

冶金部复吹专家组、宝钢设计研究院 合编

氧气顶底复吹转炉 设计参考

冶金工业出版社

76.18112
248

氧气顶底复吹转炉设计参考

冶金部复吹专家组、宝钢设计研究院 合编

3K484/31

冶金工业出版社
1994⁸

(京)新登字 036 号

图书在版编目 (CIP) 数据

氧气顶底复吹转炉设计参考/冶金部复吹专家组、宝钢设计研究院合编。—北京：冶金工业出版社，1994. 11

ISBN 7-5024-1522-X

I. 氧… I. ①冶…②宝… III. 氧气转炉-复合吹炼转炉-设计 IV. TF748.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 03985 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

1994 年 11 月第 1 版, 1994 年 11 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 14.5 印张; 350 千字; 228 页; 1-2500 册

18.00 元

前言

过去十年，我国转炉复吹技术经“六五”及“七五”重点试验和科技攻关，有了很大进步，进入到新的发展层次，积累了很多经验，为今后复吹技术发展打下良好基础。

近十年的国际转炉复吹技术，不仅已经普及和发展成熟，而且与铁水处理相结合，开发出最大限度发挥复吹效能、强化搅拌、充分发挥复吹冶金特色的新工艺，探索包括极低碳钢在内的高清洁度钢熔炼、锰铬矿直接入炉熔融还原的途径，向着既分离转炉机能，又扩大转炉冶炼机能方向发展。现今，国外复吹技术正步入新的发展时期。

我国转炉迄今复吹比率很低，许多百吨以上大转炉还仍然采用单纯顶吹，伴随今后生产技术的进步及冶金效果、技术指标的改善要求，必然会有更多的炉子改成复吹，逐渐提高复吹比例。

目前，我国的工艺装备水平仍处于不理想状态，为跟踪世界先进水平，使复吹技术在全国普及发展，有必要消化国外先进技术及国内成功经验，编制一套技术规范作为参考，使全国同行有章可循。为避免“忙中出错”、“快中出偏”，本书在吸收“七五”复吹技术攻关经验基础上编写。全书分三大部分。第一部分忠实详尽的叙述了国内外复吹技术的发展；第二部分介绍了上海宝山钢铁总厂炼钢厂300t氧气顶吹转炉改造成LD-CB复吹技术的设计实例，以提供整套的设计参考资料有章可循的吸收消化国外技术；第三部分根据国内“七五”期间对复吹技术的实践，并结合宝钢情况总结了一套转炉复吹参考技术规范，提供推荐使用。全书由冶金部氧气转炉顶底复合吹炼技术攻关专家组和上海宝山钢铁总厂设计研究院合篇。第一篇主要由钟雨芳、邓开文、张慰生、金振坚、丁容等编写，郭殿才审校；第二篇主要由王喆、丁山、郁祖达、罗雍康、王纪龙、汪顺兴、周耀宗、吴杰、邱志一、

康士华等编写，王喆审校；第三篇主要由赵荣玖、钟雨芳等编写，张绍贤审校。

由于编者水平有限，编辑中疏漏与错误之处敬请读者批评指正，在本书编辑中得到参加“七五”复吹技术攻关的单位协助，特此感谢！

目 录

第一篇 诸 论

第一章 氧气转炉顶底复合吹炼的发展	(1)
一、历史的回顾.....	(1)
二、氧气转炉顶底复合吹炼法的发展与分类.....	(2)
三、氧气转炉顶底复合吹炼的应用现状	(11)
四、氧气转炉顶底复合吹炼的发展前景	(24)
五、我国氧气转炉顶底复合吹炼技术的发展现状与趋势	(26)
第二章 氧气转炉顶底复合吹炼的底吹气源	(29)
一、底吹气体的选择及其发展	(29)
二、底气气源的应用	(29)
三、底吹气源的品质要求	(34)
四、底吹气源的制造	(35)
第三章 氧气转炉顶底复合吹炼的底部供气元件	(45)
一、底部供气元件的发展	(45)
二、底部供气元件的特性要求	(50)
三、底部供气元件的计算	(56)
四、底部供气元件的布置	(64)
五、底部供气元件的制作	(66)
六、底部供气元件的筑砌	(67)
七、底部供气元件的维护	(67)
八、底部供气元件的更换	(69)
第四章 氧气转炉顶底复合吹炼的底部供气	(72)
一、底部供气原则	(72)
二、底部供气模式	(73)
三、底部供气系统管路	(76)
四、底部供气系统的安全操作	(77)
参考文献	(80)

