

• 高等学校教学用书 •

炼钢工艺及设备

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

高等学校教学用书

炼钢工艺及设备

东北工学院 蒋仲乐 主编

冶金工业出版社

• 223762

高等学校教学用书

炼钢工艺及设备

东北工学院 蒋仲乐 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 18 3/4 字数443千字

1981年6月第一版 1990年3月第四次印刷

印数11,101~15,100册

ISBN 7-5024-0665-4

TF·139 (课) 定价3.70元

前 言

本书是按1978年元月十六所冶金院校炼钢（包括电冶金）教研室共同制订的教学大纲编写的，主要供高等学校钢铁冶金专业作为教学用书，也可供本专业的工程技术人员参考。

本书的主要内容是炼钢和铸锭的工艺原理及确定基本工艺参数的原则和方法。根据国内外炼钢方法发展的趋势，本书以转炉和电炉炼钢为主，平炉炼钢只重点阐述平炉用氧。对钢的浇铸，主要从流体力学和热物理的基本原理出发，重点分析钢锭和铸坯产生缺陷的原因和提高质量的方法。炼钢车间及设备一篇以顶吹氧气转炉炼钢车间为主。为适应我国发展现代钢铁工业的需要，书中力求反映现代炼钢生产的新工艺。炼钢的原材料、炼钢过程的自动控制、炉外精炼、烟气净化及综合利用等章的基本内容对转炉、电炉和平炉炼钢都是适用的。

本书由东北工学院蒋仲乐主编。参加编写的有东北工学院徐文派（第一章，第二章第一至四节）、邢玉禄（第二章第五节，第三、六、二十四、二十五章，第二十三章第三节）、姜永林（第二章第六节，第十六至二十章）、蒋仲乐（绪论，第四、五、二十一、二十二、二十六章，第二十三章第一至二节）、昆明工学院杨文樑（第七至十二章）、鞍山钢铁学院洪德成（第十三至十五章）等。

十六所冶金院校炼钢（包括电冶金）教研室的代表曾对初稿进行了审查，并提出修改意见；各院校和生产、科研、设计等单位的同志提供了许多资料。在修改定稿时，北京冶金机电学院朱承平同志提出了许多宝贵意见。编者谨向协助本书编写和审查工作的同志以及文献作者表示感谢。

对本书的缺点错误，衷心希望读者批评指正。

编 者

1980年6月

目 录

绪 论	1
第一篇 转炉炼钢	3
第一章 炼钢的原材料	3
第一节 金属料	3
第二节 非金属材料	7
第二章 顶吹氧气转炉炼钢工艺	11
第一节 装料	11
第二节 供氧	12
第三节 造渣	21
第四节 温度及终点的控制	30
第五节 喷溅	39
第六节 脱氧和合金化	42
第三章 炉龄	51
第一节 炉衬材料	51
第二节 炉衬破损机理	54
第三节 延长炉龄的措施	55
第四章 底吹和侧吹氧气转炉炼钢	60
第一节 底吹氧气转炉炼钢	60
第二节 侧吹氧气转炉炼钢	62
第五章 含钒铁水的吹炼	64
第一节 提钒	64
第二节 半钢炼钢	68
第六章 炼钢过程的自动控制	69
第一节 顶吹氧气转炉炼钢的静态和动态控制	69
第二节 温度和含碳量的测定	71
第三节 测温定碳副枪	73
第二篇 电炉炼钢	76
第七章 电弧炉构造及设备	77
第一节 电弧炉构造	77
第二节 电弧炉电气设备	79
第三节 电极	81
第四节 炉衬	83
第五节 电弧炉系列及主要技术性能	85
第八章 电弧炉炼钢工艺	86
第一节 补炉	86
第二节 装料	86
第三节 熔化	87

第四节 氧化	91
第五节 还原	97
第九章 碱性电弧炉典型钢种的冶炼	109
第一节 轴承钢	109
第二节 不锈钢	112
第十章 超高功率电炉	118
第一节 超高功率电炉的电气特性	118
第二节 超高功率电炉的设备特点	120
第三节 超高功率电炉的工艺特点	121
第十一章 炉外精炼	123
第十二章 其它电炉炼钢方法	132
第一节 电渣重熔	132
第二节 感应电炉熔炼	138
第三节 真空感应电炉熔炼	139
第四节 真空电弧炉熔炼	140
第五节 电子束炉熔炼	141
第六节 等离子炉熔炼	142
第三篇 平炉炼钢	145
第十三章 平炉构造及热工	146
第一节 平炉构造	146
第二节 平炉炼钢的热工原理和热工制度	149
第十四章 平炉炼钢工艺	154
第一节 供氧	154
第二节 废钢矿石法熔炼工艺	155
第十五章 平炉用氧强化	159
第一节 火焰富氧	159
第二节 直接向熔池吹氧	160
第三节 平炉顶吹氧枪结构及其寿命	163
第四节 吹氧平炉的结构	165
第五节 双床平炉	166
第四篇 铸锭	169
第十六章 浇注工艺基础	170
第一节 注流的特征	170
第二节 钢锭模内钢水的流动	173
第三节 钢水的结晶和凝固	178
第十七章 镇静钢模铸	185
第一节 镇静钢钢锭结构	185
第二节 镇静钢钢锭的宏观偏析	188
第三节 镇静钢钢锭的缺陷	190
第四节 镇静钢钢锭浇注工艺	203
第十八章 沸腾钢的浇注	210

