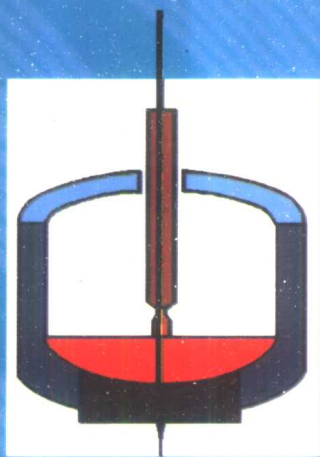


直流电弧炉 的电弧现象

[日] 南條敏夫等 著 乔兴武 译 马廷温 校



冶金工业出版社

直流电弧炉的电弧现象

[日] 南條敏夫 等著
乔兴武 译
马廷温 校

北京
冶金工业出版社
1998

图书在版编目(CIP)数据

直流电弧炉的电弧现象/[日]南條敏夫等著;乔兴武译. —北京:冶金工业出版社,1998.3
ISBN 7 5024-2110-6

I. 直… II. ①南…②乔… III. 电弧炉-电弧-现象-研究 IV. TF806.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 18829 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

北京昌平新兴胶印厂印刷,冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1998 年 3 月第 1 版,1998 年 3 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32, 8.25 印张; 219 千字; 254 页;1—1000 册

15.00 元

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-97-1838

原著者序言

本书原以《DCアーク炉のアーク现象》为题目连载于日本工业炉协会机关杂志《工业加热》1991.1至1992.5 共9期，其续篇载于1993.9至1994.1 共3期。

著者自1960年以来从事炼钢用电弧炉的设计。当时，日本正处于经济成长期，在国内建设了许多电弧炉，几乎全部炉子都是基于欧美技术。著者通过多台电弧炉的建设，得以学到先进技术。但是，对于电弧炉的报道，连学报也只有零星的技术论文，论述综合性技术的图书几乎没有。这种背景，著者卑见认为，一般来说在炉子技术上存在重视经验和实践的习惯，因而其技术多属于个人，有不希望技术公开的倾向。

近年，世界性的DC（直流）电弧炉建设正在增长。为能使与新型DC炉有关的技术工作者正确地理解DC炉，从作为DC炉技术基础的大电流DC电弧理论到其应用的电弧炉设备，著者把实用性作为重点发表了范围广泛的系统的技术解说。值得高兴的是，它在日本引起预想不到的反响。这也是著者继而又发表了续篇的动机。但是，DC电弧（炉）技术正在发展过程中，因此本技术解说说到底还存在未臻完善之处。

这次，由于尊敬的北京科技大学马廷温先生和石家庄钢铁厂乔兴武先生的努力和协助，得以在中国出版中文版。

原著者表示深切的感谢。

本书如能对中国电炉炼钢的发展有所帮助，著者将感到非常高兴。

南條敏夫

1995年

77A-3/07

本书译自连载于日本工业炉协会发行的《工業加熱》
Vol. 28, No. 1, 1991. 1~Vol. 29, No. 3, 1992. 5 共 9 期及
Vol. 30, No. 5, 1993. 9~Vol. 31, No. 1, 1994. 1 共 3 期

目 录

基础篇直流电弧炉的电弧现象

南條敏夫 吉田弘信

1	前言	1
2	DC 电弧炉历史概况	2
2.1	基础研究期	2
2.2	试验设备的建设	5
2.3	中小型生产炉的建设	6
2.4	大型生产设备的建设	6
2.5	小结	7
3	电弧加热基础	10
3.1	DC 电弧概述	10
3.2	电弧加热与一般电阻加热的比较	11
4	DC 电弧的物理特性	14
4.1	电弧定义	15
4.2	阴极压降区	15
4.3	电弧柱 (电弧等离子体)	22
4.4	阳极压降区	30
4.5	电极区附近的发热现象	31
4.6	其他各种电弧现象	33
5	DC 炉电弧的电气特性	42
5.1	概述	42
5.2	炉内电弧的电位梯度	43
5.3	电弧阻抗	53
5.4	电弧点的磁场与电磁力	57
6	DC 炉电弧的行态与特征	62