第二篇 设计篇

第三章 转炉复合吹炼工艺	(81)
一、复合吹炼方法的选择	(81)
二、透气元件布置	(81)
三、生产规模和钢种分类	(82)
四、底吹气体的选择	(82)
五、复吹操作方式	(83)
六、复合吹炼的冶金效果	(84)
七、设备概述	(85)
第六章 转炉复吹改造的理论计算	(87)
一、倾动力矩核算和措施	(87)
二、转炉炉体温度场计算	(87)
三、转炉炉壳应力和开孔补强计算	(92)
四、系统压力计算	(102)
五、气体流量的设计依据及风口磨菇体形成计算机理	(106)
第七章 复吹设备	(110)
一、供气阀门站	(110)
二、旋转接头	(119)
三、炉侧布置	(120)
四、电缆卷筒	(120)
五、炉底供气元件法兰及保护罩	(121)
六、透气元件及炉底砖	(122)
七、底吹气体的安全保护措施	(124)
第八章 底吹气源供应	(127)
一、设计前提条件	(127)
二、氮升压机及贮罐	(127)
三、氩升压机及贮罐容量	(138)
四、气体贮罐压力降计算及升压机工况	(147)
五、工艺配置设计	(163)
第九章 阀门的强度和漏泄试验	(168)
一、阀门的强度试验	(168)
二、阀门的漏泄试验	(168)
三、氧气阀门的强度和严密性试验的特殊性	(169)
第十章 转炉顶底复合吹炼仪表系统设计	(170)
一、概述	(170)
二、系统构成	(170)

三、系统运行方式	(173)
四、仪表流程和检测控制回路项目	(173)
五、YEWPACK MAPK I 及 YEWSERIES 80 组态设计	(173)
六、CRT 画面设计	(176)
七、电气设计	(179)
第十一章 复合吹炼计算机功能设计	(183)
一、计算机系统功能设计前提	(183)
二、复合吹炼计算机功能概述	(184)
三、宝钢复合吹炼计算机功能设计步骤示例	(186)
附录 I 转炉复合吹炼设计参考书目	(196)
附录 II 管道附件直管长度折算表	(197)
附录 III 物质状态参数	(202)
附录 IV 气体物理性值	(202)

第三篇 设计规范

第十二章 总则	(206)
第十三章 复吹方法及选择	(206)
第十四章 复合吹炼的冶金效果	(207)
第十五章 底吹气源	(207)
第十六章 复吹供气	(208)
第十七章 配管设计	(208)
第十八章 系统压损计算	(213)
第十九章 管路漏泄检测	(216)
第二十章 阀门漏泄及强度试验	(217)
第二十一章 供气元件类型与布置	(218)
第二十二章 供气元件通气面积	(219)
第二十三章 元件压损计算	(219)
第二十四章 形成稳定蘑菇体条件	(221)
第二十五章 不同吹炼阶段必需的流径元件气量计算	(224)
第二十六章 元件及元件保护砖	(225)
第二十七章 元件安装及蚀浸监测	(226)
第二十八章 复吹自动控制	(227)
第二十九章 安全保护措施	(227)

第一章 氧气转炉顶底复合吹炼的发展

一、历史的回顾

用高纯度氧气炼钢的想法是贝氏麦在 19 世纪中叶为改进以后用他的名字命名的炼钢方法而提出的。他的想法是通过炉底向炉内吹入氧气代替空气。他还建议把氧气从炉子顶部吹入金属熔池中（英国专利 354 号，1856 年）。但是，由于用于工业生产需要的氧气产量不足，这项工艺很长时间不能大规模地应用于生产。1902 年一家意大利公司在奥地利申请了一项专利，把氧气通过熔池液面以下 10cm 的侧墙吹入转炉中时，这种情况仍未改变。直到 1928 年，林德—弗兰科（Linde—Frankel）法的发展，氧气才能大规模地生产。然而，又过了 20 多年第一家 LD 钢厂才投产。

1928 年以后，在不同的地方，再次提起用氧气炼钢的想法。1936~1939 年间，莱勒普（Lellep）做了通过底部喷嘴把氧气吹入一座 1t 的炼钢炉精炼铁水的试验。由于炉底寿命不能令人满意，因此试验没有成功。用空气中富氧的托马斯工艺取得了部分成功，还用了氧气和水蒸汽的混合气。特别是美国，在平炉和电弧炉上进行了用氧和提高熔化能力的试验。

有人认为需要用高动能把氧气深深地吹入金属熔池（施瓦茨的专利，1939 年），也有人提出把氧气向下吹到熔池液面的想法，但用这个原理进行的试验失败了。杜尔和亥尔布瑞格（Durrer Hullbruegge）于 1948 年在瑞士的格拉芬根做了用氧气以一定的角度吹入熔池的试验取得了一定的进展。但是，所有这些试验都没有达到工业的程度。后来这种试验成果被奥地利人正式应用于他们的工厂。由于他们认为深吹会引起氧枪粘结和毁坏，故而放弃深吹，把枪位抬高，采用了软吹法吹炼熔池。于是，诞生了至今被广泛应用的 LD 法（奥地利 Linz 和 Donawitz 厂发明，故称 LD 法）。

