

钢铁技术发展趋势丛书

底吹转炉法

——引进·搅拌效果·
顶底复合吹炼

〔日〕野崎 努 著

张柏汀 张劲松 译

冶金工业出版社

钢铁技术发展趋势丛书

底吹转炉法

——引进·搅拌效果·顶底复合吹炼

[日]野崎 努 著

张柏汀 译

张劲松

北 京

冶金工业出版社

2008

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2005-2215 号

Bottom Blown Converter

Introduction, Elucidation of Mixing Phenomena and
Extensive Development

© 2000 The Iron and Steel Institute of Japan

图书在版编目(CIP)数据

底吹转炉法: 引进·搅拌效果·顶底复合吹炼 / [日]
野崎 努著; 张柏汀, 张劲松译. —北京: 冶金工业出版社,
2008. 1

(钢铁技术发展趋势丛书)

ISBN 978-7-5024-4390-0

I. 底… II. ①野… ②张… ③张… III. 底吹
转炉炼钢 IV. TF715

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 177014 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 马文欢 张 卫 美术编辑 王耀忠 版式设计 张 青

责任校对 王贺兰 李文彦 责任印制 牛晓波

ISBN978-7-5024-4390-0

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2008 年 1 月第 1 版, 2008 年 1 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 8.75 印张; 230 千字; 257 页; 1—3000 册

30.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

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

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

出版说明

20 世纪 90 年代末,日本钢铁学会组织日本国内钢铁界的专家学者,编写了《钢铁技术发展趋势丛书》。该丛书从不同专业,不同角度,对钢铁技术,尤其是对日本钢铁技术的发展历程进行了系统的回顾和总结,并对钢铁技术的现状及未来发展趋势进行了评价和预测。

日本是钢铁技术最先进的国家之一。虽然日本的国情及钢铁技术发展背景与我国不同,但其钢铁技术发展历程及经验教训对我国的钢铁工业会有有一定的启迪价值。

冶金工业出版社在中国金属学会理事长翁宇庆同志及副理事长仲增墉同志的关心和支持下,准备陆续将此套丛书介绍给我国读者,并希望此套丛书(中文版)的出版,能对我国钢铁技术的发展有所裨益。

《钢铁技术发展趋势丛书》发刊词

日本的钢铁技术现在处于世界领先地位,这是先辈们长期不懈的努力所赐,令我们感到骄傲,同时也感到肩负着莫大的责任。为了构筑钢铁技术的工学体系,为了该领域新的研究和开发,我们作为当今的技术工作者,要承担起对技术中潜在的大量信息进行取舍和选择的基础性建设工作。

日本钢铁学会过去曾多次出版过反映日本钢铁技术状况的便览和技术资料。学术性刊物《铁和钢》也发表过许多研究成果,记述了不断进步的技术和我们在技术方面的成长过程。但是现在有种钢铁技术已经达到饱和点的感觉,弥漫着停滞的气氛。为了打破这种局面,以新的想像去发展钢铁技术,就要回顾一下我们曾经倾注了心血和努力所培养、积累的技术和研究经验,从中获取新的启示。有鉴于此,必须以先辈们积累的珍贵知识财富为背景来建立工学体系。

遗憾的是,日本的工程技术人员在这方面并不擅长。因此,我在副会长任上的1991年12月,曾向日本钢铁学会培训委员会提出出版具有以下特点的学术丛书,作为朝此方向迈进的第一步:

(1) 作为展望技术发展历史的平台,其内容包括:技术是在怎样的背景下发生的,怎样展开的,又是怎样形成的,要从长远发展的目光来评述。

(2) 组建“知识产权分会”,以该会的权威性来挑选执笔人。执笔人可按自己的意见对题材进行取舍、选择和评价,组织人员,确定内容等。

(3) 基本内容应是《铁和钢》(或以此为基准的资料)所记载的具有历史价值的综述论文,并用现在的观点加以评价。

(4) 经过数年形成一个系列之后,将它作为钢铁科学技术的路标,初级的知识财产。

幸运的是,此项工作得到了培训委员会和理事会的理解与支持,作为纪念日本钢铁学会成立80周年的规划,《钢铁技术发展趋势丛书》第一系列共10卷出版发行了。我们期待这一规划能在技术成就的背景下,为今后钢铁工学的研究及技术构成,提供积极发言的基础。