6.1	电弧柱的速度分布	62
6.2	电弧柱的温度分布	65
6.3	作用于钢水的推力	66
6.4	DC 电弧的稳定性	71
7	DC 炉电弧的传热特性	81
7.1	电弧传热概述	81
7.2	电弧传热的基础研究	84
7.3	钢水加热的模拟	89
7.4	炉壁热负荷及 RI 值	101
8	DC 电弧与泡沫渣	106
8.1	泡沫渣概述	106
8.2	泡沫渣的生成机理	107
8.3	泡沫高度的模拟	115
8.4	泡沫渣操作实际	117
8.5	泡沫渣内的电弧行态	119
8.6	电弧功率放散机理	129
9	顶部石墨电极	132
9.1	石墨电极材料的特性	132
9.2	DC 电弧炉的石墨电极消耗	134
9.3	石墨电极的通电容量	136
9.4	电极接续部位	143
9.5	电极前端部	153
9.6	小结	160
10	关于 DC 电弧炉的其他课题	162
10.1	炉底电极	162
10.2	钢液搅拌	167
10.3	电弧炉的噪声	175
10.4	直流磁场对人体的影响	182
11	结束语	186

续篇 再论直流电弧炉的电弧现象

南條敏夫 北室圭三 山田隆光

1 前言	188
2 大电流 DC 电弧的基础知识	189
2.1 大电流 DC 电弧的行态	189
2.2 DC 电弧的重要基本特性	195
2.3 DC 电弧的推力	197
3 电炉用 DC 电弧的行态	200
3.1 电炉电弧的特征	200
3.2 紊流（垂直）电弧的行态	204
3.3 100kA DC 电弧的行态举例	207
3.4 偏弧现象及其影响	209
3.5 结语	215
4 电弧传热	216
4.1 电弧各部位的发热	216
4.2 电弧传热基础	217
4.3 炉内电弧传热与输入功率的分析	222
4.4 实用电炉平坦熔池期的传热模型	226
5 DC 电弧炉的有关指数及评价	231
5.1 DC 电弧炉的指数	231
5.2 各指数的评价	233
5.3 AC/DC 电弧炉比较	240
6 DC 电弧炉的评价	244
6.1 AC/DC 电弧（炉）的特性比较	244
6.2 对问题的回答	246
6.3 理想 DC 电弧炉的条件	250
7 总结	253
后记	254

基础篇 直流电弧炉的电弧现象

南條敏夫 吉田弘信

1 前 言

直流 (DC) 电弧炉最近已在日本产业中出现, 引人注目。这是由于 DC 电弧炉与交流 (AC) 电弧炉比, 大容量的电气设备容易得到批准认可, 同时 DC 电弧炉有望降低炼钢成本。

1988 年“托比工业”首先引入了 30t DC 炉, 随后 1989 年“东京制铁九州厂”的 130t DC 炉在世界举目瞩目中开动起来, 并由于经济状况景气, 在日本国内一举迎来了大型 DC 炉的时代。

DC 炉在短时期内实现了从引入到大型化进程, 这可以说, 一方面是由于把多年培育的成熟先进的 AC 炉技术作为基础, 另一方面也象征当代技术进步的加快。

今后, 通过操作经验的积累, 作为理想的 DC 炉设备技术的改进和最佳操作条件的掌握, 一定会相互关联着共同进步。

一般地说, 对于大电弧电流, 与它在应用方面的进步和扩大相比, 对其现象和特性的分析研究是不够的。作为 DC 炉技术基础, 说到底不外乎 DC 电弧的行为与状态。