顶吹 LD 法问世后，开创了发展炼钢生产的新阶段，其发展速度十分惊人，1960 年氧气转炉炼钢法在世界产量所占比例只 5%，到 70 年代却上升到了 40%，目前已超过 50%。顶吹 LD 法占绝对统治地位，1968 年出现的氧气底吹法使 LD 法的统治地位受到了冲击和挑战。

同时吹入起冷却保护作用的碳氢化合物气（液）体和氧气的套管式底吹风嘴的发明，引起了氧气转炉送氧方式的根本改变，并且迅速收到了预期效果，降低了金属的氧化损失，提高了钢水收得率，使吹炼较平静而易控制，基本消除了飞溅。各种类型的氧气底吹法在实际生产中显示出的许多优于顶吹法之处，促使人们重新认识评价“埋入深吹”法在冶金上

的合理性，也促使氧气底吹法在发明的最初阶段得以迅速发展，甚至使许多人认为确实出现了一个全新的炼钢法，并且已经到了要判断氧气底吹法能否代替氧气顶吹法的时候了。

但氧气底吹法炉底喷吹设备的复杂性增加了维护炉底寿命的难度，造成了“得失相当”的局面，致使氧气底吹转炉法未得到进一步的发展。然而这却使炼钢界认识到最佳的冶炼条件或许介于顶吹与底吹之间。事实也是如此，正是从这两个截然相反的方向出发而找到了前进的目标。既能使 LD 法保持原有的优点，同时还能吸收某些底吹法的优点以弥补 LD 法的不足，这就是各种顶底复合吹炼法发展的基础和动力。

二、氧气转炉顶底复合吹炼法的发展与分类

(一) 顶吹法和底吹法的特征

顶底复合吹炼是在吸收顶吹和底吹氧气转炉炼钢法的各自优势而发展的，为此研究顶底复合吹炼之前，有必要弄清顶吹和底吹的基本区别。

1. 顶吹法的主要冶金特征

顶吹法的主要冶金特征为：

1) 氧枪喷孔喷出的氧气动能（即使在超音速下）穿透渣层后传递给金属熔池的已很有限，因而导致熔池的浓度和温度梯度，诱发间断性喷溅；

2) 顶吹炼钢的氧化反应，特别是脱碳反应，在熔池和金属-渣-气混成的乳化液中进行，熔渣是从炉口投入的石灰块经溶解后在熔池上方形成的；

3) 能将金属和渣击碎成极细的熔滴，进而促成了乳化液的生成，这是顶吹法的一个重要特征；

4) 视顶吹氧枪位置的不同，在熔池表面上总有一些氧供给由熔池逸出的 CO，使其二次燃烧成 CO₂。通过控制二次燃烧量，可在一定范围内改变废钢/铁水装入比，也可在一定范围内控制 (FeO) 含量以控制脱磷反应。

由于以上这些 LD 法的基本特征造成：

1) 渣中含铁高，熔池含氧高；

2) 炉气铁尘量大；

3) 炉气含 CO₂ 高；

4) 吹炼极低碳钢有困难。

尽管 LD 法有上述缺点，但仍具有一定的优点：

1) 使用单独的水冷氧枪而使供氧方式大为简化，氧枪不与炉体相连；

2) 改变枪位可以控制氧气向渣和金属的传输范围。

LD 法已被广泛用于生产中碳钢和低碳钢，氧耗为 55 (标) m³/t 钢，供氧强度为 3~3.5 (标) m³/(min·t)，视所装铁水含硅量的大小，废钢装入比可达 20~25% (图 1-1)。

2. 底吹法的主要特征

底吹法的主要冶金特征为：

1) 能更有效地将直接吹入熔池的氧转变成搅拌力，其强度至少是顶吹法的 10 倍，因此消除了会造成喷溅的浓度和温度梯度，氧的利用效率极高；

2) 只有极少量的 CO 在炉内烧成 CO₂；

3) 氧气从底部供给并穿过熔池上升，在熔池上部缺少顶吹法的乳化液区，因此成渣困

难；

4) 底吹吹炼操作使反应非常接近平衡，因而消除了渣和铁的过氧化。

以上这些特征促使氧气底吹转炉吹炼具有以下特点：

- 1) 渣中含铁较低，收得率较高；
- 2) 由于喷粉和搅拌好而提高了硫和磷的分配比；
- 3) 提高了熔池残锰含量，降低了熔池氧含量，因而提高了铁合金收得率；
- 4) 可以吹炼出极低碳钢而又不致使渣和铁过氧化；

5) 由于使用碳氢保护气体使钢中含氢量增加；
6) 由于氧化能力低和二次燃烧有限而限制了熔化废钢的能力；

- 7) 钢中含 [N] 量低；
- 8) 可提高供氧强度；
- 9) 生产的重现性好；
- 10) 脱 S 明显改善。

因此底吹法用于吹炼极低碳钢 (0.01~0.02% C) 最为适宜，供氧强度为 4.0~4.5 (标) m³ / (min · t)，废钢装炉量一般比 LD 法低 4%，这主要是由于其 CO 二次燃烧量不如 LD 法的多。

