



高等专科学校教学用书

GAODENG
ZHUANKE
XUEXIAO
JIAOXUE
YONGSHU

炼 钢 学

冶金工业出版社



高等专科学校教学用书

炼·钢·学

重庆钢铁高等专科学校 郑沛然 主编

冶金工业出版社

(京)新登字 036 号

高等专科学校教学用书

炼 钢 学

重庆钢铁高等专科学校 郑沛然主编

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街高研院北巷39号)

新华书店总店科技发行所发行

河北省阜城县印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张27.5 字数656千字

1994年6月第一版 1994年6月第一次印刷

印数1~4500册

ISBN 7-5624-1414-2

TP·325 (课) 定价12.60元

前 言

本书系根据1989年冶金部“八五”专科教材出版规划编写的，作为高等学校三年制专科炼钢专业教材。

本书的主要内容为氧气转炉炼钢、电弧炉炼钢、钢液炉外精炼和特种冶炼以及钢的浇注的工艺、原理和操作。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，例如氧气顶底复吹转炉炼钢、转炉炼钢计算机自动控制、电弧炉强化氧化和还原精炼、超高功率电弧炉和直流电弧炉等，对连铸坯的凝固理论及连铸新技术，影响钢质量的冶炼和浇注工艺进行了系统分析。根据新的教学计划，转炉炼钢、电弧炉炼钢机械设备及模铸和连铸设备均放在《炼钢设备与车间设计》课程中讲授。

黄希祜、张承武、姜洪渤和肖伟军等同志审阅了本书初稿，陈家祥同志审阅了清稿。谨向他们表示诚挚的谢意。

全书共五篇二十三章。绪论、第九章、第十章、第十一章、第十二章、第十三章、第十六章由重庆钢铁高等专科学校郑沛然编写，第一章、第二章、第三章、第四章、第五章、第六章、第七章、第八章由重庆钢铁高等专科学校雷亚编写，第十四章、第十五章、第十七章、第十八章、第十九章、第二十章由上海冶金高等专科学校史立华编写，第二十一章、第二十二章、第二十三章由重庆钢铁高等专科学校庞福如编写。全书由郑沛然主编。

限于编者水平，书中难免有不当之处，请读者批评指正。

编 者

1992年7月

目 录

结 论	(1)
第一篇 氧气转炉炼钢	(5)
第一章 转炉炼钢的原材料	(5)
第一节 金属料	(5)
第二节 非金属料	(18)
第三节 炼钢用气体	(23)
第二章 气体射流与熔池的相互作用	(25)
第一节 气体射流的状态与特征	(25)
第二节 气体射流与熔池的相互作用	(33)
第三章 氧气转炉内的基本反应	(42)
第一节 吹炼过程状况	(42)
第二节 炉渣的形成与变化	(43)
第三节 吹炼过程脱碳	(47)
第四节 吹炼过程脱磷与脱硫	(51)
第四章 氧气顶吹转炉炼钢	(54)
第一节 装入制度	(54)
第二节 供氧制度	(56)
第三节 造渣制度	(59)
第四节 温度制度	(63)
第五节 终点控制和出钢	(67)
第六节 脱氧与合金化	(71)
第七节 吹损与喷溅	(74)
第八节 开新炉操作	(77)
第五章 氧气顶底复吹转炉炼钢	(80)
第一节 氧气底吹转炉炼钢概述	(80)
第二节 顶底复合吹炼转炉的冶金特点	(83)
第三节 顶底复合吹炼转炉冶炼工艺	(91)
第六章 特殊铁水吹炼	(99)
第一节 含钒铁水处理	(99)
第二节 半钢冶炼	(102)
第七章 转炉炼钢的物料平衡与热平衡	(105)
第一节 转炉设计中物料平衡与热平衡计算	(105)
第二节 转炉生产过程物料平衡与热平衡测算	(114)
第八章 转炉炼钢计算机自动控制	(118)
第一节 转炉自动控制系统	(118)
第二节 静态控制	(119)
第三节 动态控制	(121)
第四节 动态控制的信息检测	(124)
第二篇 电弧炉炼钢	(129)

第九章 电弧炉的电气设备	(129)
第一节 电弧概念与交流电弧特性	(129)
第二节 电弧炉的主电路	(131)
第三节 主电路上的电气设备	(132)
第四节 电极升降自动调节装置	(138)
第五节 电弧炉炼钢的计算机控制	(141)
第十章 电弧炉炉体构造与炉衬	(143)
第一节 电弧炉炉体构造	(143)
第二节 电弧炉炉型尺寸	(145)
第三节 电弧炉炉衬与砌砖工艺	(147)
第四节 不烘炉直接炼钢烤炉技术	(151)
第五节 炉衬维护	(153)
第十一章 电弧炉炼钢的原材料	(154)
第一节 钢铁料	(154)
第二节 合金材料	(156)
第三节 造渣材料	(158)
第四节 氧化剂、脱氧剂、增碳剂	(159)
第五节 电极	(161)
第十二章 碱性电弧炉冶炼工艺概述	(165)
第一节 氧化法冶炼	(165)
第二节 不氧化法冶炼	(166)
第三节 返回吹氧法冶炼	(166)
第四节 冶炼工艺制定原则	(167)
第十三章 碱性电弧炉氧化法冶炼工艺	(169)
第一节 补炉	(169)
第二节 装料	(170)
第三节 熔化期	(173)
第四节 氧化期	(181)
第五节 还原期	(199)
第十四章 超高功率电弧炉和直流电弧炉	(216)
第一节 超高功率电弧炉的发展	(216)
第二节 超高功率电弧炉的技术特点	(216)
第三节 超高功率电弧炉的设备特点	(217)
第四节 超高功率电弧炉的工艺特点及新进展	(219)
第五节 直流电弧炉	(220)
第十五章 分钢种冶炼	(224)
第一节 合金结构钢的冶炼	(224)
第二节 高速钢的冶炼	(227)
第三节 不锈钢的冶炼	(232)
第三篇 平炉炼钢	(239)
第十六章 平炉炼钢	(239)
第一节 平炉构造概述	(239)

