

石墨电极

生产

李圣华 编著

SHIMO DIANJI
SHENGCHAN

冶金工业出版社

991579

石墨电极生产

李圣华 编著

北 京
冶金工业出版社
1997

图书在版编目(CIP)数据

石墨电极生产/李圣华编著. —北京: 冶金工业出版社,
1997. 11

ISBN 7-5024-2101-7

I. 石… II. 李… III. 石墨-电极-生产工艺 IV. TM
910.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 16198 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

北京怀柔东茶坞印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销
1997 年 11 月第 1 版, 1997 年 11 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 15.125 印张; 403 千字; 471 页; 1-3500 册

28.00 元

前 言

石墨电极是电炉炼钢或其他电冶金行业的重要导电材料,随着电炉炼钢和其他电冶金行业的发展,石墨电极生产已经成为国民经济中不可缺少的部门之一,20 世纪 90 年代初,全世界石墨电极年产能力已经达到 140 万 t 左右,中国石墨电极年产能力也达到 20 万 t 以上。由于电炉炼钢工业的技术发展很快,高功率电炉、超高功率电炉和直流电炉的不断普及,对石墨电极的规格和质量要求越来越高。工业发达国家的电炉钢厂,中小型电炉已基本淘汰,以炉容为 80~150t 的高功率或超高功率电炉代之,直流电炉也是按高功率或超高功率设计的,因此大量使用的是直径 550~700mm 的高功率或超高功率石墨电极。进入 20 世纪 90 年代以来,中国电炉钢厂也加速了技术改造步伐,到 1995 年底,中国电炉钢厂已拥有 50~150t 高功率和超高功率电炉 20 多座,“九五”期间,还将有一批高功率或超高功率电炉投产,因此对大规格的高功率或超高功率石墨电极的需要量越来越大,大量生产大规格高功率或超高功率石墨电极已经成为中国炭制品行业的重要任务。

最近十多年,中国石墨电极生产发生了很多变化,生产能力增加很快,1995 年中国实际生产各类石墨电极 21 万多 t,其中高功率和超高功率石墨电极产量占 20%。为了适应发展品种和提高生产效率、节约能源的需要,从“六五”到“九五”,中国很多炭素厂都增加了技术改造投资,加快了技术改造进度,引进了一些新设备,加上国内研制的新设备,中国几个大型炭素厂的装备水平有了明显提高。中国炼油厂经过努力,也在 1995 年开始生产针状焦,生产高功率和超高功率石墨电极所需的原料正在得到解决。国内几所大学、科研单位和工厂研究所对生产高功率和超高功率石墨电极也进行了大量的研究工作,取得了丰硕成果,为中国石墨电极工业的进一步发展奠定了技术基础。在中规格超高功率石墨电极批量

AD58/11

生产以后,大规格超高功率石墨电极正在研制中,预计在“九五”期间将进入批量生产。中国即将成为高质量石墨电极的生产大国,不仅可满足国内需要,并将大量出口,参与国际市场竞争。

为了适应中国石墨电极生产厂广大干部、技术人员和技术工人的学习需要,作者在过去编写《炭和石墨制品》(1984年冶金工业出版社出版)的基础上,收集和整理国内外有关资料编写了这一本专门介绍石墨电极生产的书,并直接取名为《石墨电极生产》。全书共十八章,本书以叙述石墨电极的性质、使用和生产工艺为主,同时介绍炭制品生产的有关设备,为了适应加强炭素厂管理工作的需要,最后四章介绍炭素厂的质量管理、技术经济效果指标管理、设备管理和能源管理。作者希望本书的出版能对许多从事石墨电极生产的有关人员有所帮助。由于本书介绍的许多工艺和设备是炭制品行业通用的,因此本书对从事其他炭制品生产的有关人员也会有所裨益。作者虽然在吉林炭素厂工作了40年,积累了一定经验,但还是水平有限,书中不免有疏漏或错误之处,敬请读者批评指正。

