

# 现代转炉炼钢

戴云阁 李文秀 龙腾春 主编

东北大学出版社

## 前 言

自 50 年代初氧气顶吹转炉问世以来,转炉炼钢取得了长足进步。在生产规模、工艺流程、设备和自动控制水平、品种和质量等方面发展迅速、前所未有,对整个钢铁工业发展起到了积极的推动作用。与此同时,我国钢铁工业更是成绩斐然,目前钢产量已跃居世界首位,其中不乏转炉的贡献。

为了进一步促进我国转炉炼钢的发展,我们感到有必要和有责任编写一本最新的转炉炼钢方面的书籍,把转炉炼钢技术及最新成果介绍给炼钢工作者,为我国钢铁工业发展尽微薄之力,并弥补一点炼钢专业书籍之匮乏。为此,东北大学、首钢、酒钢、钢铁研究总院、原冶金部科技司和洛耐院等单位的多位专家和具有丰富专业工作经验的同志历经一年多的时间,完成了这项工作。

本书由十五章和附录组成,包括转炉生产技术的发展,转炉炼钢的物理化学,原材料和铁水预处理,炼钢工艺,数学模型和自动化,炉外精炼,典型钢种冶炼和质量,转炉节能,炉衬与耐火材料,溅渣护炉,全连铸转炉炼钢车间,烟气净化回收,转炉炼钢厂设计等。本书力图从理论和实践结合的角度来阐明现代转炉炼钢原理、工艺、设备和自动控制,以及炼钢厂设计等。编著者力求内容精练、重点突出,奉献出多年积累的经验,以使本书在内容和深度上跟上现代转炉发展的步伐。对以往被教材忽视而在实践中又比较重要的内容,给予了必要的注意。希望本书对从事炼钢和连铸生产、科研、设计工作的科技工作者及高校钢铁冶金专业的教师、大学生、研究生能有所裨益。

本书由戴云阁、李文秀、龙腾春组织编写并任主编,最后由戴云阁统编、李文秀审核。编著者第 1 章为胥昌弟,第 2 章为车荫昌,第 3 章为戴云阁、王学利,第 4 章为梁连科、刘建荣,第 5 章为戴云阁、李文秀,第 6 章为钟良才,第 7 章为王成明、潘辛、万长江、单长青、强伟、李涛、陆业铄,第 8 章为仇圣桃、张柏汀、邓开文,第 9 章为麦炽昌,第 10 章为李文秀、戴云阁,第 11 章为王子连,第 12 章为龙腾春、戴云阁,第 13 章为苏天森,第 14 章 1~2 节由钟耀浦执笔,汪锡元审核,第 14 章 3~5 节为汪锡元,第 15 章为钟耀浦、洪鹤、崔辛超,附录为张炳成、胡大伟。

酒泉钢铁公司马鸿烈和马国华同志,辽宁省大石桥荣源镁矿公司谢启荣和谢启义同志对本书提出了宝贵意见,在此深表谢意。

限于编著者水平,本书的错误和不当之处在所难免,敬请专家和读者批评指正。

编著者

1998 年 10 月

# 目 录

<b>第 1 章 现代转炉生产技术发展</b> .....	(1)
1. 钢铁工业发展概况及前景 .....	(1)
2. 氧气转炉炼钢的发展与前景 .....	(4)
3. 氧气转炉技术的发展 .....	(8)
4. 现代钢铁工业工艺流程 .....	(13)
<b>第 2 章 转炉炼钢的物理化学</b> .....	(17)
1. 氧化反应和氧势 .....	(17)
2. 脱碳反应 .....	(19)
3. 脱硫 .....	(21)
4. 脱磷 .....	(28)
5. 脱氧 .....	(34)
6. 选择性氧化还原反应 .....	(38)
7. 熔渣对金属脱除杂质的容纳能力 .....	(40)
<b>第 3 章 炼钢原材料</b> .....	(44)
1. 原材料分类和准备程序 .....	(44)
2. 金属料 .....	(44)
3. 造渣材料 .....	(48)
4. 氧化剂、冷却剂和增碳剂 .....	(54)
<b>第 4 章 铁水预处理</b> .....	(56)
1. 铁水预处理的发展 .....	(56)
2. 铁水脱硅 .....	(56)
3. 铁水脱硫 .....	(60)
4. 铁水脱磷 .....	(66)
<b>第 5 章 转炉炼钢工艺</b> .....	(74)
1. 转炉炼钢的工艺特征及其演变过程 .....	(74)
2. 氧气顶吹转炉炼钢工艺 .....	(76)
3. 复合吹炼转炉 .....	(91)
4. 转炉的其他冶炼工艺 .....	(102)
<b>第 6 章 氧气转炉炼钢数学模型</b> .....	(112)
1. 概况 .....	(112)
2. 冲击坑气液界面的反应 .....	(114)
3. 炉内炉渣-金属间的反应 .....	(118)
4. 吹炼过程各组元的变化 .....	(120)

5. 钢液温度	(122)
6. 烟气流量、组成及温度	(124)
7. 冲击坑面积	(127)
8. 数学模型的数值计算方法与模拟结果	(130)
<b>第7章 转炉炼钢自动化</b>	<b>(135)</b>
1. 概况	(135)
2. 计算机控制系统	(136)
3. 静态和动态模型控制	(144)
4. 检测仪表	(151)
5. 炼钢称量系统	(156)
6. 转炉氧枪及倾动装置电控系统	(158)
<b>第8章 炉外精炼</b>	<b>(163)</b>
1. 炉外精炼的现状与发展趋势	(164)
2. 炉外精炼的基础理论	(166)
3. 典型的炉外精炼设备及工艺	(179)
<b>第9章 典型钢种的冶炼及其质量</b>	<b>(188)</b>
1. 氧气转炉的特点	(188)
2. 焊条钢的冶炼及其质量	(189)
3. 低合金高强度结构钢的冶炼及其质量	(192)
4. 硅钢的质量及其冶炼	(195)
5. 中高碳钢的冶炼及其质量	(200)
6. 深冲钢的冶炼及其质量	(203)
7. 连铸准沸腾钢的冶炼及其质量	(206)
8. 超纯净钢的冶炼及其质量	(208)
9. 低焊接裂纹敏感性高强度钢 (CF 钢) 简介	(209)
<b>第10章 转炉炼钢的节能</b>	<b>(211)</b>
1. 转炉能耗	(211)
2. 转炉热平衡及影响因素	(217)
3. 转炉的外加燃料	(222)
4. 转炉节能方向和途径	(224)
5. 转炉节能实践	(226)
<b>第11章 转炉炉衬和耐火材料</b>	<b>(229)</b>
1. 炉衬耐火材料损毁机理	(229)
2. 转炉炉衬结构	(242)
3. 转炉炉衬耐火材料的演变	(235)
4. 转炉炉衬的修补	(237)
5. 镁碳砖	(239)