第二节	平炉炼钢的热工原理及热工制度	(242)
第三节	平炉供氧	(245)
第四节	平炉熔炼工艺	(248)
第四篇	钢液炉外精炼和特种冶炼	(253)
第十七章	钢液炉外精炼	(253)
第一节	概述	(253)
第二节	常用的钢液炉外精炼方法	(254)
第三节	各种精炼方法的比较和选择	(265)
第十八章	特种冶炼	(267)
第一节	电渣重熔	(267)
第二节	真空感应熔炼	(274)
第三节	真空电弧重熔	(276)
第四节	电子束熔炼法	(278)
第五节	等离子弧熔炼	(281)
第五篇	钢的浇注	(285)
第十九章	钢液的凝固	(285)
第一节	钢液凝固过程的冶金物化基础	(285)
第二节	钢液凝固过程的传热	(291)
第三节	钢锭的凝固结构	(299)
第四节	钢液的凝固收缩与裂纹	(303)
第二十章	钢液的凝固偏析、夹杂、气体	(311)
第一节	钢液的凝固偏析	(311)
第二节	钢液凝固过程中的非金属夹杂	(319)
第三节	钢液凝固过程中的气体	(322)
第二十一章	浇注用保护渣	(326)
第一节	保护渣的作用	(326)
第二节	固体保护渣的性能及其配制	(330)
第二十二章	钢的模铸	(337)
第一节	镇静钢的模铸	(338)
第二节	沸腾钢的浇注	(357)
第三节	半镇静钢的浇注	(370)
第四节	小型镇静钢钢锭和沸腾钢钢锭的浇注	(374)
第二十三章	钢的连续浇注	(377)
第一节	概述	(377)
第二节	连铸机的主要工艺参数及连续铸钢的工艺过程	(381)
第三节	连铸坯的凝固	(383)
第四节	连铸坯的凝固结构	(393)
第五节	连续铸钢过程钢液的流动	(397)
第六节	连续浇注工艺	(402)
第七节	连续浇注的事故分析	(408)
第八节	连铸坯缺陷	(408)
第九节	连铸新技术	(424)

绪 论

一、钢铁工业在国民经济中的重要地位与作用

人类在同自然界作斗争的过程中，不断地改善劳动工具和生活环境，发明许多新型材料。现在最重要的材料大体可分为金属、陶瓷和高分子三大类。在国民经济中应用最广，用量最大的是金属材料，而其中钢的用量占金属材料的85%左右。钢具有强度高、韧性好、易加工和焊接等特性，所以它是一种优良的结构材料。改变钢中的合金元素及其数量可以获得各种不同性能的合金钢，从而满足制造各种工具和设备的要求。此外，由于铁矿石贮藏丰富，便于冶炼和加工，可以进行大规模工业化生产，因此钢铁工业成为国民经济的重要基础工业。

在四个现代化建设中，钢的需求涉及所有部门，而且需用的品种和数量都很大。例如，建筑一栋5000m²大楼需用150~300t钢材，生产1km单线火车轨道需用100多吨钢材，生产一台载重汽车约需用5吨、30多种钢材，生产一艘万吨轮需用6000多吨钢材。现代农业、机械工业、化学工业、建筑业、电子工业、兵器工业、宇航工业以及人民日常生活都离不开钢。可以说，钢的产量、质量和品种是衡量一个国家的工业水平和物质文明的重要标志。

二、炼钢方法的发展简史

人类使用铁的历史已有几千年了，我国是世界上最早冶炼和使用钢铁的国家之一。迄今出土的中国早期铁器有：泾河上游甘肃灵台景字坪，春秋中叶秦墓出土的铜柄钢剑；江苏六合程桥春秋末叶楚墓出土的铁条；长沙战国初期楚墓出土的钢剑；河南辉县战国魏墓出土铁制生产工具和铁兵器。由此判断，早在2300多年前我国的钢铁冶炼技术就已相当发达，比欧洲各国超前了约17个世纪。

