

国外转炉顶底复合吹炼技术

赵荣玖 何国梁 阎 峰 林慧国 朱文佳 主编

(上)



钢铁编辑部出版

北京 1985

国外转炉顶底复合吹炼技术

《钢铁》编辑部 编

开本 16开

字数 550千字

1985年出版

(内部交流)

前 言

《国外转炉顶底复合吹炼技术》文集是冶金部科技司为配合我国转炉顶底复合吹炼技术的发展,组织北京钢铁设计研究总院、冶金部情报研究总所和钢铁编辑部有关同志安排翻译、编辑、出版的。

本文集分为综合论述、吹炼方法、操作工艺、冶金学问题、供气及供气元件、提高炉子热效率、吹炼钢种、喷石灰粉及少渣吹炼工艺、复合吹炼用耐火材料及其他等九大部分共100篇文章,内容充实,针对性强。文章系从主要国际会议论文、1982年~1984年国外冶金期刊及有关专利资料中精心挑选的,每篇文章均请有关专家评审后定稿。本文集分上、下册出版,我们期望它对配合国内转炉顶底复合吹炼技术的发展将起到积极的作用。

本文集由北京钢铁设计研究总院高级工程师赵荣玖同志任技术审校,赵荣玖、何国梁、阎峰、林慧国、朱文佳同志负责主编。钢铁编辑部全体同志担任编辑和出版工作。由于编者水平有限,如有错误与不当之处,敬请读者批评指正。

编者

1985年3月

目 录

(上 册)

一、综合论述

1. 转炉复合吹炼技术的发展与展望.....赵荣玖 (1)
2. 氧气转炉顶底复合吹炼.....Я.А.施聂罗夫 等 (13)
3. 转炉复合吹炼法的现状和今后的发展.....植田 等 (26)
4. 复合吹炼综合评述.....P. Nilles (33)
5. 碱性氧气转炉炼钢新技术.....Paul E. Nilles (35)
6. 顶吹氧气转炉和复合吹转炉的经济比较.....F. Cunningham James (46)

二、吹炼方法

1. STB氧气转炉炼钢法的发展.....成羽始 等 (65)
2. 顶底复合吹转炉的一种新精炼法 (LD—OTB法).....Shuzo Ito 等 (73)
3. K—BOP转炉操作技术的确立.....永井润 等 (83)
4. 水岛厂顶底吹氧气转炉的冶金特点和操作.....M. Ohnishi 等 (89)
5. 川崎钢公司的 LD—KG 炼钢法..... (97)
6. 赫施钢铁公司LD转炉采用氩氮复合吹炼.....Robert Schrott 等 (103)
7. LD—OB 法的冶金及吹炼特性.....Tomokatsu Kohtani 等 (108)
8. 大分厂LD—OB转炉的冶炼特性.....河野拓夫 等 (115)
9. 以底吹改善顶吹转炉的NK—CB炼钢方法.....Kiyomi Taguchi 等 (117)
10. 克虏伯钢公司顶吹转炉用底吹气体搅拌的冶金效果.....Ludwig Fiege 等 (124)
11. 底吹转炉采用顶底复合吹.....John T. Boeing 等 (130)
12. 顶底复合吹转炉炼钢法.....(日本专利)加藤嘉英 等 (137)

三、操作工艺

1. 琼斯拉夫林厂 (J & L) 底吹气体搅拌四千炉.....Pierre H. Dauby (143)
2. 蒂森钢铁公司氧气转炉炼钢厂的复合吹炼技术.....Erich Höffken 等 (149)
3. 底吹惰性气体改进BOP氧气转炉.....Aristide J. Berthet (155)
4. 钢的精炼法.....(日本专利)平田武行 等 (163)
5. 炼钢方法.....(日本专利)竹村三洋 等 (167)
6. 君津第一炼钢厂顶底吹转炉的建设和操作.....汤川正 等 (171)
7. 底吹少量CO₂的顶底吹转炉的开发和操作.....磯平一郎 等 (173)
8. 阿尔贝德-萨尔钢公司使用LBF炼钢法的经验..... (175)
9. 国家钢公司大湖厂LBE法的操作经验.....John C. Powell 等 (180)

10. 转炉炼钢法..... (日本专利) 藤山寿郎 等(186)
11. 防止纯氧顶底吹转炉喷溅的方法..... (日本专利) 村上昌三 等(194)
12. 防止顶底吹转炉喷溅的方法 (日本专利) 山田博右 等(98)
13. 防止顶底吹转炉喷溅的方法 (日本专利) 尾関昭夫 等(201)
14. 顶底吹法用于90吨AOD炉..... 岡島弘明 等(203)

四、冶金学问题

1. 通过冷模试验研究顶底吹转炉特性..... 甲斐 幹 等(205)
2. 关于顶底吹转炉炉底附近钢水流速分布的水力学模型实验..... 田中道夫 等(216)
3. 利用水力学模型观察操作因素对顶底吹、底吹转炉熔池搅动的影响.....
..... 原田信男 等(218)
4. 顶底吹转炉的搅拌力 大西正之 等(220)
5. 顶底吹AOD炉搅拌模型的研究 杉田 宏 等(222)
6. 关于顶底吹转炉内钢水流动同炉体振动的水力学模型试验..... 铃木健一郎(224)
7. 熔池搅拌强度对顶底吹转炉冶金特性的影响..... 甲斐 幹 等(226)
8. 炼钢过程平衡和动力学 Gaye, H. (236)
9. 顶底吹转炉的冶金特性..... 永井润 等(246)
10. 复合吹炼过程的物理化学特性..... Kyoji Nakanishi 等(255)
11. 用水力学模型研究底吹顶吹顶底吹转炉的气体和液体间的传质..... 加藤嘉英 等(264)
12. 从炉内残留氧量(O_s) 分析对顶底复合吹转炉的新认识..... 有馬慶治 等(266)
13. 顶吹粉剂复合吹炼法的脱磷机制 梅田洋一 等(268)
14. 顶底吹转炉钢中的氧 大河平和男 等 269)
15. 顶底复合吹转炉中氧势与操作条件的关系 Okohira 等(279)
16. 转炉复合吹炼法冶炼不锈钢的冶金特性 甲斐 幹 等(280)