第一节 沸腾钢钢锭结构和偏析	210
第二节 沸腾钢钢锭的缺陷	217
第十九章 半镇静钢的浇注	219
第一节 半镇静钢钢锭结构	219
第二节 半镇静钢钢锭的宏观偏析	221
第三节 半镇静钢浇注工艺	222
第二十章 连续铸钢	224
第一节 铸坯的凝固过程及其结构	225
第二节 铸坯的缺陷	229
第三节 连铸工艺	230
第五篇 顶吹氧气转炉炼钢车间及设备	234
第二十一章 顶吹氧气转炉炼钢车间	234
第一节 车间的组成和布置	234
第二节 主厂房	238
第二十二章 原材料的贮运及加料设备	249
第一节 铁水的供应	249
第二节 散状料的供应	250
第二十三章 转炉及倾动机构	252
第一节 转炉座数和容量的确定	252
第二节 转炉炉型及其主要参数	254
第三节 炉体金属结构及倾动机构	256
第二十四章 供氧设备	261
第一节 氧枪和喷头	261
第二节 喷头主要尺寸的确定	262
第三节 氧枪枪体设计	264
第四节 氧气管道的布置和仪表	265
第二十五章 铸锭设备	268
第一节 盛钢桶	268
第二节 钢锭模	270
第三节 连铸机	273
第二十六章 烟气净化及综合利用	277
第一节 烟气和烟尘	277
第二节 烟气的收集和冷却	279
第三节 烟气的净化	281
第四节 烟气净化系统	285
第五节 含尘污水的处理	288
第六节 炉渣的处理和利用	289

绪 论

钢铁是现代生产和科学技术中应用最广的金属材料。特别是钢，在金属材料的用量中约占85%以上。这是由于钢的强度高，韧性好，容易加工和焊接，是优良的结构材料。不同含碳量的碳素钢和加入一定量各种合金元素的合金钢，通过热处理可以分别获得不同的机械性能和一系列的特殊性能，如耐热性、耐腐蚀性、耐磨性和优良的电磁性能等。作为钢的基体的铁元素在地壳中的蕴藏量在金属元素中仅次于铝，容易从矿石中提取和加工。

近三十年来，由于生产力的发展和科学技术的进步，使钢的生产迅速增长，世界上钢的年产量已从一亿吨增加到七亿吨左右。

近代钢铁生产的主要方法一直是沿用“二步法”，第一步先用铁矿石冶炼出生铁，第二步再以生铁和废钢为基本原料炼出不同的钢种。

近代主要的炼钢方法首推1855年在英国获得专利的贝塞麦法，即酸性空气底吹转炉炼钢法。它是在底吹转炉中，将空气直接吹入铁水，利用空气中的氧气氧化铁水中铁、硅、锰、碳等元素，并依靠这些元素氧化时放出的热量将液体金属加热到能顺利进行浇铸所需的高温。它用酸性耐火材料制作炉衬，用酸性渣操作。吹炼过程中不能去除磷、硫。因此，贝塞麦法只适合于处理低磷、硫的原料。为了保证有足够的热量来源，这种方法要求铁水有较高的含硅量。

1879年开始生产的托马斯法，即碱性空气底吹转炉炼钢法，改用碱性耐火材料制作炉衬，在吹炼过程中加入石灰，造具有脱磷能力的碱性渣，通过将液体金属中的碳氧化到 $<0.06\%$ 的“后吹”操作集中进行化渣脱磷。在托马斯法中，磷取代硅成为主要的发热元素。此法适合于处理高磷铁水。在用含磷量为 $1.8\sim 2.2\%$ 的铁水炼钢时，不但能得到钢，还能获得有重要经济价值的副产品——含 $P_2O_5>16\sim 20\%$ 的炉渣，可以作为优质的磷肥。德、法、比利时、卢森堡等国富产高磷生铁，托马斯法的诞生，为他们发展钢的生产开辟了道路，这些国家以此为主要炼钢方法达八、九十年之久。

空气底吹转炉炼钢不用外来的燃料加热，设备简单，生产率高，它是现代氧气转炉炼钢的雏型。但是，它只适合于处理一定成分的铁水。因为用空气吹炼，大量热量消耗于加热空气中的氮，不能大量加入废钢，而且，钢中氮、磷、氧等有害杂质的含量高，适合冶炼的钢种也少。

