

电弧炉炼钢 生产技术

赵文广 编著



化学工业出版社

电弧炉炼钢 生产技术

赵文广 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统地阐述了电弧炉炼钢的基本原理与工艺,内容包括电弧炉机械设备、电气设备、炉体构造与炉衬、原材料、冶炼工艺、电弧炉强化冶炼及节能技术、典型钢种的冶炼、安全生产知识等。

本书注重综合知识介绍,力求反映生产实际操作,并在增产节电方面做了较多的探讨,各章节相互连贯。本书可供从事电弧炉冶金生产、科研、教学和管理方面的科技人员参考,亦可作为大学相关专业高年级学生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电弧炉炼钢生产技术/赵文广编著. —北京: 化学工业出版社, 2010.1
ISBN 978-7-122-07382-2

I. 电… II. 赵… III. 电弧炉-电炉炼钢 IV. TF741.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第233125号

责任编辑: 丁尚林

文字编辑: 冯国庆

责任校对: 陶燕华

装帧设计: 史利平

出版发行: 化学工业出版社

(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

850mm×1168mm 1/32 印张9½ 字数217千字

2010年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 25.00 元

版权所有 违者必究

前 言

电弧炉炼钢流程由于在节能环保、循环经济等方面所特有的优势，在钢铁生产领域占据着重要地位。我国电弧炉工作者坚持自主创新，在现代电弧炉炼钢技术的理论研究及其工程应用等方面开拓进取，使得电弧炉炼钢技术沿着提高生产效率、简化工艺的方向发展，取得了很大成功，达到国际领先水平。

本书共分10章，重点阐述电弧炉炼钢过程的基本理论和工艺，主要内容包括电弧炉机械设备、电气设备、炉体构造与炉衬、原材料、冶炼工艺、电弧炉强化冶炼及节能技术、典型钢种的冶炼、安全生产知识等。结合我国电弧炉炼钢的现状和经验，以基本原理与实践相结合，着重叙述了电弧炉炼钢冶炼工艺和典型钢种的冶炼工艺，并在增产节电方面做了较多的探讨。为了能更好地反映现代电弧炉炼钢技术的进展，编写过程中参阅并吸收了大量的近期国内外资料，对偏心炉底出钢、氧燃烧嘴技术以及底吹气体搅拌技术等做了适当的叙述，力求简明扼要，通俗易懂。

本书可供从事电弧炉冶金生产、科研、教学和管理方面的科技人员参考，亦可作为大学相关专业高年级学生和研究生的教学参考书。

由于编者水平所限，书中不足之处在所难免，欢迎读者批评指正。

赵文广

内蒙古科技大学材料与冶金学院

2010年1月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 电弧炉炼钢技术的发展及现状.....	1
1.2 电弧炉炼钢的特点	6
第 2 章 机械设备	8
2.1 电弧炉主要机械设备	8
2.1.1 炉体的金属结构	8
2.1.2 电极夹持器及电极升降装置	13
2.1.3 炉体倾动机构	18
2.1.4 炉顶装料系统	21
2.2 电弧炉辅助装置	26
2.2.1 水冷装置	26
2.2.2 倾动平台与维修平台	28
2.2.3 排烟除尘装置	28
2.2.4 炉顶加料装置	33
2.2.5 补炉装置	34
第 3 章 电气设备	36
3.1 直流及交流电弧特性	36
3.2 交流电弧炉供电及电气设备的组成、作用	41
3.2.1 电弧炉的主电路	41

3.2.2	隔离开关和高压断路器	43
3.2.3	电炉变压器和电抗器	52
3.2.4	短网	56
3.2.5	测量、保护及信号装置	58
3.2.6	电极升降自动调节	61
3.2.7	配电操作	69
3.3	电弧炉炼钢的计算机控制	72
第4章	炉体构造与炉衬	76
4.1	电弧炉炉型结构及主要参数的确定	76
4.1.1	额定容量	76
4.1.2	熔池的形状和尺寸	76
4.1.3	熔炼室的形状和尺寸	78
4.1.4	炉盖的形状和尺寸	79
4.2	电弧炉炼钢使用的耐火材料	79
4.2.1	电弧炉对耐火材料性能的要求	79
4.2.2	电弧炉用耐火材料	80
4.2.3	电弧炉用绝热材料和黏结剂	82
4.3	炉衬损坏的原因及维护	83
4.3.1	耐火材料炉衬的损坏原因	83
4.3.2	炉衬的维护	84
第5章	原材料	87
5.1	钢铁料的要求及准备	87
5.1.1	废钢	87
5.1.2	生铁和软铁	88
5.1.3	各种铁合金和金属料	89
5.2	辅助材料的要求及准备	90