古代炼铁方法是用木炭将矿石中的铁还原出来，所得到的是含碳较低的海绵铁，经过热锻打用以制造成器具。

随着风箱工具的出现，鼓风技术不断发展，炼铁炉高度逐渐增加，生产出了液态生铁。生铁性脆不能锻打，将生铁、矿石和燃料放在同一炉内进行脱碳，取出锻打，去除杂质而得到熟铁，于是钢铁生产从此开始分为二步冶炼法。在500多年前，我国苏州、河南商城、河北蓟县等地便使用了不同的炒铁法精炼炉。西欧用反射炉炒铁（搅拌法）开始于1784年。

1856年，英国人贝塞麦发明了底吹酸性空气转炉炼钢法。将空气吹入铁水，使铁水中硅、锰、碳高速氧化，依靠这些元素放出的热量将液体金属加热到能顺利地进行浇注所需的温度，从此开创了大规模炼钢的新时代。由于采用酸性炉衬和酸性渣操作，吹炼过程中不能去除磷、硫，同时为了保证有足够的热量来源要求铁水有较高的含硅量。

1879年英国人托马斯又发明了碱性底吹空气转炉炼钢法，改用碱性耐火材料作炉衬，在吹炼过程中加入石灰造碱性渣，并通过将液体金属中的碳氧化到<0.06%的“后吹”操作，

集中化渣脱磷。在托马斯法中，磷取代硅成为主要的发热元素，因而此法适合于处理高磷铁水，并可得到优质磷肥。西欧各国一直使用此法直到60年代。

1891年，法国人特罗佩纳发明了侧面吹风的酸性侧吹转炉炼钢法，曾在铸钢厂得到应用。

空气底吹和侧吹转炉炼钢解决了不用外来热源和提高生产效率的问题。但是，铁水适应炼钢钢种范围很窄，热效率不高，不能大量加入合金和废钢，而且钢中氮、氧、磷等有害元素含量高，适合冶炼的钢种少，这种炼钢方法的发展受到了一定限制。

1864年，法国人马丁利用蓄热室原理发明了平炉炼钢法。1865年建成第一座酸性平炉，1880年出现第一座碱性平炉。由于碱性平炉能适用于各种原料条件，生铁和废钢的比例可以在很宽的范围内变化，解决了废钢炼钢的问题，钢的品种质量也大大超过空气转炉，因此碱性平炉一度成为世界上最主要的炼钢方法，其地位保持了半个多世纪，50年代平炉钢产量占世界总钢产量的82%。但是平炉的设备庞大，热效率与生产率较低，耐火材料消耗也较高。

本世纪40年代初，制氧技术得到了迅速发展，给氧气炼钢提供了物质条件。1948年德国人杜雷尔在瑞士采用水冷氧枪垂直插入炉内吹炼铁水获得成功。1952年在林茨（Linz）城，1953年在多纳维茨（Donawitz）城先后建成了30t氧气顶吹转炉车间并投入生产，称为LD法。由于氧气顶吹转炉反应速度快，生产率及热效率很高，可使用约20~30%的废钢以及便于自动化控制，又克服了空气吹炼时钢质量差、品种少的缺点，使它成为冶金史上发展最迅速的新技术，先进工业国家已取代了平炉。当今世界钢的总产量约7.8亿吨，氧气转炉产量超过了60%，在各种炼钢方法中居于首位。

1967年，原联邦德国和法国建成氧气底吹转炉。由于从炉底吹入氧气，使冶炼过程更加平稳，脱碳能力强，有利冶炼超低碳钢种，铁和锰的氧化损失较氧气顶吹转炉小，也适用高磷铁水炼钢，这一工艺的出现受到炼钢界的普遍重视。

1969年，原联邦德国采用钢包喷射冶金技术。

1974年英国首先在1.25t转炉上，1975年法国和卢森堡合作在65t转炉上先后试验成功顶底复合吹炼转炉炼钢。试验结果证明它兼有顶吹和底吹转炉炼钢的优点，促进金属与渣、气体间的平衡，吹炼过程平稳，渣中氧化铁含量少，减少了金属和铁合金的消耗，可以吹炼含碳很低的钢种，目前已在世界范围内迅速推广，1989年世界复吹转炉钢产量占氧气转炉钢总产量的54.3%。

1899年，法国人海劳尔特发明了电弧炉。由于钢液温度、成分和炉内气氛容易控制，品种适应性大，特别适于冶炼高合金钢，1989年电炉钢年产量占世界钢产量的26.5%。近年来，电炉炼钢除普遍采用氧气强化冶炼外，工业发达国家还用大型超高功率电炉生产普通碳素结构钢，与氧气转炉相竞争。

现在，世界上的主要炼钢方法是氧气转炉和电弧炉，平炉炼钢在我国和俄罗斯等国还会延续一段时间。此外，为了冶炼某些特殊用途的钢种和合金，人们还采用感应炉、电渣炉、等离子炉和各种炉外精炼法。