李圣华

1997年于吉林炭素厂

目 录

第一章 电炉炼钢与石墨电极生产	1
第一节 电弧炉与电炉炼钢.....	1
第二节 石墨电极的品种.....	7
第三节 石墨电极的生产特点和工艺流程	13
第四节 其他类别的电弧炉用导电电极	15
第五节 国内外石墨电极生产状况及主要生产厂	18
第二章 石墨电极的连接、受力状况和消耗机理	21
第一节 电极连接的两种类型和两种接头形状	21
第二节 电极连接时的受力	26
第三节 拧紧力矩和防止松动措施	32
第四节 电极的消耗机理	34
第五节 电炉钢厂使用石墨电极应注意事项	38
第三章 炭质原料和石墨电极的物理化学性质	39
第一节 真密度	39
第二节 密度	40
第三节 孔隙率	42
第四节 机械强度	43
第五节 弹性模量	46
第六节 电阻率	49
第七节 热导率	53
第八节 线膨胀系数	56
第九节 抗热震性	60
第十节 灰分	63
第十一节 抗氧化性	65
第十二节 石墨化程度	68

第四章 生产石墨电极的原材料(一)	72
第一节 石油焦	72
第二节 沥青焦	86
第三节 冶金焦	91
第四节 硅石和硅砂	93
第五章 生产石墨电极的原材料(二)	95
第一节 粘结剂的功能和分类	95
第二节 煤沥青	97
第三节 浸渍剂特性和分类	110
第四节 添加剂	114
第六章 煅烧	118
第一节 煅烧目的	118
第二节 石油焦在煅烧过程中的物理化学变化	119
第三节 煅烧质量指标	123
第四节 煅烧设备类型与工艺操作	125
第七章 骨料和粉料的准备	137
第一节 物料粉碎的一般概念	137
第二节 各类破碎和磨粉机械简述	141
第三节 骨料筛分	155
第四节 筛分设备	157
第五节 粉碎筛分流程	162
第八章 配料	165
第一节 原料的选择	165
第二节 炭素颗粒料的性质	170
第三节 粒度组成的确定	175
第四节 粘结剂的使用	183
第五节 配料单和实际工作配方	186
第六节 配料设备	190
第九章 混捏	197
第一节 沥青对炭质材料颗粒的粘结	197

第二节	混捏设备	203
第三节	混捏设备的加热方式	212
第四节	混捏工艺	215
第五节	混合均匀度的检查	216
第十章	成型	218
第一节	炭糊的力学性质	218
第二节	挤压成型和振动成型	223
第三节	挤压型嘴曲线和压缩比	233
第四节	成型中生坯膨胀与真空排气	239
第五节	生坯缺陷类型及其原因	241
第十一章	焙烧	244
第一节	焙烧过程	244
第二节	焙烧温度制度	248
第三节	焙烧设备和工艺	256
第四节	焙烧填充料	274
第五节	二次焙烧	278
第六节	环式炉、隧道窑、车底式炉热能利用的比较	284
第七节	沥青偏析	287
第八节	焙烧品缺陷类型及其原因	288
第十二章	浸渍	291
第一节	炭制品的孔隙率与孔隙性质	291
第二节	浸渍生产系统	295
第三节	浸渍车间其他设备	307
第四节	浸渍工艺	314
第五节	浸渍质量的检查	319
第十三章	石墨化	321
第一节	石墨化机理	321
第二节	石墨化炉	329
第三节	装炉工艺	339
第四节	电阻料与保温料	345

第五节	供电设备	349
第六节	供电操作	359
第七节	内热串接石墨化炉的装炉与通电	365
第八节	石墨化炉炉温分布与温度的测量	370
第九节	石墨化炉的物料平衡、热平衡和电平衡	374
第十节	石墨化品缺陷类型及其原因	377
第十四章	石墨电极机械加工	380
第一节	电极加工特点和加工精度	380
第二节	加工设备	384
第三节	加工刀具的种类和使用	390
第四节	电极加工工艺	399
第五节	量具的种类和使用	404
第六节	电极加工后缺陷类型及处理	413
第十五章	炭素厂的质量管理	415
第一节	牢固树立“质量就是企业生命”的观念	415
第二节	提高石墨电极质量的两个关键问题	418
第三节	提高成品率	422
第四节	提高炭素制品质量及成品率的主要途径	425
第五节	重视科学研究	432
第十六章	炭素厂的经济效果指标管理	436
第一节	技术经济指标	436
第二节	经济效益指标	444
第三节	企业经济活动分析	446
第十七章	炭素厂的设备管理	449
第一节	设备管理的主要任务	449
第二节	炭素厂设备的特点	451
第三节	考核设备管理的主要指标	452
第四节	炭素厂设备管理工作的几项有效措施	453
第十八章	炭素厂的能源管理	457
第一节	炭素厂节约能源的潜力	457