6. 镁钙碳砖 .....	(245)
7. 其他相关耐火材料 .....	(247)
8. 转炉炉衬耐火材料的发展方向 .....	(248)
<b>第 12 章 溅渣护炉 .....</b>	<b>(249)</b>
1. 溅渣护炉技术的发展和特点 .....	(249)
2. 溅渣护炉工艺和实践 .....	(250)
3. 溅渣护炉技术的基础研究 .....	(254)
4. 溅渣护炉带来的问题 .....	(256)
5. 溅渣护炉的经济效益 .....	(256)
<b>第 13 章 全连铸车间炼钢生产的组织及特点 .....</b>	<b>(258)</b>
1. 全连铸生产发展史 .....	(258)
2. 全连铸生产组织的基本条件和工艺特点 .....	(260)
3. 全连铸生产的完善与优化 .....	(263)
4. 全连铸生产发展的两个重要方向 .....	(267)
<b>第 14 章 烟气的净化及其回收利用 .....</b>	<b>(270)</b>
1. 烟气和烟尘的性质 .....	(270)
2. 转炉烟气净化 .....	(272)
3. 烟气净化系统的主要设备 .....	(275)
4. 煤气回收 .....	(281)
5. 污水、泥浆的处理和利用 .....	(282)
<b>第 15 章 氧气转炉炼钢工厂设计 .....</b>	<b>(284)</b>
1. 概述 .....	(284)
2. 氧气转炉炼钢工厂设计 .....	(287)
3. 炼钢原材料供应 .....	(305)
4. 转炉及其倾动机械 .....	(309)
5. 工业用气 .....	(316)
<b>附 录 .....</b>	<b>(325)</b>
1. 炼钢常用符号及英文缩写 .....	(325)
2. 钢和铁合金常用标准对照表 .....	(329)

# 第1章 现代转炉生产技术发展

## 1. 钢铁工业发展概况及前景

钢铁工业是原材料工业，也是基础工业。它的发展和整体经济发展规模和速度相适应的。钢铁产品又是用途广、用量大的材料，钢铁工业和各经济部门的发展密切相关，各经济部门使用钢材的数量和品种质量是不尽相同的，因此产业结构的变化和发展将直接影响到钢铁工业的发展速度和产品结构。一般情况，在经济发展初期，基础设施、基础工业、建筑业发展较快，钢材消费量增长较快，产品结构条钢型材比例较大。加工制造业快速发展时期，例如：汽车制造业、造船、农业机械、家用电气等等，板材扁平材比例增长较快。而当第三产业和高技术产业发展到一定比例时，钢材消费量便相对下降。

20世纪钢铁工业的高速发展，正是适应现代工、农业大生产的需要。一个世纪以来，尽管有许多偶然性的事件发生，使钢铁工业受到影响。但是，从1910年到1996年钢铁产量增长了十倍。从图1-1可以看出钢的增长可以分为三个时期，第一个时期（1910~1950年），钢产量自1910年的0.67亿t到1950年的1.92亿t，增长近两倍。第二个时期（1950

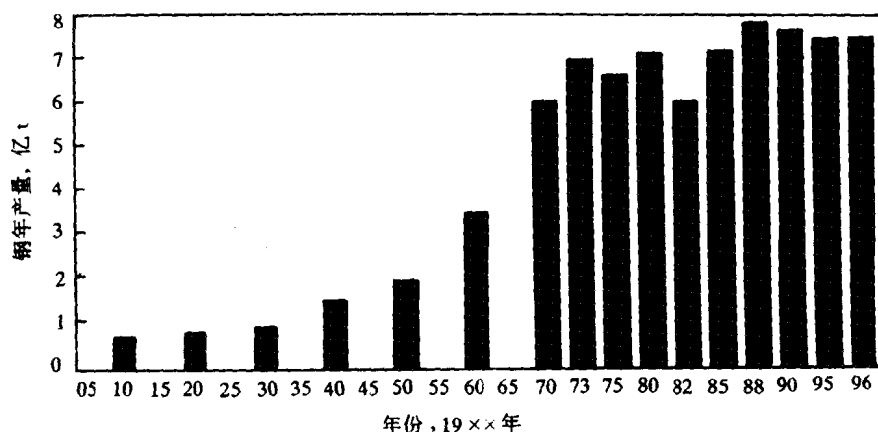


图1-1 20世纪钢产量发展情况示意图

~1973年)，二次世界大战后的经济恢复发展时期，钢铁工业一直高速发展到1973年第一次石油危机，钢产量从1950年的1.92亿t发展到1973年的6.97亿t，23年增长了2.63倍，年均增长率11.4%，是高增长率发展时期。第三个时期（1973~1996年），1973年以后的两次石油危机造成钢产量波动较大，钢产量自1973年的6.97亿t到1996年的7.51亿t，23年钢产量增加了7.7%，平均年增长率0.33%，是低增长率发展时期，主要原因是产业结构发生变化的结果。在发达国家，由于基础设施、基础工业、加工制造业已趋于饱和，发展缓慢，发展战略已转到全力发展高新技术，并用高新技术发展新兴高科技产业和改造传统工业。信息革命带来全球经济一体化，使为第一、二产业服务的通讯信息产业、银行、保

险、流通运输、旅游等行业得到发展，而对钢铁产品的需求则有所下降。在发展中国家，在继续发展基础设施、基础工业、加工制造业的同时也逐渐转入到发展高新技术和高新技术产业，改变经济结构，参与世界市场的竞争。因此，对钢铁产品的需求也将转入到缓慢增长的趋势。所以钢铁工业的前景将是低增长率的发展状况（见表 1-1、表 1-2）。

表 1-1 发达国家粗钢产量下降和发展中国家粗钢产量增长情况一览表(万 t)

年 份	发达国家			发展中国家		
	美 国	日 本	德 国	中 国	巴 西	韩 国
1974	13 682	11 932	5 323	2 112	752	195
1980	10 146	11 140	4 384	3 712	1 531	856
1992	8 432	9 913	3 871	8 004	2 390	2 805
1996	9 440	9 817	3 982	10 035	2 527	3 903