5.2.1	造渣材料	90
5.2.2	氧化剂	91
5.2.3	脱氧剂和增碳剂	91
5.3	电极的要求及使用	93

第6章 冶炼工艺 **95**

6.1	冶炼前的准备工作	95
6.1.1	配料	95
6.1.2	补炉	99
6.1.3	装料	100
6.2	熔化期	102
6.2.1	炉料的熔化及物化反应	102
6.2.2	熔化期造渣及去磷	106
6.2.3	缩短熔化期的措施	109
6.3	氧化期冶炼	116
6.3.1	氧化期的任务	116
6.3.2	氧化方法	117
6.3.3	脱磷	118
6.3.4	碳的氧化	125
6.3.5	脱碳和各项任务的关系	135
6.3.6	氧化期的造渣	138
6.3.7	氧化期操作要点	140
6.4	还原精炼与出钢	144
6.4.1	还原期的任务	144
6.4.2	脱氧	145
6.4.3	脱硫	154
6.4.4	还原期的炉渣	159
6.4.5	钢液的合金化	163

6.4.6	还原期温度的控制	168
6.4.7	还原期的操作要点	173
第7章	电弧炉强化冶炼及节能技术	177
7.1	偏心炉底出钢电弧炉	177
7.1.1	偏心炉底出钢电弧炉出现的技术背景	177
7.1.2	EBT 电弧炉的特点	177
7.1.3	EBT 电炉的冶炼工艺	179
7.2	电弧炉底吹气体搅拌技术	187
7.2.1	底吹气体系统结构特点	187
7.2.2	底吹搅拌的冶金特点	187
7.2.3	底吹气体的搅拌效果	188
7.3	电弧炉氧-燃烧嘴技术	189
7.3.1	概述	189
7.3.2	燃烧嘴的助熔原理	190
7.3.3	氧-燃烧嘴	194
7.3.4	富氧操作	200
7.4	电弧炉余热利用技术	201
7.5	电弧炉炼钢节能技术	202
第8章	典型钢种的冶炼	205
8.1	合金结构钢冶炼	205
8.1.1	合金结构钢的用途与分类	205
8.1.2	20CrMnTi 钢的冶炼	207
8.1.3	38CrMoAl 钢的冶炼	210
8.2	高速钢冶炼	213
8.2.1	高速钢的性能和化学组成	213
8.2.2	高速钢的冶炼要点	216

8.2.3	高速钢的主要质量问题及改进措施	219
8.3	不锈钢的冶炼	220
8.3.1	不锈钢的性能、用途和分类	220
8.3.2	不锈钢的腐蚀和防护	221
8.3.3	不锈钢中合金元素的作用	222
8.3.4	铬镍不锈钢的冶炼方法	223
8.4	轴承钢的冶炼	230
8.4.1	滚动轴承钢的用途和性能要求	230
8.4.2	滚动轴承钢中主要合金元素的作用	231
8.4.3	滚动轴承钢的冶炼要点	232
8.4.4	滚动轴承钢的主要质量问题及改进措施	233
8.5	高锰钢的冶炼	235
8.5.1	高锰钢的化学成分	235
8.5.2	高锰钢中主要合金元素的作用	236
8.5.3	高锰钢的冶炼工艺要点	244
8.5.4	返回法冶炼高锰钢工艺要点	247
8.5.5	冶炼因素对高锰钢质量的影响	249
第9章	安全生产	258
9.1	安全生产的职业规范	258
9.1.1	加料	258
9.1.2	吹氧	259
9.1.3	搅拌	261
9.1.4	取样	261
9.1.5	测温	262
9.1.6	炉体倾动	263
9.1.7	除渣	263
9.1.8	堵塞和打开出钢口	264

9.1.9	出钢槽的修补	265
9.1.10	炉门口的维护	265
9.1.11	接电极和松电极	266
9.1.12	估碳	267
9.1.13	烟火的观察	267
9.2	操作中的安全问题	268
9.3	常见事故的类型及防止措施	269
9.3.1	漏钢（或漏渣）	270
9.3.2	漏水	271
9.3.3	塌炉盖	272
9.3.4	塌炉墙	273
9.3.5	翻炉底	273
9.3.6	出钢口跑钢	274
9.3.7	断电极	274
9.3.8	电极夹持器失灵	275
第 10 章	技术经济指标	277
10.1	电弧炉能量的来源及支出	277
10.1.1	电弧炉能量来源	277
10.1.2	电弧炉能量支出	278
10.1.3	电弧炉能量平衡	281
10.2	电弧炉炼钢技术经济指标	281
10.2.1	产量方面技术经济指标	281
10.2.2	质量方面技术经济指标	282
10.2.3	品种方面技术经济指标	283
10.2.4	材料消耗方面技术经济指标	283
	参考文献	285

