

炼钢氧枪技术

Oxygen Lance Technology for Steelmaking

袁章福 潘贻芳 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>



炼钢氧枪技术

Oxygen Lance Technology for Steelmaking

ISBN 978-7-5024-4203-3



9 787502 442033 >

定价 58.00 元

销售分类建议：冶金工程

炼钢氧枪技术

袁章福 潘贻芳 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2007

内 容 提 要

本书重点介绍了氧枪在炼钢过程中的应用,强调了氧气炼钢的重要性。本书共9章,分别为:国内外转炉氧枪系统的发展和电弧炉炼钢用氧技术、可压缩气流的理论基础、喷头射流的冷态测试方法、射流特性、氧气射流与熔池的相互作用、转炉用氧枪的设计、氧枪在转炉溅渣护炉中的应用、电弧炉炼钢用氧技术、煤氧炼钢技术和炉外精炼用氧枪技术等。在气流的理论基础和射流特性的基础上,通过冷态测试和模拟实验方法研究炼钢过程中氧气射流与熔池的作用机理和传递现象,提出炼钢炉气和熔池流动的数学模型和经验公式,便于完善炼钢用氧枪或氧燃枪的设计、改造和提高生产率。

本书可以作为从事钢铁冶金以及化学工程与技术的科技工作者、管理人员和现场技术工人的参考学习资料,也可用于钢铁冶金、化学工程专业的研究生或本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

炼钢氧枪技术/袁章福等编著. —北京:冶金工业出版社,
2007. 2
ISBN 978-7-5024-4203-3
I. 炼… II. 袁… III. 炼钢—吹氧管 IV. TF724. 3
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 013178 号

出 版 人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)
责任编辑 刘小峰 (010-64027931; forrest_liuxf@sohu.com)
美术编辑 李 心 责任校对 符燕蓉 李文彦 责任印制 牛晓波
北京兴顺印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销
2007 年 2 月第 1 版, 2007 年 2 月第 1 次印刷
787mm×1092mm 1/16; 20.75 印张; 499 千字; 318 页; 1-4000 册
58.00 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
(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

氧气是现代炼钢工艺不可缺少的，而氧气是通过氧枪喷头形成高速氧气射流与金属熔池中的钢液和熔渣的相互作用，并进行流动、传热、传质和化学反应，来完成合格钢种的冶炼和生产。随着氧枪技术的进步和电弧炉炼钢的发展，氧气在炼钢中的应用范围不断扩大。为此，本书首先总结了国内外转炉、电弧炉炼钢用氧技术和氧枪的发展。

喷头射流的流体力学特性、与熔池的相互作用和反应机理的好坏，直接影响炼钢炉的各项生产技术指标和加工工艺。因此，本书在第2章归纳可压缩气流理论上，结合作者从事氧枪研究的经历，在第3章介绍了喷头射流特性测试方法。将前人的有关氧气射流作用机理以及数学模拟计算与水力学物理模型实验的研究结果，归纳整理成第4、5章。编写时力求使这些内容由浅入深、通俗易懂、理论与实践相结合。

第6章运用上述的理论，结合作者从事氧枪研究的经验，总结了设计转炉用氧枪的实用方法，并简单介绍了氧枪喷头的结构，提出了一套有效的喷头设计和铸造加工方法。还介绍多种喷头在转炉炼钢中的应用情况，特别报道了转炉二次燃烧氧枪的射流特性和模拟计算。为了满足从事氧枪研究和炼钢生产现场的需要，以100t转炉为例，介绍了该系统用氧枪和喷头的计算设计，并采用等截面喷管的计算方法，进行了复吹转炉底吹喷嘴的设计介绍。

转炉溅渣护炉工艺是20世纪90年代开发的一项重大炼钢技术，在我国转炉上得到广泛的推广和应用，使转炉炉龄普遍提高几倍以上，经济效益显著，引起了世界钢铁界的瞩目。但是，溅渣护炉技术同样需要使用原来转炉的氧枪系统或略加改进，将氧气切换为氮气，通过氧枪喷头形成的超声速氮气射流使调整好的炉渣喷溅至转炉内壁表面，烧结形成高熔点的含MgO溅渣层，达到提高转炉炉龄的目的。第7章在氧枪理论和实验研究结果的基础上，重点归纳了氧枪在转炉溅渣护炉技术中的作用、氧枪溅渣过程的动力学模型研究结果和氧枪溅渣工艺参数的确定。