表 1-2 产业结构的变化对粗钢消费强度的影响一览表

序号	国家或地区	年 代	年粗钢消费量 万 t	年平均 增长率 %	人均国民 生产总值 美元/人	人均粗钢 消费量 kg	消费强度 kg/每美元 国民生产总值
1	美国	1955~1970	10 240~12 650	3.2	2 875~3 839	617~618	0.125~0.16
		1970~1992	12 650~9 987	-1.1	3 839~*21 790	618~391	0.16~0.019
2	欧共体	1955~1970	4 560~9 670	5.3	1 027~1 971	290~510	0.253~0.258
		1970~1992	9 670~12 253	1.1	1 971~*16 641	510~338	0.258~0.020
3	日本	1955~1970	720~7 060	13.5	338~1 272	80~681	0.238~0.535
		1970~1992	7 060~8 404	0.8	1 272~*25 430	681~676	0.535~0.029
4	前苏联	1955~1970	4 320~10 990	6.5	887~1 575	220~453	0.248~0.287
		1970~1992	10 990~11 486	0.20	1 575~3 412	453~391	0.287~0.392
5	印度	1955~1970	290~620	5.2	78~95	8~11	0.096~0.118
		1970~1992	620~1 909	5.3	95~*350	11~22	0.118~0.075
6	中国	1955~1970	390~2 220	8.5	76~109	7~29	0.088~0.267
		1970~1992	2 220~9 218	6.7	109~377	29~76	0.267~0.192
7	世界 平均	1955~1970	23 910~54 900	5.7	480~710.2	88~152	0.183~0.214
		1970~1992	54 900~72 093	1.3		152~143	

注：标\*者为1990年数据。

著名的美国 Paine Wabber 公司提出：“世界钢材需求将面临一个黄金时代。”报告中提出的预测超过观察家最乐观的预测，该公司预测 1993 年到 2010 年世界平均钢材消费量的增长率为 2.5%，2000 年钢材消费量将为 7.5 亿 t，2010 年将为 9.1 亿 t（见图 1-2）。世界钢铁协会预测 1995 年到 2000 年，发达国家钢材消费量的增长率将为 1%，发展中国家将为 5%，到 2000 年钢材消费量将是 7.5 亿 t。这些预测虽有待于未来实际的检测，但是，世界经济结构的变化，产业结构的调整对钢铁工业的影响是无容置疑的。

二次世界大战后，世界钢铁工业经历了高增长率和低增长率两个时期，在高增长率发展

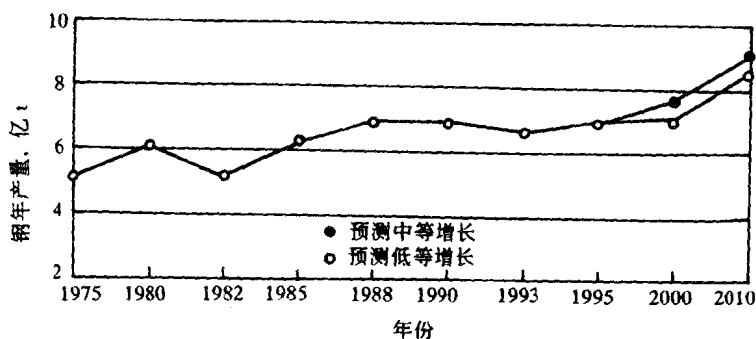


图 1-2 世界钢材近 20 年消费量和今后消费量预测示意图

时期，发达国家积累了过剩的生产能力。发展中国家近 20 年来，钢铁工业也有较大的发展（见表 1-1）。从几个发达国家和几个发展中国家近 20 年来钢产量的变化可以大略看出钢铁工业生产过剩的情况。日本粗钢生产能力的情况见表 1-3，到 1976 年，日本的粗钢生产能力已达到 1.6 亿 t，而近十年来，日本的粗钢产量在一亿 t 左右，有三分之一的过剩生产能力。钢铁工业生产过剩的状况可能将延续到下一个世纪，激烈的竞争，用户对钢铁产品的要求越来越高，要求强度更高，耐腐蚀、耐磨性能更好的钢材。要求加工性能好和加工成本低，要求断面尺寸接近零件尺寸的高精度钢材。近终型钢材，要求板材长、宽尺寸规格与使用尺寸相近，减少钢材使用量和提高钢材利用率，按各个用户使用要求生产，而不是按统一标准生产。用户要求缩短交货期，分批、多次交货，以减少资金占用和加速资金周转。特点是，小批量、多样化（质量性能要求多样化和尺寸规格多样化）。这对钢铁工业技术、工艺流程、规模、行业组成结构提出了新的挑战。

表 1-3 日本粗钢生产能力变化情况一览表(万 t)

年 份	1972		1973		1974		1975		1976	
	台	能力	台	能力	台	能力	台	能力	台	能力
平 炉	28	253	24	220	21	203	17	172	17	172
电 炉	746	1 530	710	1 565	716	2 477	705	2 497	709	2 575
转 炉	90	10 580	95	12 120	96	12 402	98	12 532	101	13 384
合 计	12 367		13 904		15 076		15 201		16 131	

注：本资料来自日本通产省统计部。

钢铁工业在发展中将面临以下四个方面的问题：

1) 市场问题，钢材消耗量，在低增长率的状况下缓慢增长，设备生产能力大于需求的状况将长期存在。随着经济全球一体化进程的加快，竞争将更加激烈。

2) 产品结构调整问题，国民经济产业结构的变化，要求钢铁工业产品结构随之调整，高科技建立的新兴高科技产业要求发展新材料，钢铁产品从按照标准生产转到按照用户的加工要求和使用要求进行生产，这就要求钢铁工业从大规模、大批量生产转为小批量、多样



化、灵活生产的方式。

3) 技术结构调整, 新技术、新工艺开发加快, 由于连铸技术发展, 全连铸及铸坯热装和直接轧制的发展, 淘汰了初轧和模铸, 钢铁工业的工业技术流程从冷态、间断、多品种联合企业转到现代钢铁工业工艺流程的热态、连续专业化生产线。