一. 综合论述

1. 转炉复合吹炼技术的发展与展望

赵荣玖

一、历史回顾

贝氏麦发明底吹空气炼钢法迄今已经130年。在他发明用冷风吹炼熔融金属的当时就曾指出,使用氧气是合理的。但是由于当时条件限制,未能兑现。随后不久,人们放弃了对底吹的宠爱,然而贝氏麦的两个主要想法:即深吹与用氧,继续在二次世界大战期间为Durrer(顶吹法发明人)所接受。他与Hullbruegge试验在熔池面上设置水冷喷枪深吹熔池,后来这种试验成果被奥地利人正式应用于他们工厂。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。

顶吹法问世后,其发展速度之快十分惊人。到1968年出现氧气底吹法时,全世界的顶吹法产钢能力已达到2.6亿吨,占据了绝对垄断地位。自1970年后,新的氧气底吹法得到了稳步发展。它的出现是由于发明了用碳氢化合物保护的双层套管式底吹氧枪的结果。各种类型氧气底吹法(OBM, Q-BOP, LWS)在实际生产中所显现出来的许多优越于顶吹法之处,促使人们重新认识和评价“埋入深吹”法在冶金上的合理性。于是,使一直居于首位的顶吹法受到挑战和冲击。

用氧气射流从熔池上落穿过渣层来搅拌熔池,即便是采用超音速,也较难满足冶金要求。这一点早在五十年代顶吹法出现的初期,人们就对之有所认识。在当时曾诞生过Kaldo法和Ro+or法。此两种方法通过炉身转动能使渣—钢得到良好混合,有许多顶吹法难比的优点。后来只是由于炉衬寿命太低以及设备复杂,维修费用高,才于1980年以前逐步为顶吹法所代替。

顶吹法的主要冶金特点在于:①由于穿过渣层的氧气射流能量不足,造成熔池在成分、温度上的很大差异,从而会诱发出喷溅。②脱碳反应是在熔池和金属—渣—气浮状区内进行。③能把金属和渣连成细小的熔滴,从而能在熔池上形成浮状区。④依据喷枪位置不同,能将炉内部分CO烧成CO₂,可适当提高废钢比。基于这些特点,于是有渣中含铁高、钢水含氧高、废气铁尘损失大和冶炼超低碳困难的缺点。一般说,应用顶吹法可以成功的冶炼中

碳钢和低碳钢,耗氧量为55标米³/吨,供氧强度可达3~3.5标米³/分·吨。

底吹法的主要特点在于:

①由于直接把氧鼓入金属熔池,其搅拌动力要高于顶吹法10倍。从而,可以消除顶吹法存在的熔池内成分和温度差别大,会诱发喷溅的缺点,并且氧利用率高。②只有极少量的CO在炉内烧成CO₂,废钢比要比顶吹法低4%。③缺少顶吹法在熔池上部形成的浮状区,过程去磷困难,不得不在冶炼低磷铁水时向熔池喷吹石灰粉。④由于熔池处于比较平衡状态,没有像顶吹法那样的渣、钢过氧化现象。基于这些特点,使底吹法具有低的渣中含铁,较好的钢水收得率,低的钢水含氧和高的残锰回收率,有利于合金的节约,以及容易冶炼超低碳钢,能炼含0.01~0.02%C钢,并且不会出现渣、钢过氧化现象。但是由于用碳氢化合物冷却喷嘴,钢水含[H]偏高。需要在停吹后吹惰性气体清洗。一般说,底吹法的供氧强度比较高,可以达到0.4~0.45标米³/分·吨,吹炼时间比较短。

基于两种方法在冶金上显现出来的明显差别,尤其于1970年后,西德、美国、法国、比利时、瑞典以及日本相继投产氧气底吹转炉给顶吹法以很大冲击,促使人们去着手研究能联合两种方法优点的顶底复合吹炼法。

二、顶底复合吹炼法发展现状与特征

1. 继奥地利人 Dr. Eduard 等于1973年研试转炉顶底复合吹氧炼钢之后,世界各国普遍开始了对转炉复吹的研究工作。出现了各种类型的复吹炼钢方法。这些方法虽然大同小异,但也各有其特点。一般说可以分成以下几大类:

- 1) 100%顶吹O₂+从顶部加石灰块+惰性气体搅拌。
 - 2) 90~95%顶吹O₂+从顶部加石灰块+5~10%底吹O₂。
 - 3) 70~80%顶吹O₂+20~30%底吹O₂+底吹石灰粉。
 - 4) 60~80%底吹O₂+底吹石灰粉+20~40%顶吹O₂+喷吹油/燃气预热废钢。
 - 5) 100%底吹O₂+底吹石灰粉+附加O₂+顶/底部喷吹煤粉。
2. 基于上述分类,就现有几种复吹法归纳分述如下。