1865年开始生产的平炉炼钢法，采用燃料加热，并利用炉膛内排出废气的热量通过蓄热室分别预热燃料和助燃用的空气，以提高火焰温度，使平炉可以大量利用废钢炼钢。平炉炼钢法对原料的适应性强，冶炼品种广，钢的质量好，熔炼过程容易控制，曾在世界钢生产中长期占据主要地位，直到1960年平炉钢还占世界钢产量的70%以上。

第二次世界大战后，已经能通过分离空气中的氧和氮提供大量廉价的氧气，为实行氧气炼钢创造了条件。1952年在奥地利首先投产的顶吹氧气转炉炼钢开创了发展炼钢生产的新阶段。转炉改用氧气吹炼，进一步发挥了转炉炼钢不用燃料、吹炼迅速和生产率高的优点。顶吹氧气转炉炼钢还改变了碱性转炉用空气底吹时“后吹”脱磷的工艺特征，可以使化渣脱磷与脱碳同时进行，甚至比脱碳提前完成。这样，就使转炉炼钢有可能处理不同成

分的铁水，并利用原来消耗于加热氮气的热量用于加热废钢（废钢加入量高达30%），改善了转炉炼钢对不同原料条件的适应性。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，顶吹氧气转炉炼钢已经能控制环境污染和利用计算机进行自动控制。因此，它以空前的速度在大多数产钢国家迅速发展，甚至迫使许多平炉车间停产或改为氧气转炉车间。1978年，氧气转炉钢的产量约占世界钢产量的50%，在各种炼钢方法中居于首位。

与顶吹氧气转炉炼钢迅速发展的同时，各种炼钢方法普遍采用氧气强化炼钢过程。现代平炉炼钢在兑入铁水后已基本上依靠直接向熔池吹氧进行熔炼和加热。1968年以来，西欧在传统的托马斯转炉上发展了底吹氧气转炉炼钢法处理高磷铁水，美国又进而在底吹氧气转炉上采用喷石灰粉吹炼低磷铁水，使底吹氧气转炉炼钢不但被应用于托马斯转炉和平炉车间的改造，而且有与顶吹氧气转炉炼钢竞争的态势。1973年以来，我国还在原有的空气侧吹转炉上发展了侧吹氧气转炉炼钢。

电弧炉炼钢是靠电极与炉料之间产生电弧，发出热量进行炼钢。由于它以废钢作为主要原料，并有温度高，能控制炉内气氛，特别适合于冶炼合金钢和回收利用合金废钢等优点，被各国普遍采用，产量稳步增长。现在，电炉钢的年产量约占世界年产钢量的15~20%。在用电比较便宜和有大量废钢的工业国家，或没有完整的钢铁工业的发展中国家，电炉钢的比例更高。近年来，电弧炉炼钢除普遍用氧强化外，有些国家还用大型超高功率电弧炉（容量最大已达400吨）生产普通碳素钢，与氧气转炉炼钢相竞争。

从近代主要炼钢方法发展的情况可以看出，一种炼钢方法的兴衰，主要决定于它对资源条件的适应性、钢的质量和品种、以及生产的经济效果。各种炼钢方法的新陈代谢及其竞争是很激烈的。但由于资源条件不同，生产的钢种多种多样，以及力求充分利用原有设备等原因，还没有一种方法能满足所有的要求。无论过去和现在一直是几种炼钢方法同时并存，彼此在竞争中不断发展。

现代生产和科学技术的发展不断对钢的质量提出更高的要求，近年来广泛采用各种方法提高钢的质量。成品钢的质量不仅决定于冶炼过程，更重要的是决定于脱氧、合金化和浇铸等过程。因此，采用真空、吹惰性气体、喷粉状材料、电磁搅拌、电弧或感应加热等近代技术的各种炉外精炼法和用合成渣保护浇铸等方法蓬勃发展。对有些质量要求特别严格的钢种，还采用真空自耗熔炼和电渣重熔等特殊冶炼方法。将钢的精炼过程移到炉外进行后，可能使转炉炼钢简化为脱碳和提温的过程，电炉炼钢简化为熔化炉料及氧化的过程，有利于充分发挥炼钢炉的生产潜力。同时，为了稳定生产，实现自动控制，提高钢的质量，必须实行精料的方针，特别是保证原材料供应的稳定。现在，对入炉原料的预处理，如铁水的炉外脱硫等正在迅速发展。

现在的主要炼钢方法还都是周期性地生产。在连续铸钢迅速发展的情况下，已经出现了不少全部采用连铸的炼钢车间。连续炼钢正在许多国家进行试验研究。直接将铁矿石一步炼成钢的试验研究也一直在进行着。将来实现一步法连续炼钢后，必将使钢铁生产出现崭新的面貌。

第一篇 转 炉 炼 钢

第一章 炼钢的原材料

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条件，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。金属料主要指铁水（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。

第一节 金 属 料

一、铁水（生铁）

铁水是转炉炼钢的基本原料。铁水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。

1. 温度 应努力保证兑入转炉的铁水温度高（ $>1200\sim 1300^{\circ}\text{C}$ ）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，铁水的高温尤为重要。