熔融还原和近终型连铸技术的发展组成的紧凑式短流程将在本世纪末或下世纪初出现、发展。

4) 建设适应人类社会环境要求的钢铁工业, 要治理污染, 更要降低能耗, 减少污染点、污染源, “污染治理”和“源头治理”应齐头并进。

## 2. 氧气转炉炼钢的发展与前景

一个世纪以前, 英国 H. 贝氏麦 1856 年在登记贝氏麦酸性转炉炼钢法专利时。就提出用纯氧炼钢的重要意义。到上个世纪末, 德国的 K.V. 林德首先生产可供工业使用的氧气。后来, 直到制氧技术发展改进, 使价格低廉时, 才开始在炼钢中使用。1930 年, 德国南部马克西米利安 (Maxhutte) 厂在托马斯转炉试验 30% 富氧炼钢, 1938 年用于生产, 证实了不仅可提高生产率, 而且降低了钢中的含氮量, 从而提高了质量。1932 年的前苏联和 1940 年的德国都采用过平炉炉头富氧燃烧技术。1946 年, 加拿大在平炉生产上, 开始采用炉头富氧燃烧技术, 1946 年, 使用钢管插入平炉, 电炉熔池吹入氧气, 氧气用于炼钢生产已经开始。

1947 年, R. 杜勒 (R. Durrer) 和他的同事 H. 赫尔瑞格 (H. Hellbrugge) 在瑞士格拉费根 (Gerlafigen) 钢厂 2.5t 转炉上进行顶吹氧试验。由于过去许多冶金工作者试验采用纯氧插入钢液熔池吹氧方法, 从底部、侧面、顶部吹入纯氧, 风口都很快烧损, 托马斯底吹转炉风口吹入富氧, 当富氧超过 35%~40% 时, 也很快地烧损。R. 杜勒的试验是在转炉钢液面上吹入氧气, 用高速氧气流吹入钢液, 于 1948 年 3 月获得成功。该项试验一直进行到 1949 年前后。这时, 奥地利联合钢铁公司要恢复建厂, 他们知道 R. 杜勒的该项试验。并去观察这种试验方法, 他们在奥地利林茨 (Linz) 2t 和 15t 的转炉上进行试验, 并于 1949 年 10 月获得了成功, 于是, 决定在林茨建立一个炉容量为 30t 的工厂, 于 1952 年建成开工生产。过了一年, 奥地利阿尔卑斯矿业公司在多那维茨 (Donawitz) 也建成了工厂开始生产, 并把这种炼钢方法命名为 LD 氧气顶吹转炉炼钢法。它是世界炼钢技术的一次巨大变革。LD 转炉从一开始就显示出它的以下几个优点: ①高生产率, 其生产率相当于当时同等容量的平炉的十倍。②建设费用低。③节省劳动力, 不需外加能源, 生产成本低。④质量好, 氮、氢、氧都低于平炉, 同时能去除硫磷。开始生产低碳钢, 1958 年前后已经能生产中高碳钢和合金钢。⑤烟气除尘容易。⑥耐材消耗低。⑦生产周期短, 其生产节奏、规律均衡, 有利于与连铸配合。由于上述优点, 于 50 年代末进行了完善化技术改进和转炉大型化发展。到 60 年代, 就已发展到 300t 的大型转炉。LD 氧气转炉的诞生和发展, 正处于二次大战后的经济恢复建设时期, 为钢铁工业的高速发展做出了突出的贡献。

1956 年转炉钢占世界钢产量的 1%, 1961 年占到 6%, 1967 年已超过平炉钢, 1973 年的调查结果表明, 转炉钢的生产能力已达到 3.66 亿 t, 计划与再建的生产能力为 1 亿 t。炼钢方法的构成发生了明显的变化, 形成了两个主要的炼钢方法, 即氧气转炉和电弧炉 (见表

1-4)。

表 1-4 世界各种炼钢方法产量比例(%)一览表

炼钢方法	1950年	1970年	1980年	1990年	1993年	1996年
托马斯转炉	16.0	3.8				
氧气转炉		43.0	54.0	57.5	59.5	60.2
平炉	77.5	39.0	24.0	15.0	9.6	6.5
电弧炉	6.5	14.2	22.0	27.5	30.9	32.9

60年代,氧气转炉迅速发展,平炉钢的产量比例逐年降低,氧气转炉消耗废钢较少,其废钢比一般为10%~20%,最大为30%,仅能消耗钢铁企业自身产生的废钢铁。社会回收废钢铁不断增多,废钢铁价格低廉,这时电炉可以使用廉价的废钢铁冶炼普通钢也是有竞争力的。60年代,高功率电炉出现,冶炼周期缩短到能有效地与连铸生产节奏匹配,当时是两座电弧炉配一台小方坯连铸机,生产条钢型材。60年代的电炉小钢厂(MiniMill)就是在这样的条件下兴起的。到1987年,小钢厂已有300多家,产钢量达一亿t,主要生产条钢型材。1989年,美国纽科公司在印地安娜州建设紧凑型带钢生产线(CSP),小钢厂的产品又扩展到扁平材领域,规模已达到200万t,电炉钢在60年代以后有了快速发展(见表1-5)。

表 1-5 世界电炉钢产量及其占世界钢总产量的百分比

年 份	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	1996
世界电炉钢产量 万t	12.1	65	117	600	1 250	3 456	8 519	15 752	21 154	24 463
电炉钢占世界钢 总产量百分比	0.18	0.87	1.23	4.23	6.51	9.9	14.2	22.0	27.5	32.9

氧气转炉与电弧炉将长期并存发展是由于钢铁工业的原料所决定的,钢铁工业的原料是矿石和废钢铁,钢铁材料可再生循环使用是一个很大的优势,如何有效地利用废钢铁一直是钢铁工业生产中的一项重要问题。1956年英国贝氏·麦的酸性转炉炼钢法和1878年法国G·托马斯碱性转炉法都是从底部鼓入空气,将铁水氧化脱碳而炼钢的。这两种方法共同的缺点是几乎完全不能使用废钢铁。1864年,法国马丁(MarTin)兄弟和英国W·西门子(W.Semens)发明平炉,平炉对原料的适应性很强,可灵活配比生铁和废钢铁是这种炼钢方法的主要优点之一。氧气转炉的诞生和发展虽然有许多优点,但是,氧气转炉的缺点是消耗废钢铁的数量受到限制。因此,当平炉逐渐淘汰,废钢过剩时,必然导致电弧炉的发展。

1992年,世界钢铁总产量为7.21亿t,转炉钢比例为59.3%,平炉钢11.4%,电炉钢29.3%,生铁产量4.92亿t,直接还原铁2 080万t,而废钢铁消费量为3.5亿t,占钢铁工业消耗原料的40%。有资料预计十年后废钢铁的消耗量将增长到4.2亿t,因为钢铁产量也在相应地增长,所以废钢铁消耗占原料总量比例不变,仍为40%左右(见表1-6)。