本解说, 以有关 DC 电弧炉各领域的工程师为对象, 把 DC 电弧的行态作为论述重点, 其他一些重要问题只作一般叙述。

发表本文, 希望能为 DC 电弧炉今后的加速发展起到一定的作用。

2 DC 电弧炉历史概况

2.1 基础研究期

DC 电弧炉的历史源流，可追溯到本世纪 50 年代的大电流电弧行态的研究。

这里，分为设备技术方面的要求和作为其对策的电弧研究来阐述。

2.1.1 设备技术

原有的炼钢电弧炉全部是交流电弧炉，由施维博 (Schwabe) 博士等人提倡，以美国为中心，进行了以提高生产率为目的的 HP、UHP 化及炉子的大型化。

但是，其结果是闪烁及炉壁热点等成为大的问题，为解决这些问题付出的代价是巨大的。此时，已部分地出现关于 AC 电炉的技术界限的说法。

而另一方面，通过电弧形态的研究，明确了 DC 电弧的优越性，作为解决电弧炉问题的根本对策，DC 电弧的采用引起了部分人的注意。

例如，1973 年由鲍曼 (B. Bowman) 等提议采用作为热点对策的 DC 电弧炉，此时被描述的炉子由 3 根电极构成。

可是，到 1977 年 ASEA (现 ABB) 在世界上第一个建设 DC 炉试验设备为止，没有看到具体的进展。

2.1.2 电弧的基础研究

试回顾关于电弧炉的基础技术——大电流石墨电弧的研究。

(1) AC 电弧与 DC 电弧

大电流电弧的研究，一开始以欧洲为中心进行。当时，以 AC 电弧为对象，在石墨电极起阴极作用的负半周期时，存在比较稳

定的阴极斑点，形成稳定的电弧；而在正半周期时，由于从钢水阴极出来的蒸气喷射流，电弧状态变得越发复杂起来。

即，阴极斑点在复杂的钢水面上高速转动，引起强大的扰乱，等离子轮廓不清晰。由于正半周非常复杂，研究集中于比较容易操作的，电极为阴极的脉动电弧或 DC 电弧。

这样一来 AC 电弧的研究自然地过渡到 DC 电弧的研究，与此同时，DC 电弧与 AC 电弧相比，作为电弧炉的热源，特别是其稳定性和传热本质上存在明显的优越性。

(2) 大电流石墨电弧的研究

从宏观上看，电弧研究大致分为如下三个阶段。

第一阶段，1960 年前后梅克 (H. Maecker) 的实验与理论研究。通过研究，首次从理论上阐明了因电磁抽吸引起的阴极喷射发生的机理。该理论现在也被广泛使用。

第二阶段，从 1960 年末到现在，B. 鲍曼等长期的广泛研究。这些研究从摄像观察及实验开始，继而进行关于电弧形态的宽广范围的分析讨论。该研究在生产用电弧炉的发展上作出了很大贡献。

第三阶段，从 1980 年初到现在，M. I. T 的 J. Szekely 集团的一系列研究。

通过这些研究，DC 电弧传热、熔池搅拌等的数学模型开始被开发。

由此，使电弧及电弧炉系统的计算机模拟成为可能。

下面以时间顺序稍详细地介绍有关大电流石墨电弧的代表性研究。

1955 年 H. 梅克进行了大电流石墨电弧的正规研究，这一研究如果说始于 200A 为止的电弧研究，并不过分。

他首先进行阴极现象的理论研究，还发表了定量地正确说明等离子速度的理论式。

即在电弧等离子体，一面使电流通路从阴极斑点开始沿着电弧轴方向膨胀，一面产生使向着阳极等离子体加速的劳伦茨力

J. B 的轴向分力。

这种电弧具有一种类似“电磁泵”的作用，吸入阴极斑点附近的气体，使其向着阳极移动并扩散。

这个轴向喷射流，使通常具有不稳定倾向的敞开电弧几乎维持垂直，具有使电弧柱稳定化的作用。

1955年威纳克 (R. Wienecke) 计测了 200A 电弧等离子流体的速度场，证明阴极附近的最大轴速度约 330m/s 及 H. 梅克的公式的正确。

1961年 H. 梅克开始进行等离子流的温度场的计测，继而进行了物质、能量、动量的平衡等电弧场整体的测算，第一次能够进行大体完整的记录。

1969年 B. 鲍曼、杰登 (G. R. Jordan)、菲茨杰拉德 (F. Fitzgerald), 1970年 G. R. 杰登、B. 鲍曼、韦克拉姆 (D. Wakelam) 先后通过炉内电弧的摄像观察和电气计测，明确了电弧的行态因极性而变化很大。电弧电流到 7.5kA 为止。