上述顶吹和底吹的优缺点定量示于表 1-1。从表 1-1 可看出，尽管底吹法的优点可弥补其熔化废钢能力较差，含氢较高等缺点，但以下所列的底吹法的固有的特点仍是不容忽略的。

表 1-1 传统的顶吹 (LD) 和底吹 (OBM) 炼钢的主要特性值 (吹炼钢种：0.04~0.05% C)

参 数	LD	OBM
渣中 TFe, %	17~22	10~15
炉尘铁损, kg/t 钢水	10	2
吹氧强度, (标) m ³ / (min · t)	3.0~3.5	高达 5.5
耗氧量, (标) m ³ / t 钢水	48~60	45~55
熔池含氧量, %	0.050~0.080	0.035~0.040
吹炼终点的最低含碳量, %	0.04~0.05	0.01
有代表性的熔池 C · O	29~30 (钢中碳愈低差愈大)	20~22 (钢中碳愈低差愈大)
Al 收得率, %	标准值	+10
熔池中 H ₂ , ppm	2~3	4~5
熔池中 N ₂ , ppm	20~40	15~30
渣与金属的氧势比	8~10	1
熔池中 Mn, %	0.10~0.15	0.25~0.30
石灰反应表面, 1000cm ² /cm ³	100~200	800~1000
P 分配比	70~80	100~120

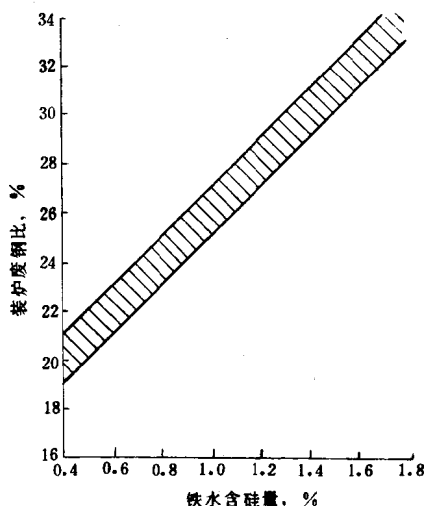


图 1-1 LD 炼钢法废钢装入比与入炉铁水含硅量的关系

续表 1-1

参 数	LD	OBM
S 分配比	4.5~6.0	7.0~8.0
CO 二次燃烧比, %	5	2~3
炉气中 CO ₂ , %	12~15	3~5
p_{CO} (0.05% C), atm	1.0	0.60
废钢比 (1.5% Si 铁水), %	32~33	27~28
喷溅	频繁	无
钢水收得率, %	标准值	+0.7~0.15

注: “标准值”是指 LD 法正常情况值, 以此为准, 增或减而得 OBM 法的对比值。

(二) 复合吹炼的出现

50 年代在顶吹转炉发展的同时, 欧洲就提出过从炉底吹入辅助气体的方法以改善脱 P 反应并称之为复合吹炼法, 但在实际生产中未得到应用, 底吹转炉的成熟以及 70 年代后期的有关顶吹和底吹的一些重要研究成果, 推动了复合吹炼的工业应用。1978 年, 卢森堡阿尔贝德公司在贝尔瓦厂 180t 转炉上采用了 LBE 法, 这是工业生产中使用复合吹炼法的开始。

从与顶吹或底吹的比较中可以看出, 混合吹炼系统具有一些既不同于顶吹也不同于底吹的特点。

与顶吹相比, 复合吹炼的目的在于:

- 1) 减少熔池的浓度和温度梯度, 以改善吹炼的可控性, 从而减少喷溅和提高供氧强度;
- 2) 减少渣和金属的过氧化, 从而提高钢水和铁合金的收得率;
- 3) 使吹炼进行得更接近于平衡, 从而改善脱硫和脱磷率, 使炉子更适宜于吹炼低碳钢。

与底吹相比, 复合吹炼的主要目的在于增加转炉的灵活性和适应性, 如增加转炉熔化废钢的能力, 这就可以按市场废钢和铁水的比价的变化而改变入炉废钢量, 从而获得经济效益。

(三) 现有的转炉吹炼法及其特点

现将现有的单纯顶吹、底吹以及顶底复合吹等各种吹炼法的工艺归纳如下:

- 1) 顶吹 100% 氧气 + 由顶部加入石灰块/石灰粉;
- 2) 顶吹 100% 氧气 + 顶部加石灰块 + 用惰性气体稀释顶部吹入的氧气;
- 3) 顶吹 100% 氧气 + 顶部加石灰块 + 辅助搅拌熔池;
- 4) 顶吹 100% 氧气 + 顶部加石灰块 + 底吹惰性气体;
- 5) 顶吹 90~95% 氧气 + 顶部加石灰块 + 底吹 5~10% 氧气;
- 6) 顶吹 70~80% 氧气 + 底吹 20~30% 氧气 + 底吹石灰粉;
- 7) 底吹 100% 氧气 + 由底部吹入石灰粉;
- 8) 底吹 60~80% 氧气 + 底吹石灰粉 + 顶吹 20~40% 氧气 + 喷射油/煤气预热;
- 9) 底吹 100% 吹炼工艺用氧 + 底吹石灰粉 + 附加氧 + 由顶部或底部加入煤粉。