第8章总结了电弧炉炼钢用氧技术，包括电弧炉用多功能氧碳枪、氧燃烧嘴、聚合射流氧枪和二次燃烧等技术，还介绍了将许多上述的新技术有机地融合在电弧炉内、形成的Danarc技术。炉门碳氧枪技术和煤氧枪助熔技术等内容是作者参加或负责的国家攻关课题研究成果的总结。

煤氧炼钢技术是以煤氧燃烧产生的热量为炼钢的主能源，熔化废钢、生

铁块或直接还原铁等固体原料后,进一步精炼成钢的技术。第9章介绍了KS法、EOF法、反应器法、转炉式等煤氧炼钢方法。另外,还简单介绍了RH、CAS等精炼炉设备使用氧枪技术的情况。

本书第7章和第3、4、5章的部分章节由赵宏欣撰写,其他部分由潘贻芳和袁章福共同撰写完成,并由袁章福执笔总纂定稿。本书的形成得益于万天骥教授、杨天钧教授、李文超教授、谢裕生研究员和李正邦院士的培养和指导,在此表示诚挚的感谢和崇高的敬意。衷心感谢曾小平、许克亮、李树庆、王宝明、李士琦、刘浏、赵沛、曾加庆、包燕平、郭占成、薛庆国、王新华、李京社、朱荣、蔡志鹏、马恩祥、杨文远和苏天森等教授专家的支持和帮助。范建峰、徐聪、王志、李文兵、周峨、李建强、谭强强、王晓强等博士为本书提出了宝贵意见,借此深表谢意。杨肖、李斌、关璐硕士和李晶、杨绪壮、王玉明、张军玲、熊绍锋博士研究生以及窦磊、张晓瑞硕士研究生对本书的编著进行了文献收集和书稿整理,在此表示感谢。

本书的出版得到天津钢铁有限公司和中国科学院过程工程研究所以及多相复杂系统国家重点实验室的大力支持。最后,特别感谢与作者同窗的北京科技大学和江西冶金学院的同学及校友。

由于作者水平和经验所限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请各位专家和读者给予批评指正。

袁章福 潘贻芳

2006年6月

目 录

1 绪论	1
1.1 国内外转炉氧枪系统的发展	2
1.2 电弧炉炼钢用氧技术	7
1.2.1 氧燃烧嘴	9
1.2.2 氧(碳)枪脱碳及造泡沫渣	10
1.2.3 炉气二次燃烧用氧	10
1.3 炼钢用氧过程的安全与经验	11
1.3.1 事故的种类与分析	11
1.3.2 氧气管道的设计与施工	14
1.3.3 氧枪的设计要求与制造	15
1.3.4 氧枪的安全使用与经验	15
1.4 电弧炉与转炉的炼钢技术耦合	16
参考文献	17
2 可压缩气流的理论基础	18
2.1 气体动力学的基本概念	18
2.1.1 气体状态参数与理想气体状态方程	18
2.1.2 常用气体系数和单位	20
2.1.3 相似准数	22
2.2 一维可压缩流体流动的基本方程	23
2.2.1 连续性方程	23
2.2.2 动量方程	24
2.2.3 能量方程	24
2.2.4 可压缩气体的流出速度	25
2.3 亚声速与超声速气流	26
2.3.1 声速	26
2.3.2 马赫数、马赫角和马赫线	27
2.3.3 流动区域的划分	29
2.3.4 亚声速气流与超声速气流的差异	30
2.4 超声速气流的临界参数	31
2.4.1 获得超声速气流的条件	31
2.4.2 滞止参数或总参数	32

