

直流电弧炉 炼钢技术

朱应波

宋东亮 曾昭生 孟宪勇 胡克畏 编著

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了直流电弧炉炼钢技术。首先回顾了直流电弧炉的发展史；然后讲解了有关直流电弧炉炼钢的基础理论：直流电弧的物理特性、电气特性、运动特性、传热特性，以及直流电弧炉炼钢中泡沫渣、电解反应和搅拌特点；论述了直流电弧炉的关键技术：石墨电极、炉底电极、整流供电和偏弧纠正；还翔实地介绍了德、法、瑞士等欧洲国家直流电弧炉技术在世界各国炼钢工业的实际应用；最后对直流电弧炉进行了评价和展望。

本书可供冶金领域的工程技术人员、科技管理干部使用，也可供高等院校有关专业的师生阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

直流电弧炉炼钢技术/朱应波等编著. — 北京: 冶金工业出版社, 1997.5

ISBN 7-5024-2072-X

I. 直… II. 朱… III. 直流—电弧炉—炼钢 IV. TH741.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 10872 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

北京昌平百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1997 年 8 月第 1 版, 1997 年 8 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 17 印张; 455 千字; 544 页; 1—2000 册

30.00 元

《直流电弧炉炼钢技术》编委会

主任委员	宋东亮				
副主任委员	曾昭生	孟宪勇			
顾问	王建英	刘嘉禾	杨 栋	林慧国	
主编	朱应波				
委员	宋东亮	曾昭生	孟宪勇	朱应波	
	胡克畏	傅长令	马志强	祖荣祥	
特约责任编辑	陈 菡	王征林			

序

电弧炉炼钢已有近百年的历史，一直是优质钢、特殊钢和特种合金的主要冶炼手段。电弧炉有交流电弧炉和直流电弧炉之分；而直流电弧炉又包括直流炼钢电弧炉、直流矿热炉和直流钢包炉。本书全面介绍与直流炼钢电弧炉有关的基础理论知识和关键技术，以及国内外发展情况与展望。

直流电弧炉炼钢技术的研究始于 19 世纪 70 年代，限于当时的技术条件，不可能制造大功率高效整流设备，因此直流电弧炉的炉容量很小，长期以来使生产应用受到限制。而三相交流电弧炉在近百年的电弧炉炼钢历史中一直占据主导地位，不过在 20 世纪的前半叶，由于没有突破生产效率较低、技术经济指标较差等缺点，它的发展也较缓慢。进入 20 世纪 60 年代以来，大型超高功率电弧炉得到迅速发展，加上一系列配套技术，电弧炉炼钢技术显示出强劲的势头。特别是近年来电弧炉与炉外精炼、连铸、连轧的配合，形成短流程钢厂和“小钢厂”，在国际钢材市场上出现巨大的竞争力，并使电弧炉炼钢技术得到进一步发展和提高。

直流炼钢电弧炉是在超高功率交流电弧炉的基础上发展起来的，已成为现代电弧炉炼钢发展过程中的一项重大新技术，并且发展迅速。据截止到 1995 年的不完全统计，世界各国 70 多个钢厂中已运行及在建的 25t 以上的直流电弧炉共有 80 多座，炉容量最大的达 190t。最近几年，我国成都无缝钢管公司、首钢特钢公司等公司自力更生建造了数座中小型直流电弧炉。另外，上海第三钢铁厂、兰州钢厂、上海第五钢铁厂、宝山钢铁集团公司、中加钢铁公司、大冶特殊钢公司、长城特钢公司等先后从国外引进大中型直流电弧炉，为国内发展直流电弧炉炼钢开创了新开端。中国台湾通河钢铁公司台北钢厂等 4 家钢铁公司从 1993 年至 1995 年先后引进大型直流电弧炉 4 座，均已投产使用。

多年来，特殊钢学会在中国金属学会的领导和支持下，对冶金工业出现的重大新技术一直十分关注，我们利用学会拥有专家、优秀科技人才集中的优势，发挥学会在推动科技进步方面的作用，以促进我国特殊钢工业的发展。本钢特钢公司对特殊钢工业的这项国际炼钢新技术非常关心，兴趣很大，公司经理宋东亮、副经理曾昭生、总工程师孟宪勇等领导同志亲自参予、亲自动手，并组织技术力量，在较短的时间内对国内外有关直流电弧炉炼钢技术的大量文献进行了检索、收集，并对外文资料进行了编译和整理，然后进行了编写大纲的审定，最后由朱应波同志主要执笔集体编写成这本系统介绍直流电弧炉炼钢技术的专业书，这在国内是一项开创性的工作。正因为是新的工作，难免在内容上存在某些不足，请专家们指正，并请广大读者见谅。

