

〔日〕南条敏夫 等著
李中祥 译

炼钢电弧炉设备与高效益运行



冶金工业出版社

冶金工业出版社 冶金工业出版社

冶金工业出版社 冶金工业出版社

炼钢电弧炉设备与高效益运行



冶金工业出版社

炼钢电弧炉设备 与高效益运行

[日] 南条敏夫 等著
李中祥 译

北 京
冶金工业出版社
2000

北京市版权局著作权合同登记号图字 01-1999-1789

图书在版编目(CIP)数据

炼钢电弧炉设备与高效益运行/(日)南条敏夫等著;李中祥译.-北京:冶金工业出版社,2000.1

ISBN 7-5024-2408-3

I. 炼… II. ①南… ②李… III. 电弧炉:炼钢炉 N. T
F748.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 33940 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 李 梅 责任校对 符燕蓉 责任印制 牛晓波

北京源海印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2000 年 1 月第 1 版, 2000 年 1 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 5.875 印张; 156 千字; 178 页; 1-2000 册
13.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64013877

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

译者的话

原著者以他令人敬佩的智慧在书中深入浅出地总结了他多年设计制造电弧炉经历中的宝贵经验和体会,是电炉炼钢技术工作者深入研究电力输入、提高生产率、增加电炉炼钢经济效益、改善环境等问题的很好的指导性教课书。读者只要认真阅读、勇于实践,必能在短时间内取得立竿见影的效果。

译文对原文中的疏漏和不当之处,大多与原著者协商并一一作了修正。译文曾经高级工程师郭福宝、倪福青、教授级高级工程师张志冰等专家审阅,王朴民同志校对,译者谨向这些同志表示衷心的感谢。由于译者水平有限,缺点和错误在所难免,希望读者、专家不吝指正。

著者序言

原文曾连续刊载在日本工业炉协会的机关杂志《工业加热》的1995年2~4三期以及1997年2~6五期上。

第一篇讲述了关于电炉设备(AC炉及DC炉)的发展动向和合理化,而第二篇是以电炉炼钢生产的主力军AC炉为对象,讲述了电力的有效利用和生产率提高的最新技术和未来的动向。特别兼顾到非电气专业的电炉技术工作者,希望能对他们工厂电炉电力输入方法的改善有所帮助。

著者从1960年从事炼钢用电弧炉的设计至今已经30多年,从初期UHP-电弧炉到最近高性能的DC电弧炉,积累了不少有益的经验,本书只选择性地介绍了其中对现场技术工作者特别需要的内容。

这次,中文版本得以出版,是由于中国冶金工业部鞍山热能研究院情报室李中祥先生的努力和协作,非常适时,因而著者非常高兴,并深表谢意。

著者曾多次访问中国,有机会与许多中国电炉技术工作者进行技术交流,对夜以继日为电炉炼钢发展做出努力的中国电炉技术工作者的热心态度,每次都深受感动,并油然而敬。相信中文版本的出版对诸位技术工作者是甚为有益的。

在阅读本书时建议读者自己以具体的炉子为对象,亲自研究有关适合于设备特性、能力的最佳输入电力的方法,并将其应用在实际炉子上。关于这些,本书随处都讲述了必要的实例,而不仅仅只是总结知识,衷心希望本书能有助于实际电炉作业的改善。

最后,祝愿中国的电炉炼钢工业日益发达。

南条敏夫

1997年10月于东京

目 录

第 1 篇 电炉设备的发展动向和合理化	1
1 前言	1
2 电炉设备的变迁	3
2.1 摇篮期	3
2.2 三相 AC 炉时代	4
2.3 DC 炉的诞生	6
2.4 泡沫渣作业的普及	7
3 AC/DC 炉的综合比较	7
3.1 总论	7
3.2 生产率	8
3.3 能量的单耗	8
3.4 电极单耗	11
3.5 电力特性	12
3.6 负荷冲击	13
3.7 DC 炉的潜在优点	14
3.8 总结	15
4 电炉技术设备的关键所在	16
4.1 技术设备	16
4.2 对环境的影响	19
4.3 现在重要的课题——节能	20
4.4 新的废钢熔化炉装置	22
5 电炉合理化的理论和实际	25
5.1 概要	25
5.2 生产率的提高和能量单耗的降低	25