1972年 B. 鲍曼 (Electrowärme) 弄清楚了电流到 2160A 为止的电弧的物质、能量、动量的平衡。

1972年 B. 鲍曼 (J. phys. D) 进行了对于等离子速度场的可靠的参数计测，成为理论计算的比较基准。

1973年伊德尔斯 (H. Edels) 通过到 10kA 止的 DC 铜阴极空气电弧的实验和大量引用文献，提供了宽压力范围和超大电流止的电弧等离子区域的温度和速度场的参数。

1976年斯特罗恩 (D. C. Strachan) 进行了仅数毫秒的脉冲电弧的研究，但电流范围扩展到 25kA 止。

1978年拉梅克西斯厄姆 (S. Ramaksishman)、斯托克 (A. D. Stokes)、洛基 (J. J. Lowke) 明确了电弧等离子流场，在 500A 以上为涡流，其结果使移动特性增加。

1981年尤斯海 (M. Ushio)、沙克利 (J. Szekely)、钱 (C. W. Chang) 开发了表示大电流 DC 电弧的速度场、温度场、传热比率 (速率) 的数字参数。由特定的电弧断面形状和电弧电流

2160A 的数值解, 求得了系统的速度断面形状及向阳极表面的传热比率。这些结果显示了与已经公开发表的测算值(鲍曼 72J. phys. D) 非常吻合。

1982 年 B. 鲍曼基于 DC 电弧等离子体与喷嘴射流的相似性, 研究了电弧推力及效果。求出了向熔池冲击而形成的熔池凹面, 以及熔池的物质流速率, 也作出了对于熔池搅拌效果的近似值。

1983 年沙克利 (J. Szekely)、麦克利奇 (J. Mckelliget)、乔德哈里 (M. Choudhary) 第一次应用数学方法描述了 DC 电弧炉电弧区与熔池内的传热, 及熔池的搅拌效果。

也计算了 50kA 电弧等离子体的速度场、温度场、传向金属熔池的热流束、热平衡, 并考察了涉及传热效果的电弧长度的影响。

1985 年布莱克本 (T. R. Blackburn) 通过类似于石墨电极电弧的 Cu 阴极 10kA 自由电弧的解析结果, 电弧电压、电弧电流及温度流动场的计测结果, 明确了对于在整个系统的定量问题上并不相互矛盾。

1987 年斯坦威斯特 (S. E. Stenkvist)、B. 鲍曼论述了 DC 电弧的基本特性, 特别是稳定性和传热特性等 DC 电弧的优越性。介绍了 DC 电弧炼钢炉和矿石还原炉的应用。

2.2 试验设备的建设

从 70 年代末到 80 年代初, 欧洲各国建造了 DC 炉试验设备, 为了评价 DC 电弧炉作为主要生产设备的可能性和未来发展前景, 需要确认的课题很多, 主要集中在以下 3 个方面。

2.2.1 DC 电源系统的构成

电源系统, 由于大功率电子技术的迅速进步, 可经济的得到大容量 DC 电源, 作为包含涉及系统影响及电极控制等的电弧炉电源系统的综合评价与确认。

2.2.2 炉底电极

电弧炉的炉底电极, 在 20 世纪初的吉罗德 (GIROD) 炉 (多

触头水冷式)上能够看到它的原型(原始型式)。

可是,现代化大功率高生产率的大型设备,需满足于安全性和经济性要求,因此,对于这样的系统需要确认能否制造。

这也是 DC 电弧炉的最基本的课题。

2.2.3 炉子的整个系统

DC 炉的熔炼过程、生产率、各种消耗、闪烁及噪声问题等与 AC 炉比较,需通过综合分析确认其优势。

试验设备的熔炼试验结果,除在炉底电极尚存在一定问题外,整体上象预想的那样达到了满意状态。之后,过渡到以下的生产设备阶段。

2.3 中小型生产炉的建设

继试验设备的成功,自 1985 年左右在欧洲和美国中小型生产用电炉开始投入运行。

按原来的设想,与 AC 炉比,性能上的很多优点得到确认,但仍遗留有关于炉底电极寿命的问题。

这一问题甚至成为 1988 年 8 月的 AISI 专门委员会(Aug'88I & SM P. 18)研讨的话题;而从采用海外进口 DC 炉的工厂在相当一段时间里踌躇于第二台炉子的建设,也可以得到见证。