特殊钢学会全力支持《直流电弧炉炼钢技术》一书的编写和出版，并在学会已组织编写和出版的《特殊钢丛书》之后，又将本书列入学会 1995年~1996年学术活动计划之一的出版计划。为了让国内电弧炉炼钢界的广大科技人员能及时系统了解直流电弧炉炼钢新技术，本钢特钢公司在编写和出版这本书的过程中给予人力上和经费上的大力支持，以实际行动贯彻落实中共中央和国务院《关于加速科学技术进步的决定》和“科教兴国”的战略方针，我们向本钢特钢公司领导 and 全体职工致以崇高的敬意和衷心的感谢。我们还感谢冶金工业出版社领导对本书出版的大力支持。我们也希望国内广大的电弧炉炼钢科技人员与特殊钢学会加强联系，加强合作，欢迎参加学会的有关学术活动，为促进电弧炉炼钢新技术在国内的发展，为促进我国特殊钢生产和科技的发展，共同贡献力量。

中国金属学会特殊钢专业学会
1996年10月于北京

前 言

本书是根据中国金属学会特殊钢专业学会 1995 年~1996 年学术活动计划编写的, 主要供钢铁冶金工业的工程技术人员、科技干部使用, 也可供高等院校有关专业师生参考。

全书分 3 篇 16 章, 全面系统地介绍了直流电弧炉炼钢技术。上篇介绍了直流电弧炉的发展史和基础知识。基础知识部分参考了日本学者南條敏夫等的专题讲座“直流电弧炉的电弧现象”^①和“再论直流电弧炉的电弧现象”^②, 重点从直流电弧的物理特性、电气特性、运动特性、传热特性以及直流电弧炉炼钢中泡沫渣、电解反应、搅拌特点等方面讲述了直流电弧炉的基础理论知识。中篇对大型直流电弧炉的关键技术: 石墨电极、炉底电极、整流供电及控制、偏弧纠正分别进行了详细论述。下篇从试验炉研究、小型电弧炉改造、大型直流电弧炉建造几方面对几种具有代表性炉底电极型直流电弧炉技术做了典型实例介绍, 并在最后一章中对直流电弧炉技术做了评价, 以及介绍了最近发展趋势。国外最近纷纷建造双炉壳直流电弧炉、Consteel 直流电弧炉、竖式直流电弧炉。直流电弧炉, 不但用于生产传统的线、棒材用钢, 以及生产前几年已报道过的 H 型钢、薄板坯用钢, 而且最近成功地用于转炉车间改造, 取代氧气转炉生产钢轨、热薄板甚至冷轧薄板用钢。原料除使用废钢外, 还大量使用直接还原铁、海绵铁压块、碳化铁, 甚至直接兑入铁水。现代化电弧炉流程对高炉—转炉大型联合企业的市场大有逐步蚕食之势。

本书由本钢特殊钢公司负责编写, 编写大纲由朱应波提出, 宋东亮、曾昭生、孟宪勇、胡克畏参加过讨论, 曾邀请国内有关

① 工業加熱 (日), 1991(1~6); 1992(1~3)。

② 工業加熱 (日), 1993(5, 6); 1994(1)。

专家学者武振廷、邹笃镛、范光前、张孟亭、何润杰、林慧国、祖荣祥对大纲进行了审定。本书初稿主要由朱应波执笔编写。宋东亮、曾昭生、孟宪勇等对全部书稿进行最终审定。特约责任编辑陈菡、王征林，以及本钢特殊钢公司的马志强、付长令等在本书编写过程中都曾给予过帮助和支持，在此特表感谢。

对本书的缺点错误，衷心希望读者批评指正。

《直流电弧炉炼钢技术》编委会

1996年10月

绪 言

1855年,英国人贝塞麦向熔化的铁水中吹入空气,成功地冶炼出第一炉钢,因此发明了酸性空气底吹转炉,结束了古老的半固态炼钢手工作坊生产史,开创了现代化大规模炼钢生产的先河。从那时起150年来,炼钢工业经历了几次重大变革。我国著名冶金学家、冶金工业部原总工程师周传典曾撰文“正视钢铁工业第三次革命的到来”[●],介绍了炼钢工业的三次革命浪潮。他认为“就象第一次革命时期平炉取代空气转炉流程,第二次革命时期顶吹转炉、连续铸钢流程取代平炉开坯机流程那样,在今后的时期内,……电弧炉短流程也必将逐步取代转炉长流程,这次变化应被称为钢铁工业的第三次革命”。