5.3	生产率、能量单耗改善的具体对策	31
5.4	电极单耗的改善	38
5.5	省力化和省人化	51
5.6	钢包的现代化	57
6	结语	61
	参考文献	63
第2篇	炼钢电弧炉电力的有效利用和生产率的提高	64
1	前言	64
2	AC 电弧炉的电气基础知识	65
2.1	AC 炉电弧和电弧电路	65
2.2	AC 电弧炉的电气特性	81
2.3	关于负荷冲击的基础知识	97
3	现有电弧炉生产能力的提高	104
3.1	电力的有效利用和生产率的提高	104
3.2	现有炉子性能的改善	110
4	炉子电抗	124
4.1	概要	124
4.2	电抗的重要性	125
4.3	电抗值的影响	128
4.4	电抗率	131
4.5	电弧阻抗(=电弧电阻)和功率因数	132
5	导电臂	137
5.1	概要	137
5.2	对电极横臂的性能要求	139
5.3	铝导电臂的构造和特性	140
5.4	铝臂的特征和效果	145
6	装有附加电抗器的电弧炉	149
6.1	概要	149
6.2	SR 炉的基本概念和电气理论	150

6.3	普通炉和 SR 炉的比较(1/2)	
	——电抗器的影响	158
6.4	普通炉和 SR 炉的比较(2/2)	
	——功率因数的影响	166
6.5	各种电弧炉的作业特性比较	173
6.6	总结	174
7	编后语	176
	参考文献.....	178

第1篇 电炉设备的发展动向和合理化^①

1 前言

近年来世界性的电炉钢生产发展显著。电炉钢的比例在美国已达40%，在日本也超过30%，预计趋势将进一步增大。特别是最近亚洲地区的电炉钢的发展显著，而且其大部分是由大型直流(direct current, 以下简称DC)电弧炉生产的。

起源于欧洲的DC炉作为大型生产技术设备已在日本确立，现在日本DC炉生产的电炉钢产量为世界第一。这不外乎是因为在老的交流(alternating current, 以下简称AC)炉设备以合理化为目的的现代化之际，需要DC炉来适应国内电网反向功率(バックパワ)不太大的实际情况，更进一步是基于已着眼于DC炉未来发展的经营者和专家们的明鉴，还有就是现时经济发展动向的推动，从而积极建设了大量的大型DC炉。关于在初期阶段曾认为有疑问的炉底电极的可靠性和综合费用问题，已在日本技术人员的不懈努力之下进行了世界领先性的大幅度改善，并不可动摇地确立了DC炉的优越性。另外，各种形式的炉底电极正在从各自延长寿命阶段进展到对应各种使用条件使单位成本降至最小的技术的确立阶段。日本的这些实际业绩，对于以往缺乏电炉炼钢经验的发

① 本文作者为南条敏夫、冲野浩、川端纯一、山田隆光，发表于日文杂志《工业加热》1995年第2~4期。

南条敏夫，日本工业炉协会电炉顾问兼石川岛播磨重工业公司(株)岩国制作所顾问 T. Nanjo。

冲野浩，IHI 第一设计部部长 H. Okinó。

川端纯一，同公司科长 J. Kawabata。

山田隆光，IHI(株)产业机械事业部工业炉设计部专业部长 T. Yamada。

展中国家已成为不断推动其 DC 炉建设的强大动力。

在有许多 DC 炉运转着的日本,仍以常规 AC 炉生产电炉钢占据主流,这种趋势当前仍不会改变。但普遍来讲所谓已经达到极限的常规 AC 炉也受到新兴 DC 炉的冲激,在提高生产率和改善各种单耗方面不断做出努力并取得成果。

电炉炼钢是典型的大量消耗电能的产业,国内电炉钢年产量约 3300 万 t,炼钢平均电力单耗若约为 $400\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ 的话(根据“铁联”资料),电力消耗量仅电炉炼钢就约达 130 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。再加上除尘装置等相关设备所消耗的电力,总量可超过 160 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。美国的电炉炼钢年耗电大约为 200 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ (根据 EPRI-CMP 的资料)。电炉炼钢一直在这样消耗着大量电力,而国内为了降低电力费用,使生产集中在电价有利的夜间,所以说电炉炼钢还有对电力供需平衡做出贡献的一方面。