从以上的归类可以看出, 炼钢工艺如何从典型的顶吹 1) 而演变到典型的底吹 7), 进而又演变为 8) 和 9), 从而希望扩大底吹转炉废钢装入量。以上所列各种吹炼法中, 即使是同一吹炼法也会由于所用主要设备类型不同而有差异。目前所用的复合吹炼法的一些主

要特点如图 1-2 和表 1-2 所示,复合吹炼的氧气和/或其他吹入气体在顶部和底部的吹入量分配比直接影响各种方法的混匀时间的不同。图 1-3 指出所有的复合吹炼法的混匀时间都介于顶吹和底吹这两个极限之间。由混匀时间这个基本参数可见,有些复合吹炼法较接近于顶吹法,而另一些复合吹炼法则与底吹法相似。

表 1-2 实际生产使用的复合吹炼法及其主要特性

复吹名称	方法英文名称, 开发厂家	供气特征				冶金特征
		顶吹 O ₂		底吹气体		
		强度(标) m ³ /(min·t)	比例(占 总 O ₂ %)	气种强度(标) m ³ /(min·t)	比例(占 总 O ₂ %)	
AFC 法	Anshan Fuchui Process	2.0~2.5	>95	CO ₂ +O ₂ /N ₂ , Ar 0.05~0.15	<5.0	顶加石灰块造渣
BAP 法	Batli Agitation Process	2.2~3.0	85~95	空气/N ₂ 冷却 或 Ar/N ₂	5~15	顶加石灰块造渣
CB 法	Combined Blowing Process	2.0~2.5	100	Ar/N ₂ 0.01~0.10		顶加石灰块造渣
K-BOP 法	Kawasaki Bottom Oxygen Blowing Process	2.0~2.5	60~80	O ₂ +石灰粉/ 天然气 0.70~1.5	20~40	具有较好的吹炼灵活性。用 OBM 型喷嘴(或双套管喷嘴)吹 O ₂ +石灰粉
KS 法				4.0~5.0 O ₂ /天然气	100	全废钢操作,产生大量高发热值废气,天然气冷却喷嘴
KVA 法	Klöckner Voest-Alpine			O ₂ /天然气或油		全废钢操作,废钢和无烟煤一起加入炉内
KMS 法	Klöckner Maxhütte Sulzbach		50~70	O ₂ +石灰粉	30~50	用特殊氧枪改善炉内二次燃烧,增加废钢比
K-OBM 法 (OBM-S 法)	Maxhütte-Klöckner		20~40	O ₂ /天然气	60~80	顶加石灰粉。用油+O ₂ 预热废钢
LBE 法	Lance Bubbling Equilibrium	4.0~4.5	100	Ar/N ₂ 0~0.25		顶加石灰块,双流道氧枪改善二次燃烧
ALCI 法	ARBED	4.0~4.5	<100	O ₂ +粉煤		底枪中间孔吹粉煤,外孔吹精炼 O ₂ ,最外孔吹二次燃烧 O ₂ ,增加废钢比
LD-CB 法	NSC(Sakai steel works)		100	CO ₂ + (N ₂ /Ar)		控制 CO ₂ 量,使底枪端部生成“蘑菇头”,多孔塞或喷嘴
LD-KG 法	Kawasaki Steel	3.0~3.5	100	Ar/N ₂ 0.01~0.05		顶加石灰块造渣
LD-KGC 法	Kawasaki (Mizushima)		100	CO/N ₂		多孔塞式喷嘴从底部吹气
LD-OTB 法	Kobe Steel Works	3.0~3.5	100	Ar/N ₂ 0.01~0.10		顶加石灰块,单环缝型喷嘴