2. 硅 硅是重要的发热元素。吹炼平炉炼钢铁水的大中型转炉，用废钢作冷却剂时，铁水含硅量以 $0.5\sim 0.8\%$ 为宜。用矿石冷却时，由于矿石带入 SiO_2 ，铁水含硅量应适当降低。铁水含硅量过高有很多缺点，如渣中 SiO_2 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水收得率降低，炉衬寿命缩短，初期渣中 SiO_2 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，铁水含硅量过低，也会使石灰熔解缓慢，渣量过少也不利于去除磷、硫，而且炉渣覆盖钢水不足会引起金属喷溅，降低金属收得率。小型转炉铁水含硅量过低，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。

3. 锰 对顶吹氧气转炉用铁水的合理含锰量仍存在着不同的观点。七十年代以来，美国有些钢铁厂向高炉加入锰矿把顶吹氧气转炉用铁水的含锰量提高到 $0.6\sim 0.9\%$ ，获得如下效果：化渣显著加快而萤石消耗量显著减少并有利于去硫和减少氧枪沾钢，炉龄显著延长，金属收得率提高，以及终点钢水残余锰含量提高使锰铁消耗量降低等。

但锰矿资源丰富的苏联，最近却在加紧进行顶吹氧气转炉使用低锰铁水的试验。因为高炉冶炼高锰生铁时，焦比显著增高，生产率降低。

我国对顶吹氧气转炉用铁水的含锰量未作规定。近年来有的钢厂试验用铁水增锰延长炉龄取得了显著效果，引起了铁水增锰是否合理的讨论。看来，由于我国已发现的锰矿不多，对铁水增锰的合理性，还需进行详细的技术经济对比才能作出结论。

4. 磷 磷是高炉中不能去除的元素。因此，只能要求进入转炉的铁水含磷量尽量稳

定。铁水的炉外脱磷还研究得很不够，对于中、高磷铁水或吹炼高碳低磷钢时，继续研究铁水炉外脱磷是必要的。

5. 硫 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操作，可以把金属中的硫去到很低，但会降低炉子生产率，增加原材料消耗，并使各项技术经济指标显著恶化。近年来，用户对钢材性能的要求越来越高，对低硫钢（<0.010% S）的需求急剧增多。因此，必须降低入炉铁水的含硫量。对于吹炼低硫钢的铁水，要求含硫<0.015%甚至更低。

电弧炉炼钢以废钢为基本原料，生铁主要用于提高炉料的含碳量，一般配加钢铁料的10~30%。有时也用报废的钢锭模、底盘、轧辊等废铸铁代替生铁配料，以降低钢的成本。电弧炉以返回法冶炼高合金钢时往往用含碳极低的工业纯铁（软铁）降低炉料的含碳量。

二、铁水的炉外脱硫

在氧气转炉中脱硫，既困难又不经济。近年来优质冶金焦供应不足，焦炭含硫量增高，为强化高炉冶炼所喷吹的重油含硫也高，致使符合炼钢要求的低硫铁水的数量和成本都越来越成问题。实践证明，在高炉与转炉之间进行铁水炉外脱硫，是解决上述矛盾的好办法。它能同时改善炼铁和炼钢的技术经济指标，对转炉简化操作，实现自动控制尤为重要，正在许多国家迅速发展。

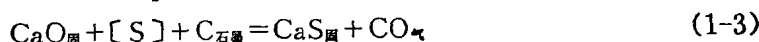
炉外脱硫的基本原理与炉内脱硫相同。即使用与硫的亲合力比铁与硫的亲合力大的元素或化合物，将硫化铁转变为更稳定的、极少溶解或完全不溶于铁液的硫化物；同时，创造良好的动力学条件，加速铁水中硫向反应地区的扩散和扩大脱硫剂与铁水之间的反应面积。

符合上述条件的典型脱硫剂有：苏打（ Na_2CO_3 ）、石灰（ CaO ）、食盐（ NaCl ）、氰化钙（ CaCN_2 ）、镁（ Mg ）、碳化钙（ CaC_2 ）等。它们可以单独使用，也可以混合使用。目前普遍使用的脱硫剂是碳化钙、石灰和镁。其反应为：



反应（1-1）的平衡常数与温度的关系为：

$$\log K_{(1)} = \log \frac{a_{\text{CaS}} \cdot a_{\text{C}}^2}{a_{\text{CaC}_2} \cdot [\% \text{S}] \cdot f_{(\text{S})}} = \frac{19000}{T} - 6.28 \quad (1-2)$$



反应（1-3）的平衡常数与温度的关系为：

$$\log K_{(3)} = \log \frac{a_{\text{CaS}} \cdot P_{\text{CO}}}{a_{\text{CaO}} \cdot a_{\text{C}} \cdot [\% \text{S}] \cdot f_{(\text{S})}} = -\frac{5540}{T} + 5.75 \quad (1-4)$$