三、我国近代钢铁工业的发展

我国近代钢铁生产开始于1890年清末时期。当时的湖广总督张之洞在湖北汉阳开办了

汉阳钢铁厂（高炉 $2 \times 248\text{m}^3$ 、贝塞麦转炉 $2 \times 8\text{t}$ 、平炉 $1 \times 10\text{t}$ ），到1900年钢的产量仅几千吨，后因西方资本主义国家向我国大量倾销钢铁，该厂于1907年倒闭。第一次世界大战期间，帝国主义之间的相互战争暂时放松了对中国的侵略，中国民族工业有了一些发展。1917年上海建立私营和兴炼钢厂（平炉 $2 \times 10\text{t}$ ），大战一结束，该厂停产倒闭。1935年在太原建立太原钢铁厂（平炉 $2 \times 30\text{t}$ ）。1939年至1945年，建立鞍山钢铁公司（三座预炼炉、六座可倾式平炉）。抗日战争期间，在重庆、天津、大冶等地先后建立了约10多座平炉和20多座电炉。从1895年到1949年的54年间中国累计产钢760万t，年产钢量最多的是1943年92.3万t，1949年只有15.8万t。

新中国成立以来，我国钢铁工业有了迅速的发展。1949年到1952年，完成了国民经济的恢复工作，1952年钢产量达到135万t。1957年钢产量为535万t，1959年钢产量为1387万t，1971年钢产量为2132万t，1978年钢产量为3178万t（世界第五位），1983年钢产量为4002万t，1991年钢产量为7100万t，居世界第三位。

解放后，钢的品种不断扩大，钢的质量也有了明显提高。旧中国只能生产100多个普通钢号和不到400种规格的钢材，现在已能生产1000多个钢号，轧制20000多种规格的钢材，基本上能满足我国国民经济各部门所需的金属材料的要求。

四、国外炼钢动态与发展

据报道，全世界1989年产钢78020万t。其中转炉钢接近5亿t，电炉钢接近2亿t，平炉钢不足1亿t。

到目前为止，氧气转炉仍然是炼钢的主要方法，占世界产钢量的60%。世界主要产钢国家除前苏联和意大利外，转炉钢比都超过50%。在80年代，由于工业发达国家中的废钢充足、价格便宜，转炉面临大量用废钢的电炉生产普通钢的挑战，转炉产钢量一直处于停滞不前的状态。由于国外的转炉多在大型钢铁联合企业中发挥作用，在产品品种，如板材方面具有质量高、生产量大和成本低的优势，所以用电炉炼普通钢不会对转炉产生严重威胁。

作为传统的特殊钢冶炼方法，在世界上电炉炼钢仍然是主流。1989年，日本的电炉钢比已达30%，我国的电炉钢比为21.24%，其中大部分是生产特殊钢。用电炉冶炼普通钢在美国、意大利发展很快，以代替平炉消耗集中起来的废钢。

日本和西欧早已淘汰了平炉，唯有俄罗斯及乌克兰的平炉钢比还接近50%，但近10年来他们的平炉钢比也下降了12%。

国外连铸技术发展十分迅速，到1990年底全世界连铸比为64.1%。日本、意大利、德国、法国和韩国的连铸比都在90%以上。目前，世界上已出现了许多全连铸工厂。1991年，我国连铸钢比例为26.53%，相继出现了几座全连铸工厂。

早先，钢水炉外精炼技术多用于电炉厂生产特殊钢，后来由于转炉生产的高级钢产量大、成本低，所以炉外精炼也普遍用于转炉。现在，国外无论电炉、转炉钢厂都配置了功能完备、装备水平较高的炉外精炼设施，以担负大量的钢水处理任务。譬如日本，1988年的转炉钢水炉外精炼比为71.7%，其中真空处理比为51.4%；电炉钢水炉外精炼比为53.5%。

当前，国外炼钢技术的进展主要是顶底复合吹炼转炉、超高功率电炉和炉外精炼技术

的进一步完善和普及以及连铸技术的大发展。可以说已经形成了炼钢-炉外精炼-连铸的现代化标准炼钢工艺流程。

当代炼钢技术向着大幅度提高生产效率、节约能源、扩大品种、不断提高产品质量、开发高附加值产品、降低生产成本的方向发展；重视对原有企业的改造，扩建，使之现代化，并减少投资；根据市场需求，调整产品结构，以增强市场的适应性。

第一篇 氧气转炉炼钢

第一章 转炉炼钢的原材料

原材料是炼钢的物质基础，原材料的质量和供应条件对炼钢生产的各项技术经济指标有重大影响。原材料的质量，不仅指化学成分和物理性质应符合技术标准，而且要求其化学成分和物理性质保持相对稳定。生产实践表明，保证原材料化学成分和物理性质的稳定，是实现冶炼过程自动化达到优质低耗的前提条件。目前，普遍对入炉原料进行预处理，以提高转炉炼钢的各项技术经济指标。

转炉炼钢的原材料分为金属料、非金属料和气体。金属料包括铁水、废钢、铁合金，非金属料包括造渣料、熔剂、冷却剂，气体包括氧气、氮气、氩气、二氧化碳等。

第一节 金属材料

一、铁水

铁水是转炉炼钢的主要原料，一般占入炉量的70~100%。铁水的物理热和化学热是转炉炼钢的基本热源。因此对铁水的成分和温度应有一定的要求，铁水的成分和温度是否合适和稳定，对转炉操作稳定和获得良好的技术经济指标具有重要的影响。