最后,对出版本丛书给予充分理解并鼎力支持的地人书馆表示衷心感谢。

(社团法人)日本钢铁学会 培训委员会 知识产权分会
委员长 增子 昇
1995年1月

第二系列丛书发刊词(前言)

有关出版《钢铁技术发展趋势丛书》的宗旨,在第一系列丛书的发刊词中已有阐明。第二系列丛书发行目的亦是相同的,如果说稍有不同之处,便是此系列丛书的作者大多年轻一些,他们正好是日本钢铁工业独立自主、蓬勃发展时期,活跃在第一线的学者们。因此,在阅读第二系列丛书时,似乎能感受到他们的朝气与活力。

作者们在百忙之中勤于笔耕,使此丛书得以在进入 21 世纪前顺利出版,在此向作者们诚致敬意。同时向日本钢铁学会生产技术部事務局渡辺昭子女士致谢,感谢她在本系列丛书编辑工作中的辛勤劳动。

(社团法人)日本钢铁学会 培训委员会 丛书 WG

主编 崔部实

1999 年 12 月

前言

钢铁工艺技术过去没有在周刊杂志上连载过,因此也没有过将连载的内容整理成单行本的事。

在1980年1~10月的《现代周刊》上,柳田邦男以《冰天、夏日》为题连续发表了有关汽车、LSI、电视机等的日本技术,以及日本技术人员在开发过程中艰苦奋斗的故事。其连载的一部分内容为《铁始终是热的》,叙述了底吹转炉引进时期的艰辛故事。后来,以《日本的逆转之日》^[1]为题将这部分内容整理成了单行本,它并不是钢铁技术工作者、研究人员的技术论文,而是记录真实的小说,但却远比专业技术论文更值得技术工作者精读。

本书不是小说,书中关于底吹转炉技术的归纳整理,参考、引用了《铁和钢》和日本钢铁学会的智慧结晶,并以《钢铁技术发展趋势丛书》第一系列作为参考,其主旨是要将技术引进的背景、技术的

普及和演变这样具有历史性的内容作为重点来写。

稍稍啰唆了一点,但是,仍想引用柳田邦男^[1]的结尾语:石油危机以后的日本经济卷入了低增长、高成本、耗能大、公害大、国际摩擦多等严峻形势的涡流中。但是,技术工作者们只有在这样的条件下,才能感觉出自身存在的意义。如果对他们的共同特点进行总结的话,则可用如下语言来形容:

(1) 遇困境反倒坚持拼命干;

(2) 有一定要明确地掌握要求和实现目标的强烈意识;

(3) 敢于挑战似乎不可能的事;

(4) 性格顽强,有竞争意识;

(5) 超越职务等级的差别,大家抱成一团攻克难关;

(6) 达到了废寝忘食的境界;

(7) 不只是完成交给的任务,而是要自发地去研究问题,等等。

柳田邦男从1981年开始记述,经历近20年。但是,现在日本的社会、经济是处于比当时更加严峻的条件下的,这样说一点也太过分。为了切实地重振日本经济大国的地位,构筑强有力的基础,从事制造业的技术工作者、研究人员就有必要自觉地传承上述七个方面的精神。

20世纪即将过去,回首过去,的确可以说20世纪在钢铁发展史中是技术革新的时代。有从1950年开始取代平炉的LD转炉的发明,有由双重套管喷嘴的发明所导致的LD转炉以前的贝塞麦转炉和托马斯转炉的复苏及对它的重新评价。这些推进了底吹转炉的工业化,促成了OBM/Q-BOP的出现。