反应（1-5）的平衡常数与温度的关系为：

$$\log K_{(5)} = \log \frac{a_{\text{MgS}}}{P_{\text{Mg}} \cdot [\% \text{S}] \cdot f_{(\text{S})}} = \frac{22750}{T} - 9.63 \quad (1-6)$$

按照实际条件，取 $a_{\text{CaC}_2} = a_{\text{CaO}} = P_{\text{Mg}} = a_{\text{CaS}} = a_{\text{C}} = P_{\text{CO}} = 1$ ，在铁水温度分别为1150、1250和1550℃时，按式（1-2）、（1-4）和（1-6）算出铁水中硫的平衡含量如表1-1所示。

表 1-1 在不同温度下用 CaC_2 、 CaO 和 Mg 脱硫时铁水中硫的平衡含量 (%)

脱 硫 剂	铁 水 温 度, $^{\circ}\text{C}$		
	1150	1250	1550
CaC_2	2.3×10^{-3}	1.6×10^{-7}	1.2×10^{-5}
CaO	3.3×10^{-3}	1.7×10^{-3}	3.5×10^{-4}
Mg	1.2×10^{-7}	1.2×10^{-6}	2.5×10^{-4}

由表1-1可见, CaC_2 是强的脱硫剂。虽然它的脱硫能力随温度升高而减弱, 但即使在高温下也具有强的脱硫能力。石灰的脱硫能力较差, 但随温度升高而增强。因此, 用石灰脱硫时, 应尽可能使铁水具有较高的温度。镁的脱硫能力强, 但价格昂贵。用镁脱硫时, 反应激烈。往往将镁粉渗入焦炭孔隙中制成镁焦, 或与石灰制成混合物使用。

实践证明, 铁水炉外脱硫的效果, 不仅决定于脱硫反应的热力学条件, 反应的动力学条件也非常重要。为了改善反应的动力学条件, 除要求适当高的铁水温度以加速扩散, 适当细小的脱硫剂粒度以扩大反应面积, 利用脱硫剂 (如 Na_2CO_3 、 CaCO_3) 本身放出气体加强搅拌, 和采用催化剂 (如铝粉、萤石粉等) 外, 更重要的是采用强制搅拌的方法。现有的铁水炉外脱硫方法不下二十余种, 根据搅拌方式不同大体可分为三类:

1. 铁流搅拌法 它靠铁水流的冲击使铁水与脱硫剂搅拌混合。此法的脱硫剂多半是用苏打粉或苏打粉与石灰粉和萤石粉的混合物。把脱硫剂加入高炉出铁槽中, 或加入高炉、混铁炉或混铁车的铁水包中。优点是设备和操作都很简单, 缺点是铁流搅拌的作用不足以使铁水与脱硫剂充分混合, 因而脱硫效率低, 而且不稳定。所以现代化的钢铁企业都不采用此法。但在设备简陋、铁水含硫又高的小钢铁厂, 还经常被采用。

2. 机械搅拌法 靠旋转沉入铁水中的搅拌器或转动盛铁水的容器使铁水与脱硫剂搅拌混合。无论是采用搅拌器的(图1-1中的c-1, c-2)还是采用转动容器的(图中的a, b-1 b-2)机械搅拌法, 均可控制铁水与脱硫剂的搅拌时间和搅拌强度, 用 CaC_2 作脱硫剂都能得到 $>90\%$ 的脱硫效率(单向摇包法图1-1的b-1搅拌混合较差, 脱硫率比双向摇包法约低10%), 可以把铁水中的硫稳定地降低到 $<0.010\%$ 。武钢旋转实心搅拌器的机械搅拌法, 铁水的含硫量可从 0.06% 降低到 $<0.005\%$ 。实践证明, 此类脱硫设备可以用价廉的石灰进行有效的脱硫。

转动容器的回转炉法和摇包法, 由于设备复杂, 维修费用高和难于大型化, 发展前途不大。旋转实心搅拌器的KR法, 在机械搅拌法中设备最简单, 脱硫效率又高, 故发展很快。

3. 喷吹气体搅拌法 此法把氮气、氩气、天然气或压缩空气吹入铁水, 使铁水与脱硫剂搅拌混合。如图1-2所示, 气体可以从铁水的上部或底部吹入; 脱硫剂可以直接加到铁水面上, 也可以随气体喷入铁水。此法兼有操作灵活, 易于控制, 脱硫效率高和设备简单, 几乎不受容量限制的优点, 是很有前途的方法。

各种脱硫方法的工艺特点虽各不相同, 但在任何炉外脱硫方法中都必须尽可能不让高炉渣进入铁水包, 和在脱硫后不让含硫炉渣进入转炉。为实现这项要求, 应该使扒渣机械化。

三、废钢

废钢是电弧炉炼钢的基本原料，用量约占钢铁料的70~90%。氧气转炉用铁水炼钢时，由于热量富裕，可以加入多达30%的废钢，作为调正吹炼温度的冷却剂。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。