第二节	新建炭素厂节约能源要从设计开始·····	459
第三节	老厂节约能源应从技术改造入手·····	463
第四节	加强能源管理的日常工作·····	468
主要参考文献	·····	471

第一章 电炉炼钢与石墨电极生产

石墨电极是使用石油焦、沥青焦为颗粒料,煤沥青为粘结剂,经过煅烧、破碎、配料、混捏、成型、焙烧、石墨化和机械加工而制成的一种耐高温的石墨质导电材料,称为人造石墨电极(简称石墨电极),以区别于使用天然石墨为原料生产的天然石墨电极。石墨电极是电炉炼钢的重要高温导电材料,通过石墨电极向电炉输入电能,以电极端部和炉料之间产生的高温电弧为热源,使金属熔化进行炼钢生产,其他一些电冶炼设备(如埋弧电炉)也常使用石墨电极为导电材料。1995年全世界消耗石墨电极1100kt左右,中国1995年消耗石墨电极约200kt。利用石墨电极优良的物理化学性能,在其他工业部门中也有广泛的用途,目前以生产石墨电极为主要品种的炭制品工业已经成为当代原材料工业的重要组成部分。本章将介绍电弧炉与电炉炼钢、石墨电极的品种、石墨电极的生产特点及工艺流程、各种类别的电弧炉用导电电极、国内外石墨电极生产状况及主要生产厂等内容。

第一节 电弧炉与电炉炼钢

一、电弧炉与导电材料

电弧是两电极端头间的气体放电现象,利用电弧的热效应熔炼金属或其他物料的电炉称为电弧炉,电弧炉能量集中,可以达到很高的温度(摄氏数千度),电弧产生热量可以看作是弧阻产生热量,由于弧阻值比较小,为了得到需要的热量,必须通过相当大的工作电流,工作电压不高但工作电流很大是电弧炉的特点。在数千度的温度下,只有炭质或石墨质材料能作为电弧炉的导电材料,因为炭质或石墨质材料不仅电阻率比较低,而且在3000℃的温度下仍能维持较高的机械强度不软化,也不会熔化,只是在石墨材料表面碳直接升华为气态。

电弧炉有直接加热电弧炉和间接加热电弧炉两种类型,直接加热电弧炉为电弧在电极与物料之间产生,直接加热物料,炼钢用三相电弧炉是最常用的直接加热电弧炉。间接加热电弧炉电流不通过被加热物体,主要靠电弧辐射的热量加热周围的材料,近代电弧炼钢炉主要使用石墨电极作为导电材料。利用电弧直接加热熔炼金属或其他物料的电炉还有一种埋弧电炉,亦称还原电炉或矿热电炉,电极一端埋入物料内,在料层内形成电弧,并利用料层自身的电阻发热加热物料,由于埋弧电炉通过电极的电流密度较低,因此埋弧电炉可以使用炭电极或连续自焙电极。20 世纪 80 年代起中国很少生产炭电极,冶炼大部分铁合金或生产电石(碳化钙)等的埋弧电炉多使用连续自焙电极(电极糊焙烧成炭电极),中国生产工业硅、黄磷、刚玉、低碳铬铁、金属锰等产品的埋弧电炉多数使用石墨电极。