引进的搅拌技术当然也得到了研究,结果是几乎所有的 LD 转炉都改造成了“顶底复合吹炼转炉”。同时经过对炉内反应的重新认识,讨论了转炉的功能分化,确立了铁水预处理法。

为了防止传统厚板和铸锻钢的白点,开发的脱气装置被普遍纳入到了炼钢工艺流程中,它不仅可以脱气,而且也是分离去除夹杂物的反应器,增加了生产极低碳钢的脱碳反应器的作用。像这样,作为转炉的后续工序,钢包精炼对炼钢工艺流程来说已经是不可缺少的了^[2]。

战后开发的连铸机,最初是为了生产代替半镇静钢的廉价镇静钢。但是,在技术提高的同时,连铸机也适用于传统的铝镇静钢的生产,在这 30 年间,过去的钢锭模铸法完全被淘汰了。

如上所述,炼钢中既便以脱碳法为中心,1950 年以后也仍然可被评价为高速技术革新的时代。

由东京大学名誉教授馆充任编委主任,由日本钢铁学会于 1982 年出版的《我国氧气炼钢法的历史》^[3],完整地总结了至当时为止的关于顶吹转炉(LD 转炉)的引进及技术开发的历史。

但是,底吹转炉由于当时刚刚引进不久,在该书中只有 10 页左右的记载。所以,《钢铁技术发展趋势丛书》第二系列的责任主审千叶工大雀部教授要求本书从历史的角度来写,根据技术的演变过程来描述底吹转炉在日本是依据怎样的考虑引进的,被进行了怎样的技术革新,以及对炼钢技术产生了什么样的波及效果。虽然不知道按照雀部教授的要求有多少可以如实地记述,但是,再一次回想起曾经与底吹转炉奋斗过的历史,还是应该尽可能

客观地还原事实的本来面目。

另外,关于本书的书名多少要说一下其来由。日本钢铁学会给的书名为《底吹转炉》。川崎制铁千叶第三炼钢厂是日本最早设置底吹转炉(Q-BOP)的,如果从实验和理论两方面调查它的冶金特性,则如在第4、6章所述那样,没有必要100%地从底部吹入氧气。也就是说,日本底吹转炉的引进仅千叶就足够了,与LD转炉引进的时代不一样,第2座、第3座底吹转炉引进日本是完全没有必要的。日本的各钢铁公司也早就注意到这一点,进行了顶吹转炉的炉底改造,以迅猛的姿态抓住了顶底复合吹炼转炉的开发,并确立了其地位。

认识到这样的状况,说清了由底吹转炉所得到的冶金现象,叙述了该技术给传统炼钢工艺过程带来的影响,认为本书可以取名为《赋予底吹的转炉法》。但是,考虑到书中记述的底吹转炉的波及效果是确实存在的,书名就取为《底吹转炉法》,以涵盖钢铁技术演变所产生的波及效果。

野崎 努

2000年2月

参 考 文 献

- 1) 柳田邦男:「日本の逆転した日」(講談社,1981年4月)
- 2) 梶岡博幸:「取鍋精錬法」(地人書館,1997年)
- 3) 日本鉄鋼協会:特別報告書 No. 33「わが国における酸素制鋼法の歴史」(1982年1月)

目 录

1 底吹转炉法引进的背景	1
1.1 底吹转炉技术的演变(从贝塞麦到托马斯)	1
1.2 LD 转炉法的实用化	2
1.3 NKK 前社长三好先生对 LD 转炉引进过程的阐述	4
1.4 川崎制铁使用氧气的历史和 LD 转炉的引进	6
1.5 底吹转炉的复兴	11
1.6 底吹转炉引进的原委	12
1.7 当时的炼钢部长川名对引进前夜的阐述(第 1 章的总结)	13
参考文献	17
2 双重套管的发明与底吹转炉的诞生 ...	18
2.1 Savard 和 Lee 发明的双重套管喷嘴	18
2.2 底吹转炉(OBM)的诞生	22
2.3 底吹转炉的种类	27
2.3.1 底吹转炉的大型化(Q-BOP 的诞生)	27
2.3.2 LWS 转炉	28

