

YE JIN SHI YONG JI SHU CONG SHU



冶金实用技术丛书

# 电弧炉炼钢

宋文林 主编

冶金工业出版社

冶金实用技术丛书

# 电弧炉炼钢

宋文林 主编

北京  
冶金工业出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

电弧炉炼钢/宋文林主编.-北京:冶金工业出版社,1996.2  
(冶金实用技术丛书)  
ISBN 7-5024-1767-2

I. 电… II. 宋… III. 电弧炉-炼钢 IV. TF741.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 14770 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)  
三河市双峰印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销  
1996 年 2 月第一版,1996 年 2 月第一次印刷  
850mm×1168mm 1/32;9.875 印张;259 千字;308 页;1—3000 册  
12.60 元

# 前 言

为了满足冶金企业广大职工学习技术知识,提高操作水平的愿望,冶金工业出版社组织编写了一套冶金实用技术丛书。本书是这套丛书之一。

全书共分 14 章,包括电弧炉炼钢原材料、基本冶炼工艺和基本操作技能、炉衬耐火材料、电弧炉机械设备和电气设备,合金钢冶炼、炉外精炼、电弧炉炼钢新技术、安全生产知识等内容,书中还列有一些必要的附录。本书以电弧炉炼钢基本原理与工艺相结合的方式介绍了电弧炉炼钢冶炼工艺和合金钢冶炼工艺。鉴于近年来国内外电弧炉炼钢发展较快,对炉外精炼、偏心炉底出钢电弧炉、直流电弧炉以及计算机应用做了适当的介绍。编写过程中参阅并吸收了大量的近期国内外资料,总结了大量的现场实际经验,内容兼顾大中小型电炉钢厂的需要,并考虑到中小型电炉钢厂现有职工的文化素质,力求深入浅出,通俗易懂,理论联系实际。

本书由河北理工学院宋文林主编,第 1、7、10、11、14 章,12.1~12.3 节由宋文林编写,第 2~6,13 章由唐山钢铁公司孙宽编写,第 8、9 章,12.4 节由唐山钢铁公司宋志刚编写,第 12.5 节由唐山钢铁公司郭廷钢编写。

由于编者水平所限,书中可能会有一些缺点和错误,欢迎读者批评指正。

1995 年 10 月

# 目 录

1 电弧炉炼钢概述 .....	(1)
1.1 电弧炉炼钢的发展概况 .....	(1)
1.2 电弧炉炼钢的特点 .....	(3)
1.3 碱性电弧炉与酸性电弧炉 .....	(4)
1.4 碱性电弧炉炼钢过程简述 .....	(5)
1.5 酸性电弧炉炼钢过程简述 .....	(8)
2 电弧炉炼钢原材料 .....	(10)
2.1 废钢 .....	(10)
2.2 生铁、软铁 .....	(11)
2.3 合金材料 .....	(13)
2.4 造渣材料和氧化剂 .....	(27)
2.5 脱氧剂和增碳剂 .....	(28)
3 冶炼前的准备工作 .....	(30)
3.1 配料 .....	(30)
3.2 补炉 .....	(36)
3.3 装料 .....	(37)
4 熔化期冶炼 .....	(39)
4.1 炉料的熔化及物化反应 .....	(39)
4.2 熔化期造渣及去磷 .....	(42)
4.3 缩短熔化期的措施 .....	(46)
5 氧化期冶炼 .....	(52)
5.1 氧化期的任务 .....	(52)
5.2 氧化方法 .....	(52)
5.3 脱磷 .....	(54)
5.4 碳的氧化 .....	(62)
5.5 脱碳和各项任务的关系 .....	(73)
5.6 氧化期的造渣 .....	(77)