2.4.3 气体的临界参数	34
2.4.4 超声速气流各参数随喷管面积比的变化关系	35
2.5 压缩性气体流出的质量流量	36
2.5.1 亚临界流量的计算	37
2.5.2 临界流量的计算	37
2.6 激波与喷管流动特性	38
2.6.1 激波	38
2.6.2 正激波、斜激波和膨胀波	39
2.6.3 喷管的流动特性	41
2.7 等熵流函数计算图表	44
2.7.1 可压缩气体等熵流图	44
2.7.2 氧气焓熵图	45
参考文献	45
3 超声速喷头的冷态测试	46
3.1 喷头测试系统装置及其原理	46
3.2 超声速喷管出口马赫数的测定	47
3.2.1 根据出口与喉口截面的比值确定	47
3.2.2 根据激波后的总压和激波前的静压确定	48
3.2.3 用测量斜激波角的方法确定	50
3.3 超声速气流温度的测定	52
3.3.1 高速气流温度测定的理论公式	52
3.3.2 气流温度的实验测量	53
3.4 喷头流量和管道内部压力损失的测量	54
3.4.1 孔板流量计的原理	54
3.4.2 标准状态时体积流量的计算公式	56
3.4.3 管道内部压力损失的测量	58
3.5 流股动压衰减规律的测定	58
3.5.1 动压衰减的测定	59
3.5.2 流股径向的动压分布特征	60
3.5.3 流股刚性角的测量	60
3.6 冲击面积和有效冲击面积的测定	60
3.7 流股引射量和引射系数的测定	61
3.8 用光学方法观察流股的结构	62
3.9 三维多股射流流场的图形处理	63
3.9.1 网格化	63
3.9.2 流场图形的处理	64
参考文献	66

4 喷头射流的特性	67
4.1 湍流自由射流	67
4.1.1 等温自由射流的特性	68
4.1.2 轴对称射流的流动	68
4.2 单股轴对称超声速湍流射流	73
4.2.1 超声速轴对称自由射流的结构	73
4.2.2 超声速长度与马赫数的关系	73
4.3 多股超声速射流的特性与模型	75
4.3.1 射流中心线的偏移	75
4.3.2 抽引系数	76
4.3.3 二次燃烧氧枪喷头的流场特性	77
4.4 氧枪喷头射流的速度分布	80
4.4.1 超声速射流湍流特性	80
4.4.2 脉动速度	82
4.4.3 自相关系数	83
参考文献	84
5 氧气射流与熔池的相互作用	86
5.1 氧枪射流的冲击深度	86
5.2 氧枪射流的冲击面积	89
5.2.1 射流冲击面积的测定与计算公式	89
5.2.2 冲击面积的影响因素	89
5.3 射流作用下的熔池流动与传质	91
5.3.1 顶吹气体射流冲击下熔池流场的数学模型	91
5.3.2 顶底复吹转炉熔池流场及循环流量	96
5.3.3 射流作用下熔池传质的模拟实验与计算	100
5.4 转炉炉内流场、传热与传质	105
5.4.1 转炉炉气流动的数学模型	105
5.4.2 转炉中金属液滴的产生、运动及传热模型	111
5.4.3 炉内二次燃烧的流动、传热与传质模型	113
5.5 转炉火点区域的反应特性	119
5.5.1 火点面积的计算	119
5.5.2 氧气射流吹炼时的氧化反应	121
5.5.3 炉内耗氧量与反应动力学	121
5.6 射流侧吹作用熔池的特性	123
参考文献	125

6 转炉氧枪的设计与应用	127
6.1 氧枪设计	127
6.1.1 氧枪枪体	127
6.1.2 氧枪喷头	133
6.1.3 氧枪受热机理与热平衡计算	136
6.1.4 氧枪枪身套管的确定	138
6.1.5 喷头加工与氧枪装配	141
6.1.6 氧枪的密封及膨胀装置	145
6.1.7 一种氧枪新型进出水方法	147
6.2 多孔喷头的设计	148
6.2.1 喷头端底结构	149
6.2.2 喷头冷却水流动的模拟	155
6.2.3 几种喷头设计方法的比较	158
6.2.4 喷头主要参数的计算与确定	160
6.3 100t 转炉用氧枪的设计实例	163
6.3.1 吨钢氧消耗量的计算	163
6.3.2 氧枪喷头的设计	165
6.3.3 枪身各层管径尺寸的确定	166
6.3.4 氧枪长度与冷却水的计算	169
6.4 一些喷头在炼钢过程的使用效果	171
6.4.1 旋流喷头	171
6.4.2 双角度低喷溅喷头	182
6.4.3 宝钢用双角度6孔喷头	194
6.4.4 聚合射流喷头	200
6.4.5 日本顶吹氧枪射流特性	204
6.5 转炉二次燃烧氧枪喷头的设计	212
6.5.1 二次燃烧氧枪的发展及基本机理	212
6.5.2 二次燃烧氧枪的射流特性	216
6.6 转炉底吹喷嘴的设计	218
6.6.1 转炉底吹供气元件的类型及主要特点	218
6.6.2 底吹喷嘴的设计	220
6.7 氧枪与转炉煤气回收技术	224
6.7.1 转炉煤气回收系统	224
6.7.2 供氧强度等对煤气回收的影响	225
6.7.3 提高煤气回收量的综合措施	226
参考文献	227