续表 1-2

复吹名称	方法英文名称, 开发厂家	供气特征				冶金特征
		顶吹 O ₂		底吹气体		
		强度(标) m ³ /(min · t)	比例(占 总 O ₂ %)	气种强度(标) m ³ /(min · t)	比例(占 总 O ₂ %)	
LD-OB 法(预热废钢吹炼)	LD-Oxygen Bottom Blowing Process	O ₂ +N ₂ 预热废钢		O ₂ +N ₂ +煤油		不锈钢废钢屑和 Fe-Cr 装入转炉, 加热到高温后, 兑入 55% 铁水进行吹炼
LD-OB 法	NSC(Yamata Steel Works)	2.5~3.0	80~90	O ₂ /天然气 0.3~0.8	10~20	OBM 型喷嘴天然气冷却, 顶加石灰块造渣
LD-HC 法	Hainau-Tsambre-CRM	3.0~4.2	92~95	O ₂ /天然气 0.08~0.20	5~8	顶加干燥石灰粉和石灰块, 环缝喷嘴天然气冷却
LET 法	Solmer	3.0~4.0	>95	O ₂ /C _x H _y , Ar/N ₂	<5	环缝喷嘴
NK-CB 法	Nippon Kogan Combined Blowing Process	3.0~3.3	100	Ar/CO ₂ , N ₂ 0.04~0.10		多孔塞或透气砖供气, 顶加石灰块造渣
STB 法	Sumitomo Blowing Process	3.0~4.2	92~95	O ₂ /CO ₂ (内) CO ₂ /N ₂ 或 Ar (外) 0.15~0.25	8~10	顶加石灰块
STB-P 法	Sumitomo Blowing Process	3.0~4.2	92~95	O ₂ +CO ₂ /CO ₂ + N ₂ /Ar 0.03~0.07	8~10	从顶部将石灰粉喷到火点处
TBM 法	Thyssen Blowing Metallurgy	3.0~4.0	90~98	O ₂ /C _x H _y	2~10	2~4 支小孔管式底枪
LD-AB 法	LD-Argon Blowing	3.5~4.0	100	Ar 0.014~0.31		顶加石灰块
J & L	Jones and Laughlin	3.3~3.5	100	Ar/N ₂ /CO ₂ 0.045~0.112		顶加石灰块。底吹 N ₂ 接近终点吹 Ar/CO ₂
BSC-BAP 法	BSC (Teesside Lab)	2.2~3.0	85~95	空气/N ₂	5~15	顶加石灰块。底吹空气, 用 N ₂ 冷却
H-BSC 法	Hoogovens-BSC	3.33	100	N ₂ /Ar 0.04~0.10		顶加石灰块。二次 O ₂ +无烟煤, 可增加钢比