第 1 章

概述

1.1 电弧炉炼钢技术的发展及现状

19 世纪后半叶，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(Williams Siemens)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个电极。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。这种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。20世纪60年代出现了超高功率电弧炉,80年代开发了直流电弧炉。

20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。此期间电炉炼钢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20余年,全世界电炉炼钢取得了突飞猛进的发展。20世纪80年代中期,欧洲各国、美国、日本、韩国、马来西亚等国家和中国台湾地区纷纷建设超高功率电炉-炉外精炼-连铸-连轧“四位一体”的短流程生产线,电炉钢比例与日俱增,2000年全世界电炉钢产量占粗钢产量的33%,表1-1中列出了近70年来电炉钢占世界粗钢产量的比例。

表 1-1 电炉钢占世界粗钢产量比例

年份	1940年	1950年	1960年	1970年	1980年	1990年	2000年	2010年
比例/%	2.3	6.9	9.7	13.8	20.5	28.4	33	35(估计值)

10年来,我国在现代电炉炼钢技术方面取得了长足进步,主要体现如下方面。

(1) 实现了炉子容量大型化

形成了电炉冶炼→炉外精炼→连铸或电炉冶炼→炉外精炼→连铸→连轧的现代化电炉流程群体。1992年我国电炉基本上是小炉子,平均炉容量为4.6t/台。1995年全国共有电炉1561台,



2000 年仅为 179 台, 大批小炉子被淘汰。目前, 我国有容量为 60~150t 的大电炉 34 台, 大于 100t 的 14 台, 其生产速率能够满足连铸要求。2000 年, 我国共产电炉钢 2020 万吨, 其中由 50t 以上电炉生产的为 1241 万吨, 占电炉总产钢量的 61%。

(2) 电炉生产技术经济指标大幅度提高

不少钢厂在冶炼周期、电耗、电炉利用系数、生产率等方面已进入国际先进甚至国际领先行列, 60~150t 炉子生产率超过 $8000\text{t}/(\text{t} \cdot \text{a})$ 的已有 16 座, 其中 7 座超过 $10000\text{t}/(\text{t} \cdot \text{a})$, 与同容量转炉水平相接近。2003 年, 安钢 100t 烟道竖炉电炉在加 25% 铁水 (因铁水供应量限制) 条件下的技术经济指标为: 冶炼周期平均 41min, 最短 30min, 送电平均 31min, 最短 27min, 竖炉作业率 $>92\%$, 热停率 $<115\%$, 最高班产 13 炉, 最高日产 37 炉, 3970t, 最高月产 103673t, 年产钢 1081278t, 利用系数 $3212\text{t}/(\text{t} \cdot \text{d})$, 最高 $3917\text{t}/(\text{t} \cdot \text{d})$, 电耗平均 $222(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{t}$, 最低 $160(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{t}$, 氧耗平均 $41\text{m}^3/\text{t}$, 电极消耗平均 $1.5\text{kg}/\text{t}$, 最低 $1.3\text{kg}/\text{t}$ 。1990~2003 年我国钢产量及电炉钢产量见表 1-2。

表 1-2 近年来中国电炉钢增长情况

年份	1990 年	1992 年	1994 年	1996 年	1998 年	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年
年钢产量/万吨	6535	8093	9261	10124	11459	12395	12850	15163	18244	22234
年电炉钢产量/万吨	1401.5	1762.6	1966.1	1893.2	1814.3	1947.2	2020	2400.5	3048.9	3235
电炉钢比例/%	21.4	21.8	21.2	18.7	15.8	15.7	15.7	15.8	16.7	14.6

(3) 在引进和消化吸收国外先进技术的基础上有所创新

这些创新推动了我国现代电炉炼钢技术及电炉钢生产的快

速发展。

国内外电炉炼钢技术发展趋势主要概括为以下几点。

① 超高功率直流电弧炉具有电极消耗低、节电且对渣线耐火材料侵蚀小等特点，是世界范围内电炉发展的总趋势。并且要充分利用超高功率电弧炉的一些强化冶炼技术，提高电炉生产能力，逐步缩小与转炉出钢周期的差距，达到电炉转炉化的水平。随着功率级别的提高和炉子大型化，更大的电流操作运行和对电网的冲击成为超高功率电弧炉的重要限制条件。对此，近年来出现了高阻抗电弧炉技术，其电气运行特征是高电压、长弧、低电流的操作，优点是操作稳定、对电网冲击小、实际熔化速率高、电极消耗减少等。

② 尽可能地利用电炉冶炼废热和化学能，发展废钢预热及烟气二次燃烧技术。竖式电炉不仅在生产率、能量利用、环境适用性及炉料灵活性等方面占有优势，而且实现电炉炼钢的连续化，是目前最有发展前途的电炉。但其设备结构的复杂性以及其产生的二噁英等问题也是值得注意并有待解决的。

