之直接还原铁中的脉石含量较高，大量使用将导致炼钢炉内的渣量增加，同时炉渣中的 (FeO) 含量较高，冶炼中易产生激烈沸腾，使得金属收得率下降、冶炼时间延长和电耗增加。因此，电弧炉炼钢中

使用直接还原铁的量一般认为是 50%左右较为合理，国内许多厂家的用量为 25%~30%，不过目前也有个别厂家使用 100%的直接还原铁进行生产。

电弧炉还使用一种叫做脱碳粒铁的原料。它是高炉生铁粒化后在回转窑中被 CO₂脱碳而获得的产品，粒度一般为 5~15mm，含碳量为 0.2%~2.0%。与直接还原铁相比，脱碳粒铁的金属铁含量高 5%~10%、酸性脉石含量低 1%~3%；但其价格也相应高些。

1.1.2 配料计算

所谓配料，就是根据所炼钢种的冶炼方法、技术标准和工艺要求，合理地搭配使用本厂现存的废钢原料。

1.1.2.1 氧化法的配料计算

前已述及，氧化法冶炼的突出特点是有一个氧化期，可以通过吹氧和加矿等氧化手段达到去磷和脱碳并去气、去夹杂的目的，因此原则上可用普通废钢冶炼任何钢种。

A 基本要求

氧化法冶炼时的炉料组成主要是外购废钢和生铁，返回废钢的用量通常不超过炉料装入量的 20%。

氧化法的配料主要是要配好碳。炉料中的碳含量应保证氧化期有足够的碳进行碳氧反应，以达到去气、去夹杂的目的。炉料的配碳量可根据熔化期的烧损、氧化期的脱碳量和还原期的增碳量三方面的情况来决定。在目前熔化期采取吹氧助熔的条件下，配碳量通常高出所炼钢种规格 0.6%左右。当然，炉料的配碳量也不可过高，否则会延长氧化时间并使钢液过热。

炉料中的硅和锰一般不人为配入。不过，一般希望炉料的含硅量不大于 0.8%、含锰量不超过 0.6%，否则会延缓熔池沸腾。

炉料的磷、硫含量原则上是越低越好，但应考虑库存废钢的实际情况。通常，冶炼一般结构钢的炉料含硫、磷量不应超过 0.1%，冶炼优质钢的炉料含硫、磷量应小于 0.05%。

氧化法冶炼时，炉料的综合回收率视废钢的块度和生锈程度而定，一般波动在 93%~96%之间。

B 计算步骤及公式

(1) 确定出钢量：

出钢量 = (钢锭单重 × 钢锭支数 + 汤道废钢 + 中注管废钢 + 注余) × 密度系数

所谓密度系数，是以 45 号钢的密度 7.81t/m³为标准 1 时，其他钢的相对密度值。常见钢种的密度系数列于表 1-2。

表 1-2 常见钢种的密度系数

钢 种	密度/t·m ⁻³	密度系数	钢 种	密度/t·m ⁻³	密度系数
45	7.81	1.00	Cr17	7.72	0.9885
1Cr18Ni9Ti	7.90	1.0115	Cr12MoV	7.70	0.9859
W18Cr4V	8.70	1.114	38CrMoAlA	7.71	0.9872
W9Cr4V2	8.30	1.063	35~60Si2Mo	7.71	0.9872
3Cr2W8V	8.35	1.069	CrW5	8.10	1.0371
1~4Cr13	7.75	0.9923	3W4Cr2V	8.20	1.05
GCr15	7.81	1.00	4~6CrW2Si	7.93	1.015
Cr28	7.72	0.9885	W12Cr4V4Mo	8.54	1.093

(2) 计算总入炉量:

$$\text{总入炉量} = \frac{\text{出钢量}}{\text{炉料综合回收率}}$$

(3) 求配料量:

配料量 = 总入炉量 - 矿石进铁量 - 合金加入总量

式中 矿石进铁量 = 吨钢加矿量 × 出钢量 × 矿石含铁量 × 铁的回收率

$$\text{某合金加入量} = \frac{\text{出钢量} \times (\text{控制含量} - \text{钢液含量})}{\text{合金含量} \times \text{合金回收率}}$$

采用矿氧结合氧化时, 一般情况下每吨钢加矿 15kg 左右, 矿石含铁量通常为 60% 左右, 铁的回收率一般按 80% 计算。还原期调成分时, 钢液的含硅量可按 0.03% 考虑, 钢液的含锰量一般按 0.1% 计算。

(4) 计算各种炉料用量:

$$\text{某种炉料用量} = \text{配料量} \times \text{该料的配比}$$

例 1-1 氧化法冶炼 45 钢, 采用下注法浇铸 2t 的方锭 8 支, 汤道及中注管废钢共计 200kg, 注余按 150kg 考虑。根据废钢的库存情况, 要求配用 70% 的外购废钢, 用生铁配碳, 不足的部分由本钢种返回钢配齐。炉料的综合回收率为 94%。求配料量及炉料的组成。原材料成分列于表 1-3。

表 1-3 原材料的化学成分 %

	w[C]	w[Si]	w[Mn]	w[P]	w[C]
45 钢的规格	0.42~0.50	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.04	≤0.04
45 钢返回料	0.45	0.27	0.65	0.03	0.03
生 铁	4.00	0.50	0.45	0.25	0.055
外购废钢	0.25	0.85	0.50	0.05	0.05
锰铁合金			63	回收率 98	
硅铁合金		75		回收率 96	

解:

1) 确定出钢量:

$$\text{出钢量} = (2000 \times 8 + 200 + 150) \times 1.0 = 16350\text{kg}$$

2) 计算总入炉量:

$$\text{总装入量} = \frac{16350}{94\%} = 17394\text{kg}$$

3) 求配料量:

$$\text{矿石进铁量} = 15 \times 16.35 \times 60\% \times 80\% = 118\text{kg}$$

$$\text{Fe-Si 加入量} = \frac{16350 \times (0.27\% - 0.03\%)}{75\% \times 96\%} = 55\text{kg}$$

$$\text{Fe-Mn 加入量} = \frac{16350 \times (0.65\% - 0.10\%)}{63\% \times 98\%} = 146\text{kg}$$

$$\text{配料量} = 17394 - 118 - (55 + 146) = 17075\text{kg}$$

4) 计算各种炉料用量:

$$\text{外购废钢用量按要配用 } 70\%: 17075 \times 70\% = 11953\text{kg}$$

根据配料原则炉料的配碳量为: $0.45\% + 0.60\% = 1.05\%$, 设需配生铁 x (kg), 45 钢返