(四) 按底部供气强度和供气压力分类

1. 按底部供气强度分

众多的复合吹炼法在按搅拌强度分时可分为强搅拌和弱搅拌两大类型。

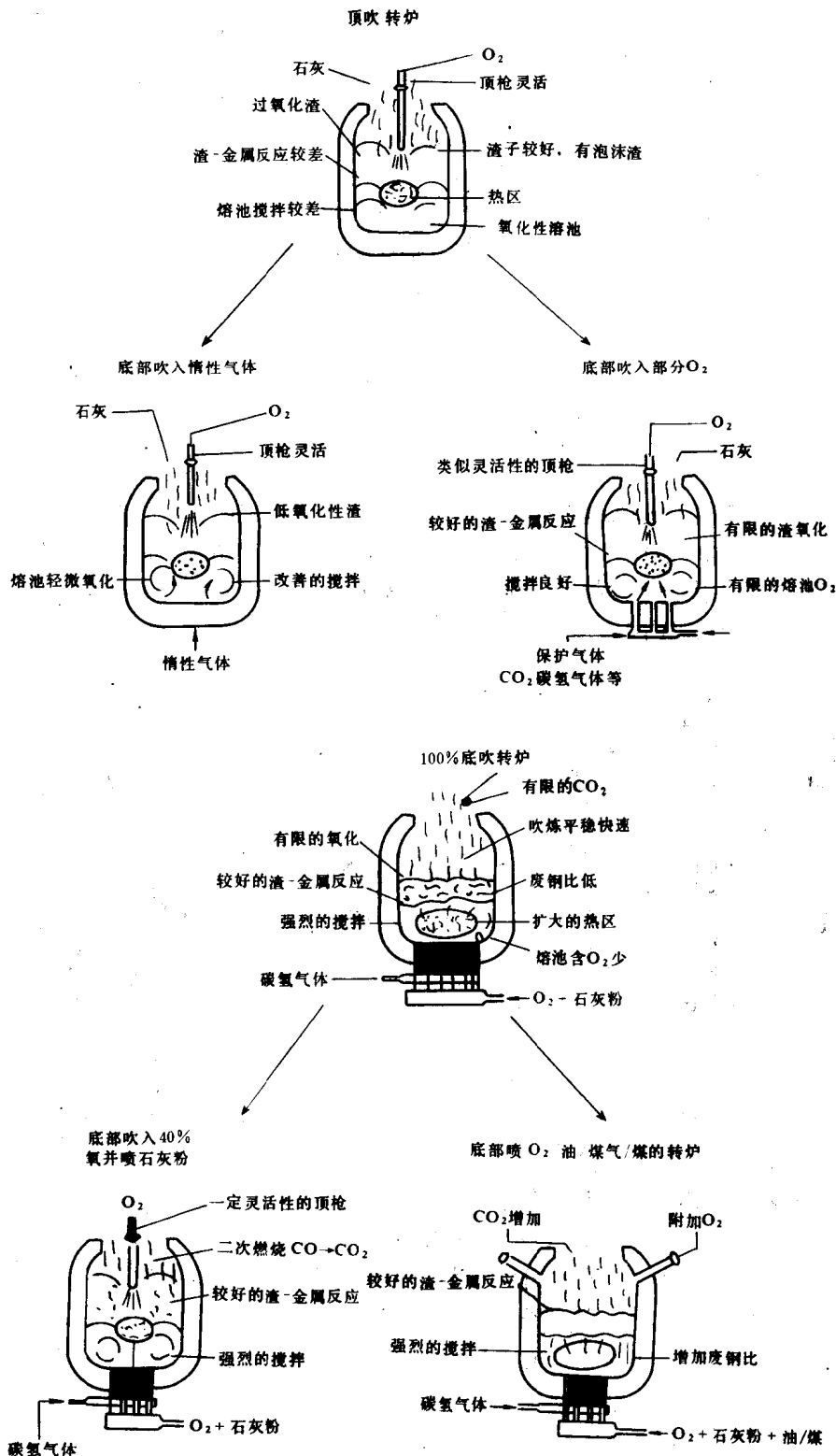


图 1-2 各种类型氧气炼钢法的冶金特征

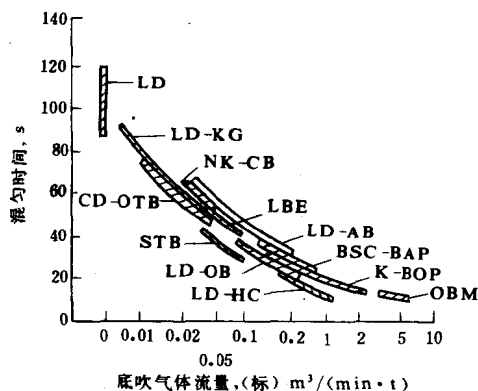


图 1-3 底吹气体强度对熔池混匀时间的影响

通常，顶吹转炉改造成复吹转炉，且底部供气以惰性气体为主的大多为弱搅拌型，供气强度一般在 0.12 (标) $\text{m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$ 以下。而底吹转炉改造为顶底复合吹炼，且底部供气以氧气为主的大多为强搅拌型，供气强度一般在 0.25 (标) $\text{m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$ 以上。复吹转炉的分类详见图 1-4、图 1-5。

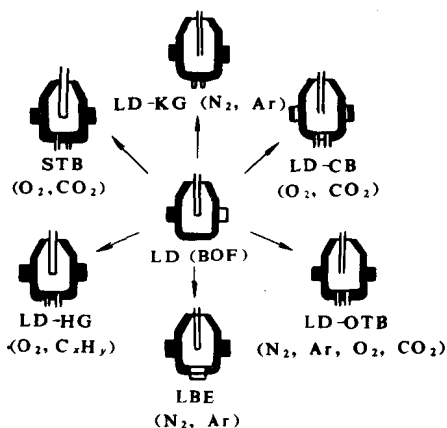


图 1-4 弱搅拌复合吹炼型式

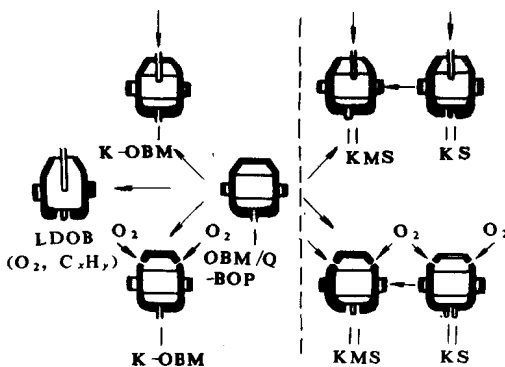


图 1-5 强搅拌复合吹炼型式

(1) 强搅拌复吹技术

强搅拌复吹使用套管式底部喷嘴，中心供氧，环管供天然气或液化石油气作为冷却剂。底部供氧占转炉供气总量的 $5 \sim 40\%$ ，供气强度为 $0.25 \sim 0.8$ (标) $\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$ ，最大可达 1.7 (标) $\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$ ，有的底部喷嘴还可喷入石灰粉。强搅拌的主要方法有比利时冶金研究中心开发的 LD-HC，新日铁开发的 LD-OB，川崎开发的 K-BOP 法。目前世界上强搅拌复吹转炉约有近 30 座，生产能力达 4500 万 t/a ，其中 LD-OB 法有 15 座转炉，生产能力近 3000 万 t/a 。