③ 用初级能源代替电能，采用氧燃烧嘴助熔技术，可以降低电耗、降低生产成本、缩短冶炼时间，尤其是煤-氧助熔技术更有发展前途。

④ 扩大铁源应用范围，除废钢外广泛应用 DRI、HBI、碳化铁、高炉铁水、熔融还原铁、生铁块等灵活配比，以适应不同地区的原料供应状况。

⑤ 电炉炼钢应逐步趋向连续化操作，改善劳动条件，提高设备的利用率。为了提高生产率，必须缩短出钢的时间，增大输入功率，扩大炉容量，简化工艺。无论从提高生产率，还是从改善质量出发，传统的熔化、氧化、还原三段式工艺已不能适应，必须配以炉外精炼，更何况还必须与连铸机相匹配。所有电弧炉炼钢技术的现代化都环绕着这个中心在发展。



⑥ 采用 PLC 及 DCS 的控制系统，特别是基于 PC 的分布式控制系统，以提高基础自动化水平。应用网络化的分级计算机系统(以开放的大型数据库软件技术为支撑)，实现生产信息及数据的大规模采集、分析、传输与共享，实现过程控制及生产管理。

目前，虽然我国部分电炉钢厂采用了各项国际先进技术，但面临着国际钢铁业的竞争和国际市场的疲软，我国电炉生产仍存在以下 6 大问题。

① 生产能力布局不平衡 从总体看，我国电炉生产线的工艺技术落后，工序之间衔接不紧凑，不适应现代电炉炼钢流程高效生产的要求。在已经建成投产的电炉钢厂中，除了少数几条全流程引进了超高功率电炉-炉外精炼-连铸-连轧生产线外，一些电炉厂建设时只是逐步投入各工序的设备，不能做到全流程的优化和高效、紧凑，严重制约了全流程生产能力的发挥。

② 电弧炉容量小、装备水平低 在我国，达到经济规模容量的电弧炉台数并不多，相当一部分的电弧炉容量低于 50t，不仅造成电炉炼钢能耗高、污染大、质量低，也造成无法进行高效的生产过程衔接。我国电弧炉的装备水平远落后于欧洲、美国、日本等先进国家和地区，特别是控制水平(包括软硬件)上差距更大。此外，在有载切换开关、液压系统等方面与国外相比也有相当大的差距。

③ 电炉配套技术不完善 主要表现在强化用氧方面，如氧燃烧嘴、机械手超音速氧枪及二次燃烧等在国内大多数钢厂没有被采用，即使有少数采用的，效果也远不理想。而作为现代化的电炉必需的水冷炉壁和炉盖、偏心炉底出钢等也未广泛使用。

④ 废钢紧张 我国是世界上钢铁积累量最少的国家之一，同时钢铁产品报废周期长，再加上电炉炼钢短流程的迅猛兴

起,致使废钢供应严重不足,并且废钢中杂质也较多,废钢加工能力也不足,造成冶炼时的电耗增加和电炉钢成本的提高。因此,有必要发展电炉兑铁水、加废钢代用品(直接还原铁、海绵铁、碳化铁等)等技术。

⑤ 产品质量差 我国电炉钢厂虽然生产品种多,但大多是较低档的产品,对质量要求高的产品仍需进口。这样就出现了一方面钢厂的钢材销售不畅;另一方面每年仍进口大批钢材的局面。提高产品质量,实现产品的升级换代是电炉钢厂面临的紧迫任务。

⑥ 污染严重 我国大多数电炉污染严重、环保水平低。大部分电炉没有除尘设施或虽有效果也不尽理想,废气烟尘直接排空。由于缺乏相应设备,炉气余热未能利用,能源浪费极为普遍。

要解决电炉炼钢技术在中发展中所遇到的问题,必须依靠技术进步,实现科学炼钢。要依靠钢厂和设备制造商之间通力合作以及拥有一支训练有素、经验丰富的操作人员队伍。工艺技术设备日益老化的电炉炼钢车间进行现代化改造,则是钢铁工业部门面临的技术挑战,即把现存电炉炼钢车间改造成为现代化、生产成本低电炉炼钢车间,是 21 世纪赋予钢铁工业部门的重大历史使命。培训一支素质高、技术精的电炉炼钢车间操作人员队伍来处理 and 掌握最新工艺技术是取得成功的关键所在。

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 40000℃ 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℃ 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，比转炉炼钢的热剪率高。

(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，熔炼从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体，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，使炉内空气和水汽大量离解，而溶入钢液中，因而电炉钢中氢和氮含量比转炉钢高。