7 氧枪在溅渣护炉中的作用	230
7.1 转炉溅渣护炉工艺与技术	230
7.1.1 溅渣护炉的发展	230
7.1.2 溅渣护炉的理论与工艺	230
7.2 氧枪溅渣护炉过程的物理模拟	234
7.2.1 溅渣护炉物理模型的建立	234
7.2.2 溅渣护炉的水模试验	235
7.2.3 溅渣护炉用喷头射流特性与熔池的作用	240
7.3 溅渣护炉氧枪与氮气系统	241
7.3.1 溅渣护炉氧枪	241
7.3.2 溅渣护炉氧枪的设计与维修	241
7.3.3 溅渣护炉供氮系统与用氮量的计算	243
7.4 顶底复吹溅渣工艺与底部供气	245
7.4.1 溅渣护炉的复吹冶炼工艺	245
7.4.2 底吹对溅渣护炉的影响	246
参考文献	247
8 电弧炉用氧技术	249
8.1 多功能氧碳枪与 Consteel 电弧炉	249
8.1.1 多功能氧枪	249
8.1.2 Consteel 电弧炉炼钢技术	253
8.1.3 炉门碳氧枪	261
8.1.4 炉墙碳氧枪	265
8.2 氧燃烧嘴助熔技术	266
8.2.1 氧燃烧嘴助熔原理	267
8.2.2 氧燃烧嘴的设计	268
8.2.3 煤氧枪助熔技术与工艺	277
8.3 聚合射流氧枪技术	280
8.3.1 聚合射流氧枪的特点	281
8.3.2 聚合射流氧枪在电弧炉上的应用	283
8.3.3 聚合射流氧枪技术在国内的应用前景	284
8.3.4 聚合射流氧枪技术在电弧炉中的应用效果	284
8.3.5 Cojet 技术的优越性及推广应用	285
8.4 电弧炉用二次燃烧技术	286
8.4.1 二次燃烧的基本原理	286
8.4.2 二次燃烧的系统组成及技术特点	287
8.4.3 二次燃烧用氧技术要点	287
8.4.4 二次燃烧技术进展	288

8.5 Conarc 炼钢法与 Danarc 技术	288
8.5.1 交替使用氧枪和电极的 Conarc 炼钢法	288
8.5.2 Danarc 电弧炉技术	291
参考文献	295
9 煤氧炼钢技术与炉外精炼用氧枪技术	297
9.1 煤氧炼钢技术	297
9.1.1 炼钢用煤技术	297
9.1.2 煤氧炼钢方法	298
9.1.3 煤氧炼钢与电弧炉炼钢的比较	301
9.1.4 双膛煤氧炼钢炉	303
9.2 炉外精炼用氧枪技术	304
9.2.1 氧枪在 RH 精炼炉的应用	305
9.2.2 CAS-OB 精炼炉用氧枪技术	307
9.2.3 一种可滑动的烧嘴及组合氧枪	310
参考文献	312
附 录	313
附录 1 激波前马赫数与 p_{0y}/p_x 的关系表 ($\kappa = 1.4$)	313
附录 2 气体绝热函数表	314

1 绪 论

根据对 2010 年钢材消费量的预测^[1]，工业发达国家年均增长量为 0.7%，发展中国家将达到 3.8%，而太平洋地区的增长为 4.6%。进入 21 世纪，面对机遇和挑战，炼钢企业必须努力发展高效生产工艺，降低成本，提高产品质量和减轻对环境的污染，才可能立于不败之地。表 1-1 为世界前七位产钢国家和地区的粗钢生产量。氧气转炉炼钢是目前世界上最主要的炼钢方法^[1~5]。世界主要产钢国的转炉钢生产比例仍保持为 60%~84%，其余 16%~40% 的粗钢使用电弧炉生产。我国自 1996 年钢产量超过 1 亿 t 以来，已经连续 7 年成为世界第一产钢大国。最近 2~3 年内已进入高峰期，到 2005 年，我国年产钢量达到 3.5 亿 t。但是，当前钢铁工业迅猛的发展，无疑增加了更大的潜在风险。