强搅拌方式冶金效果明显，以 1987 年投产的加拿大多发斯科 (Dofasco) 第二炼钢厂 300t K-OBM 炉为例，钢水收得率提高了 1.4% ，终钢钢水含硅量可低至小于 0.015% ，终吹钢水含氮量降到 23ppm，终吹钢水含氧量降到 250ppm，铝节约 0.53kg/t ，锰铁节约 1.36

kg/t, 炉龄达到 2544 炉 (中间换一次炉底), 还使用了二次燃烧技术, 废钢比增加 2.5%, 使用废钢炉内预热技术, 废钢比还可提高 2.4%。

在这里值得提出的是底吹转炉复吹化虽在转炉炉口增加氧喷嘴 (称炉口氧枪) 或顶吹氧枪, 但主要供氧是底部供氧, 顶部供氧只占 30%。1977 年开发投产的 KMS 法, 可以从底部喷嘴喷入煤粉, 以增加废钢比, 目前 KMS 炉也配备了顶部氧枪或炉口氧气喷嘴。最近使用了炉内废钢预热技术, 炉底喷嘴喷入空气和天然气, 炉口喷嘴喷入氧气, 废钢比超过 50%, 也可一次装入, 大大改进了冶炼工艺。

(2) 弱搅拌复吹技术

弱搅拌复吹底部供气强度 $0.01 \sim 0.2$ (标) $\text{m}^3 / (\text{min} \cdot \text{t})$, 底部吹入气体种类有氮气、氩气、 CO_2 、CO 等, 有时混入部分氧气, 以防止风口堵塞。供气元件型式有缝隙式、集管式、单管式、套管式等, 由于弱搅拌复吹技术比较单纯, 设备简单, 投资少, 钢种适应性强, 各厂都自行开发, 型式多种, 主要的有 LBE、NK-CB、LD-KGC、LD-CB、STB、BAP、TRM、OTB 等。

LBE 法是 1975 年由法国钢铁研究院与卢森堡阿尔贝德公司开发的, 1978 年用于生产, 是最先在世界范围内得到推广的复吹方法。目前世界上有近 60 座 LBE 转炉, 生产能力达 5700 万 t。LBE 法使用缝隙式透气元件, 每个透气元件的供气能力只有 $1 \sim 2$ (标) m^3 / min , 相当于 $10 \sim 20\text{t}$ 钢水所要求的供气量, 因此需配置众多的透气元件, 而每个透气元件的气体流量又需要单独调节, 造成管路、仪表装备繁琐。1982 年新日铁曾引进 LBE 技术, 1984 年又改成 LD-CB 法, 只用 4 个风口, 大大简化了设备。

NK-CB 是日本钢管开发的, 1981 年用于工业生产, 现日本钢管 7 个转炉全部使用了 NK-CB, 此外韩国浦项、我国台湾基隆都使用了 NK-CB 技术。NK-CB 的生产能力总计达 2440 万 t。NK-CB 法的特点是使用集管式风口砖, 数十根 $\phi 1 \sim 2\text{mm}$ 的不锈钢细管平行布置与一个气室相连, 再制成风口砖, 一个风口砖的供气能力可达 8 (标) m^3 / min , 300t 转炉只需使用 4 个风口砖。早期 NK-CB 使用 CO_2 作为底吹气体, 当钢铁生产不景气时, 因氩气有余, 也使用氩气, 效果一致。NK-CB 的炉龄约为 2500 炉。

LD-KGC 是川崎开发的, 1984 年用于工业生产, 使用集管式风口砖或单管式风口, 特点是底部流量的调节范围大。水岛厂 180t 转炉可在 $0.005 \sim 0.2$ (标) $\text{m}^3 / (\text{min} \cdot \text{t})$ 范围内调节, 相应供气压力高达 4.3MPa 。1985 年又使用从转炉煤气中分离精制得到的 CO, 效果与 Ar 相同, 但成本低。LD-KGC 的技术还输出到南非、芬兰、韩国、美国。现有 21 座 LD-KGC 转炉, 生产能力达 2300 万 t。水岛厂 LD-KGC 炉的炉龄达到 6000 炉以上。

LD-CB 是新日铁堺厂 1982 年开发的, 以 CO_2 为气源。新日铁比较了 LD-CB 法和引进的 LBE 法, 认为 LD-CB 操作比 LBE 更稳定, 决定将君津厂和室兰厂的 LBE 炉改成 LD-CB 炉。现日本中山制钢也使用 LD-CB 法, 还输出到南非、美国。世界上 LD-CB 炉有 19 座, 生产能力为 2400 万 t (不包括我国宝钢 3 座 671 万 t)。LD-CB 使用集管式风口砖, 但通过不断实践, 开发了特殊的风口蘑菇形成技术, 由于风口砖顶部形成蘑菇状的凝铁, 可以加大底部供气的流量调节范围, 也允许扩大细管管径, 加大风口的通气能力, 减少风口砖数量, 并且可保护风口砖, 将风口的侵蚀速度控制到 $0.3 \sim 0.4\text{mm} / \text{炉}$ 。

英国钢铁公司的 BAP 法、德国蒂森公司的 TBM 法、日本住友金属的 STB 法、神户制钢的 OTB 法也都是弱搅拌, 基本上局限于本公司使用, 生产能力分别为 $1300 \sim 2000$ 万 t,