或许有人认为预言“电弧炉短流程必将逐步取代转炉长流程”有些偏激,但最保守的人也会同意电弧炉短流程完全可与转炉长流程相竞争,不容置疑的事实是电弧炉炼钢在年产钢量和产品大纲中所占比例不断增加。现在美国纽柯公司已分别在其克劳福德斯维尔和希克曼两家电弧炉炼钢厂成功地浇注出薄板坯,开创了小钢厂产品新领域。

一项对2000年的最新世界钢产量预测表明,人们普遍认为电弧炉产量将会不断提高并占钢总产量的比例增大,见图1。

所有这些都归因于电弧炉近30年来的飞速发展。过去,传统的电弧炉炼钢速度慢、效

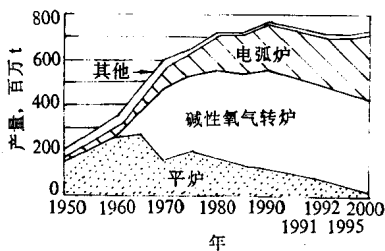


图1 世界钢产量统计及预测

(引自: Iron and Steel Engineer. 1994(5): 25)

● 科技导报, 1992, 68(2): 27 ~ 29.

率低、能耗高,因此,仅适用于高合金钢和特殊钢的生产。20世纪60年代后,首先采用吹氧代替矿石,使电弧炉冶炼周期从5~6h以上一下子缩短到3h。随后高功率大型电弧炉可以用废钢廉价生产线材、棒材用钢。超高功率电弧炉及其相关技术的不断完善,以及与二次精炼、连铸相配合,到90年代初,冶炼周期缩短到1h,吨钢单位电耗410kW·h,电极单耗2.2kg,从而使电弧炉生产成本降低到“高炉—转炉法”之下。图2表示从1965年到1990年电弧炉炼钢技术的重大进步。

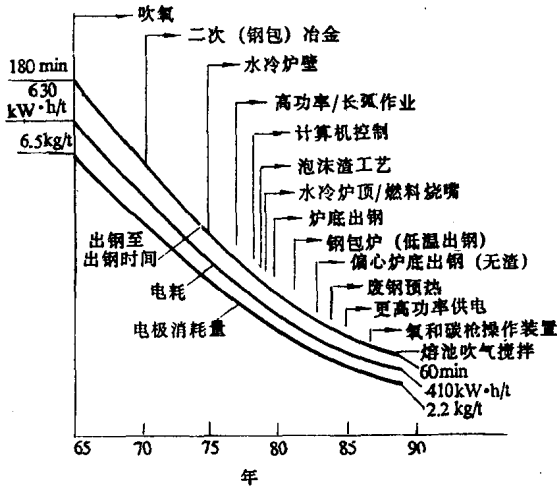


图2 1965年~1990年期间电弧炉炼钢的重大进步

80年代中期,电弧炉炼钢工业发生了一件大事,即德国MAN-GHH和BBC公司联合把美国纽柯钢铁公司达林顿钢厂原有的30t交流电弧炉改造成为世界第一台小钢厂中使用的直流电弧炉。随后又有1986年投产的美国佛罗里达公司坦帕钢厂35t改造直流电弧炉,1987年投产的意大利德尔增公司阿奥斯塔钢厂30t改造直流电弧炉,1988年投产的日本托比工业公司丰桥厂的30t改造直流电弧炉。经过实际使用,直流电弧炉的制造商和钢厂一致认为直流电弧炉有电极消耗量下降1/2左右、电能消耗量降低10%、无热点等诸多优点。鉴于这些小型直流电弧炉所具有