表 1-1 世界主要产钢国家和地区粗钢生产量 (万 t)

年 份	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
中 国	10139	10891	11459	12395	12724	14870	18150	22234	28050	34936
日 本	9880	10455	9355	9419	10644	10286	10980	11051	11272	11248
美 国	9467	9848	9866	9728	10099	9010	9158	9044	10388	10351
独联体	7688	8031	7395	8558	9640	9970	10161	10800	11175	11290
德 国	3979	4501	4405	4206	4637	—	4501	4484	4641	4451
韩 国	3890	4255	3990	4104	4312	4385	4539	4631	4750	4780
巴 西	2524	2615	2576	2500	2775	2672	2960	3115	3291	3163
世 界	75201	79897	77739	78773	84300	85018	90307	96494	106700	113180

注：中国的粗钢产量未计入台湾省的粗钢产量。

氧气炼钢工艺从最初的设想到首次实现工业化应用经历了 150 年，而对于整个钢铁工业的影响是具有革命性的技术发展。顶吹氧气工艺已应用了大约 50 年，全世界采用该工艺生产的钢水总量约为 130 亿 t。自 1969 年以来还有 11.5 亿 t 钢水是用顶底复吹转炉生产的。当然，发展过程如此之长是有原因的：铁水精炼的技术需要摸索，只有在 1928 年发明了 Linder/Frinkl 工艺后才能够获得大量的氧气供应，当时还没有大规模炼钢所需要的设施（如优质耐火材料和自动化等）。转炉炼钢技术领域还有很多其他重要发展，如工艺控制、扩大产能的炉型设计、出钢末期的渣钢分离、氧枪、副枪、烟气净化系统、低能耗高效率的电除尘器、钢厂物流管理、二次冶金、铁水预处理等。

转炉的冶炼时间几乎不随炉容的增加而变化，因而转炉炉容大幅度提高，甚至使每炉钢达到 400t。拥有两座大型转炉的钢厂的生产率约为 1000t/h，而过去两座超大型平炉的生产率只有 160t/h。

图 1-1 示意了全球粗钢生产采用不同工艺的变化。转炉工艺已占到全球炼钢生产的 60% 左右，电弧炉为 34%，平炉 4%，其他工艺 2%，其中，我国以及发达国家已经淘汰

了平炉炼钢方法，目前主要集中在前苏联的国家。

20 世纪 50 年代中期，大型空气分离制氧装置的应用，带来了炼钢技术的革命^[2]，现代炼钢技术没有氧气无法进行钢铁生产。氧枪是目前炼钢方法（转炉、电弧炉）不可缺少的关键设备，直接影响到钢的产量、质量、原材料消耗和成本等主要技术经济指标。我国炼钢用氧技术的开发取得了显著效果，基本上可以满足炼钢生产的需要。今后，应提高炼钢用氧设备的设计和装置的制作质量，开发高质量钢的冶炼技术，加强相关炼钢用氧技术的基础研究。

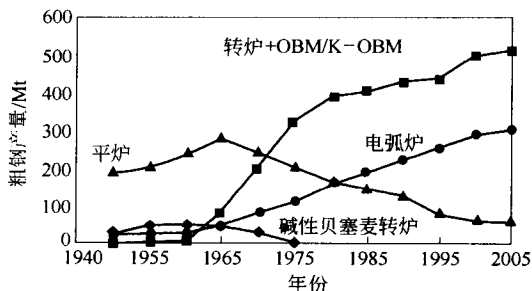


图 1-1 全球粗钢产量与生产工艺的变化

1.1 国内外转炉氧枪系统的发展

氧气转炉炼钢技术工艺的发展历程可以描述如下^[3]：

(1) 1855 年的专利申请中，提到插入式顶吹方案，用一根耐火黏土吹管喷吹空气。

(2) 第二种方法主要是埋入式顶吹方案，将空气吹入固定式转炉的炉底附件。

(3) 首先获得突破性进展的是底吹，将空气吹进一个可旋转的不对称转炉中。这就是所谓的碱性贝塞麦—托马斯工艺，当可以制备大量工艺用氧气后，1930 ~ 1949 年间进行了大量重要的开发工作。