5.7	氧化期操作要点	(79)
6	还原期冶炼	(83)
6.1	还原期的任务	(83)
6.2	脱氧	(83)
6.3	脱硫	(94)
6.4	还原期的炉渣	(99)
6.5	钢液的合金化	(103)
6.6	还原期温度的控制	(115)
6.7	还原期的操作要点	(119)
6.8	出钢	(121)
7	耐火材料与炉衬	(123)
7.1	耐火材料的分类和性能	(123)
7.2	电弧炉用耐火材料	(126)
7.3	电弧炉用绝热材料和粘结剂	(128)
7.4	炉型尺寸计算	(129)
7.5	炉衬的砌筑	(132)
7.6	烘炉	(138)
7.7	炉衬的维护	(139)
8	电弧炉的机械设备	(142)
8.1	电弧炉的构造	(142)
8.2	炉体的金属结构	(142)
8.3	电极夹持器及电极升降装置	(147)
8.4	炉体倾动机构	(152)
8.5	炉顶装料系统	(155)
8.6	电弧炉的辅助装置	(166)
9	电弧炉的电气设备	(177)
9.1	电弧炉的主电路	(177)
9.2	隔离开关和高压断路器	(179)
9.3	电炉变压器和电抗器	(186)
9.4	短网	(192)

9.5	电极 .....	(195)
9.6	测量、保护及信号装置 .....	(196)
9.7	电极升降自动调节装置 .....	(199)
9.8	配电操作 .....	(206)
10	合金钢冶炼 .....	(210)
10.1	合金结构钢的冶炼 .....	(210)
10.2	滚动轴承钢的冶炼 .....	(219)
10.3	高速工具钢的冶炼 .....	(224)
10.4	不锈钢的冶炼 .....	(230)
11	炉外精炼 .....	(244)
11.1	炉外精炼的发展和分类 .....	(244)
11.2	真空脱气法 .....	(246)
11.3	钢包精炼法 .....	(252)
11.4	氩气精炼法 .....	(259)
11.5	喷射冶金及合金元素特殊添加法 .....	(262)
11.6	各种炉外精炼方法的比较 .....	(265)
12	电弧炉炼钢新技术 .....	(267)
12.1	超高功率电弧炉 .....	(267)
12.2	炉底出钢电弧炉 .....	(270)
12.3	直流电弧炉 .....	(274)
12.4	计算机的应用 .....	(281)
12.5	电弧炉底吹气体搅拌技术 .....	(283)
13	电弧炉炼钢基本操作技能和安全生产知识 .....	(286)
13.1	炉前操作的基本技能 .....	(286)
13.2	安全生产知识 .....	(294)
13.3	事故的处理和预防 .....	(295)
14	电弧炉炼钢技术经济指标 .....	(302)
14.1	产量方面技术经济指标 .....	(302)
14.2	质量方面技术经济指标 .....	(302)
14.3	品种方面技术经济指标 .....	(303)

14.4 材料消耗方面技术经济指标.....	(303)
附录.....	(306)
附表1 我国HX系列炼钢电弧炉的主要技术 .....	(306)
附表2 铁合金的密度、堆密度及熔点 .....	(306)
附表3 炼钢常用化学元素符号及基本性质 .....	(307)
附表4 钢液的熔点和密度参考值 .....	(308)



# 1 电弧炉炼钢概述

## 1.1 电弧炉炼钢的发展概况

### 1.1.1 电弧炉炼钢的发展

19世纪后半世纪,继转炉炼钢法、平炉炼钢法出现后,电炉炼钢法也诞生了。电炉炼钢法广义地讲包括电弧炉炼钢法、感应电炉炼钢法和电渣炉炼钢法。但通常所说的电炉炼钢法是指电弧炉炼钢法。

1879年,西门子(William Sieme)第一个用电能来炼钢,他用一个坩埚,在坩埚壁上安放两个水平电极,在两电极间产生单相电弧,获得间接电弧炉专利。由于这种间接电弧炉对炉衬辐射热量大,热效率低,在炼钢中未能得到应用。1900年,赫洛尔特(Paul Heroult)在法国建立第一座直接电弧炉,并获得了专利。炉壳为长方形,有两个垂直电极,用单相交流电供电,电流从一个电极通过电弧流至炉料,然后从炉料通过电弧而流至另一电极。电极升降用人工手动调节。1909年,美国建成一座15t三相电弧炉,炉壳为圆形,用三相交流电供电,三个电极穿过炉顶孔伸入炉中,这是世界上第一座圆形炉壳的电弧炉。这类型的电弧炉很快地得到了发展。1926年,德国制造成功了炉盖移动式电弧炉,炉子容量为6t。这是电弧炉炉顶装料的开始。1936年,德国又制造成功了炉盖旋转式电弧炉,炉子容量为18t。60年代出现了超高功率电弧炉,80年代开发了直流电弧炉。