的优势, 1989年8月, 日本NKK公司采用MAN-GHH直流电弧炉技术为东京钢铁公司九州厂建成当时世界最大的130t直流电弧炉, 1990年初这台电弧炉达到电极消耗1.1kg/t, 出钢周期58min, 电能消耗量350kW·h/t, 炉底电极寿命大于862炉的好效果。但出现电弧偏向问题, 不久即被解决。从此, 世界各国纷纷建造大型直流电弧炉, 现在建造大型直流电弧成为新建电弧炉的主流(占新建电弧炉台数的80%)。而将旧式小型电弧炉改成直流电弧炉的计划却消失了, 佛罗里达钢铁公司坦帕钢厂甚至把早期改造的30t小型直流电弧炉和原有30t小型交流电弧炉一同扒掉, 重新建造60t大型电弧炉。

目前, 主要有4种炉底电极型式的直流电弧炉: 导电耐火材料炉底电极(ABB)、触针(MAN-GHH)、触片(奥钢联), 以及水冷钢棒炉底电极(科莱姆)。每种炉底电极型式各有其优缺点, 尚不能断定哪一种更好, 只能根据钢厂本身及其周围条件(经济、技术等诸多因素)来选择具体炉底电极型式。

直流电弧炉已成为一种经济可行的炼钢技术, 但尚不能讲今后会完全取代交流电弧炉, 因为最近交流电弧炉也取得了不小的进步, 除高阻抗电弧炉外, 意大利达涅利公司还研制出一种新型交流电弧炉——Danarc[®]电弧炉, 这种电弧炉的电抗器可随电弧条件的改变而进行自动控制。电弧炉短路时, 电抗自行增大, 从而降低了电弧炉的短路电流、电流波动和供电干线的电压波动。Danarc[®]炉工作时, 供电线路上的电流波动较普通交流电弧炉下降约40%~50%。表1对4种类型电弧炉的典型操作指标进行了对比。可见高阻抗交流电弧炉和Danarc[®]交流电弧炉都是直流电弧炉强有力的竞争对手。

直流电弧炉及其相关技术还在发展中, 人们对直流电弧炉整套技术的认识不断得到深化。最近, 国外还开发出采用双壳直流电弧炉、竖式直流电弧炉以及采用Consteel连续装料的直流电弧炉, 并且已投入实际使用。相信直流电弧炉技术、经济指标将会不断得到改善。

表1 几种电弧炉的典型操作指标^①

电弧炉类型	低阻抗交流电弧炉	高阻抗交流电弧炉	直流电弧炉	Danarc [®] 电弧炉
电耗, kW·h/t	390 ~ 430	360 ~ 410	360 ~ 400	360 ~ 400
电极消耗量, kg/t	2.50 ~ 3.00	1.90 ~ 2.40	1.20 ~ 1.70	1.70 ~ 2.20
功率因数	0.80 ~ 0.85	0.80 ~ 0.85	0.85 ~ 0.90	0.80 ~ 0.85
电流波动	0.40 ~ 0.50	0.34 ~ 0.36	0.28 ~ 0.32	0.25 ~ 0.30
电效率	0.92 ~ 0.94	0.95 ~ 0.97	0.95 ~ 0.97	0.95 ~ 0.97

① 摘自《冶金设备和技术》，1992，14。

直流电弧炉是在超高功率电弧炉的基础上发展起来的，它是超高功率电弧炉各种相关技术与当代高效、大功率半导体变流技术的结合。最令人遗憾的是目前我国没有像ABB、曼内斯曼那样集机械及电气设计、开发和制造于一身的跨国集团公司，因此长期不能掌握超高功率电弧炉的设计与制造技术，相关技术也跟不上，不但不具备高性能大功率炉用变压器及其配套高低压供电元件的设计和制造技术，而且石墨电极、耐火材料与关键的机电零配件都依赖从外国进口。[●]因此，我国直流电弧炉的研制和开发只能局限在普通功率小型直流电弧炉上，而且供电整流器所用晶闸管也大都从国外引进。从目前看，我国已投入生产的数台国内制造的小型直流电弧炉的技术、经济指标不理想，甚至竞争不过原有交流电弧炉。这说明我国甚至在小型直流电弧炉的设计、制造，以及对直流电弧炉炼钢工艺的完全理解、掌握上还存在问题。

最近几年，上钢三厂、上钢五厂、宝山钢铁集团公司、大冶特殊钢股份有限公司等钢厂正陆续从瑞士、德、法等国引进大型直流电弧炉，相信这会给我我国直流电弧炉技术的发展带来新气息。为了让我国电弧炉炼钢界的广大工程技术人员全面详细了解新颖直流电弧炉炼钢技术，在中国金属学会特殊钢学会的关心和帮助下，由本钢特殊钢公司组织编写了这本《直流电弧炉炼钢技术》。