(4) 1936 ~ 1939 年，重点研究了底吹工艺，但这时增加了吹氧以保证熔池充分搅拌。试验是在一台 1t 转炉进行的（Lellep 试验在奥本哈森进行）。

(5) 随后加强了顶吹，确保了氧气射流进入熔池深处进行搅拌（施瓦茨专利，1939 年）。

(6) 在此期间还试验了从转炉炉壁下部以一定角度侧吹氧气。试验是在加拉芬根由 Durrer 和 Hellbrügge 提供的 2t 转炉上进行的。由于种种原因，例如耐火材料侵蚀、风口损坏、喷溅严重、钢水质量等问题，上述 (4) ~ (6) 项研究没有推广到工业生产。

(7) 1949 年 6 月，奥地利林茨的奥钢联公司开始在一台改进的 2t 贝塞麦转炉上进行顶吹氧气试验。获得的最重要结果是，证实了深入熔池内部的氧气射流及其强大动能是搅动金属和熔渣所必需的，但是，产生的大量 CO 同液态渣滴和金属液滴一起构成乳化液。熔渣和金属液滴是在氧气射流造成的热点区由于流体动力学作用而从熔池中分离产生的。渣金乳化液具有极大的表面积，再加上 CO 生成的面积，显著提高了精炼反应速度。这样，就奠定了大规模工业应用的基础，包括：1) 高脱碳速度，快速造渣，尤其重要的是高生产率；2) 水冷顶吹氧枪与转炉耐火材料和氧气射流造成的热点区（2500℃）有充分的距离；3) 纯氧的应用确保了钢水质量；4) 工艺和设备简单，运行和投资成本低。

随后，在林茨的 15t 转炉的试验以及多纳维茨的 5t 和 10t 转炉上的进一步试验，证明了该工艺的工业可行性、经济效益和生产广泛产品的可能性。转炉钢经过长达 15 年时间才被全面接受。1958 年，“林泽特”号轮船完全使用林茨和多纳维茨钢厂生产的钢板、型

材、铆接件、锻件、铸件等建造。最终,在广泛使用钢材的造船业,转炉钢也被完全认可。深冲钢种的生产也没有任何问题。1952年11月27日,在第一次转炉炼钢试验仅42个月之后,林茨钢厂第一座30t转炉炼出第一炉钢。多纳维茨钢厂的转炉生产始于1953年。这种自热式氧气炼钢工艺的生产率很高,带来了对于大高炉的需求;其冶炼时间很短,且冶金效果和钢水温度离散性低,为连铸技术的迅速发展奠定了基础。随着转炉工艺在林茨的发展和大规模应用,50年代后期,奥钢联工程技术公司(VAI,简称奥钢联)在林茨建立。到今天,奥钢联已建设了180座转炉,包括大量重要的改进和新方案。

(8) 1936~1939年间进行的底吹氧气试验几乎30年之后,开发出用碳氢化合物保护底吹风口的方案。OBM/Q-BOP(1968年)、K-OBM和他热式KMS(1977年)等底吹氧气工艺相继开发出来,废钢比达到50%。喷石灰、喷煤和二次燃烧等技术也得到大规模应用。底吹强度达到 $5\text{m}^3/(\text{t}\cdot\text{min})$ 。世界各地转炉(包括氧气底吹转炉)钢的年产量达到约5500万t。

(9) 底吹和复吹转炉技术的进一步改善,也促进了氧气顶吹结合惰性气体底吹搅拌工艺的改善。这是指在高碳范围内用 N_2 、而达到低碳范围时切换为Ar进行转炉熔池的搅拌。现在世界上几乎所有的氧气炼钢转炉都采用顶底复吹的方案。

(10) 最新的发展很可能是在高碳范围内部分顶吹热空气结合底吹氧气。氧气顶吹时与CO反应生成 CO_2 的二次燃烧率为8%~12%,复吹时为15%~20%,而底吹氧加上顶吹热空气(1200℃)时则可达到约60%。

回顾50年来氧气转炉炼钢技术工艺的发展历程,氧气转炉炼钢的发展史可以划分三个时期^[4]:转炉大型化(1950~1970年)、转炉技术完善化(1970~1990年)和转炉综合优化(1990~2010年)。

采用富氧直接插入液态金属进行炼钢的方法,早在20世纪30年代就应用于生产。由于导入氧气的风口很容易被烧损(即使采用约含30% O_2 的富氧),因此,这种炼钢方法没有得到推广。