表 1-6 十年废钢铁组成变化(亿 t)

年 份	废钢铁总量	钢铁厂自产废钢		制造加工产生废钢		社会回收废钢	
		数量	百分比	数量	百分比	数量	百分比
1992	3.5	1.22	34.8%	0.96	27.4%	1.32	37.8%
2002	4.2	1.02	24.3%	1.10	26.2%	2.08	49.5%

从以上资料可以看出:前两项是减少趋势,由于连铸的发展成材率提高,冶金工厂产生

废钢铁减少，由于近终型钢材的发展，加工制造业钢材的利用率提高，切削、切边、切头相应减少。而社会回收废钢，由于社会钢铁积蓄量的不断增长，上升幅度较大。

社会废钢回收量和社会钢铁积蓄量有着密切的联系。我们称社会钢铁回收量与社会钢铁积蓄量的比例为社会废钢回收率。这个回收率固然和钢铁制品的使用寿命有关，更重要的是他们的回收加工成本是很不相同的，一些回收加工成本过高没有利润回报的废钢铁是得不到回收的。虽然废钢铁价格上升是会刺激社会废钢铁的回收量，但是废钢铁的价格又受生铁价格的制约，因为，只有当废钢铁的价格低于生铁价格的70%~80%以下时，电炉钢才具有竞争的能力。电炉炼钢的总成本包括原料成本和冶炼成本，电炉钢的冶炼成本高于转炉钢的冶炼成本，电炉由于电耗、电极消耗、耐火材料消耗高，所以是一种工序能耗最高的炼钢方法。电炉钢只有依靠低价废钢铁降低原料成本来弥补冶炼成本高的不足，才具有竞争力。因此，电炉大量使用生铁和直接还原铁是不适宜的，因为生铁和直接还原铁都是价格高、能耗高的原料，只有冶炼一些高附加值产品，配入少量的生铁和直接还原铁才是合适的和有经济效益的。

氧气转炉和电弧炉并存发展是由两种原料，矿石和废钢铁并存而决定的，各地区两种炼钢方法所占比例是不相同的，这是由原料构成和能源构成所决定的。氧气转炉和电弧炉将在竞争中并存发展，氧气转炉将发挥消耗废钢铁的潜能，多消耗废钢以降低铁水比，从而降低能耗，降低成本。并充分利用铁水杂质少的优势，结合铁水预处理和炉外精炼冶炼清洁钢、优质钢和各种合金钢。电弧炉将尽量降低电耗、电极消耗及耐材消耗等降低冶炼成本，利用低价废钢降低原料成本并利用建设费用低、生产灵活、适应性强的特点生产一般用钢材。电弧炉配比一定量的优质废钢、生铁、直接还原铁生产优质钢和合金钢也是必要的。有些钢种，例如高速工具钢和模具钢、特殊合金等，还必须采用电弧炉冶炼，在这方面电炉仍有优势。

氧气转炉在冶炼一般钢种时，应多配加杂质较多的社会回收废钢铁，优质废钢尽量提供电炉钢厂使用，实现资源合理利用。在市场经济的条件下，资源优化配置只有通过供、求关系和比价关系进行调节。一般合理的比价，优质废钢略高于生铁，生铁略高于直接还原铁，直接还原铁高于一般废钢铁。

当前，两种炼钢方法在改进原料方面，正在进行多项科研开发工作。氧气转炉主原料是铁水，为了解决环境污染和焦煤不足，正在开发熔融还原技术。氧气转炉为提高废钢的消耗以降低铁水比，减少二氧化碳排放量方面的科研工作也受到了重视，已有下列几种方法，KMS法，EOF法，SMP法等，都可以将废钢比提高到30%~100%，已有许多厂家实现工业化生产。电弧炉主原料是废钢铁，为去除废钢铁中的有色金属杂质，例如：铜、锡、锌等，日本政府1991年10月制定的再循环资源利用促进法规定汽车、家用电气、包装罐等产品都应再循环再生使用，上述产品再循环使用必须去除铜、锡、锌等杂质，否则经过多次循环，这种杂质的含量会越来越高，以致影响钢的加工性能和使用性能。上述几项，日本政府已列入适应环境的炼钢技术的科研计划，90年代由政府投资组织研究并组织国际合作开发研究。近几年，对直接还原铁的研究也有了新的发展，由于直接还原铁氧化物杂质较多，电炉冶炼过程增加渣量而增加了电耗，而直接还原铁的含铁量比生铁低大约5%，因此，售价必须低于生铁售价的10%左右才有销售市场。但是，直接还原铁的建设投资、能耗、生产成本与高炉炼铁相近，有些直接还原铁的方法甚至于比高炉炼铁的成本还要高。因此，过去

直接还原铁发展缓慢，多数直接还原铁的工厂建设在既有优质矿石又有廉价天然气的地区生产，为解决直接还原铁生产地的地域限制和降低生产成本，近几年直接还原铁的科研开发方向，一是用原矿粉减少造球工序，二是用低价煤做燃料和还原剂，三是在钢厂就地生产实现直接还原铁热装电弧炉，以降低电弧炉的电耗。

表 1-7 1978~1996 年我国各种炼钢方法构成一览表

年份	总产量 万 t	平 炉		电 炉 钢		顶吹氧气转炉钢	
		产量, 万 t	占总量比例, %	产量, 万 t	占总量比例, %	产量, 万 t	占总量比例, %
1978	3 178	1 127	35.47	681	21.44	1061	33.41
1979	3 448	1 134	32.91	730	21.19	1 293	37.50
1980	3 712	1 189	32.03	710	19.15	1 508	40.64
1981	3 560	1 118	31.43	656	18.44	1 529	42.96
1982	3 716	1 164	31.35	686	18.48	1 665	44.83
1983	4 002	1 190	29.75	812	20.30	1 853	46.32
1984	4 348	1 214	27.93	903	20.78	2 074	47.72
1985	4 679	1 230	26.29	1 008	21.55	2 308	49.34
1986	5 221	1 235	23.67	1 056	20.24	2 819	54.00
1987	5 628	1 277	22.70	1 147	20.39	3 085	54.82
1988	5 943	1 304	21.95	1 206	20.30	3 336	56.14
1989	6 158	1 313	21.22	1 275	20.71	3 467	56.32
1990	6 635	1 315	19.83	1 401	21.12	3 822	57.60
1991	7 100	1 309	18.44	1 500	21.13	4 279	60.28
1992	8 093	1 399	17.29	1 762	21.78	4 916	60.74
1993	8 927	1 446	16.21	2 047	22.93	5 423	60.75
1994	9 153	1 370	14.97	1 938	21.18	5 826	63.66
1995	9 413	1 270	13.49	1 950	20.71	6 193	65.79
1996	10 013	1 261	12.60	1 893	18.90	6 947	68.50