但是,在全世界停滞不前状态下,到 1988 年“托比工业”35t 炉开动并被公开报导使用效果概况时为止,日本的情况却起了变化。

即在炉底电极尚存在一定问题的情况下,DC 炉与 AC 炉相比,炼钢成本大幅度降低,特别是关于炉底电极问题也能通过今后的改进,十分有把握地期望其寿命的延长。这已成了电炉业界的公论。

2.4 大型生产设备的建设

以“托比工业”的成果为基础,“东铁九州”确定 130t 炉的建设,1989 年 8 月在全世界注目下投入运行。

该设备最大限度地使用现有最大直径（700mm）电极。采用700mm 电极、顶部一根电极方式。

这样，特别是在日本，相继发表有关大型DC 电弧炉建设的信息，迎来了大型DC 炉的时代。

日本的动向，刺激了全世界电炉产业界，使DC 炉建设热潮在全世界再次兴起并持续发展。

表 2-1 中介绍了世界的 DC 电弧炉。

2.5 小结

表 2-1 炼钢用 DC 电弧炉统计

（注仅限于已公开的）

No	公司名称	工厂名称	投产年	能力/t	变压器容量/MVA	炉壳直径/m	制造厂	电极数
1	NUCOR (美国)	DARLINGTON	1985	30	12	3.8	GHH-BBC	1
2	SME(法国)		1985	75	3×20 MW	5.8	CLECIM	3
3	FLORIDA (美国)	TAMPA	1986	30	18	3.8	ABB	1
4	DEL TASIDER (意大利)	AOSTA	1987	30	22	4.3	ITALIMPIANTI	1
5	托比工业	丰桥	1988	35	15	4.5	NKK	1
6	大同特殊钢	星崎	1989	20	15	4.0	大同	1
7	东京制铁	九州	1989	130	100	7.0	NKK	1
8	共英制钢	和歌山	1990	60			NKK	1
9	SISW(马来西亚)	PENANG	1991	80	67	5.5	ABB	1
10	CHARTER STEEL (美国)	CHICAGO	1991	70	42	5.2	ABB	1
11	HSM(韩国)	HAMAN	1991	50	35	4.3	ABB	1
12	大和电机制钢	水岛	1991	100			CLECIM	1
13	东京制铁	冈山	1991	150			NKK	1
14	中山制钢	大阪	1991	40			大同	1
15	神户制钢	高砂	1992	30			NKK	1
16	关西钢坯中心	堺	1992	120			大同	1
17	DINC(土耳其)		1992	30	20	3.8	ABB	1
18	DILER STEEL (土耳其)		1992	80	67	5.5	ABB	1