R. 社勒和同事利用瑞士的Gerlafingen钢厂的2.5t转炉,1947年首次进行在钢液面上吹入高速氧流的试验,并在1948年3月获得成功。同年,奥地利联合钢铁公司也在林茨厂的2t和15t转炉上进行了顶吹试验,并于1949年10月获得成功,1952年5月22日,世界上第一座30t氧气顶吹转炉在林茨投产。次年,奥地利的多纳维茨也建成一座顶吹转炉,并成功投产。这种顶吹氧气炼钢法被命名为LD炼钢法,来源于林茨(Linz)和多纳维茨(Donawitz)两个地名^[3]。它是世界炼钢技术史的一次革命,对世界钢铁生产在20世纪50年代所产生的飞跃发展起了决定性作用。

由于LD炼钢法有诸多优点,因此从其诞生开始就迅速在全世界范围推广。1954年加拿大多米尼翁钢铁公司开动了北美的第一座氧气顶吹转炉,美国炼钢界从1955年开始发生了与此相似的从平炉向氧气顶吹转炉和电弧炉转换的过程。日本钢铁界是氧气顶吹转炉成为目前世界主要炼钢方法的最好实例。1960年在平炉上改造建成45t转炉之后,氧气顶吹转炉技术得到高速发展,1977年取代了所有平炉炼钢。目前钢产量的约70%由300t的氧气顶吹转炉来完成,其余的由电弧炉来生产^[5]。氧气顶吹转炉炼钢法具有生产率高(相当于同等容量平炉的10倍以上)、基建投资少和建设速度快、钢水质量好、适合多品种和高品种钢的生产、大幅度节省能耗和回收煤气、物料消耗低、生产成本低以及经济效

益好等优点。1946 年,世界炼钢界氧气消耗只有 $1.5\text{m}^3/\text{t}$,主要用于切割和焊接。1958 年和 1964 年氧气消耗分别达到 $9.4\text{m}^3/\text{t}$ 和 $15\text{m}^3/\text{t}$ 。1970 年由于氧气转炉的普及,炼钢界的耗氧量增加到了 $30\text{m}^3/\text{t}$ 。

1955 年我国就开始了氧气顶吹转炉小型试验,特别是中国科学院化工冶金研究所叶渚沛院士认为我国今后应重点发展氧气顶吹转炉技术^[6],由于苏联专家坚持要使用平炉,到 60 年代,我国政府决定在中科院化冶所建立转炉实验装置,由国家科委投资,完全依靠自己力量进行科研(化冶所)、设计(设计院)和生产(首钢)相结合,1964 年我国第一座 30t 氧气顶吹转炉在首钢建成并投入生产。其后,上钢一厂三转炉车间、上钢三厂二转炉车间等相继将原侧吹转炉改为氧气顶吹转炉。60 年代中后期,我国又自行设计和建设了攀枝花 120t 大型氧气顶吹转炉炼,并于 1971 年投产,为我国大力发展氧气顶吹转炉炼钢提供了宝贵的经验。80 年代以后,我国氧气转炉炼钢进入大发展时期,由于氧气转炉炼钢和连铸的迅速发展,1996 年我国粗钢产量首次突破 1 亿 t,并淘汰了最后一座平炉,成为世界第一产钢大国。

2000 年,我国有 74 个转炉钢厂共有 207 座大小转炉,产钢量为 10160 万 t。其中,有 106 座 20t 以下的转炉,分布在 38 个钢厂,年产量为 2883 万 t,占当年我国的转炉钢产量的 28.37%。我国 20t 以下的小转炉的数量过多,约占我国转炉座数的 50%,经济技术指标较差,大部分小转炉的吨钢氧气消耗量在 $65 \sim 80\text{m}^3/\text{t}$ (标态),有些高达 $84\text{m}^3/\text{t}$ (标态),氧枪喷头寿命一般小于 100 炉,最低为 28 炉,极个别达到 280 炉以上。因此,有必要加快淘汰 20t 以下转炉的步伐,进行转炉的技术改造,不许新建 120t 以下的转炉,实现我国炼钢产业的结构优化和调整。表 1-2 和表 1-3 分别列出我国 80t 以上和主要的 20 ~ 50t 氧气转炉座数和用氧指标。

表 1-2 我国 80t 以上的氧气转炉座数和用氧指标 (2002 年)