最初电弧炉主要用于生产工具钢,也用于冶炼高合金钢,不锈钢及其他高质量钢;后来又扩大到生产低合金钢。电炉炼钢的优越性逐渐被人们所注意,因而电弧炉代替了坩埚法成为冶炼合金钢的主要方法。现在电弧炉不但用于生产合金钢,也生产碳素钢。

本世纪初,电炉钢产量在钢总产量中占的比例很低。第一次世

界大战期间,由于军事工业对合金钢的需要量增大,促进了电炉炼钢的发展。第二次世界大战开始后,军事工业需要电炉供给大量的合金钢,而且需要新品种的合金钢,因而又促进电炉炼钢的发展。此期间电炉仍以生产合金钢为主。第二次世界大战后,军事工业对合金钢的需要量大大减少,电弧炉开始转向民用钢的生产。1946年是电炉炼钢发展的转折点。此后电炉大量用于生产普碳钢,电炉炼钢才有较大的发展。电炉钢的产量不断增长,电炉钢占钢总产量的比例也逐渐增大。近几年该比例仍在继续增长,见表 1-1。1993年世界电炉钢产量占钢总产量的比例为 31%,少数拥有水力发电资源的国家(丹麦、挪威、委内瑞拉)电炉钢的比例达 100%,预计到 2000 年世界电炉钢的比例将达到 35%~40%。

表 1-1 世界历年来电炉钢占钢总产量的比例

年代	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1985	1988	1990	1993
电炉钢比,%	1.2	2.0	2.3	6.9	9.7	13.8	22.0	25.8	26.5	27.4	31.0

近些年来,电炉钢的增长速度超过了钢总产量的增长速度。电炉钢得到迅速发展的主要原因如下:

- (1)废钢日益增多;
- (2)电能供应较充足,电价较稳定;
- (3)电炉趋向大型化,超高功率化,与炉外精炼配合,冶炼工艺强化,生产率大大提高;
- (4)基建投资少,建设速度快;
- (5)钢液温度和成分容易控制,品种适应性广。

随着电炉钢产量的增长,电炉炼钢技术也在不断改革。由于炉外精练的发展,电弧炉尤其是超高功率电弧炉与炉外精练配合,电炉冶炼中的脱氧、脱硫、脱气、钢中夹杂物的去除和钢液合金化等精练任务均移到炉外精练设备中去进行,从而大幅度地提高了电炉的生产力,使电炉变成一个初炼炉,只承担熔化、加热和脱磷等任务,因而电炉冶炼时间大大缩短,即使是 100t 以上的大型电炉,全炉冶炼的时间也只有 60~70min。这一巨大的变化赋予电炉炼

钢以极大的生命力和竞争力,这也是电炉钢之所以在世界钢总产量中的比例不断上升的重要原因之一。

### 1.1.2 我国电弧炉炼钢的发展

我国电炉以生产合金钢为主,电炉钢中 50%左右是合金钢,50%是优质碳素钢;而美国和日本电炉钢总量的 70%以上是碳素钢,余下的为合金钢。解放后,我国电炉钢占钢总产量的比例有很大的增长。1993 年,我国电炉钢产量占钢总产量的比例为 21.8%。历年来我国电炉钢产量占钢总产量的比例见表 1-2。

表 1-2 我国历年来电炉钢占钢总产量的比例

年 代	1950	1960	1970	1980	1985	1988	1993
电炉钢比,%	12.38	17.15	22.17	19.1	21.15	20.05	21.8

我国的电炉容量过小,主要特殊钢厂电炉的平均出钢量为 20.6t/座,而美国和加拿大为 80t/座,日本为 57t/座。电炉容量过小,不仅生产效率低、技术经济指标差,而且配备炉外精炼设施也较困难。80 年代我国开始引进大容量的高功率和超高功率电弧炉,国内也自行制造了较大容量的电弧炉。