2.3.3 CLU 转炉	31
2.4 底吹转炉的设计和设各	32
2.5 炉底喷嘴的保护和传热(蘑菇头的生成)	34
2.6 搅拌研究的回顾(第 2 章的总结)	39
参考文献	40
3 用冷态模型对底吹转炉法的评价	41
3.1 水模型的有用性	41
3.2 冷态模型的应用	42
3.3 冷态模型的底吹转炉内渣、金属的混合速度	43
3.3.1 水模型均匀混合时间的测定	44
3.3.2 熔池均匀混合时间的实验结果	45
3.3.3 渣-金属间的传质测定	46
3.3.4 渣-金属间的传质实验结果	48
3.4 冷态模型的应用总结	51
参考文献	52
4 底吹转炉的脱碳和搅拌效果的解析	55
4.1 脱碳反应的解析	55
4.2 底吹转炉吹炼的自动控制	59
4.2.1 底吹转炉吹炼控制系统的构成	61
4.2.2 动态控制模型的开发	62
4.2.3 吹炼控制系统的效果	69
4.2.4 吹炼命中率的提高	76
4.3 熔池搅拌效果的解析	77
4.3.1 熔池搅拌的魅力	77
4.3.2 底吹转炉的搅拌力	78
4.3.3 LD 转炉混合时间的估计(之一)	79
4.4 均匀混合时间的测定	81
4.5 体现氧化精炼炉的工艺参数(ISCO)	84

参考文献	89
5 底吹转炉用耐火材料的开发	91
5.1 耐崩裂性的量化	92
5.2 应用 AE(Acoustic Emission)的耐火材料开发	94
5.3 MgO-C 砖和砌炉法的开发	97
参考文献	100
6 顶底复合吹炼转炉的发展	101
6.1 底吹转炉的波及效果	101
6.2 小型试验转炉的研究	103
6.3 顶底复合吹炼转炉的设计与施工	104
6.4 弱搅拌型顶底复合吹炼转炉的开发(LD-KGC)	105
6.5 强搅拌型顶底复合吹炼转炉的开发(K-BOP)	107
6.6 设备参数	110
6.7 炉体剖面图	111
6.8 粉体喷吹设备	112
6.8.1 喷吹罐的配置和配管长度	112
6.8.2 喷吹系统的压力损失	112
6.8.3 气体的种类和配管系统	113
6.8.4 改造工程	113
6.9 顶底复合吹炼转炉的冶金特征	113
6.9.1 钢中碳、氧的行为	114
6.9.2 钢中氢的行为	115
6.9.3 钢中氮的行为	117
参考文献	119
7 体现顶底复合吹炼转炉冶金特性的参数	121
7.1 顶底复合吹炼转炉 ISCO 的应用	121
7.2 顶底复合吹炼转炉的均匀混合时间(之一)	125

7.3 顶底复合吹炼转炉的搅拌能供给强度供给式的导出	126
7.4 LD 转炉的均匀混合时间(之二)	129
7.5 顶底复合吹炼转炉的均匀混合时间(之二)	130
7.6 顶底复合吹炼转炉的冶金指标 BOC 的引入	133
7.6.1 BOC 导出的实验	133
7.6.2 钢液中的自由氧及其对渣中氧化铁含量的影响 ..	134
7.6.3 脱锰反应	136
7.6.4 支配(T.Fe)量的因素	137
7.7 顶底复合吹炼转炉的物料平衡	140
7.8 Q-BOP 的优先脱碳法	142
7.9 顶底复合吹炼转炉内脱碳和脱氧反应的模型化	143
7.10 5 t 试验转炉中的搅拌力和 p_{CO} 稀释实验	144
7.11 5 t 和 180 t LD-KGC 炉的底吹 CO	144
7.12 5 t 试验转炉的 IOD 法	146
7.13 转炉内脱氧、脱碳的数学模型	147
7.13.1 用数学模型的计算结果	151
7.13.2 230 t Q-BOP 炉中的反应模型解析	154
7.14 感应炉与 5 t 试验炉中金属与渣的氧位	156
7.15 LD-KGC 用 CO 气体搅拌的改造	158
7.16 精炼工艺搅拌的总结	159
参考文献	165
8 底吹转炉的脱磷及其在铁水预处理中的应用	167
8.1 底吹转炉中磷的行为	167
8.1.1 5 t 转炉 CaO 系熔剂脱磷	168
8.1.2 喷嘴数对脱磷的影响	168
8.2 底吹转炉铁水预处理法	170
8.3 底吹转炉铁水预处理法的开发和反应机理	171
8.4 解释反应机理的实验	172