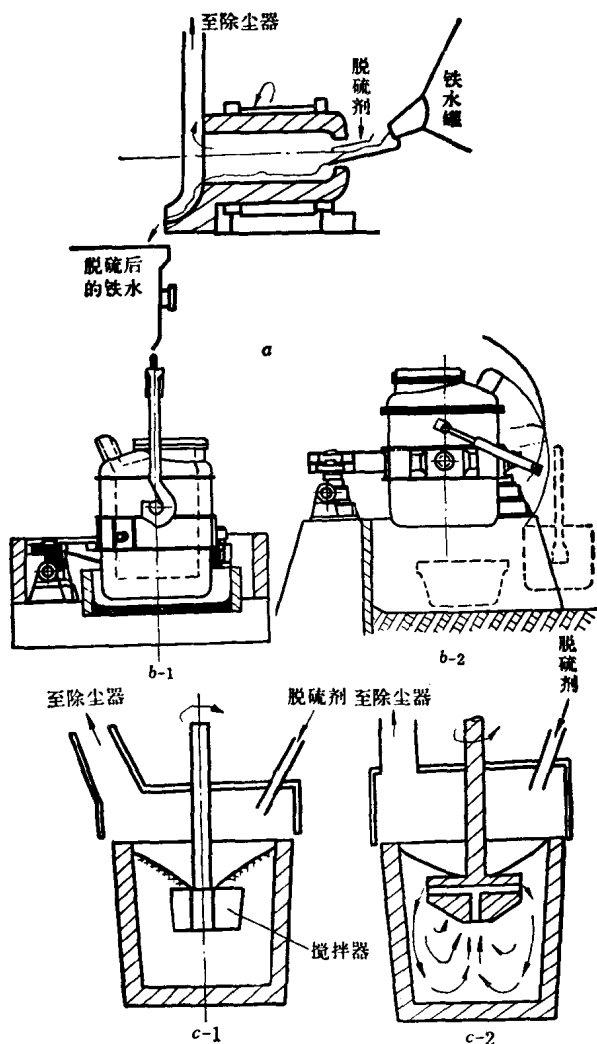


图 1-1 机械搅拌法铁水炉外脱硫示意图

a—回转炉法(转鼓法或卡林法); b-1—单向摇包法(三角形摇架, DM法); c-1—旋转实心搅拌器的搅拌法(KR法); c-2—旋转空心搅拌器的搅拌法(DORA法)

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砂、耐火材料和炉渣等。

合金钢的废料应按所含的合金元素仔细分组后分别保管，以便用于电炉以返回法冶炼

相应的合金钢，充分回收利用合金元素和降低钢的成本。

对外形尺寸和单重过大的废钢，应预先进行解体 and 切割，使能顺利装炉，不撞伤炉衬和加速熔化。对轻薄料应打包或压块，以缩短装料时间。锈蚀特别严重和沾有油污的轻薄料，不宜用于返回法冶炼。

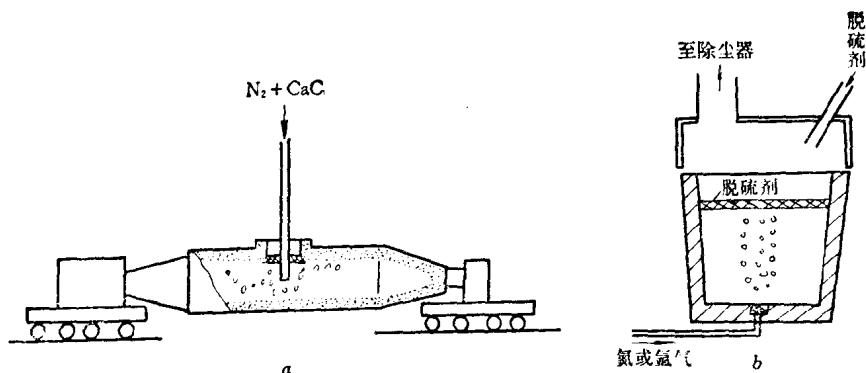


图 1-2 喷吹气体搅拌法铁水炉外脱硫示意图

a—用气体携带脱硫剂向混铁车的铁水中喷吹；b—由铁水包的上部加脱硫剂，下部通入气体搅拌

近年来，国外采用电炉的小型钢厂发展很快。由于所需的废钢主要依靠外购，而外购废钢往往混有各种残余合金元素，使许多钢种的冶炼发生困难。因此，正在推广用铁矿石在较低温度下还原得到的海绵铁代替废钢作为电炉炼钢原料。

四、铁合金

炼钢生产中广泛使用各种脱氧和合金化元素与铁的合金，如锰铁、硅铁、铬铁，和复合脱氧剂，如硅锰合金、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生产的，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的，价格都很昂贵。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，以降低钢的成本。