## 1.2 电弧炉炼钢的特点

电弧炉炼钢以电能为热源,利用电极与炉料间产生的电弧的高温来加热和熔化炉料。因而电弧炉炼钢有一系列的优点:

(1)能灵活掌握温度。电弧炉中电弧区温度高达 4000°C 以上,远远高于炼钢所需的温度,因而可以熔化各种高熔点的合金。通过电弧加热,钢液温度可达 1600°C 以上。在冶炼过程中通过对电流和电压的控制,可以灵活掌握冶炼温度,以满足不同钢种冶炼的需要。

(2)热效率高。电弧炉炼钢没有大量高温炉气带走的热损失,因而热效率高,一般可达 60%以上,比转炉炼钢和平炉炼钢的热效率高。

(3)炉内气氛可以控制。氧气转炉吹入大量氧气是熔炼得以进行的必要条件,平炉熔炼过程中为了保证燃料(煤气或重油)完全

燃烧,必须在熔炼室中保持一定的过剩空气系数,因而在这些炉子中,熔炼自始至终是在不同程度的氧化性气氛下进行的。在电弧炉中没有可燃气,根据工艺要求,既可造成炉内的氧化性气氛,也可造成还原性气氛,这是转炉和平炉无法达到的。因而在碱性电弧炉炼钢过程中能够大量地去除钢中的磷、硫、氧和其他杂质,提高钢的质量,合金的回收率高且稳定,钢的化学成分比较容易控制,冶炼的钢种也较多。

(4)设备简单,工艺流程短。电弧炉的主要设备为变压器和炉体两大部分,因而基建费用低,投产快。电弧炉以废钢为原料,不像转炉那样以铁水为原料,所以不需要一套庞大的炼铁和炼焦系统,因而流程短。

电弧炉炼钢法也有缺点,主要是电炉钢中氢和氮的含量较高,由于电弧的电离作用,使炉内空气和水气大量离解,而溶入钢液中,因而电炉钢中氢和氮含量比转炉钢和平炉钢高。

由于电弧炉炼钢法具有上述一系列优点,所以世界各国都在稳步地发展电炉炼钢。多年以来,世界电炉钢产量的增长速度一直高于世界钢总产量的增长速度。

### 1.3 碱性电弧炉与酸性电弧炉

炼钢电弧炉根据炉衬耐火材料性质的不同,可以分为碱性电弧炉和酸性电弧炉。

#### 1.3.1 碱性电弧炉

碱性电弧炉的炉衬用碱性耐火材料,用镁砖、白云石砖砌筑,或用镁砂、白云石、焦油沥青混合物打结而成。炉盖大都用高铝砖砌筑。冶炼时造碱性渣,造渣材料以石灰为主,能大幅度的去除钢中的有害元素磷、硫和其他杂质,原料范围广,钢的质量好,冶炼品种多。既生产普通钢,又生产优质钢;既生产碳素钢,又生产合金钢。有些现在转炉和平炉不能生产的高质量合金钢,特别是高合金钢只能用碱性电弧炉冶炼,所以碱性电弧炉应用较广。电炉钢厂生产连铸坯和钢锭普遍采用碱性电弧炉,铸钢厂也日益广泛用碱性

电弧炉生产铸件。

### 1.3.2 酸性电弧炉

酸性电弧炉的炉衬用酸性耐火材料,用硅砖砌筑,或用石英砂与水玻璃打结而成。炉盖用硅砖砌筑。冶炼时造酸性渣,造渣材料以石英砂为主。冶炼过程中不能去除磷和硫,所以酸性电弧炉炼钢用原料的磷、硫应低于成品钢的要求。这限制了酸性电弧炉的应用,但酸性电弧炉也有优点,其优点如下:

(1)生产率高。酸性炉衬寿命比碱性炉衬寿命高得多,因而修炉停炉时间大为减少,提高了酸性炉的生产率。酸性电弧炉冶炼过程中没有脱磷和脱硫任务,大大缩短了氧化期和还原期,因而熔炼时间缩短,炉子的生产率提高。