2.1 LD—KG, LBE, LD—OTB, NK—CB, LD—AB及J & L系统

所有这些方法都是靠底吹惰性气体来搅拌熔池,所用气体主要为Ar、N₂及CO₂。由于N₂比较便宜,因此大都使用N₂。但是不适于用在对N₂敏感的钢种,即使从炉底吹入很少量的N₂,如果采用全程吹N₂,有的可使钢水含[N]增加约30ppm。为避免钢水增[N],有时使用CO₂和Ar作为搅拌气体,有的为全程使用,但通常大都是在吹炼的后20~30%时间内使用。某种情况下,还要在吹炼终点之后,再吹3~5分钟的Ar以进一步降低[N]含量和促进平衡。LD—KG, LD—OTB, NK—CB, LD—AB为采用小直径多管供气, LBE为用透气砖供气。

2.2 BSC—BAP, LD—OB, LD—HC, STB及STB—P法

所有这些方法都是采用从炉底吹入O₂或其他氧化性气体来搅拌熔池。当使用氧气时,不论是用纯氧、氮与氧混合物、或者空气,都需要采用双套管喷嘴,使气流得到遮盖以避免与炉底耐火材料接触。对于BSC—BAP法是用N₂作遮盖气体。而对于STB法,根据需要,有较大的变换气体灵活性。通常中心管为通O₂及CO₂,外管遮盖气体用CO₂、N₂或Ar。

LD—OB和LD—HC法则采用天然气（或丙烷）为遮盖气体，缺点是使钢含〔H〕量增加4~5ppm。一般，要求在结束吹炼时，用惰性气体进行清洗。

2·3 K—BOP法。

K—BOP法很象OBM法，只是底吹氧量最大限制在40%（通常为30%），余下氧气通过顶枪吹入熔池。川崎公司的千叶厂有顶吹转炉和底吹转炉的生产操作经验，他们当然很清楚知道，当底吹气量在30%到100%之间变化时，对冶金效果的影响是很小的。K—BOP法通过设置顶枪，可以减少底吹氧量，使炉底喷嘴数明显减少，从而简化了炉底结构。

2·4 OBM—S, KMS, KS, HOOGOVENS—BSC与ALCI法

所有这些方法都是针对OBM法存在着的由于炉渣中氧化铁少和CO在炉内燃烧少而引起的废钢比低这一缺点而出现的。这些方法虽然各不相同，但都以增加炉气在炉内的再燃烧为目标。

ALCI（ARBED Lance Coal Injection）是用一种特制的喷枪将煤粉吹入熔池内，此喷枪为三流道，中心流道喷送煤粉，中间流道吹入精炼氧，外层流道吹入二次燃烧氧。

OBM—Scrap是在炉帽处装设侧喷嘴，用以喷送氧气。并还可以从炉底吹入油/氧来预热废钢。

KMS（Klockner—Maxhutte—Steelmaking）与OBM—S相近，只是增加了从炉底喷送煤粉措施。

Hoogovens—BSC的主要区别在于煤是从炉口加入而不是采用喷吹煤粉。

OBM—S, KMS和KS适合用于底吹转炉，其他两法适合用于顶吹转炉。

各种类型复吹方法及其主要特征示于表1中。

3. 复吹转炉在世界范围内的发展现状

复吹法开始在工业中推广应用，可说是从1980年开始，由于它具有比顶吹法和底吹法都要好的许多优越性，加上改造现有转炉容易，仅仅几年的功夫就开始在全世界范围内广泛地普及起来。发展速度之快，就是当初的LD转炉也是无法与之比拟的。一些国家，例如日本，已经基本淘汰了单纯顶吹法。现将各种复吹转炉在全世界范围内的发展情况汇集于表2中。

三、炉底供气及供气元件

氧气底吹转炉之所以能用于生产，一个很重要原因是发明了能够延长炉底寿命的以燃料为冷却剂的氧气喷嘴。但是，它并没有能够排除传统底吹法炉底寿命是炉龄限制环节这一缺陷。转炉顶底吹法的问世，由于在炉底上增设了供气元件，促使人们不能不首先想到如何才能延长炉底供气元件的寿命，以便与炉衬同步。此外，由于顶底吹转炉的炉底供气主要是搅拌熔池，因此，所用气体当然不仅限于O₂。在保证钢质前提下，如何更经济地选择搅拌气体，显然也是需要考虑的问题。由于底部供气量需要根据冶炼钢种和吹炼进程不时加以控制，也就是说它已经是控制冶炼的一种手段。因此，如何使供气元件结构适应这一要求，也成为人们普遍重视的研究课题。