现代炼钢所用的三相交流电弧炉(图 1-1),是按照法国人埃鲁于 1888~1892 年研制成功的直接加热电弧炉的原理制造的,电

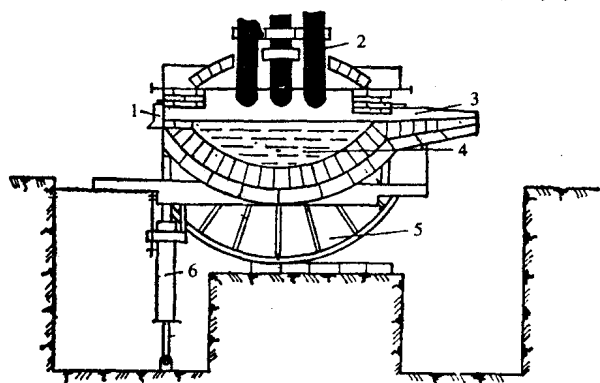


图 1-1 三相交流电弧炼钢炉示意图

1—炉门;2—石墨电极;3—出钢口;4—熔池;5—倾炉摇架;6—倾炉用液压缸

弧炼钢炉的炉体由炉盖、炉门、出钢槽和炉身组成,三根炭电极或石墨电极按等边三角形布置穿过炉盖上的电极孔插入炉膛,并由一台炉用变压器通过电缆、电极把持器向电极供电,使电极末端与金属炉料之间产生电弧,将电能转化为加热炉膛和熔化钢水所需

的热能。电弧炼钢炉生产灵活性大,炉内气氛可进行调节,对熔炼含有易氧化元素较多的钢种极为有利,多数牌号的合金钢主要用电炉生产。

二、世界电炉炼钢的发展

电炉炼钢厂建设周期短,建设规模灵活性大,吨钢单位投资较低,更重要的是全世界废钢数量越来越多,电炉炼钢以废钢为主要原料,而氧气转炉吃废钢有一定比例。电炉炼钢能耗较低,仅为高炉-转炉流程的50%左右。20世纪70年代以后,世界上能耗高、效率低的平炉炼钢逐步淘汰,氧气转炉和电炉炼钢的比例不断上升。随着电炉设备的改进,电力供应不断增加,电炉炼钢技术的发展,电炉钢生产成本不断降低。20世纪80年代开始,电炉不仅用于冶炼合金钢,而且大量用于冶炼普通钢。有的国家炼钢工业以电炉为主,如意大利1990年电炉钢占该国钢总产量的50%以上,特别是东南亚地区的许多发展中国家,如菲律宾、泰国、新加坡全部生产电炉钢,印度尼西亚电炉钢比例为65%。美国电炉钢发展也很快,1990年电炉钢占该国钢总产量的36.8%。电炉钢在国际钢总产量中的比例不断提高,1990年已达到27.5%,预计到20世纪末将接近30%。自1960年以来,世界电炉钢产量及其在钢总产量中的比例见表1-1。

表 1-1 世界电炉钢产量及其在钢总产量中的比例

项 目	1960 年	1970 年	1980 年	1985 年	1990 年	2000 年预测
钢总产量/万 t	34595	59991	71600	71700	77000	87460
电炉钢产量/万 t	3455	8519	15752	16640	21154	25400
电炉钢比例/%	9.99	14.2	22.0	23.2	27.5	29.04

20世纪70~80年代世界电炉炼钢技术重要发展有三方面:

1. 电炉大型化。表现在电炉平均炉容的增大,不一定是新建电炉越来越大。国外许多电炉钢厂通过技术改造,折除了陈旧的中小型电炉,以一个炼钢车间只设一座80~150t的现代化大电炉而代之。炉容为150t以上的大电炉也有,但为数不多,并且多数炼钢车

间将熔化与精炼分开,另设一台相应容量的精炼炉(也是电弧炉),钢水熔化后倒入精炼炉进行成分调整,因此生产效率大大提高。

2. 高功率和超高功率炼钢技术的普及。电炉的功率水平按每吨炉容配备的变压器容量分为三个档次,即普通功率、高功率和超高功率。20 世纪 80 年代初工业发达国家普通功率电炉基本淘汰,美、日、英、德国及意大利等国,超高功率电炉占 50% 以上,其余是高功率电炉。单位炉容的变压器容量不断提高,20 世纪 80 年代初期国外超高功率电炉每吨炉容已达到 $600 \sim 800 \text{ kV} \cdot \text{A}$,80 年代中期每吨炉容又提高到 $1000 \text{ kV} \cdot \text{A}$,80 年代末出现了每吨炉容 $1100 \sim 1200 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 的超高功率电炉,因此每炉次熔化时间不断缩短,电耗下降,石墨电极单耗也相应减少。表 1—2 列举 20 世纪 80 年代中期典型的交流超高功率电炉技术经济指标。