最近笔者从 1991 年到 1994 年曾两度在《工业加热》杂志以 DC 电弧的特性为中心,就 DC 电弧炉的基本问题发表了技术讲座^[1,2]。另外,早在 1965 年和 1973 年笔者也曾两次以 AC 电弧炉为对象连载发表了以“炼钢用电弧炉生产率的提高”^[3,4]为题的论文,然而最近才知道直至现在仍蒙利用。文章发表后已经过 20~30 年,现在技术已有很大变化,即使是对 AC 炉来说为使之符合时代进步需要改写的地方也不少。而且尽管 AC 炉有长远历史,若评价其各生产设备,也有其各自内在因素的制约,存在不能充分发挥其固有性能和能力的缺点。原来的设备因为有以能力最低的局部决定着全体能力的性质,所以也可能以微小的投资就可以加以改善。这个改善有通用的对策和每个用户单独的对策。

另外,近来以彻底降低炼钢费用和缓和对环境的影响为目的的 21 世纪综合电炉系统,正在进行着包括废钢的高温预热和连续装入的新技术开发,正持续不断地形成世界性潮流。其代表性装置是具有 IHI 开发的竖炉式连续高温预热装置的废钢熔化系统,受到世界关注。最近又发表了 VAI 的 COMELT、MDH 的 CONTIARC 等的观点。

从以上背景出发,加上这次新的第一手资料一起归纳出本文。本文总论将以电炉设备的最新动向为重点,而各论以现在仍作为电炉炼钢生产中心的现有 AC 炉的合理化为重点,当然这里也有不少内容与 DC 炉是通用的。

2 电炉设备的变迁

现概述具有约 120 年历史的电炉是怎样发展到今天的。表 1-1 概括了电炉历史的变迁。

2.1 摇篮期

电炉的历史开始于 1800 年的 Humphrey Davy 发现碳电弧的时候,可是作为炉子历史的开端是基于 Willian Siemens 的研究,他于 1879 年制造了利用碳极电弧的直接电弧和间接电弧的炉子,取得了专利。当时电力价格极高,在其利用上多有量的限制,还有碳素电极的问题,而且电炉发展的基础也还没有完全完备起来。

1885 年世界上最初的 DC 炉由 ASEA(现为 ABB)设计,其中有图 1-1 所示的间接加热方式和直接加热方式^[5]。1906 年开发了具有贯穿炉床的炉底电极的可视为现在 DC 炉的原形的 Girod 炉

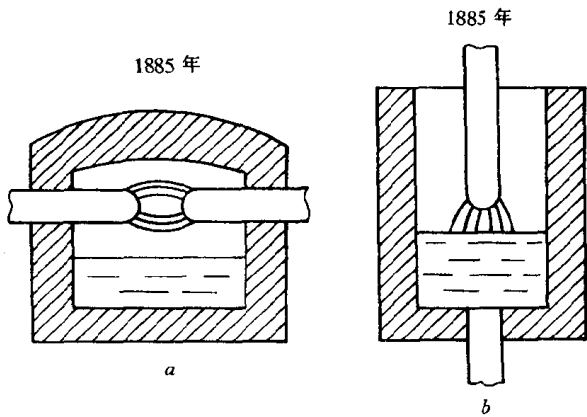


图 1-1 ASEA1885 年的电炉形态(原图误为 1985——译者注)

a—间接加热;b—直接加热

用于生产。因而所谓 DC 炉是最近才开始开发的观点肯定是不正确的。

表 1-1 电炉设备的变迁

主题词		电炉设备的变迁↔适应需求	
炉 型			
DC 炉		19 世纪末诞生,初期的电炉为 DC,钢制水冷炉底电极	
↓ 三相 AC 炉 ↓	高级钢生产设备→1950 年以来作为主要炼钢工艺固定下来 炉子大型化・UHP(超高功率)化↔大批量生产/生产率提高		
	UHP 判定标准 (1964 年 Schwabe)		相应技术
	功率等级 C_1 [kW/t]: >100t 炉 250~330 100~40t 330~410 时间加权平均电功率 与最大熔化电功率之比 C_2 : >70% 时间利用率 T_u : >70%		热点(ホットス ポット)対策; 低电压大电流作业; 三相平衡; 水冷壁; 氧-燃料燃烧器; 氧切割
	DC 炉诞生		问题点 三相电弧的偏向未根本纠正; 负荷冲击对策费用
DC 炉	概要	UHP 作业效果 AC/DC 通用; 与 AC 炉相比 趋向于长电弧	电源设备的综合费用; 炉底电极的综合费用
	优点	电弧偏向可能纠正, 能量集中到中央 均匀迅速熔化; 钢液的电磁搅拌; 电极单耗降低; 负荷冲击减小	
		课题	