从某种意义上说，顶底吹炼法的核心技术就是炉底供气与供气元件，它是区别于各种类型顶底吹法的重要标志。

1. 搅拌气源

表1 各种复合吹炼法的主要特征

类型	名称	发明厂家	顶吹O ₂ 比例, %	顶吹O ₂ 流量, 标米 ³ /分	底吹O ₂ 比例, %	底吹O ₂ 流量, 标米 ³ /分	使用其他种类气 体及流量, 标米 ³ /分	加入石灰 顶部	底部	说明
I	LD-CL	日本钢管 (NKK)	100	3.0~3.5	0			块		喷枪在熔池面上旋转, 转速为1~5 转/分, 循环直径达1200毫米。
	LD-PJ	LtaLsider	100	1.5(3.0 ~3.5) (断续)	0			块		断续脉动喷吹。
	LD-KG	川崎	100	3.0~3.5	0		Ar/N ₂ , 0.01~0.05	块		炉底用小口径喷嘴。
	LBE	ARBED -IRSID	100	4.0~4.5	0		Ar/N ₂ , 0~0.25	块		炉底用透气砖。
II	LD-OTB	神户	100	3.3~3.5	0		Ar/N ₂ , 0.01~0.10	块		使用各种喷吹惰性气体模型。
	NK-CB	日本钢管 (NKK)	100	3.0~3.3	0		Ar/CO ₂ /N ₂ , 0.04 ~0.10	块		单孔喷嘴或多孔塞。
	LD-AB	新日铁	100	3.5~4.0	0		Ar, 0.014~0.31	块		炉底喷嘴。
	J&L系统	Jones and Laughlin	100	3.3~3.5	0		Ar/N ₂ /CO ₂ , 0.045 或0.112	块		炉底喷嘴或沟槽砖, 大部分时间吹N ₂ , 在最后阶段吹Ar/CO ₂ 。
III	BSC-BAP	BSC(Teessi- de Lab)	85~95	2.2~3.0	5~15		Ar, 0.075~0.20	块		炉底喷嘴吹O ₂ 或空气, 用N ₂ 遮盖。
	LD-OB	新日铁	80~90	2.5~3.0	10~20	0.3~0.8	天然气遮盖	块		OBM型喷嘴, 天然气遮盖。
	LD-HC	Halnaut -Sambre -CRM	92~95	3.1~4.2	5~8	0.08~ 0.20	天然气遮盖	块或粉		较早在CD-AC车间进行试验。
	STB或 STB-P	住有金属	90~92	2.0~2.5	8~10	0.15~ 0.25	内喷嘴O ₂ /CO ₂ , 外喷嘴CO ₂ /N ₂ /Ar 0.03~0.07	STB- P用粉		有较灵活的底吹喷嘴系统, 吹入氧化 性气体, STB-P为用顶枪喷石灰粉。
IV	K-BOP	川崎	60~80	2.0~2.5	20~40	0.7~1.5	用天然气遮盖	粉		用OBM喷嘴, 氧气底喷石灰粉。
V	OBM-S	Maxhutte -Klockner	20~40		60~80		天然气遮盖和侧喷嘴	粉		经侧面喷嘴从顶部吹O ₂ , 有时用油/氧 预热废钢, 每吨钢多用5标米 ³ O ₂ , 增 加废钢60公斤/吨钢水。
VI	KMS-KS	Klockner -Maxhutte	0		100	4.5~5.5	天然气遮盖喷嘴	粉		KS法为100%废钢, 喷50公斤煤/吨, 增加废钢比18~20%。

表2 全世界投产的复吹转炉

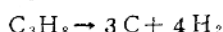
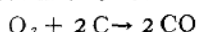
国名及厂名	方法	转炉 座数×吨位	投产时间及现状
美国 inland Steel	LD— GTL	……	1979年研试, 1982年采用。
日本钢管扇岛厂	LD—CL	1×150 1×160	1980年研试, 现已正式生产。
意大利 Bagnoli厂	LD—PJ	1×150	1980年投产, 准备在1983年停产。
日本川崎千叶厂和水岛 厂	LD—KG	1×150 1×180 2×150	1979~80年研试, 现已转入生产。千叶厂2 个较大的炉子于1982年底投产
日本神户尼崎及加古川 厂	LD— OTB	1×30 3×240	1979~80年在30吨炉上试验, 于1981年6月 加古川3座炉投产。
日本钢管福山厂	NK—CB	1×180 1×250	先在一车间180吨炉上试验, 于1981年10月二 车间一座250吨炉投产。
日本新日铁八幡厂	LD—AB	1×70	在第五车间试验并投产。
美国Jones & Laughlin	J&L系统	1×250	1981年投产。
英国Scunthorpe	BSC— BAP	1(3)×300	先在3吨炉上试验, 然后在220吨炉上工业试 验, 最后在3座炉上采用(尚处试验阶段)。
日本新日铁大分厂	LD—OB	1×320 1×150 1×340	1978年2月试验然后八幡3炼钢320吨炉于 1981年7月投产, 1982年大分厂340吨炉投 产。
比利时Montignee 厂	LD—HC	1×40 1×80 (1×180)	1979年在40吨炉上试验(使用高磷铁水), 于 1980年12月扩展到180吨炉子上(低磷铁水), 改造第二座炉于1983年投产。
日本住友鹿岛厂和和歌 山厂	STB	2×250 3×250 3×160	首先在2.5吨炉上试验, 1978年后在160吨炉 试, 后来1980年在250吨炉试并投入生产, 1981年后扩展到所有转炉。
日本川崎千叶厂和水岛 厂	K— BOP	2×85 2×220	该两厂于1980年后相继投产。
美国共和Chicago厂	OBM—S'	2×200	旧有OBM转炉上安设侧喷嘴(因无装顶枪条 件)。
西德Maxhutte和 Sulzbach厂 Klockner厂 美国National Steel 公司	KMS (KS)	3×60 3×65 1×125 2×225	在1980~81年期间改造老OBM转炉, 而 后于1982~83年期间Klockner建设125吨 KS转炉。美国Granite City厂于1982年建成 KMS转炉。曾试验过LBE。