我国主要炼钢方法构成见表 1-7。平炉钢的比例，从 1979 年起一直呈下降趋势，平炉座数也一直在减少。但是，平炉采用顶吹氧工艺强化冶炼，使单炉产量提高，平炉钢产量的绝对量是增长的，一直到 1994 年，产量达到绝对量高峰后才开始下降。近几年来，平炉的淘汰速度加快，其主要原因是平炉冶炼周期过长与连铸生产节奏不相匹配，虽然也有少数平炉厂建设连铸机，但不能实现多炉连浇。采用单炉浇铸效益很差，所以，多数平炉仍然是钢锭模铸，初轧开坯，这种方式和转炉连铸生产相比，成本相差很大。可以看出，连铸的大发展将加快平炉的淘汰速度直到消失。许多国家里，平炉的最后消失都是在连铸的大发展时期，

可见，平炉炼钢方法不适应连铸技术的发展，是平炉被淘汰的重要原因之一。连铸技术是导致技术结构调整和炼钢方法构成发生变化的重要因素。凡是不能和连铸技术相匹配的如小转炉、一般功率的小电炉等也必将淘汰。

电炉炼钢在 1993 年以后，由于废钢铁价格上升，影响成本，相当多的一般功率小电炉、模铸两次加热成材，亏损停产。一批超高功率的大电弧炉建成投产，并配有炉外精炼、连铸、连轧形成热态、连续的专业化生产线，发展情况良好。电弧炉的适度发展是由废钢铁的市场调节来实现的，只有改变废钢铁的供求关系，形成废钢铁的买方市场，形成废钢铁行业，建立废钢铁工业，改进回收、加工分类供应，提高废钢铁的供应质量，才能为电弧炉的健康发展提供良好的条件。

### 3. 氧气转炉技术的发展

氧气转炉从 1952 年诞生以来 40 年技术的发展，大致有以下四个方面。

#### (1) 氧气转炉的完善和大型化

一个新生技术的诞生，往往是主要工艺技术方面的突破，在实现工业化生产以后，有一个完善的过程。氧气顶吹转炉也是这样，氧枪在钢液面上用高速氧流吹入钢液，实现氧气炼钢。工业化生产还有许多问题，烟气的除尘和煤气的回收、氧枪的改进，单孔氧枪到多孔氧枪、原料的适应性、高磷生铁的应用，出现 LD-AD 法和 OLP 法、品种的扩大，从早期冶炼低碳钢逐步扩大中高碳钢合金钢等品种。炉衬的发展也是很重要的，在早期，炉龄很低，约百炉左右，因此，采用二吹一的生产运转方式。经过 40 年，采用镁碳砖炉衬，炉龄达到三四千炉，溅渣补炉可达到一万炉以上。氧气转炉诞生在二次世界大战后的经济恢复建设时期，钢铁工业高速发展，转炉大型化发展很快。60 年代初，出现炉容为 200t 的炉子，60 年代末，出现炉容为 300t 的炉子。大型化使得整个炉子及厂房工程设计方面都有了很大的进步。

#### (2) 科学控制炼钢

科学控制炼钢包括过程控制和终点控制，由于转炉炼钢时间短，反应速度快，很难采用取样分析的方法来监控反应过程，也不能像平炉、电炉那样直接观察炉内反应过程，而是根据火焰、喷溅、声音等二次信息，依靠人的经验，观察分析冶炼过程和控制终点。所以，一百年以来，贝氏麦、托马斯转炉都是依靠经验炼钢。转炉从经验炼钢到科学控制炼钢是转炉炼钢技术发展的一个重要方面。

50 年代末期到 60 年代初期，转炉炼钢工作者依靠利用热力学成果，利用热力学实验数据，可以精确地计算出炼钢过程的化学反应生成热。另外，检测、分析仪表仪器的发展，对加入转炉的主、副原料的质量、温度及化学成分等都可以进行测量，故可做到准确的计量加入原料。对转炉吹氧和废气可以连续监控和分析计量，加之副枪的开发，这一切均为转炉静态计算、静态控制和动态控制等科学控制炼钢创造了条件。目前，对冶炼过程中炉渣的监控也有了几种行之有效的方法，科学炼钢已达到很高的水平，终点命中率达到很高的精度。后吹率的降低，为保证钢水质量、降低各种消耗和提高劳动生产率方面发挥了重要的作用。

#### (3) 炉外精炼

炼钢工序有两个重要任务，一是冶炼功能，调整各种化学成分，二是凝固成形。很长一

个时期以来, 各种炼钢方法的冶炼任务都是在炼钢炉内完成的, 随着钢材品种、质量要求的不断提高, 这已不能满足要求。因此, 三四十年代就出现铁水预处理和钢包精炼技术。最早的铁水预处理, 除脱硫外还有脱硅, 高硅铁水脱硅后, 进入平炉冶炼。30年代就出现合成渣渣洗技术、钢包脱硫去除夹渣。转炉诞生以后, 转炉的脱硫效率很差, 所以铁水脱硫技术发展很快。铁水预处理成为一项新的技术领域, 它包括铁水脱硅、脱磷、脱锰、脱氮等等, 从广义讲, 也包括一些共生矿铁水提钒、提铌等。二次冶金包括钢包冶金和 AOD、VOD 等。随着连铸技术的发展, 又出现中间包冶金, 因此, 炉外精炼包括铁水预处理、二次冶金和中间包冶金等。所谓“炉外”精炼是相对炼钢炉炉内冶炼而言, 过去也曾概括称为炉外处理。炉外精炼可以使各种成分控制精度很高, 波动很小, 对清洁钢的元素可精炼到很低的水平。据报道, [N] 的精炼极限能力, 1983 年为  $28 \times 10^{-6}$  (ppm), 1993 年达到  $8 \times 10^{-6}$  (ppm), [C] 的精炼极限能力从  $16 \times 10^{-6}$  (ppm) 到  $6 \times 10^{-6}$  (ppm), [S] [P] [H] [O] 都可达到很低的水平。表 1-8 部分清洁钢产品的化学成分是商业订货合同可保证的水平。