泡沫渣作业(AC/DC 通用)

2.2 三相 AC 炉时代

1887 年 Heroult 发明的电炉应用于铝工业,后经历了碳化钙

的制造,1899 年开始用于炼钢。在 Heroult 的专利中表达为“包括用单相及多相电流,在钢液和电极之间发生电弧的电气炉”,是广义的直接电弧炉,然而这已拉开将成为主流的炼钢用三相交流电弧炉的序幕。

电弧炉炼钢最初以欧洲为普及中心,然后移至美国,20 世纪初电炉钢的生产继续缓慢增长,限于生产特殊钢,而且生产的场所仅限于电价便宜的水力发电区域。

其后进入第二次世界大战期间,应合金钢需要的增大,电炉的能力大幅度增加,产量剧增。不久战争结束,战后可利用的过剩生产能力从军用转向民需。

1950 年以后,电炉炼钢逐渐扩大到以前用废钢生产普通钢的有中心资格的平炉的领域。

1960 年在 W. E. Schwabe 等人发表超高功率(UHP)作业概念的同时,在 North Western Steel and Wire Co. 证实增大输入电功率可以带来生产率的提高。UHP 炉的原理和作业结果在 1960 年 Schwabe 等人的许多文献^[6,7]中介绍过,其一系列技术立刻引起世界关注。从此美国的平炉完全被淘汰,而且“短流程”(ミニルミ)概念的产生也是在这个时代。

UHP 作业简单讲是以最低的作业费用达到最大生产能力的方法,作为 UHP 作业的定义 Schwabe 叙述如下:

(1)输入电功率等级 C_1 (kW/t);

C_1 大型炉 >100t

中型炉 250~300kW/t

40~100t

330~410kW/t

(2)时间加权平均电功率和最大熔化电功率之比 C_2 :

$$C_2 = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + \cdots + P_n t_n}{P_{\max}(t_1 + t_2 + \cdots + t_n)} \geq 0.7$$

式中 $P_1, P_2, \cdots, P_n$ ——从通电到出钢的各时间间隔 $t_1, t_2, \cdots, t_n$ 的平均输入功率, kW;

$P_{\max}$ ——熔化期的最大输入功率, kW。

(3) 时间利用率 T_U :

$$T_U = \frac{t_1 + t_2 + \cdots + t_n}{t_{T-T}} \geq 0.7$$

式中 t_{T-T} ——从出钢到下次出钢的时间, h。

UHP 炉迅速在全世界普及, 但输入功率等级的增大导致在熔池平展期发生强烈的炉壁热点。作为其对策, 进行了低电压大电流作业, 而且使三相阻抗平衡, 但炉壁热点依然是 UHP 作业上的重大障碍, 而且大电流作业使电极单耗增加。一般对冷支撑部位除了使用氧-燃料燃烧器外还通过氧的切割作用以求促进废钢的熔化。这些对策的目的都是为了使废钢均匀熔化, 其后通过使用冷却壁, 炉壁热点问题几乎完全得到解决。可是为了进一步提高三相 AC 电弧炉的生产率而提高功率等级时, 作为三相 AC 电弧炉的根本问题——电弧偏向(外吹)问题仍有待解决。另外使 AC 炉减小反向功率时, 对付负荷冲击对策的费用也成了应该研究的课题。

UHP 作业(后来转向高电压作业)、水冷壁及氧的大量使用, 这三方面构筑了 AC 电弧炉的全盛时代, 而后两项是在日本开发的技术。

2.3 DC 炉的诞生

三相交流电弧炉由电弧的偏向产生的废钢不均匀熔化因在本质上是不能改正的, 所以从 UHP 炉诞生之后就已经认为作为解决 AC 炉根本问题的对策就是采用 DC 电弧炉。其后由于用大容量的可控硅经济地产生直流电以及输入电力控制技术的开发, 从而诞生了 DC 炉。

UHP 作业的效果在 DC 炉的情况下, 与其说仍完全不变, 不如说使之进一步增加电功率等级成为可能。DC 炉除了特别的情况, 只要电极通电能力允许就可使用一根电极, 然而通常采用比 AC 长的电弧。