1. 铁水温度 铁水温度是铁水含物理热量多少的标志，应努力保证入炉铁水温度大于1300℃，以保证炉内热源充足和成渣迅速。对于小转炉和化学热量不富裕的铁水，保证铁水的高温入炉尤为重要。

2. 铁水成分 铁水成分直接影响炉内的温度、化渣和钢水质量。因此，要求铁水成分符合技术要求，并力求稳定。

(1) Si. 硅是重要的发热元素之一，铁水含Si量高，炉内的化学热增加。有研究者根据热平衡计算认为，铁水中Si含量增加0.10%，废钢加入量可提高1.3~1.5%。但在转炉炼钢过程中，硅几乎完全氧化，使铁水吹损加大，同时也使氧气消耗增加；在同样炉渣碱度条件下，Si含量高必然增大石灰耗量，使渣量增大，引起渣中铁损增加；铁水Si含量高将使渣中SiO₂增多，加剧对炉衬的侵蚀，并有可能造成喷溅。因此，从经济上看，铁水含Si高虽然可以提高废钢加入量，但其造成的消耗多和铁损大也是不可低估的。一般认为，铁水含Si量以0.8%左右为宜。在采用少渣冶炼工艺时，为了有效地进行炉外脱磷，希望铁水含Si少一些为好。

(2) Mn. 锰是弱发热元素，铁水中Mn氧化后形成的MnO能有效地促进石灰溶解，加快成渣，减少助熔剂的用量和炉衬侵蚀。同时铁水含Mn高将使吹炼终点钢水残锰量提高，从而减少合金化时所需的锰铁合金，并在降低钢水S含量和硫的危害方面起有利作用。但是，高炉冶炼含Mn高的铁水时将使焦炭用量增加，生产率降低。因而对铁水增锰的合理性还需要做详细的技术经济对比，故我国技术标准对转炉炼钢铁水含Mn量未作规定。

(3) P. 磷是强发热元素，对一般钢种来说也是有害元素，因此要求铁水含P量越低越好。由于磷在高炉中是不可能去除的，因此要求进入转炉的铁水含P量尽可能稳定。目前，

由于各种炉外脱磷工艺技术的开发,使得入炉铁水的含P量可大大降低。

(4) S。一般来说,S是钢中有害元素。在转炉炼钢的氧化气氛下脱硫率只有30~60%,因而脱硫是困难的。然而在高炉的高碳和还原气氛条件下,对S的去除要容易些,因此转炉炼钢对高炉铁水应提出要求。近年来,为了提高转炉的生产率,铁水炉外脱硫工艺有了很大的发展,这就为低硫铁水入炉提供了条件。

目前,国内一些转炉炼钢厂对铁水控制范围见表1-1。

表 1-1 国内部分转炉炼钢厂铁水成分 (%)

厂 名	Si	Mn	P	S
中国GB	<1.25	—	<0.4	<0.07
宝 钢	0.4~0.8	≥0.4	≤0.12	≤0.04
鞍 钢	0.6~1.2	—	≤0.10	≤0.04
武 钢	0.5~0.8	≤0.3	≤0.15	≤0.03
首 钢	0.4~0.7	0.5~0.8	≤0.10	≤0.035
攀 钢	≤0.10	0.2~0.8	0.03~0.05	<0.07
唐 钢	0.9~1.2	0.1~0.3	≤0.30	<0.07
重 钢	0.7~1.0	0.3~0.5	≤0.40	≤0.04
南 钢	0.4~0.7	0.1~0.4	≤0.30	≤0.04
杭 钢	0.3~0.7	—	≤0.15	≤0.05
柳 钢	0.5~1.2	0.2~0.4	≤0.4	≤0.05

3. 铁水带渣量 高炉渣中含S、SiO₂和Al₂O₃量较高,过多的高炉渣进入转炉内会导致转炉钢渣量大,石灰消耗增加,容易造成喷溅,降低炉衬寿命。因此,兑入转炉的铁水要求带渣量不得超过0.5%。

4. 铁水供应 转炉炼钢用铁水,绝大部分由高炉直接供应,但高炉铁水供应不足和缺少高炉铁水的转炉车间,也可用化铁炉供应铁水。

高炉供应铁水有两种方式,一种是高炉→铁水罐车→转炉;另一种是高炉→混铁炉→转炉。由于混铁炉供应的铁水成分、温度比较均匀稳定,带入的高炉渣少,因而在国内广泛采用。但使用混铁炉增加了耐火材料和燃料消耗的附加费用。

在国内也有部分厂家使用化铁炉供应铁水。目前,由于化铁炉的熔化率最大为100t/h,产量受限,故主要用于转炉容量小于50t的转炉车间。对于大型转炉,化铁炉铁水只能作为高炉铁水的补充。化铁炉供应铁水的经济性视其废钢用量的大小而定,有学者对不同炼钢模式的综合能耗作了计算对比,其结果见表1-2。用化铁炉将生铁熔化成铁水供转炉炼钢时能耗最高,而用化铁炉熔化废钢获得的铁水供转炉炼钢时能耗最低。另外从经济上考虑,废钢的价格总是低于生铁的,虽然熔化废钢时焦炭消耗会增加100kg/t左右,但总的成本仍是较低的。因此,提高化铁炉金属料的废钢用量,是降低能耗,提高经济性的重要措施。