(2)钢液的铸造性能好。酸性炉渣电阻大,吸收热量多,给钢液的热量也多,因而钢液温度高。酸性钢液中夹杂物少,且大部分呈球状钢液流动性好,因而铸造时用酸性电弧炉钢液容易获得优质薄壁铸件,因而酸性电弧炉主要用于铸钢厂生产铸件。

(3)钢的成本低。由于酸性电弧炉冶炼时电能、电极、耐火材料和脱氧剂的单位消耗低,以及酸性耐火材料价格便宜,所以酸性电弧炉钢的成本低。

## 1.4 碱性电弧炉炼钢过程简述

碱性电弧炉炼钢的工艺方法归纳起来有三种,即氧化法、不氧化法和返回吹氧法。氧化法是碱性电弧炉炼钢工艺的最基本的方法,不氧化法和返回吹氧化都是在氧化法的基础上发展起来的。

### 1.4.1 氧化法

氧化法冶炼工艺由补炉、装料、熔化期、氧化期、还原期和出钢六个阶段组成。其特点是有氧化期,炉料熔清后,加矿石或吹氧进行脱磷和脱碳,使熔池沸腾,去除钢中的气体和夹杂物。用氧化法炼出的钢含磷、气体和夹杂物都很低,而且对炉料的要求不十分严格,料源广泛。因而氧化法在电弧炉炼钢中应用最广泛,绝大多数钢种都是用氧化法冶炼的。

现将氧化法冶炼的工艺流程作简要介绍如下：

#### (1)补炉。

上一炉出钢完毕后，如炉内有残余炉渣和钢水，要迅速将残渣与残钢扒出，然后将炉体损坏的部分迅速进行修补，以保证下一炉钢的正常冶炼。使用新炉衬冶炼时，一般前几炉不需要补炉。

#### (2)装料。

补炉后将炉料装入炉膛内，一般先在炉底加入少量石灰，然后加入废钢，目前电弧炉普遍采用顶装料、废钢按所冶炼的钢种进行配料，把废钢先装入料罐内，装料时将炉盖升起旋开，或者将炉盖升起，开出炉体，露出炉膛，用吊车吊起料罐将炉料一次加入炉内。小于3t的电弧炉多数是用人工从炉门装料。

#### (3)熔化期。

从通电开始到炉料全部熔清的阶段称为熔化期。熔化期的主要任务是迅速熔化全部炉料，并且要求去除部分磷。为了加速熔化和节省电能，在熔化期一般采用吹氧助熔，有条件的也可以采用煤氧助熔。此外，如果电极需要接长则在熔化期进行，更换渣罐、堵出钢口、准备冶炼用工具以及其他准备工作都在熔化期进行。

#### (4)氧化期。

当炉料全部熔清后，取样分析进入氧化期。氧化期的任务有：

- 1)继续最大限度地降低钢液中的磷含量；
- 2)去除钢中气体和夹杂物；
- 3)将钢液温度加热到高于出钢温度 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。

为了完成上述任务，氧化期需向炉内加入石灰、矿石、以及吹氧。当氧化期结束时，将氧化渣全部扒除。

#### (5)还原期。

扒除氧化渣后，加入石灰和萤石重新造渣，开始进入还原期。还原期的主要任务有：

- 1)脱氧；
- 2)脱硫；
- 3)调整钢液的化学成分；

#### 4)调整钢液的温度。

还原期造还原渣,分批向渣面均匀加入碳粉、硅铁粉等脱氧剂,进行脱氧和脱硫。根据冶炼钢种的需要加入铁合金,调整钢液的化学成分,最后在出钢前插铝进行终脱氧。

#### (6)出钢。

钢液脱氧良好,化学成分符合要求,温度达到出钢温度,炉渣合乎出钢要求,即可出钢。出钢时一般采用钢渣混出的方法。

### 1.4.2 不氧化法

不氧化法也称装入法。在合金钢的生产过程中,积存了大量的合金钢切头、切尾、废品、汤道、注余和切屑等,如用氧化法冶炼,这些合金返回钢中的合金元素会被氧化损失掉。为了充分利用这些合金返回钢中的合金元素,减少铁合金的消耗,降低钢的成本,降低电能消耗,缩短冶炼时间,提高电弧炉的生产率,因而出现了不氧化冶炼法。