铁合金必须按其成分仔细分类并加工成一定块度后使用，使钢的成分均匀和减少烧损。使用前还必须进行烘烤，以减少带入钢中的气体。熔点较低和易氧化的合金，如钒铁、钛铁、铌铁、硼铁、硅钙、铝和稀土金属等可在低温下（ $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ ）烘烤。熔点高和不易氧化的合金，如硅铁、铬铁、钨铁、钼铁等应在高温下（ $\geq 800^{\circ}\text{C}$ ）烘烤。含氢量高的金属如电解镍、电解锰等应进行退火。

第二节 非金属材料

一、造渣材料

1. 石灰 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，来源广，价廉，有相当强的脱磷和脱硫能力，不危害炉衬。

对石灰要求 CaO 含量高， SiO_2 和 S 的含量尽可能低。终渣碱度为3.0时，石灰中 SiO_2 含量增加1%，有效 CaO 的含量将减少约3%。石灰含硫量高，意味着石灰的去硫能力低，甚至反而增硫。炼低硫的钢种，对石灰的含硫量应有严格要求。

石灰的灼减大，表明生烧率高，而且不稳定，会使炉子热效率显著降低，使造渣、温度控制和终点控制发生困难。应将灼减控制在适当的范围内（4~7%）。

块度对石灰的溶解速度有重要影响，以5~40毫米为宜。块度过大，溶解很慢，甚至到吹炼终点还来不及溶解，不能及时而充分地起作用。过于细小的石灰粒易被废气带走。石灰应当严格过筛。为了合理利用细小的石灰粒，可将其压成块使用。

石灰容易吸水粉化，变成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。应尽量使用新烧的石灰，采用密闭的容器贮存和运输。这对电炉钢厂尤为重要。

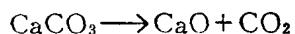
近二十年来，为了强化转炉的吹炼，要求快速化渣，就是要使加入的石灰快速溶解。为了加快石灰的溶解，国内外做了大量的研究，发现石灰的气孔率、体积密度和晶粒大小等物理性质对石灰的溶解速度有重要的影响。研究表明，石灰的气孔率越大、体积密度越小和晶粒越细，则石灰在吹炼过程中溶解越快。

将气孔率大和体积密度小的石灰块加入转炉，炉内的液体炉渣将迅速沿石灰块的孔隙渗透到石灰块内部，使液体炉渣与石灰块接触的比表面积显著增大。因此，使液体炉渣与石灰块之间的传热和传质加速，使石灰块的溶解加快。

研究表明，在石灰煅烧过程中，随着石灰晶粒的长大，晶粒之间的界面减少，晶格存在的缺陷（裂纹、歪曲、空位）也减少，耐压强度提高。说明随着晶粒的长大，晶粒之间的联结力增强，使石灰变得“不活泼”而难以在渣中溶解。相反，晶粒越细的石灰，越容易在渣中溶解。

近年来，广泛采用“活性”来衡量石灰与炉渣的反应能力，即石灰在炉渣中溶解速度的指标。大量研究表明，用石灰在水中的溶解速度，即石灰的“水活性”，可以近似地反映石灰在炉渣中的溶解速度。石灰在水中溶解快，则在炉渣中溶解也快；反之亦然。但这是一种近似的测定方法，例如石灰中的 MgO 含量在测定活性的温升法和盐酸滴定法中的影响是不同的。在温升法中，温升随 MgO 含量增加而加快；而在盐酸滴定法中，盐酸的耗量却随石灰中 MgO 含量的增加而减少。又如石灰中氧化铁含量越高，越易在炉渣中溶解，在水中却越难溶解。

石灰石在煅烧过程中的分解反应为



CaCO_3 的分解温度为880~910°C。石灰石的煅烧温度高于其分解温度越多，石灰石分解越快，生产率越高。但烧成的 CaO 的晶粒长大也越快，难以获得细晶石灰。同样，分解出的 CaO 在煅烧的高温区停留的时间越长，晶粒也长得越大。因此，要获得细晶石灰， CaO 在高温区停留的时间应该短。相反，煅烧温度过低，石灰块核心部分的 CaCO_3 来不及分解而使生烧率增大。因此，煅烧温度应控制在1050~1150°C的范围。同时，烧成石灰的晶粒大小也决定着石灰的气孔率和体积密度，随着细小晶粒的合并长大，细小孔隙也随着减少。文献中普遍将煅烧温度过低或煅烧时间过短、含有较多未分解的 CaCO_3 的石灰称为生烧石灰，将煅烧温度过高或煅烧时间过长而获得的晶粒大、气孔率低和体积密度大的石灰称为硬烧石灰，将煅烧温度在1100°C左右而获得的晶粒小、气孔率高（约40%）、体积密度小（约1.6克/厘米³）反应能力高的石灰称为软烧石灰。