● 宋华德：超高功率电炉及相关技术。见：当代电炉流程和电炉工程问题研讨会论文，上海，1993,6。

本书详细讲述了直流电弧的基础知识,着重介绍了直流电弧炉的关键技术以及一些典型钢厂安装、调试和使用直流电弧炉的实际情况。本书编写过程中对国内外有关直流电弧炉炼钢技术的文献进行了全面检索,收集到 160 多万字的各种文献资料,对外文文献进行了翻译、整理。并邀请国内有关专家对本书大纲进行了审定,最后综合编写而成。在国内这是第一本公开出版的全面介绍直流电弧炉炼钢技术的书籍,可能存在这样或那样的缺点和错误,希望广大读者给予批评指正。

宋东亮 曾昭生

目 录

前 言 绪 言

上篇 直流电弧炉的发展和基础知识

第 1 章 直流电弧炉的发展概况	(3)
1.1 电弧炉炼钢历史回顾	(3)
1.2 大电流电弧的基础研究	(6)
1.3 实验直流电弧炉的建造	(8)
1.4 中小型直流电弧炉的建造	(9)
1.5 大型工业直流电弧炉的建造	(10)
1.6 直流电弧炉发展过程小结	(10)
参考文献	(16)
第 2 章 直流电弧的加热基础和物理本质	(18)
2.1 电弧的加热基础	(18)
2.2 直流电弧的物理本质	(22)
2.3 其他电弧现象	(39)
参考文献	(46)
第 3 章 直流电弧炉电弧的电气特性	(47)
3.1 概述	(47)
3.2 炉内电弧的电位梯度	(48)
3.3 电弧阻抗	(56)
参考文献	(60)
第 4 章 直流电弧炉电弧的行为与特性	(61)
4.1 电弧炉电弧的特点	(61)
4.2 紊流电弧的行为	(64)
4.3 100kA 直流电弧行为的例子	(67)
4.4 电弧偏向现象及其影响	(69)

4.5	电弧柱的速度分布	(69)
4.6	电弧柱的温度分布	(73)
4.7	作用在钢液上的推力	(74)
4.8	直流电弧的稳定性	(78)
	参考文献	(85)
第 5 章	直流电弧的传热	(86)
5.1	电弧各部分的放热	(86)
5.2	电弧传热基础	(87)
5.3	电弧传热的基础研究	(94)
5.4	钢液加热的模拟	(98)
5.5	炉内电弧传热与输入功率	(107)
5.6	实际电弧炉升温期传热模型	(112)
5.7	炉壁的热负荷和直流电弧炉的各种指数	(115)
	参考文献	(127)
第 6 章	直流电弧与泡沫渣	(128)
6.1	电弧炉炼钢中的泡沫渣	(128)
6.2	泡沫渣的形成机理	(129)
6.3	发泡高度的模拟	(134)
6.4	泡沫渣的实际操作	(135)
6.5	泡沫渣内的电弧行为	(136)
6.6	电弧功率放散的机理	(145)
	参考文献	(147)
第 7 章	直流电弧炉相关的其他理论知识	(148)
7.1	直流电弧炼钢过程中的电解反应	(148)
7.2	钢液搅拌	(155)
	参考文献	(162)

中篇 直流电弧炉关键技术

第 8 章	石墨电极	(167)
8.1	石墨电极材料的特性	(167)
8.2	石墨电极的消耗过程	(169)

8.3	石墨电极的载流能力	(170)
8.4	交流和直流石墨电极消耗量的差异	(172)
8.5	电极消耗趋势与电极直径的关系	(178)
8.6	生产中的不同之处	(179)
8.7	电极连接部位	(180)
8.8	电极端头	(189)
	参考文献	(196)
第 9 章	直流电弧炉炉底电极技术	(197)
9.1	炉底电极概述	(197)
9.2	导电耐火材料炉底电极	(201)
9.3	水冷钢棒炉底电极	(210)
9.4	空冷多触针和触片型炉底电极	(221)
9.5	各种炉底电极型式的比较与评价	(231)
	参考文献	(238)
第 10 章	直流电弧炉的整流供电及其控制	(240)
10.1	降压方式	(241)
10.2	直流电弧炉的整流接线	(242)
10.3	整流装置	(249)
10.4	新型整流器的开发	(260)
10.5	直流电弧炉的控制系统	(274)
	参考文献	(279)
第 11 章	大型直流电弧炉的偏弧纠正	(280)
11.1	概述	(280)
11.2	电弧点的磁场与电磁力	(280)
11.3	纠正偏弧的措施	(283)
11.4	结语	(294)
	参考文献	(294)
	下篇 直流电弧炉的实践与展望	
第 12 章	导电炉底型直流电弧炉技术	(297)
12.1	概述	(297)