荷兰 Hoogoven Jmuiden厂	Hoogoven—BSC	1 × 100	于1980年在Jmuiden厂试验，直到1982年底试成BSC—BAP法，后来用包壳砖并在开吹4分钟后从炉顶加入无烟煤，目前还在试验中。
芦森堡ARBED Esch—Belval 厂	ALCI	1 × 180	于1982年投产（喷煤粉）。
芦森堡ARBED Esch—Belval 厂	LBE	2 × 180	1978年首次试验OBE法。
芦森堡ARBED Differdange 厂	LBE	1 × 165	1980年9月完成改造。
比利时 Forges de Clabecq 厂	LBE	2 × 80	1983年底投产。
芦森堡ARBED Schiffange 厂	LBE	2 × 90	1981年11月投产。
芦森堡ARBED Dudelange 厂	LBE	1 × 80	1980年7月投产。
法国 Mondeville 厂	LBE	2 × 105	1979年11月及1980年6月投产。
法国Grandrange 厂 (Saciolo)	LBE	2 × 240	于1981年7月投产，用高磷铁水。
法国Solmer 厂	LBE (后LET)	2 × 350	1981年7月和1982年12月投产。
法国Usinor 厂	LBE	3 × 220 3 × 160	1980年10和1981年12月投产。
西德Roching—Burbach Voiklingen 厂	LBE	2 × 140	1981年4月投产后于1983年停产。
澳大利亚BHP Newcastle Port Kembla和 Wnyalla 厂	LBE	1 × 60 2 × 200 2 × 270 2 × 210	1981年12月投产。 1982年3月投产。 1982年1月投产。 1983年4月投产。
美国Great Lakes 厂	LBE	1 × 210 1 × 210	1980年进行试验（在2车间），于1981年3月一车间一座260吨炉投产。 1982年7月第二座炉改造完成。
加拿大Dofasco Hamilton 厂	LBE	1 × 100	1983年投产。
加拿大Stelco Hilfon 厂	LBE	1 × 125 2 × 125	1981年3月投产1座，另两座为1983年底投产。

日本新日铁 若津厂 室蓝厂	LBE	1 × 250	1982年8月第一座炉投产。
		1 × 250	1982年10月第二座炉投产。
		2 × 250	1982年底投产。
瑞典Oxelösund厂	LBE	1 × 150	为活炉座转炉, 于1982年6月投产。
加拿大Algoma厂	LBE	3 × 100	1982年6月投产。
		2 × 240	
巴西CSBM	LBE	1 × 45	1982年底投产。
		1 × 100	
葡萄牙SNS Saixal厂	LBE	1 × 45	1982年底投产, 后来又扩展到120吨炉上。

迄今为止, 可用来作为搅拌钢水的气体有 O_2 、空气、 CO_2 、 N_2 及Ar等。

用 O_2 搅拌, 需要用燃料(天然气、丙烷或油)来进行遮盖保护(防止与耐火材料接触和起冷却作用)。由于燃料(例如丙烷)分解和氧与熔池碳发生反应, 产生比较大的搅拌力。但是这种搅拌力将随熔池含碳减少而明显减少。当熔池碳大于0.2%时, 其搅拌力要两倍于 N_2 、Ar; 当碳降至0.04~0.06%时, 搅拌力基本与 N_2 、Ar相等。



尽管以 O_2 为搅拌气体在各方面都能满足要求, 但是由于要使用燃料保护比较复杂, 另外还有增[H]问题, 因此使用并不多。主要是一些用氧为载体吹石灰粉的方法, 例如K—BOP法, 使用氧气。

使用空气为搅拌气体也同样必须用惰性气体遮盖保护, 并且还有增加钢中含[N]量问题, 因此较少使用。

N_2 是惰性气体中唯一价格最便宜的, 用 N_2 作搅拌气体无需遮盖保护, 供气元件结构简单, 并且对耐火材料的侵蚀影响小, 因此采用比较广泛。但是使用 N_2 , 会引起钢水含[N]的增加, 例如即使使用较小的供 N_2 强度, 如果采用全程吹 N_2 , 钢水[N]也要增加30~50 ppm。如果要在吹炼終了到出钢期间继续吹 N_2 , 则还要再增5~10 ppm, 解决办法是在终吹前吹Ar清洗, 清洗时间约相当于全程的20~30%。

Ar气是最为理想的搅拌气体, 不仅可以保证搅拌效果, 而且没有增加钢中有害气体的危险。但是它的价格实在太贵, 以致非冶炼特殊钢种不能采取全程吹Ar, 目前主要用于吹炼后期搅拌, 都在努力降低Ar耗。

CO_2 气体由于与熔池中碳发生 $CO_2 + C \rightarrow 2CO$ 反应, 所以也是一种搅拌力比较强的气体。使用 CO_2 不会恶化钢质, 并且还具有一定的冷却作用。因此, 同 N_2 一样也是应用较普遍的一种气体。住友和日钢管公司均先后试成应用转炉气直接转换成 CO_2 的技术。由于还可以副产高纯度 H_2 , 所以成本比较低廉。美国有的厂使用 CO_2 液态贮存器和蒸发器来供应。由于 CO_2 气具有一定氧化性以及发生反应时造成的压力波动, 对炉底耐火材料具有一定程度的影响, 特别是由于会相对引起熔池CO分压的增加, 不利于超低碳钢的冶炼。

2. 供气元件及其发展演进

发展演进过程

转炉底吹惰性气体搅拌, 最早是从单管开始的。用单管喷嘴吹惰性气体, 当出口速度低

于音速时，由于会出现气流脉动引起的非连续性中断，而造成钢水倒灌喷嘴。当采用超声速供气时，发生射流直径与喷嘴直径相等现象，而且气速越高，气柱密度越大，喷射越稳定，然而却会发生由于气体冷却效应而造成喷嘴的粘结和堵塞。

于是，出现了由氧气底吹转炉引伸来的双层套管喷嘴。应用此种喷嘴，可以有效地防止喷嘴的粘结堵塞，因此，曾在一个时期得到推广应用。设计双层套管喷嘴必须注意两点：一是要使芯管面积 $A_{芯}$ 与环缝面积 $A_{环}$ 之比为 $1 \leq A_{芯}/A_{环} \leq 3$ 。二是要注意使环缝厚度 $t_{环}$ 与芯管壁厚 $t_{管}$ 之比 $t_{管}/t_{环} \leq 3$ 。