DC 炉的特点是废钢迅速均匀熔化, DC 炉的电弧偏向的改正可通过使电弧点的水平磁场强度变得最低来实现, 但实际上随着

熔化的进行,液面水平有波动,电弧点和母线间的相对距离因为变化,所以整个作业持续到底使电弧完全没有偏向是困难的。而减少电弧偏向,通过电弧的垂直化将能量集中于中央并使废钢均匀迅速熔化是可能的。DC 炉另一个特点是电弧电流流经钢液时产生的对钢液的搅拌作用。而且 DC 炉石墨电极单耗的降低在理论上是可能的。另外负荷冲击水平变为同一容量的 AC 炉的 $1/2$,原理上也是清楚的。

作为 DC 炉的研究课题之一是电源设备费用,但为了减小 AC 炉的反向功率,如果包括其改善负荷冲击的费用,还是 DC 炉的综合费用低。并且当初所谓的 DC 炉设备费用高,最近也已经与 AC 炉相当接近了。

2.4 泡沫渣作业的普及

泡沫渣作业在电炉作业中具有重大的优越性。也就是说从熔池平展期对钢液的加热效率的提高和炉壁热点减少的效果来看泡沫渣作业确实使电弧炉的作业稳定起来。泡沫渣作业对 AC 炉、DC 炉都是有效的,特别是对 AC 炉减少了三相阻抗的平衡和低电压、短弧作业的必要性,对 DC 炉通过高电压操作使电弧电流的降低成为可能,而且对接近能力极限使用的石墨电极单耗的降低也特别有效。

泡沫渣可在炉内钢液面附近吹入氧和碳而生成,而最近正在普及的水冷喷氧枪和喷碳的组合十分方便,现在正广泛普及于 60~70t 以上的大型炉中,但对中小炉因有飞溅问题几乎不能使用,这是因为从一根枪喷入的氧量相对炉体容积的比例过大的缘故。水冷枪的采用对炉前操作的合理化是必要的,作为今后的课题要扎扎实实地向中小型炉子推广应用。

3 AC/DC 炉的综合比较

3.1 总论

AC/DC 炉的特性比较及对其客观的评价对计划新炉时的机

种选定及设备、作业的改善等具有极其重要的意义。可是在现实中,除了给生产率和各种单耗造成根本差别的铁水作业外,即使再考虑到钢种、LF 的有无,通常正确的比较也是困难的,因为各炉间有复杂的固有设备和作业条件的差异。而且如果不只是评价现状,还包括评价将来的可能性,将进一步增加比较难度。例如,现今 DC 炉与 AC 炉相比较发表了生产率、各种单耗等优越性数据,但通常认为似乎多以旧的 AC 炉为比较的基准。新设炉中除一般的 AC/DC 炉的固有差别以外,作为设备整体,当然也折算了其在当时的合理化因素(例如功率等级、停电时间等),但从新 DC 炉与旧 AC 炉的数据差别中,仅只要区别出哪些是 AC 炉的因素,哪些是 DC 炉的因素就是极其困难的。

比如在日本国内 30t 以上的 DC 炉也已有 13 座在运转,而其操作数据甚为有趣,然而作为我们设备制造厂虽然详细分析了其内容,但是由于没有足够的信息和知识,所以也不能随意发表观点,以免误导读者。因而这里重视客观性,从海外求取例子,参考由 UCAR CARBONCO. INC 的 B. Bowman 处于客观立场在 1992 年^[8]和 1994 年^[9]两次发表的文献,并加上本人的意见,作为所要叙述的内容。再者,Bowman 后面发表的是基于德国 14 座 AC 炉的数据和运转中的 14 座 DC 炉的最新资料。

3.2 生产率

在 DC 炉的建设中有完全新建的情况和更换现有 AC 炉的情况,日本国内后者是主体。生产率可以“t/h”表示,日本国内的例子提出 DC 炉生产率能提高 10% 或以上的报告是普遍的。作为实际成绩这或许是正确的,然而当使关系到生产率之外的全部条件一致,仅只集中分析 DC 化因素的时候,并没有不利于 DC 炉的理论性因素,但是一般明显有利的理论根据也难以找出。因而这里以 AC 炉的生产率为 100 的情况下,DC 炉的生产率可视为 100~110。

3.3 能量的单耗

考虑能量单耗时,首先有必要分析其输出热量。输出热量除了有效的钢液的焓和其精炼所必要的渣的焓之外,作为损失部分有