表 1—2 交流超高功率电炉技术经济指标

比较水平	电炉公称 容量/t	每 t 炉容的变压 器容量/ $\text{kV} \cdot \text{A}$	每次熔化 时间/min	电耗/ $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1}$	石墨电极消耗/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
一般水平	50~100	800	90	420~500	4~4.5
先进水平	150	1000	70	350	2.55

3. 直流电弧炉的发展。自从 1971 年瑞典通用电气公司研制直流电炉以来,20 世纪 80 年代工业发达国家加快了直流电弧炉在炼钢方面的开发利用,到 90 年代初期已建成直流炼钢电炉 40 多座。同样是采用超高功率技术的直流电炉与相同容量的交流电炉比较有更多的优点,如噪音低、弧焰稳定、炉衬寿命长、熔池温度分布及钢水成分更为均匀,电耗可下降 5%~10%。特别是只用一根大直径石墨电极的直流电炉和使用三根电极的同功率三相交流电炉比较,由于电极氧化面积减少一半左右,因此石墨电极消耗比同容量的交流电炉相应下降,国外大型直流超高功率电炉每吨钢的石墨电极消耗已降低到 1.6kg 左右。

三、中国电炉炼钢的现状与发展动向

中国电炉钢比例一直比较高,1978 年已达到 18.9%。进入 80

年代以来,与世界钢铁工业的发展趋势一样,中国电炉钢产量以每年 8.75% 的速度增长,超过了同期钢总产量的增长速度(7.5%)。中国电炉钢近 20 年来的发展情况见表 1—3。1993 年中国电炉钢产量达到 20750kt,占当年钢总产量的 23.2%。但中国电炉钢厂多数为中小型电炉,20 世纪 80 年代末特殊钢厂的电炉平均炉容只有 17.8t,单位炉容的变压器容量平均只有 220kV·A,基本上相当于发达国家 60 年代的水平,80 年代中国建成近十座 40~70t 的高功率电炉。进入 90 年代以来,中国加快了电炉钢厂的技术改造,先后引进一批高功率或超高功率大型电炉,其中包括直流电弧炉,尤其在 1993~1995 年,继舞阳钢厂 90t 电炉及天津无缝钢管厂 150t 大电炉投产以后,又有沙洲钢厂 90t 电炉和涟源钢厂 60t 直流电炉、上钢三厂的 100t 直流电炉相继投入生产。到 1995 年末,中国有 30~45t 电炉 40 余座,50t 以上电炉 20 余座,大中型炼钢电炉生产能力约占电炉钢总生产能力的 30%~40%,从而初步改变了中国电炉钢厂以 20t 以下小炉群为主体的落后局面。中国电炉炼钢厂还加快了直流电炉的建设,预计到 2000 年,中国将拥有 10 座以上 80~150t 大型直流电弧炉。

表 1—3 中国电炉钢产量及在钢总产量中的比例

项 目	1978 年	1980 年	1985 年	1988 年	1990 年	1993 年	1994 年
钢总产量/万 t	3178	3712	4679	5944	6635	8952	9261
电炉钢产量/万 t	601	710	1008	1206	1402	2075	1996
电炉钢比例/%	18.9	19.1	21.5	20.3	21.1	23.2	21.6

1994 年末中国电炉钢会议确定了中国电炉炼钢行业的发展政策,今后将以 60~100t 容量的电炉为主体,在改造、引进和新建项目中,严格限制小于 60t 容量电炉的建设,加速中小电炉的淘汰。交流电炉改造为直流电炉,普通功率改高功率或超高功率的电炉改造项目,均需结合实际考虑扩容,并坚持减少中小电炉的原则。20 世纪末中国电炉钢产量占钢总产量的比例将提高到 30% 左右,接近 1990 年美国电炉钢占钢总产量 36.8% 和日本占 31.4%