12.2	试验阶段	(298)
12.3	小型电弧炉的直流改造	(304)
12.4	大型直流电弧炉的建造	(315)
	参考文献	(329)
第 13 章	水冷钢棒炉底电极直流电弧炉技术	(331)
13.1	概述	(331)
13.2	法国钢铁工业研究院的 6t 直流试验电弧炉	(334)
13.3	埃斯科冶金公司 3 根石墨电极直流电弧炉	(340)
13.4	大同特殊钢公司 20t 直流电弧炉	(348)
13.5	大型水冷钢棒炉底电极直流电弧炉技术	(358)
	参考文献	(374)
第 14 章	多触针型炉底电极直流电弧炉技术	(375)
14.1	6MW, 12t UNARC 试验直流电弧炉	(375)
14.2	原有交流电弧炉改造成直流操作	(390)
14.3	大型直流电弧炉的建造	(411)
	参考文献	(430)
第 15 章	其他类型直流电弧炉技术	(431)
15.1	触片式炉底电极直流电弧炉技术	(431)
15.2	喷淋水冷钢棒式直流电弧炉技术	(439)
15.3	水冷钢管—耐火材料芯式炉底电极直流电弧炉技术	(445)
15.4	我国直流电弧炉技术的发展	(452)
	参考文献	(465)
第 16 章	直流电弧炉炼钢技术评价与最近的发展趋势	(466)
16.1	炼钢电弧炉的展望	(466)
16.2	现有电弧炉技术评价	(472)
16.3	双炉壳直流电弧炉	(491)
16.4	采用 Consteel™ 工艺的直流电弧炉	(500)
16.5	竖式直流电弧炉	(507)
16.6	结语	(520)
	参考文献	(521)

第 1 章 直流电弧炉的发展概况

1.1 电弧炉炼钢历史回顾

现在实际上只有两种主要炼钢方法: 氧气转炉和电弧炉相竞争。全球粗钢产量由 1970 年的 $5.95 \times 10^2 \text{Mt}$ 到 1990 年的 $7.7 \times 10^2 \text{Mt}$ 的增长中, 电弧炉钢占 75%, 而转炉钢仅占 25%⁽¹⁾。一个不容忽视的事实是, 尽管全球粗钢年总产量近年来一直徘徊在 $7.2 \sim 7.8 \times 10^2 \text{Mt}$ 之间, 但以废钢为主要原料的电弧炉钢产量所占的份额却保持着持续增长的势头。

1992 年, 西方国家的电弧炉钢比为 33%, 据预测, 2000 年将上升到 36%。同期, 美国电弧炉钢比将从 37% 增加到 42%, 日本从 32% 增加到 34%, 欧洲共同体从 32% 增加到 36%, 发展中国家从 35% 增加到 37%⁽²⁾。

追溯电弧炉炼钢的起源是很有意义的, 自第一台电弧炉用于熔炼钢水到现在已经 100 多年了。电弧炉本身结构及其炼钢工艺技术发生了翻天覆地的变化。

1879 年, 威廉·西门子 (William Siemens) 制造出世界上第一台电弧炉 (图 1-1), 并申请了专利。两年

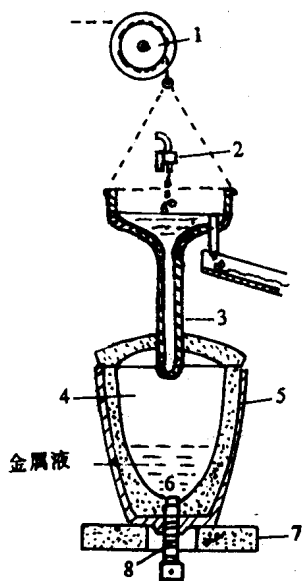


图 1-1 1879 年西门子发明的电弧炉

- 1- 控制电弧使用的自动调节装置;
- 2- 顶电极供水装置; 3- 水冷金属电极;
- 4- 形成电弧的空间; 5- 坩埚;
- 6- 金属液; 7- 底电极铂帽;
- 8- 底电极