对双层套管喷嘴的进一步研究表明，内外管的压力差值越大，喷射气流越稳定，并且由气体返流引起的对周围耐火材料的冲击频率也随之减少。此外，由于使用双层套管必需保持最小的极限出口气流速度，从而给转炉冶炼中、高碳钢带来在脱磷上的困难。实践表明，要想使转炉冶炼品种具有较高的灵活性，必须使喷嘴供气量的最大值与最小值之比接近于10左右（ $Q_{最大}/Q_{最小} \approx 10$ ）。

基于上述情况，于是出现了将芯管用耐火泥堵塞，只由环缝供气的所谓SA型喷嘴（Single Annular Tuyere）。此种喷嘴与套管喷嘴相比，喷嘴蚀损速度由0.7~1.2毫米/炉降为 ≤ 0.6 毫米/炉，最大气量与最小气量比值由 ≤ 2.0 增加至 ≈ 10.0 。

发展喷嘴供气元件的同时，在西欧出现了透气砖供气元件。它是由法国IRSID与芦森堡ARBED联合发明的。起初的透气砖为泳散型，主要因寿命低，后来出现由2~3块砖组成的包钢板缝砖。后者气体主要经砖缝进入熔池，由于砖比较致密，因而在寿命上泳比散型有所提高。然而，此种外包钢板砖在炉役期间常常出现钢壳开裂漏气，后来虽然将钢板厚度由2毫米改成4毫米，初步得到解决，但仍存在由于耐火砖与钢壳间缝隙不均造成的气体通过量差别大，供气不稳的缺点。为消除此缺陷，不久又出现定向气孔钢板包壳砖。经过实际生产使用，虽然通过的气流比较均匀，然而当炉底结渣时，砖的表面呈现堵塞状态。经进一步研究改进后，出现了管内装耐火材料和嵌入细金属管式砖。这种砖可以使吹入气流得到良好分布并可消除由炉底结渣引起的堵塞现象。

与此同时，前述喷嘴供气元件在透气砖发展的启示下，由日本钢管公司发展出一种称为多孔塞（MHP）的供气元件。此种透气元件也是在耐火体内嵌入许多细金属管。经实际使用表明，这种砖不论在供气的均匀稳定性和寿命上都比较良好。特别是最近又有进一步改进，通过将外围细管单独供气，基本上消除了多孔塞与炉底砖接缝处由于严重蚀损造成的凹陷。

回顾正个透气元件的发展演进过程可以看出，嘴子法与砖法正在趋向一致，未来的透气元件将继续朝向分散、细流股方向发展，以进一步减少和消除气流对炉底的反冲击以及提高供气的稳定性。

3. 耐火材料

不论透气砖或者是喷嘴，要想具有比较高的寿命，都必需有高质量的耐火材料作母体。用来制做透气元件的耐火材料要求具有高的抗氧化性和高的耐崩裂、耐磨损性。此外，还应尽量减小元件的体积（砖体大易发生开裂）和改善炉底砌筑方法以尽可能避免由于应力造成的元件损坏。

目前多用高质量的镁-碳质耐火材料来制做透气元件。这种材料为由含Mg达90%的高级镁砂和约占20%的石墨粉组成，通常用酚醛树脂做结合剂并需配入一定数量的Al粉或Si。在

砖内配Al的作用是: Al受热后会由固体变液体而后变成气体, 通过Al蒸汽在砖内的扩散, 并由于发生 $2\text{Al} + 3\text{CO} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{C}_{(\text{固})}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3_{(\text{固})} + \text{MgO}_{(\text{固})} \rightarrow \text{MgAl}_2\text{O}_4$ (光晶石) 反应而使砖质大为提高。在砖内加Si的作用是Si在砖内汽化后进行扩散并发生反应:

$\text{Si}_{(\text{液})} + 2\text{CO}_{(\text{气})} \rightarrow \text{SiO}_2_{(\text{气})} + 2\text{C}_{(\text{固})}$ 和 $\text{SiO}_{(\text{气})} + \text{CO}_{(\text{气})} \rightarrow \text{SiO}_2_{(\text{固})} + \text{C}_{(\text{固})}$ 以及 $\text{SiO}_2_{(\text{固})} + 2\text{Mg}_{(\text{固})} \rightarrow \text{Mg}_2\text{SiO}_4_{(\text{固})}$ 从而使砖的性能提高。

此外, 还要求往砖内配加的石墨粉必须具有比较低的含灰量。如果含灰分多, 在高温下能发生 $\text{SiO}_2_{(\text{固})} + \text{C}_{(\text{固})} \rightarrow \text{SiO}_{(\text{气})} + \text{CO}_{(\text{气})}$ 反应, 而使砖的组织恶化。

4. 蘑菇形结瘤与炉底保护渣

延长透气元件的寿命, 除改善和提高元件质量外, 还必须建立一套好的保护透气元件操作制度。

最近, 日本一些工厂开始用造蘑菇形瘤的办法来提高元件的寿命。新日铁堺厂的170吨转炉, 用造蘑菇瘤的办法于1982年7月创造炉底寿命达3180炉的纪录。

所谓蘑菇瘤, 就是在供气元件的端部通过控制钢水和吹入气体的热平衡, 使之形成一个形如蘑菇状的保护层。此保护层结构具有极细的微观腔体和孔道, 它具有能缓冲气体流量和压力波动的作用, 并可防止由于钢水流动而造成的对供气元件磨损。

蘑菇头的形成先从生成核心开始, 依靠元件端部适当的热平衡, 经反复的金属粘结熔损而逐渐形成。分析蘑菇头的成分为:

	C%	Si%	Mn%	P%	S%
内壳	1.86	0.01	0.16	0.005	0.012
外壳	0.10	0.01	0.11	0.009	0.007

从成分看出, 蘑菇头心部为连续的铁性质, 外层是多层的钢性质。由于有蘑菇头的保护作用, 使供气元件的损耗速度实际只相当于0.3毫米/炉。

还有一种保护供气元件的办法, 就是非定期的造保护渣, 应用此种办法的厂家比较多。通过造富集MgO的炉渣, 在炉子停吹时使其挂在炉底表面上。有此渣层存在可以防止吹炼时耐火材料表面的急剧加热, 能缓和钢水磨损和抑制耐火材料中MgO的熔出。

必须指出, 不论造保护渣还是形成蘑菇头, 都需要严格对粘结厚度进行管理, 过厚的保护层将直接影响搅拌效果。

5. 向供气元件供气

为使供气元件能根据冶炼钢种和吹炼进程以及元件端头工况的改变作较大范围的气量改变, 必须使各元件都有单独供气控制管路, 在管路上要分别装设切断、调节和减压等阀门以及对流量的检测设施。

设置单独控制管路还有另外好处: 一是不致因一个供气元件发生故障而使全部炉底元件停用; 二是可以通过气量调节使各元件蚀损速度均等; 三是当某元件发生粘堵时, 可用减小冷却办法使之熔化再生。

为解决元件的单独供气, 还需设置专门的多管路转动耳轴接手, 以及为防止由气体互相切换产生的瞬间停气和压力波动所必须采用的特殊管路布置。本文集介绍的两种耳轴接手和管路布置可供参考。

最后, 还需要指出的是供气压力问题。为适应元件作较大气量改变的要求, 和由于元件长度改变(炉役期蚀损), 以及堵塞引起的阻力变动, 必须保证有较高的供气压力以便能随

时进行调节。日本君津厂新设LBE法采用的供气压力为18公斤/厘米²，西德莱茵毫森厂供气压力为10巴，另一个西德厂采用喷嘴砖，供气压力为10~12巴。美国琼斯拉夫林厂为17.5公斤/厘米²。

四、提高复吹法热效率的措施

转炉采用顶底复合吹炼后，由于铁和锰的氧化减少以及吹入惰性气体吸热等原因，使热效率降低，废钢比普遍减少约3%。

转炉吃废钢量的减少是一个严重问题，尤其对于今天废钢价格比较便宜来说，更显得重要。美国琼斯拉夫林厂转炉由于少吃废钢抵销了全部由采用复吹所带来的效益。因此，从经济角度出发，他们不得不在炉役期间根据冶炼钢种来使用拌搅工艺。所有这些情况表明，必须开发出一种能在转炉内增加热量的方法。

最近以来，各厂已普遍推广采用了双流道氧枪，并还出现了新的双流道顶喷煤粉的喷枪，即ALCI法（ARBED Lance Coal injection）。

双流道氧枪顾名思义，这种喷枪设有独立的两条供氧通路，一条为主氧道，用来完成精炼任务，另一条为副氧道，用来燃烧一部分炉内CO。

双流道氧枪的结构大同小异，根据副氧路喷孔位置不同可以分为三类：一类是把喷孔设在距喷枪端头一定距离的外管变径点处；一类是开设在距端头一定距离的直管段上；还有一种是把喷孔开设在与主流同一流道的边缘处。哪种为好目前尚未见评论。

影响副氧流燃烧CO数量的因素除开设喷孔的高度外，主要是喷孔角度和主副氧流的分配比例。根据日本住友的经验，副氧喷孔的角度以与喷枪轴线呈30~35度角为好。经由副氧道喷出的氧量达到占总氧量的20~25%（即 $O_{2副}/O_{2总}=20\sim25\%$ ）以后，炉气中 $CO_2/(CO_2+CO)$ 比就不再增加。

通常转炉使用双流道氧枪后的 $CO_2/(CO_2+CO)$ 比约达到20%左右。由增加CO在炉内的燃烧量引起的废钢量增加，依各厂情况不同而异，大约为每吨钢增加50~60公斤。

双流道氧枪目前已经成为转炉复吹不可少的组成部分。

双流道喷煤粉喷枪（ALCI）是新近由芦森堡ARBED保尔沃钢厂研试成功的。它可以大大提高复吹转炉的废钢比。基本作法是：在吹炼过程中，通过二次燃烧氧枪往钢水中喷吹煤粉，为达到更充分燃烧，利用煤粉发出的热量，必须做到：①在普通枪高和一般渣层下，喷枪出口处的煤粉颗粒速度必须保证能浸入钢水中。②为了使煤粉颗粒在钢水中快速溶解，需要适当加大底吹气搅拌。③煤粉量必须与供氧量相适应。④喷枪的二次氧流一定要能保证CO得到充分燃烧。

双流道喷煤粉枪的构造较一般氧枪除多副氧流道外，在枪管中间专门设置有以N₂为载体的煤粉管。

目前，此种喷枪已在ARBED公司的2座180吨转炉上使用。试成这种喷枪无疑会给复吹转炉带来更大的采用废钢比的灵活性。

五、复吹法的吹炼控制及其效益

1. 底吹气量成为主要控制吹炼手段

最初的转炉复合吹炼，在操作控制上几乎与传统的顶吹法没有多大区别，炉底供气只是单纯为了活跃熔池，供气量是恒定的或者根据供气元件工作状态改变而任其变化，完全是处于原始状态。

随着复吹法的广泛应用以及技术的不断进步，目前底吹供气已成为控制吹炼的主要手段，而延续已久的顶枪枪位变化控制则降为辅助手段。用底气控制吹炼要比靠枪位控制不仅效率高、灵活，而且容易掌握。