的水平。中国电炉钢行业的发展趋势将对炭制品行业的石墨电极生产带来深远的影响,从品种上看,电炉钢厂对普通功率石墨电极需求将逐步减少,高功率和超高功率石墨电极需要量将相应增加,从规格上看,中小规格需要量(直径 400mm 及其以下)不断减少,大规格(直径 450mm 及其以上)将逐年上升,1995 年以后直径 600~700mm 的超高功率石墨电极的使用比例将有较大幅度的增加。

中国炭素厂生产的石墨电极不仅大量用于电炉炼钢,一部分铁合金(如低碳铬铁)也用电弧炉生产,还有相当一部分石墨电极使用于生产工业硅、黄磷、磨料等行业,特别是中国电炉生产黄磷发展很快,一部分生产黄磷的电炉也使用大规格高功率或超高功率石墨电极。生产硬质合金、石英玻璃也消耗一定数量的石墨电极,而且这些行业石墨电极单耗都比较高,20 世纪 90 年代初期生产上述产品每年消耗石墨电极 30~40kt,约占每年石墨电极总需要量的 20%~25%,其中多数为直径 350~500mm 的普通功率石墨电极,所以在今后相当长的一段时期内,普通功率石墨电极还有一定市场。表 1-4 为 1993 年中国石墨电极的实际销售情况和 2000 年的消耗量预测,表 1-5 为 2000 年中国高功率和超高功率石墨电极所需规格的预测。

表 1-4 中国 1993 年石墨电极的实际销售情况和 2000 年的预测

项 目	1993 年实际消耗量/万 t	2000 年需要量预测/万 t
石墨电极实际消耗量	19	24~27
其中:高功率电极	2.1	4.0~5.0
超高功率电极	0.9	4.0~5.0
消耗石墨电极行业分类		
1. 电炉炼钢	14.73	18~19
2. 工业硅	1.9	2.4
3. 磨料	0.5	0.8
4. 黄磷	0.5	1.2
5. 其他	1.0	1.4

表 1—5 2000 年中国高功率和超高功率石墨电极所需规格的预测

超高功率石墨电极		高功率石墨电极	
规格/mm	所占比例/%	规格/mm	所占比例/%
直径 700	20	直径 600	20
直径 650	5	直径 550	10
直径 600	45	直径 500	30
直径 550	10	直径 450	10
直径 500	15~18	直径 400	30
直径 400~450	3~5		

第二节 石墨电极的品种

一、三种不同功率炼钢电炉使用的石墨电极

20 世纪 80 年代初期国外把电弧炼钢炉按每吨炉容的变压器容量大小分为 3 类:普通功率电炉(RP 炉)、高功率电炉(HP 炉)和超高功率电炉(UHP 炉)。20t 以上的普通功率电炉每吨炉容的变压器容量一般为 $300\text{kV} \cdot \text{A}$ 左右,高功率电炉为 $400\text{kV} \cdot \text{A}$ 左右。40t 以下的电炉每吨炉容的变压器容量达到 $500 \sim 600\text{kV} \cdot \text{A}$ 、50~80t 的电炉达到 $400 \sim 500\text{kV} \cdot \text{A}$,100t 以上的电炉达到 $350 \sim 450\text{kV} \cdot \text{A}$,称之为超高功率电炉。到了 20 世纪 80 年代中期,国外经济发达国家大量淘汰 50t 以下的中小型普通功率电炉,新建的电炉多数是 80~150t 的高功率或超高功率大电炉,每吨炉容的变压器容量提高到 $800\text{kV} \cdot \text{A}$,80 年代后期一部分超高功率电炉又进一步提高到 $1000 \sim 1200\text{kV} \cdot \text{A}$ 。根据电炉炼钢功率水平的分级,使用的石墨电极也相应分为 3 个品种:即普通功率石墨电极(代号为 RP 级)、高功率石墨电极(代号为 HP 级)和超高功率石墨电极(代号为 UHP 级)。高功率和超高功率电炉使用的石墨电极通过的电流密度明显增大,结果产生下列问题:1. 因电阻热和灼热气流导致电极温度升高,使得电极及接头的线膨胀量都增加了,同时电极的氧化消耗也提高了。2. 电极中心部位和电极外圆的温度差增大了,由温度差引起的热应力也相应提高,电极容易产生裂纹和表面剥落。3. 电炉功率提高后导致电磁作用力增加,引起剧烈的