表 1-8 部分清洁钢化学成分(%)一览表

钢种	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti/Nb	O	N	Cr	Mo	Ni
电机汽轮机轴	0.25	0.02	0.02	0.003	0.001	0.005				1.73	0.39	3.84
轿车面板	0.002	0.01	0.10	0.01	0.005		0.06/0.01	0.003	0.002			
不锈钢板	0.002	0.17	0.28	0.02	0.02	0.04		0.004	0.005	19.0	1.90	
轴承钢	0.95	0.20	0.30	0.010	0.001	0.03		0.0005		1.40		0.05
管线用钢	0.06	0.26	1.18	0.004	0.0007			0.002			0.10	

炉外精炼的发展可分为三个阶段。第一阶段为 1970 年以前, 这个时期, 炉外精炼的发展主要是为适应品种质量的要求。由于各种钢材的性能对钢的成分的要求不同, 所以, 出现了各种不同的炉外精炼的方法, 见表 1-9 和表 1-10, 其精炼比与精炼水平也是和当时品种、质量的要求相适应的。

表 1-9 各种脱硫方法一览表

序号	方法名称	内 容	开发者和年代
1	苏打粉脱硫法 (Sode Paving Method)	苏打加入铁水沟或铁水罐, 利用铁水冲击混合反应	
2	摇包法 (Shaking Ladle Method)	摇摆铁水包, 加入脱硫剂混合脱硫	德国, S. Eketorp 1959 年
3	机械搅拌法 (Stired Method)	利用搅拌器在铁水包内搅拌铁水与脱硫剂混合脱硫	德国, DemagOstberg 1996 年 德国, Rheinetahl 法 1968 年 日本, 新日铁 KR 法 1968 年
4	喷射脱硫法 (injection Method)	脱硫剂和气体(载气)喷射入铁水罐或鱼雷车, 气体搅拌混合反应脱硫	德国, Bochnmer Verein 公司 1963 年

续表 1-9

各种脱硫方法一览表

序号	方法名称	内 容	开发者和年代
5	气体吹入搅拌法 (Gas Bobbling Method)	上吹或下吹, 吹入氩气, 搅拌脱硫剂脱硫, 脱硫剂加在铁水面上	德国, Suddentsehe Klkstickstoff Werk 1975年
6	气体吹入环流法 (Gas-life Mixing Method)	气流环流, 不断将脱硫剂带入铁水, 混合反应脱硫	日本, 神户制铁所 1974年
7	CaO-Mg 喷射脱硫法 (Injection Method)	用 CaO-Mg 粉剂喷射入铁水内, 混合反应脱硫	美国, Koros 1976年

表 1-10

氩气转炉常用二次冶金方法一览表

序号	方法名称	内容功能	开发者及年代
1	合成渣渣洗	合成渣加入钢包, 出钢时钢水冲击混合脱硫, 去除夹杂	法国 Perrin 30年代
2	VID (VD)	钢包在真空室内脱气	德国、前苏联 50年代
3	DH	提升法, 真空脱气 (N、H、O) 脱碳, 调整成分	德国 Dortmund Hordert 1956年
4	RH	循环法, 真空脱气 (N、H、O) 脱碳调整成分	德国 Rheustahl Heraeus) 1959年
5	喷射冶金 (TN, SL)	喷射气体带入粉剂, 在钢液中脱硫、增碳	德国、瑞士 70年代
6	SAB, CAB, CAS	钢水包加罩或加盖底吹氩, 调整成分	日本, 新日铁公司 1974年
7	喂线	喂线机将包覆线喂入钢液, 微调成分	法国 70年代
8	LF 炉	大气下电弧加热, 造还原渣脱硫、脱氧合金化调整成分	日本, 日本特钢公司 1971年
9	CAS-OB	CAS 加 OB 吹氧加铝升温, 增加调温功能	日本, 新日铁公司
10	RH-KTB	RH 加顶吹氧枪, 提高脱碳速度, 升温	日本, 川崎制铁公司 1988年
11	VOD	真空下吹氧脱碳	德国 1968年
12	AOD	氩、氧脱碳	美国 1968年

第二个阶段, 1970年以后, 是连铸大发展时期, 也是炉外精炼的一个大发展时期。由于连铸工艺要求硫低、磷低, 并控制铝含量。铁水脱硫发展很快, 许多全连铸厂实现铁水全量脱硫处理。连铸多炉连浇要求各炉间化学成分均一, 两炉钢水在连浇时, 在中间包有一段

混合钢水浇铸时间，如果上、下两炉钢水化学成分偏差较大，过渡坯化学成分和上、下两炉钢的化学成分偏差就大，导致钢材性能的波动大。一般，这种成分偏差大的过渡坯，需要判废，或做可利用品，故需通过炉外精炼调整化学成分，使其做到均一。目前，各厂均根据钢材的用途制定了标准。连铸对钢水的温度要求比较严格，因为，钢水温度是连铸的基本操作参数，温度决定拉速，拉坯速度决定冷却速度，稳定温度是连铸操作工艺的基本条件。浇铸温度对连铸事故和连铸坯的质量都有很大的影响。我们可以看到，各种二次冶金和中间包冶金都增加了温度调整的功能。二次冶金在氧气转炉和连铸机之间还起到调节、匹配节奏的功能，因此，连铸和炉外精炼是同步发展的。有些国家的连铸比和精炼比上升的曲线几乎是相同的。