不氧化法的特点是在冶炼过程中没有氧化期。炉料熔清后,钢液中碳和磷应达到氧化末期的水平。此时,钢液温度不够高,需要对钢液进行加热升温,然后扒除氧化渣进入还原期。经过还原,调整钢液成分和温度,即可出钢。由于冶炼过程中不能去磷和去气,因而对炉料要求严格,炉料应清洁无锈,含磷要低。不氧化法可回收原料中的合金元素,因而在炉料中可配入合金返回钢。钢液的化学成分基本上取决于配料的成分,所以要求配料的化学成分和称量要力求准确。低合金钢和部分高合金钢可用不氧化方法冶炼。

### 1.4.3 返回吹氧法

返回吹氧法的特点是在炉料中配入大量的合金返回钢,熔清后吹氧进行脱碳沸腾。返回吹氧法的理论依据是碳与氧的亲合力在一定的高温条件下比某些合金元素与氧的亲合力大。利用这个特点在一定的高温下向返回钢液进行吹氧,便可达到脱碳、沸腾、去气、去夹杂而又保证能回收大量合金元素的目的。

返回吹氧法冶炼过程中不能去磷,因而要求炉料中含磷量要低。冶炼的基本过程是:炉料熔清后,当钢液升到一定的温度,即可

吹氧脱碳,吹氧完毕进行预脱氧,加入部分铁合金,对炉渣进行初步还原,然后扒除炉渣(也可不扒除炉渣),重新加入渣料造还原渣,进行脱氧还原和脱硫,最后调整钢液的化学成分和温度,然后出钢。

返回吹氧法主要用于回收铬、钨等合金元素,现在高速钢和不锈钢大多采用此法冶炼。

## 1.5 酸性电弧炉炼钢过程简述

酸性电弧炉冶炼工艺有两种方法:氧化法和不氧化法。氧化法冶炼分为补炉、装料、熔化期、氧化期、还原期和出钢等阶段。不氧化法没有氧化期。现将氧化法工艺流程作简要介绍如下:

### (1)补炉。

把炉内残留钢渣扒出后,不管炉底炉坡形状如何,必须进行补炉。补炉材料用石英砂。

### (2)装料。

装料原则、炉料尺寸的配比等都与碱性电弧炉装料法相同。

### (3)熔化期。

酸性电弧炉的熔化期是最慢的环节,而且熔化期所需的时间与全炉冶炼时间的比值大于碱性炉,因此缩短熔化期可大大地提高炉子生产率。炉料熔化时必须防止出现“搭桥”,“搭桥”不但延长熔化时间,而且使炉底局部过热,以致炉底受到破坏。如果出现“搭桥”应及时推料,破坏料桥。

### (4)氧化期。

酸性炉氧化期的主要任务:

1)去除钢液中的气体和非金属夹杂物,这要依靠脱碳反应引起的熔池沸腾来实现;

2)加热钢液到略高于出钢温度。

为了脱碳沸腾,需要向熔池加入铁矿石或吹氧。酸性渣的氧化能力较碱性渣弱,因而在酸性炉中碳硅氧化的物理化学条件较碱性炉差。当炉温高时,硅非但不氧化,反而被还原出来;锰在酸性炉



中氧化较完全；磷在氧化期完全不能氧化，因而氧化渣不扒除即可进入还原期。

(5)还原期。

酸性炉还原期的主要任务：

- 1)脱氧；
- 2)调整钢液的化学成分；
- 3)调整钢液的温度。

酸性电弧炉脱氧可用沉淀脱氧法，也可用扩散脱氧法。沉淀脱氧用锰、硅、铝等合金或复合脱氧剂。扩散脱氧用碳粉、硅钙粉等脱氧剂。

(6)出钢。

钢液脱氧良好，化学成分符合要求，温度达到出钢温度，即可出钢。有些合金，如钛、锆、钒、硼等，可在出钢时加入盛钢桶中。