二、铁水预处理

为了提高钢的质量,改善高炉和转炉的生产条件,铁水炉外预处理技术已在世界各国广泛应用。铁水炉外脱硫能给高炉减轻负荷,可降低焦比,减少渣量和提高生产率。铁水炉外脱磷、脱硫,可使转炉炼钢渣量减少,做到无渣或少渣炼钢,并可缩短冶炼时间,提高生产能力。同时,磷硫的去除对于提高转炉钢的质量是极为有利的。

表 1-2 不同炼钢模式综合能耗比较

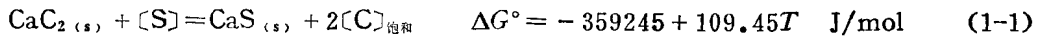
炼钢模式	综合能耗, 标煤kg/t
高炉—转炉	784.39
(生铁)化铁炉—转炉	948.20
(废钢)化铁炉—转炉	197.79
(40%铁水+60%废钢)电炉	529.49

1. 铁水炉外脱硫 铁水炉外脱硫在理论上和技术上都是可行的, 因为铁水脱硫的条件比钢水脱硫更为有利。其原因是: 铁水中C、Si、P等元素含量较高, 使硫的活度系数增大; 铁水中氧含量低, 使硫的分配系数增大; 铁水含氧低, 因而可以使用强脱硫剂强化脱硫而不会造成强烈氧化。铁水炉外脱硫的经济性也是可观的, 如某铁厂采用铁水炉外脱硫后,

高炉碱度从1.25降低到1.06, 焦比降低36kg/t, 生产率提高13%。

(1) 常用脱硫剂的脱硫能力。常用的脱硫剂有 CaC_2 、 CaO 、 Na_2CO_3 、 Mg , 可根据各地的资源情况在生产中选用。

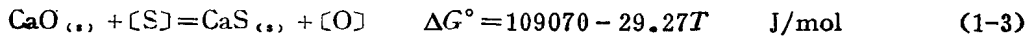
1) CaC_2 : CaC_2 是常用的脱硫剂, 其脱硫反应可用下式表示:



一般铁水预处理时的温度为1350℃左右, 而 CaC_2 和 CaS 的熔点分别为2300℃和2450℃, 在铁水炉外处理温度条件下呈固态, 其活度为1。而 $[\text{C}]$ 处于饱和状态下的活度 a_c 也为1, 故(1-1)式的平衡常数可表示如下:

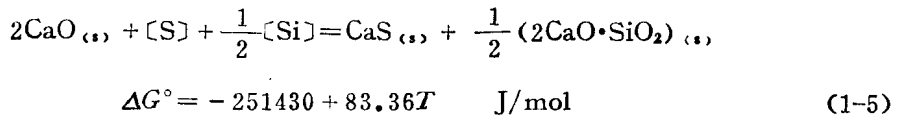
$$\lg K = \lg \frac{1}{a_s} = \frac{18766}{T} - 5.717 \quad (1-2)$$

2) CaO : 为了节约能耗和降低脱硫成本, 近年来正大力研究以 CaO 或以 CaO 为主要成分的复合脱硫剂来代替 CaC_2 作为铁水炉外脱硫剂。由于 CaO 脱硫反应速度较慢, 难以获得低硫铁水, 人们采用了喷吹石灰粉的技术来促进脱硫反应。但石灰粉吸水性强, 容易堵塞喷枪, 故近年来开发了盾化石灰。 CaO 的脱硫反应如下:



$$\lg K = \lg \frac{a_o}{a_s} = -\frac{5697}{T} + 1.53 \quad (1-4)$$

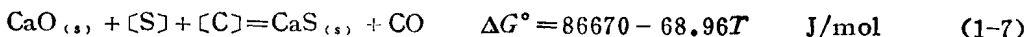
上面的反应与氧活度 a_o 有关, 而铁水中含有较强的脱氧元素C和Si。因此当铁水中含Si量在0.05%以上时, 脱硫反应用下式表示:



$$\lg K = \lg \frac{1}{a_s \sqrt{a_{\text{Si}}}} = \frac{13134}{T} - 4.35 \quad (1-6)$$

由此可见, 在用 CaO 对含Si铁水进行脱硫时会生成 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, 它能在石灰表面上形成很薄的又很致密的 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 膜层, 阻碍脱硫反应进行, 因而降低了 CaO 的脱硫效率和脱硫速度。

当铁水含Si量小于0.05%时, 石灰脱硫可用下式表示:



为了有效地提高石灰的脱硫能力, 避免生成 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 外壳, 可在铁水中溶入一定的铝量, 使其在石灰表面上生成钙铝酸盐($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$), 钙铝酸盐具有较