8.4.1	230 t Q-BOP 的实验	172
8.4.2	5 t Q-BOP 的实验	172
8.4.3	小型熔化炉的实验	173
8.5	铁水预处理法的实验结果	173
8.5.1	使用顶渣的脱磷	173
8.5.2	添加萤石促进顶渣脱磷	174
8.5.3	捕捉到的渣粒的组成	175
8.5.4	CaO 粉上浮中脱磷的热力学研究	177
8.5.5	CaO 脱磷的反应过程(小型熔化炉脱磷 试验结果).....	178
8.6	Q-BOP 炉的铁水脱磷综合模型	179
8.7	预处理过铁水的转炉炼钢法	181
8.7.1	预处理过铁水的极低磷钢的生产	181
8.7.2	锰铁合金使用量的减少	182
8.8	铁水包的铁水处理试验	182
8.8.1	试验方法	183
8.8.2	处理中铁水成分的变化	184
8.8.3	氧分压 p_{O_2} 的测定	185
8.8.4	CaO 系渣的 C_{PG} (Phosphate Capacity) 的估算	186
8.8.5	p_{O_2} 的影响和同时脱磷、脱硫处理	187
8.9	铁水预处理法的总结	188
	参考文献.....	189
9	喷吹粉剂的铁水脱磷反应模型	191
9.1	铁水预处理中的脱磷行为	191
9.2	脱磷反应限制环节的推断	191
9.2.1	铁水处理中的脱磷行为	191
9.2.2	K_M 的估算	193
9.2.3	K_S 的估算	194

9.2.4 限制环节的变化	195
9.3 脱磷速度式的导出	196
9.3.1 渣粒侧传质为限制环节时的情况	196
9.3.2 铁液侧传质为限制环节时的情况	197
9.4 脱磷行为的总结	197
9.5 脱磷反应模型的总结	202
参考文献	203
10 含铬钢冶炼、精炼的发展	204
10.1 铬矿石的熔融还原	204
10.2 5 t 试验转炉中的熔炼试验	205
10.3 5 t 转炉中的熔融还原条件	207
10.4 5 t 转炉中炉底喷嘴(a)的试验结果	208
10.5 5 t 转炉中同时底吹矿石和氧气的试验	209
10.6 5 t 转炉中用微炭粉喷枪带吹矿石的试验	209
10.7 铬球团的熔融还原法的不锈钢冶炼	211
10.8 熔融还原法的热平衡与二次燃烧	213
10.9 铬球团的供给速度与还原速度	214
10.10 用铬矿石熔融还原的不锈钢冶炼技术	215
10.11 不锈钢冶炼工艺的演变	216
10.12 炭材对铬矿石还原的影响	219
10.13 “SR-KCB”和“DC-KCB”操作的总结	222
10.14 不锈钢的脱碳	225
10.14.1 弱搅拌型顶底复合吹炼转炉中的脱碳行为	225
10.14.2 搅拌力的效果	225
10.14.3 p_{CO} 的效果	227
10.15 铬钢精炼的冶金特性比较——ISCO、BOC、 CROI	228
10.16 强搅拌型炉(DC-KCB)的脱碳	234
10.16.1 促进脱碳的技术	234