实践表明，用过去的竖窑和劣质的固体燃料得不到高质量的软烧石灰。因为沿炉子断面气流分布不均匀，造成温度分布也不均匀，中心温度低而周围温度高，容易出现很多生

烧和过烧，而且煅烧质量不稳定。采用回转窑有利于克服上述缺点。现在许多国家普遍在回转窑内煅烧炼钢用的活性石灰。

用于煅烧石灰的石灰石，块度应当均匀适中。石灰石块度不均时，小块可能过烧，而大块尚未烧透。石灰石块度过大时，石灰块的外层可能已经过烧而内部尚未烧透。

研究表明，软烧石灰的质量不仅与煅烧方法有关，而且还与石灰石的性质有关。石灰石的气孔率越高，则软烧石灰的孔隙的有效半径越大，反应能力越强。

2. 萤石 萤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°C)，还能使 CaO 和阻碍石灰熔解的 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 外壳的熔点显著降低，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。转炉炼钢要求快速化渣，萤石成为必备的材料。但大量使用萤石会增加喷溅，加剧对炉衬的侵蚀。电炉炼钢用的萤石，使用前应经过烘烤。近年来，由于萤石供应不足和价格贵，寻求其代用品的研究相当活跃。

我国许多转炉钢厂多年来使用铁矾土和氧化铁皮作为萤石的代用品。但它们的助熔速度比萤石慢，而且消耗的热量比萤石多。个别工厂采用锰矿作辅助熔剂，但因来源有限，应用不普遍。

3. 白云石 近年来，国内外氧气转炉车间普遍采用白云石、白云石质石灰等含 MgO 的材料造渣。加入一定量白云石代替部分石灰，增加渣料中 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，减少萤石用量和稠化终渣，减轻炉渣对炉衬的侵蚀，延长炉衬寿命。

4. 合成造渣材料 合成造渣材料的基本原理是将石灰和熔剂预先在炉外制备成低熔点的造渣材料，即把石灰块的造渣过程部分地、甚至全部地移到炉外进行。显然，把这种预先制备的熔点较石灰块低得多的合成造渣材料加入炉内，必能加速成渣过程，提高炼钢的技术经济指标。

无论是单一地加入 Fe_xO_y 、 CaF_2 、 MnO 或是将两种以上熔剂加入石灰制成的合成造渣材料，都能加速成渣、脱磷和脱硫，提高金属收得率、降低渣料消耗和延长炉龄。但由于制备困难，应用还不普遍。

使用高碱度烧结矿或球团矿，可以显著改善成渣过程。特别是高碱度球团矿，它的块度、强度、化学成分及稳定性都很好，并可由高炉的球团车间供应，是有一定前途的合成造渣材料。其缺点是要吸收大量热量，影响废钢用量。

二、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应 $>98\%\text{O}_2$ 。冶炼含氮量低的钢种时，应 $>99.5\%\text{O}_2$ 。氧气应脱除水分。氧气的使用压力一般为 $0.6\sim 1.2$ 兆牛/米² ($6\sim 12$ 公斤力/厘米²)。由于炼钢是周期性用氧，必须有贮氧装置。考虑到输氧过程中的压力损失，一般将氧气加压到 $2.5\sim 3.0$ 兆牛/米² ($25\sim 30$ 公斤力/厘米²) 贮存。

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，要求含铁高， SiO_2 、磷和水分要少，使用前要加热。有时也利用轧钢和锻造车间的氧化铁皮代替部分铁矿石，但氧化铁皮潮湿，油污较多，使用前必须烘烤。

三、冷却剂

除废钢外，转炉炼钢常用的冷却剂有：

1. 富铁矿、团矿、烧结矿、球团矿、氧化铁皮 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_xO_y 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，加入时可以不用装料机或吊车，不必倒炉停吹；它们同时又是助熔剂，有利于化渣。缺点是带入的脉石使石灰的消耗量和渣量增大；一次加入矿石过多时会产生严重喷溅。

对这类冷却剂的要求是含铁量要高， SiO_2 和硫的含量少，成分和块度稳定（氧化铁皮不要求块度），干燥。

2. 石灰石 在缺乏废钢和富铁矿等冷却剂的转炉钢厂，曾试用石灰石作冷却剂。因为 CaCO_3 分解时要大量吸热。实践表明，它比加入铁矿石和氧化铁皮时喷溅少，在去除磷硫程度相同的情况下渣中 $\Sigma(\text{Fe})$ 要低些。其主要缺点是比加废钢冷却时的金属损失多，又没有加铁矿石冷却时的铁的收益，钢铁料消耗较高。

四、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电极，木炭、焦炭、电石、硅铁、硅钙、铝等。它们的粒度应 <0.5 毫米，使用前要烘烤。

国外氧气转炉用增碳法冶炼中、高碳钢种时，一般用含灰分很少的石油焦增碳。

最后，必须指出，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，保证相邻炉次原料条件的充分稳定，可以大大简化炼钢工艺操作，消除或大大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机械性能的波动，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。有人认为，要保证转炉有节奏地进行生产，原材料的稳定性比规定的平均值重要得多，这是有道理的。