企业名称	公称容量 × 座数	炉容比 $/\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	耗氧量 (标态) $/\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	喷头孔数	喷头寿命/炉	平均炉龄/炉
马钢二炼钢	50t × 3	1.05	56.28	5	181	6057
马钢三炼钢	30t × 3	1.26	54.57	5	254	8499
武钢三炼钢	250t × 2	0.87	53.24	5	145	8286
首钢二炼钢	210t × 3	0.99	57.92	5	403	6206
鞍钢三炼钢	180t × 1	0.935	56.70	5	372	6600
	150t × 2	0.78		4		
梅 山	150t × 2	1.05	61.56	4		3580
本 钢	120t × 3	0.95	60.49	4	205	4701
唐钢一炼钢	120t × 2	0.932	60.93	4	118	4000
攀 钢	120t × 3	0.82	54.64	5	128	3517
武钢一炼钢	100t × 2	0.88	46.73	3	249	9162
天钢炼钢厂	100t × 3			4	252	10521
邯钢三炼钢	100t × 3	0.74	55	4	163	4522
鞍钢一炼钢	90t × 3	0.944	59.14	5	352	10468

续表 1-2

企业名称	公称容量 × 座数	炉容比 $/\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	耗氧量 (标态) $/\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	喷头孔数	喷头寿命/炉	平均炉龄/炉
鞍钢二炼钢	90t × 3	0.94	62.46	4	231	7755
武钢二炼钢	90t × 3	0.75	54.83	3	100	10238
涟钢三炼钢	90t × 2	0.97	51.68	4, 5	498	
首钢三炼钢	80t × 3	0.88	60.68	4, 5	68	13574
包 钢	80t × 5		59.81	3, 5	294	7997

表 1-3 我国主要的 20 ~ 50t 氧气转炉座数和用氧指标 (2002 年)

企业名称	公称容量 × 座数	炉容比 $/\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	耗氧量 (标态) $/\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	喷头孔数	喷头寿命/炉	平均炉龄/炉
首钢一炼钢	30t × 3	0.85	58.90	4	217	5631
天 铁	30t × 3	0.8	55.91	3	288	4575
唐钢二炼钢	30t × 4	0.83	70.13	3	192	3476
石 钢	30t × 2	0.83	55.53	3	165	9323
邢 钢	30t × 2	0.85	74.00	4	77	7060
北 台	30t × 3	0.66	74.00	3	145	12647
浦 钢	30t × 3	0.92	81.47	3	43	2395
上一三转炉	30t × 3	0.75	83.79	3	214	2069
马钢二炼钢	50t × 3		62.91	3	66	4000
马钢三炼钢	30t × 3			3	179	9250
新余一炼钢	25t × 2	0.9	72.5	3	79	8731
济钢一炼钢	20t × 3	0.96	62	3	265	6846
莱 芜	25t × 3	0.83	55.04	3	86	12991
鄂钢二炼钢	30t × 3	0.7	64.54	4	29	8859
湘 钢	50t × 2		58.45	4	161	10117
柳 钢	50t × 3	0.97	67.04	3	76	5908
重 钢	50t × 3	0.88	63.87	4	120	8045
昆钢三炼钢	50t × 2	0.82	64	4	89	3788
酒 钢	30t × 3	0.84	52.51	4	141	5900
天钢二炼钢	20t × 3	0.66	74.00	3, 4	500	12647
承 钢	30t × 4	0.76	53	3, 4	300	3000
邯钢一炼钢	20t × 3	0.86	55	3	132	9063
上 五	20t × 3	0.74	56.14	3	300	6106
南 京	30t × 3	0.59	73.94	3	87	6000
萍 乡	20t × 3	0.65	80.00	3	132	5290
成 都	20t × 2	0.60	78.00	3	496	1459

我国 200t 以上的大型转炉用氧的装备水平与国外同类型钢厂相当, 炼钢用氧指标与国外大型转炉相近。100t 以下的中小型转炉的用氧技术在国际上处于领先地位。首钢一炼钢、武钢二炼钢、济钢、唐钢、安阳等一大批中小型转炉的用氧技术指标都很好。我国主要转炉的平均耗氧量为 $64\text{m}^3/\text{t}$ (标态), 有的转炉达到 $53\text{m}^3/\text{t}$ (标态)。有些钢厂未能根