以上叙述的 DC 炉开发经过表示在图 2-1 中。

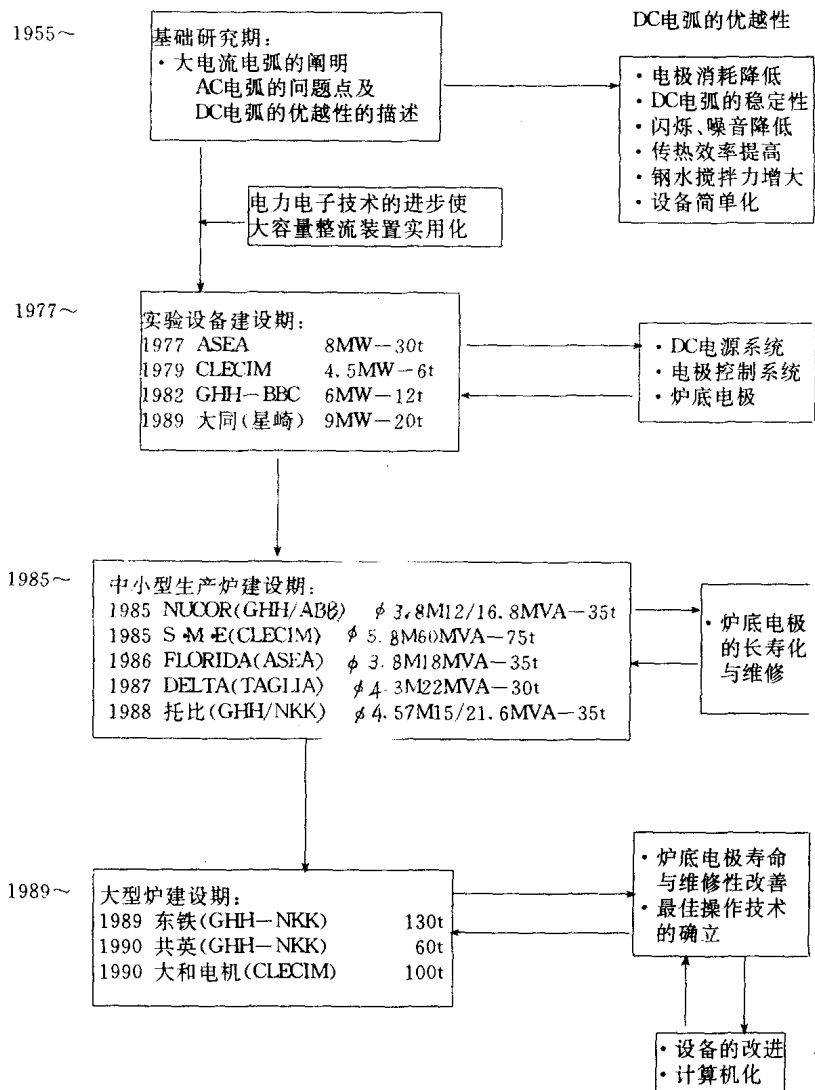


图 2-1 DC 电弧炉的开发简史

今后面临的重点课题,依然是炉底电极寿命和维护检修的改善,此外是在大型炉上存在特别明显的大电流电弧的偏弧问题。

再有,从长远上看,应研究 DC 电弧炉最佳操作条件,及确立与此相应的设备操作技术。

经过操作技术的确立和设备改进,再通过计算机化的作业自动化,随着时间的推移,使 DC 炉被确立固定下来。作为这些技术的核心是大电流电弧的行态,需要弄清的是从电弧向金属传热的机理及金属搅拌的定量化。

这些关系示于图 2-2 中。

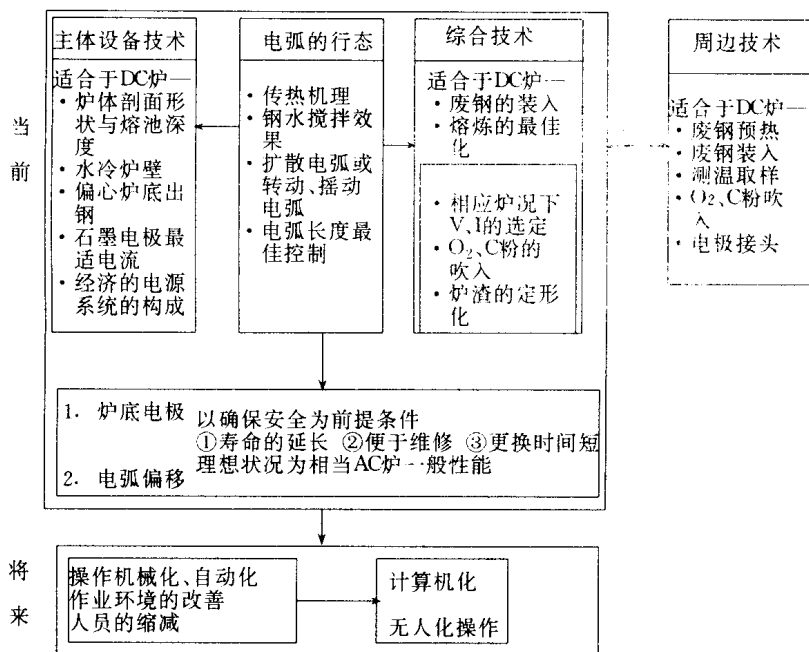


图 2-2 DC 电弧炉的研究课题