大的溶硫能力，可以显著的提高石灰的脱硫速度和脱硫效率。加铝后CaO的脱硫效果对比见图1-1，其脱硫反应可用下式表示：

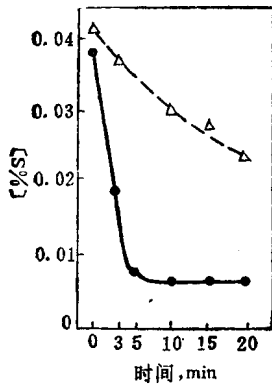
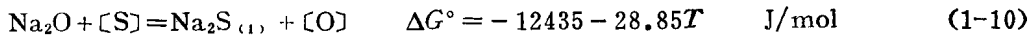


图 1-1 加Al对CaO脱硫的影响

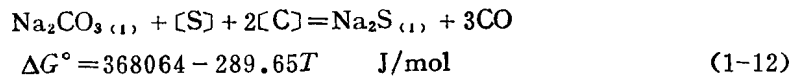
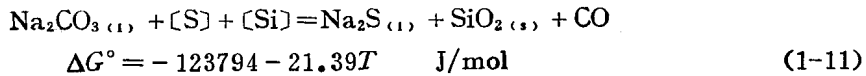
△—单独CaO，●—CaO+Al CaO/SiO₂=1.05 脱硫剂，固体苏打粉在852℃熔化，然后发生分解，其反应为： $\text{Na}_2\text{CO}_3(\text{s}) = \text{Na}_2\text{O}(\text{l}) + \text{CO}_2$

$$\Delta G^\circ = 310073 - 127T \quad \text{J/mol}$$

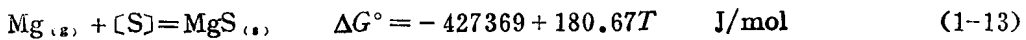
苏打粉中分解出来的NaO与铁水中的硫发生反应：



然而由于铁水中含有Si、C等脱氧元素，故苏打粉脱硫的总反应可为：



4) Mg: 金属镁的熔点651℃和沸点1107℃都很低，在铁水预处理温度下是气体。用金属镁脱硫的反应用下式：



$$\lg K = \lg \frac{1}{p_{\text{Mg}} a_{\text{S}}} = \frac{22324}{T} - 9.44 \quad (1-14)$$

而镁的蒸汽压 p_{Mg} 与温度的关系式由(1-15)式表示：

$$\lg p_{\text{Mg}} = \frac{-6802}{T} + 9.993 \quad \text{Pa} \quad (1-15)$$

在1350℃时， P_{Mg} 可达0.634MPa，如果直接将金属镁加入铁水中会发生爆发性反应，使镁的利用率大大降低，同时铁水还会由于镁蒸汽大量逸出而造成喷溅事故。因此在工业生产中广泛采用的方法是把金属镁渗透在焦炭中制成镁焦，或把金属镁渗入钢屑块中制成镁钢屑，或把镁粉与白云石粉混合压块制成镁白云石，然后放入钟罩内再插入铁水中进行脱硫反应。

为了估计各种脱硫剂的脱硫能力，假设在1350℃下，对铁水（成分为C=4.0%，Si=0.6%，Mn=0.5%，P=0.20%，S=0.04%）进行平衡含硫量计算。计算中取 $[\% \text{Al}] = 0.01$ ， $p_{\text{CO}} = 0.1 \text{MPa} (1 \text{atm})$ ， $a_i = f_i [\% i]$ 。不同脱硫剂在各种情况下的计算结果如下(表

1-3)；

表 1-3

脱硫剂应用条件	CaC ₂	CaO(含Si铁水)	CaO+Al	Na ₂ CO ₃	Mg
平衡计算(%S)	4.9 × 10 ⁻⁷	3.2 × 10 ⁻⁵	2.84 × 10 ⁻⁴	6.91 × 10 ⁻⁷	2.59 × 10 ⁻⁸

由计算可见，脱硫剂的脱硫能力秩序为Na₂CO₃、CaC₂、Mg、CaO，并且都能满足工业应用中的脱硫要求。

(2) 铁水炉外脱硫的方法及效果。工业实践业已证明，铁水炉外脱硫的效果不仅取决于脱硫反应的热力学条件，而动力学条件也是十分重要的。在铁水炉外脱硫的固—液、液—液、液—气相反应中，物质的扩散传质过程都是脱硫反应的限制性环节。

金属镁脱硫是液—气相反应，它可用表面更新理论来描述，其传质速度为：

$$\frac{d[\%S]}{dt} = k([\%S]_0 - (\%S)/L_s) \quad (1-16)$$

式中 $[\%S]_0$ 、 $(\%S)$ ——分别指铁水初始硫含量和炉渣中硫含量；

k ——传质系数，它与镁耗量有关， $k = \frac{2.3}{W} \lg \frac{[\%S]_0}{[\%S]_t}$ ；

W ——脱硫镁耗量，kg/t；

$[\%S]_t$ ——处理结束时的铁水硫含量；

L_s ——铁水与炉渣间硫的分配比。

CaC₂和CaO脱硫是固—液相反应，其脱硫情况可用边界层理论来描述。由于所受到的扩散限制环节不同，存在两种情况：当脱硫剂表面不形成硬壳时，其限制环节是铁水中硫通过边界层向脱硫剂表面扩散，其脱硫速度为：