第三阶段，80年代以后，所有氧气转炉车间都建设了铁水预处理和二次冶金设备，相应地增加了基建费用。由于相当多的氧气转炉车间实现全连铸、全量铁水预处理和二次冶金，增加了生产成本，所以在这个基础上，炉外精炼技术的发展，除了不断地提高精炼水平以满足不断增长的质量要求外，另一个开发研究的重点就是降低成本。炉外精炼是一种反应器，对某种冶炼目的，可控制创造出最佳的热力学和动力学的条件，是一种高效的冶炼手段。铁水预处理和转炉二次冶金形成连续冶炼工序，均有其特有的功能。所以，针对不同的钢种，将各种工艺优化组合成最佳的冶炼工艺，便可达到优质、高效的冶炼目的。早期的铁水预处理技术是以脱硫为主，在这个时期，发展了三脱工艺，即脱硫、脱磷和脱硅。最早开发三脱工艺是为了冶炼一些特殊的钢种，例如低磷钢、不锈钢等，80年代末在日本就很普遍，详见表 1-11。而且，发展了铁水预处理、预炼炉等方法，例如：住友的 SARP、新日铁的 ORP、神户的 H 炉等方法。过去，铁水脱硫以后，转炉仍有脱磷任务，因此，石灰的加入量和炉渣量都不能大量的降低。实现三脱工艺以后，转炉仅为脱碳和升温功能，实现了转炉的少渣操作，大量的降低了石灰和钢铁料的消耗。转炉渣变成了一种低硫、低磷、高碱度的炉渣，可以作为铁水三脱工艺的合成渣料返回使用，进一步回收了石灰和氧化铁，降低了成本。另一方面，转炉少渣操作可以提高供氧强度，缩短吹氧时间，吹炼终点采用快速出钢，因为铁水含硫、磷低，终点不需要取样分析，所以停止吹氧后，即可倒炉出钢，冶炼周期大幅度缩短。以上这些都可以提高综合效益。

表 1-11 日本五大公司采用三脱工艺时的铁水脱磷率

公司名称	新日铁	钢管	川崎	住友	神户
铁水脱磷率, %	74	55	91	30	87

二次冶金，主要是建立多功能的精炼站，把许多精炼功能集中到一个精炼设备上，减少建设费用和提高设备利用率。另一方面，在一个精炼设备上，完成各种精炼工艺，避免多次调运，缩短精炼时间，减少钢液降温。由于转炉冶炼和连铸周期的缩短，所以要求二次冶金时间也要缩短，除提高精炼效率外，还要缩短检测、分析的时间，发展直接检测、分析的方法，近几年来，在这方面也有了很快的发展。

#### (4) 底吹转炉和顶底复合吹炼二次燃烧技术的发展

60年代，托马斯碱性空气底吹转炉失去竞争力，马克西米利安 (Maxhiitte) 想改造托马斯炉，但是他们厂有过底吹富氧的经验，一般当富氧超过 35%~40% 时风口便很快烧损。用氧气底吹改造托马斯炉，在当时被认为是不可能的。1965年加拿大 G.Savard 和 R.Lee 开



发了同心套管喷枪，内管吹氧，内管与外管间的环缝吹碳氢化合物气体丙烷，插入金属熔池吹氧，丙烷碳氢化合物裂解大量吸热，冷却、保护喷枪。Maxhiitte 的工程师去加拿大考察试验，回来后，于 1967 年在 Sulzbach-Rosenberg 的托马斯炉进行试验。1968 年，Oxygen-Bottom Maxhiitte 工业化生产成功，从此，底吹氧气转炉诞生了。与此同时，法国 LWS 底吹氧气转炉也开发成功，它是由 Creuect-Luice Wendd-Sideler Spranck 共同开发的，被命名为 LWS，它和 OBM 的区别是，环缝吹入液态燃料冷却、保护喷枪。欧洲许多托马斯炉用底吹氧气转炉所替代，一些平炉改造也采用了这种方法。日本川崎等公司也新建了一些底吹转炉的工厂。

由于底吹氧气转炉熔池搅拌强烈，在熔池钢液碳很低时，底吹转炉优于顶吹转炉，脱碳速度较快，反应趋近平衡，钢中的氧含量低，铁锰烧损小，铁合金回收率高，有利于冶炼低碳钢。但是，耐材消耗高，钢中氢略有增高，且底吹氧系统结构复杂。因此，这种方法，在世界上并不多用。

后来，Maxhiitte 和川崎公司的研究表明，底吹率 30%~40% 也能取得同样的冶金效果，新日铁底吹率降低到 5%~7%，已具有足够的搅拌能力。

1978 年，Maxhiitte 想通过安装一支顶枪，氧化炉渣，以提高底吹转炉炉渣的氧化性，实现高拉碳操作时前期脱磷，结果没有达到预期效果。得到的效果是，钢液终点温度相当高，通过分析研究发现：炉气二次燃烧是造成钢液温度升高的主要原因。

Maxhiitte 改造了一台底吹转炉，从底部吹入煤粉，加顶枪吹氧实现二次燃烧，在 20% 的二次燃烧率的条件下，每吨钢喷入 40kg 煤，可增加废钢 200kg，被称为 KMS 法。1985 年，Gergsmarienhütte 厂建立了 100t 的 KS 法炼钢炉，废钢比 100%，经过一年多的实践，由于操作复杂而改为 KMS 法，现在，世界上共有六个 KMS 法的炼钢炉，其中有加拿大多法斯科的 300t 转炉，德国新西兰的四个厂和日本的川崎叶南厂，冶炼不锈钢其废钢比均在 30%~50% 左右，取得了较好的效果。

70 年代末，德国钢铁研究院和卢森堡阿尔贝德公司开发了 LBE 顶底复吹冶炼技术，从炉底吹入氮、氩等惰性气体搅拌熔池，特别是对低碳钢，在碳低时，熔池搅动减弱，采用底吹搅拌，可加速脱碳反应并使各种反应接近平衡状态，减少铁、锰烧损，提高脱硫能力。该项技术发展很快，方法很多，底吹气体除氮、氩外，还有氧、一氧化碳、二氧化碳等，底吹喷嘴也有不同的类型。1990 年，采用顶底复合吹炼技术的钢产量占转炉钢产量的百分比在日本为 83.5%，西欧为 60.1%。由于复合吹炼铁锰烧损减少，降低了消耗，但同时也带来由于热量减少，影响废钢消耗的一些问题。一些公司为了维持现有的废钢比，开发了双流道氧枪，利用副氧道吹氧，增加转炉炉气二次燃烧，以增加熔池热量。也有一些采用在氧枪头部或上部开一些副氧孔的方法，也可达到同样的目的。为防止热效率低和回收煤气热值过低而降低利用价值，氧气转炉的二次燃烧率都不很高，大约在 20%~30% 左右。

底吹转炉和顶底复合吹炼二次燃烧技术已扩展到许多冶金领域，如电弧炉，铁水预处理预炼炉，冶炼不锈钢的 K-OBM-S 法，煤气熔化废钢的 EOF 炉，SMP 法的废钢熔化炉，熔融还原 Hismalt 法、DIOS 法等等。氧气转炉在发挥消耗废钢潜能方面，就可以借鉴 EOF 炉电弧炉废钢预热方法。氧气转炉只实现煤气回收，大量的物理热没有得到利用。因此，氧气转炉炉气预热废钢是一项很值得开发的技术。