1·1 防喷控制

在转炉操作的脱Si期終了前后数分钟内，由于熔池废钢未熔阻碍钢水运动以及由于未化渣，要防止粘枪只能采用高枪位，造成钢水表面的过氧化；加上Si渣比较粘稠，常常在此时诱发出较大的喷溅。在吹炼进程中，由于外加氧化性物料以及顶枪操作不当，也有可能随时诱发喷溅。当预测到喷溅即将发生（通过安装在炉口上的测声器或根据氧枪震动频率的改变），及时增大底吹气量，可有效地加以防止。有时即使喷溅已经发生，也可以靠改变底吹气加以抑制，其效果之高、灵敏度之大，甚至可在十数秒内使喷溅得到抑制。

1·2 冶炼品种和控制终渣含铁

应用顶底吹转炉冶炼高、中、低碳镇静钢和沸腾钢时都需要有合适的底部供气制度来相配合。冶炼高碳钢，为化渣需要在吹炼进程中的某个时期抬顶枪并减少底吹气量（达到0.002标米³/分·吨）；此时就需格外注意预防喷溅，随时可能将底吹气量作较大幅度增加。冶炼低碳钢和超低碳钢是复吹法的特长。在开始吹炼后的一个相当长时间内采用稍小一点的底吹气量，但到结束吹炼前的2~3分钟内要突然增大底吹气量，达到0.1标米³/分·吨左右，以降低渣中氧化铁和进一步脱碳。如果炼超低碳钢（例如小于0.02%C）或者低碳镇静钢，则需要 在停吹后继续用较大的底吹气量（0.1标米³/分·吨）再吹2~5分钟。

采用吹氧后的底吹惰性气体（一般为Ar）搅拌有双重作用：一是向金属熔池输入气泡核心，借以清洗[N]、[H]等气体；二是降低气泡中的CO分压，便于进一步脱C。例如0.06%的停吹熔池含C，以0.3标米³/分·吨底吹气量，在3~5分内可使C降至0.02%以下。

关于停O₂后用惰性气体的再搅拌，在国外存在着不同看法。法国和芦森堡比较提倡，美国有的厂（例如琼斯拉夫林厂）则认为再搅拌的副作用很大。根据他们的经验，一是要降低熔池温度（每搅拌1分钟，温度降3.3度），二是要使炉衬侵蚀加剧。例如在一个炉役中如果有80%炉次用再搅拌，其炉衬的蚀速可高达4毫米/炉，如果只有10%炉次时，则蚀速仅有0.5毫米/炉。

2. 复吹法的主要优越性及效益

复吹法的优点很多，报道的也比较多，概括起来主要表现在以下几个方面：

- 1) 渣中含铁降低2.5~5.0%；
- 2) 金属收得率提高0.5~1.5%；
- 3) 石灰消耗减少3~10公斤/吨；
- 4) 终点含碳可降至0.01~0.03%；
- 5) 残Mn提高约0.02~0.06%；
- 6) 磷含量降低约0.002%；
- 7) 降低钢水含[O]量约0.04%（对提高钢包合金收得率有利）；

8)减少和消除喷溅,可适当提高炉子装入量;

9)降低 O_2 耗约8%,并缩短吹炼时间。

采用复吹法带来的经济效益,依各国各钢厂具体情况不同而异。西德为2~3.6马克/吨,美国为0.25~1.5美元/吨等。

六、未来展望

转炉顶底复合吹炼法从1980年开始正式用于生产以来,仅仅经过几年的时间,就已遍布世界。预计在今后几年内,全世界所有转炉都将改变成为复吹炉。不仅不会新建单纯的顶吹转炉,而且就是生产中也将不复再见到。

经过世界各国的努力,目前转炉复吹技术已经得到了很大的进步,水平正在不断的得到提高。预计在今后几个时期内,在以下几个方面将会有更大的发展:

1)供气元件将会得到进一步改进,尤其在消除和减少射流对炉底的返冲击上以及供气的稳定性和可靠性上会有很大进步。再加上元件母体耐火材料技术的进步以及保护供气元件技术的提高等,其结果将会使供气元件的寿命大大提高,要做到与炉体寿命同步将不会再成为问题。

2)炉底供气制度通过一些检测技术的提高以及工艺的改进将会变得越来越完善。目前有的厂已实现用微型机控制底吹供气。美国琼斯拉夫林公司建立起8种炉底供气模型。预计今后将进一步向自动化方向发展,以变化底气来控制吹炼的做法将越来越普遍,顶枪的控制作用将会变得越来越小。

3)转炉复吹与近年飞速发展起来的铁水炉外脱P、脱S、脱Si技术相结合,产生的多段炼钢少渣吹炼工艺流程,预计在今后若干年内将会有比较大的发展。目前这种新的方法已在日本的君津钢厂、住友鹿岛钢厂、神户加古川钢厂正式采用。有人预计此种新方法将会像当年LD转炉那样,使炼钢工业发生比较大的变革,将成为今后的主流炼钢方法。

新工艺将炼钢分成三个独立的氧化阶段即脱Si、脱P、S及脱C提温。最后一个阶段在复吹转炉中进行,由于是以含低Si、低S、P铁水为原料,使整个吹炼在少渣下进行,将会引起复吹工艺的很大变化。

转炉采用少渣吹炼在经济指标上将得到极为明显的改善。例如石灰消耗每吨钢只有7公斤,炉衬消耗每吨钢只有0.4公斤,由于渣量的减少带来的铁耗降低也必定是十分明显的。

此外,由于加入渣料少以及由于铁水经预处理后[P]和[N]也均得到降低,因此,应用复吹转炉可以冶炼出含很低磷($<0.01\%$)的钢和含[H]低($<2\text{ppm}$)、含[N]低($<20\text{ppm}$)的钢种。

未来的炼钢技术进步将是十分令人鼓舞的。