$$\frac{d[\%S]}{dt} = -k \frac{A}{V} ([\%S] - (\%S)/L_s) \quad (1-17)$$

式中 k ——传质系数，它与硫的扩散系数 D_s 和边界层厚度 δ 有关，其关系为 $k \propto D_s/\delta$ ；

A 、 V ——分别表示反应界面和体积。

另一种情况是在脱硫剂表面生成一层硬壳，其限制性环节是铁水中的硫必须通过硬壳进行传质，(如石灰脱硫时生成的2CaO·SiO₂外壳)，此时的脱硫速度为：

$$\frac{d[\%S]}{dt} = -k' C_s V_s \quad (1-18)$$

式中 k' ——表观速度常数；

C_s 、 V_s ——分别指硬壳层的含硫量和体积。

Na₂CO₃脱硫是液—液相反应，其脱硫情况可用表面更新理论来描述，脱硫速度可用(1-16)式来计算，只是传质系数 k 的计算方法不同：

$$k = \sqrt{\phi D_s} \quad (1-19)$$

式中 ϕ ——表面更新率，它取决于铁水的搅拌状况。

迄今为止，把热力学与动力学因素结合起来已发展了多种炉外脱硫方法，现将常用的炉外脱硫方法及应用效果介绍如下：

1) 铺撒法: 将苏打粉或苏打粉与石灰粉、萤石粉的混合物撒入流铁沟、铁水流或铁水罐底部, 利用铁水流动时的冲击和湍流运动使铁水与脱硫剂搅拌混合, 促进脱硫反应。这种方法简便易行, 但由于铁水与脱硫剂混合不够充分, 脱硫效率不高, 平均脱硫率与苏打粉消耗量的关系如图1-2所示。

2) 机械搅拌法: 这种方法是把脱硫剂加入铁水罐中, 然后用耐火材料制成的搅拌器插入铁水搅拌, 促使铁水与脱硫剂充分混合, 进行脱硫反应。机械搅拌法有多种方式, 其中具有代表性的是KR法, 其脱硫效果与搅拌器的转速、脱硫剂种类有关, 其影响见图1-3、1-4。

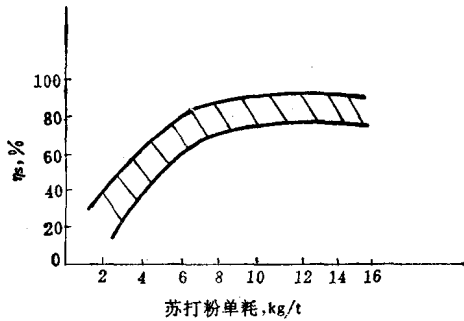


图 1-2 苏打粉消耗与 η_s 的关系

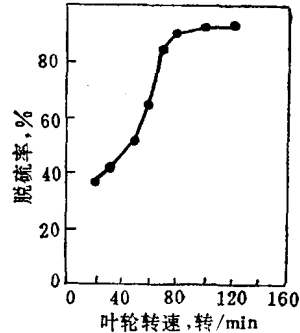


图 1-3 搅拌器转速与脱硫率的关系

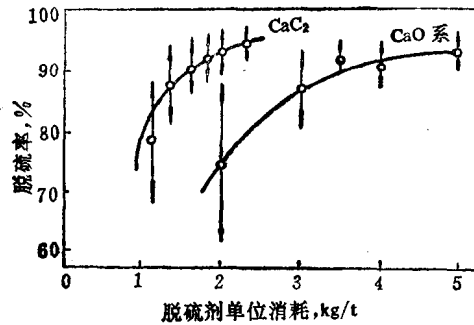


图 1-4 机械搅拌法脱硫剂种类与脱硫率的关系

3) 钟罩插入法: 这种方法是把含镁40%以上的镁焦、镁钢屑等放入石墨—粘土制成的钟罩内, 然后插入铁水罐中, 利用镁在高温下沸腾而逸出的镁蒸汽与铁水接触, 使铁水产生运动和进行脱硫反应。金属镁脱硫的特点是反应速度快, 渣量少; 但镁的蒸发速度不均匀, 前期快、后期慢, 使镁的利用率受到影响。图1-5是镁脱硫剂的消耗与脱硫效果的关系。

4) 喷射法: 喷射法是利用喷枪把气体与脱硫剂混合后喷射到铁水中, 使铁水与脱硫剂充分混合, 促进脱硫反应, 各种脱硫剂在喷射法中的应用效果见图1-6。

5) 其它方法: 在工业生产中还采用过摇包法、吹气搅拌法等多种方法进行炉外脱硫。在使用过程中, 各厂应根据实际脱硫剂情况, 考虑到要求达到的脱硫程度, 铁水的热损和铁损, 脱硫设备费用, 环境污染等问题, 选用最适合的脱硫剂和炉外脱硫方法。

2. 铁水炉外脱磷 铁矿石中的磷在高炉的还原气氛下将全部进入铁水中, 而磷对炼钢来说则是有害元素。转炉炼钢脱磷效率高, 但要加入较多的造渣料和熔剂, 并且延长冶炼