

中国金属学会炼钢专业委员会
STEELMAKING COMMITTEE
THE CHINESE SOCIETY FOR METALS (CSM)

第十一届全国炼钢学术会议

THE 11TH CSM ANNUAL STEELMAKING CONFERENCE

中国 北京
2000 年 11 月 14-16 日

BEIJING, CHINA
NOV. 14-16, 2000

中国金属学会炼钢专业委员会
STEELMAKING COMMITTEE
THE CHINESE SOCIETY FOR METALS (CSM)

第十一届全国炼钢学术会议

THE 11TH CSM ANNUAL STEELMAKING CONFERENCE

中国 北京
2000 年 11 月 14-16 日
BEIJING, CHINA
NOV. 14-16, 2000

前 言

中国金属学会炼钢专业委员会第十一届炼钢学术会议将于 2000 年 11 月在首都北京举行。本届年会一如既往地得到了广大炼钢工作者的积极支持和响应。经专家评审,本文集共收录论文 82 篇。其中既有来自高校和科研院所的最新科研成果报道、也有许多来自工厂,涉及生产结构调整、工艺优化和产品高附加值的宝贵经验介绍。论文内容基本涵盖了国内冶金工艺技术的最新进展、实际生产经验与工艺效果以及主要技术环节的国内外发展趋势;同时也客观地反映出改革开放二十年来我国钢铁工业已取得的巨大技术进步,并正在步入一个从粗放向集约、从分散向联合发展的重要转型时代。

为了方便会议组织和大家查阅,我们仍按惯例将论文在文集中分成若干部分,即综合评述、转炉炼钢、电炉炼钢、炉外精炼、连铸与质量等。然而应该指出的是,由于钢铁冶金工业本身所具有的流程性特点,加之,现代科学技术在研究方法与内容上均具有在交叉结合的基础上向精细与系统综合两个方向发展的趋势,这种惯常的论文分类多数仅具有形式意义而已。

北京科技大学冶金学院和北京钢铁研究总院工艺研究所等有关专家承担了本届年会的论文评审工作。在对投稿的评审和技术编辑过程中,专家们认真负责,尊重和赞赏每一位作者的劳动成果和研究心得,并尽量保持其原有的写作风格和思路。但为了在版面格式上尽量做到标准一致、篇幅上尽量有所控制,对部分论文的内容和文字做了少量的改动,请作者理解。

首都钢铁(集团)公司对本届年会的召开给予了热情的支持和经费资助。在此表示衷心的感谢和崇高的敬意。

中国金属学会炼钢专业委员会
2000 年 10 月

目 录

综合评述

1 转炉炼钢技术的发展与展望	1
刘河, 余志祥, 萧忠敏	
2 现代电弧炉炼钢技术进展	8
李上琦, 孙彦辉, 刘冰, 季淑娟	
3 炉外处理技术的发展和前景	17
苏天森, 傅杰, 曲英	
4 薄板坯连铸连轧技术的最新进展	22
田乃媛, 唐洪华, 宋立东	
5 炼钢钢铁材料消耗的研究与管理	27
侯成	
6 加快结构调整, 促进企业进步	36
马春生	
7 武钢二炼钢连铸工艺技术的最新进展	44
李具中, 宋泽启	
8 首钢第三炼钢厂高效铸机生产实践	48
张心林	
9 莱钢 25t 转炉实现负能炼钢可行性研究	51
张胜生, 杨欣	
10 武钢二炼钢板坯连铸机现代化改造再探讨	55
彭易武	
11 炉外处理技术在武钢的应用	58
萧忠敏, 刘良田, 喻承欢, 郑万, 赵继宇	

转炉炼钢

1 鞍钢二炼钢 90T 转炉留渣操作工艺的实践	64
王军, 房荣波, 杨海峰	
2 大型转炉炼钢过程冶金反应的研究	69
杨文远, 郑丛杰, 杜昆, 陈华, 许春雷, 蒋晓放	
3 整体出钢口及挡渣出钢技术的应用	75
王健, 谢长荣, 戈文强, 陈渝, 杨森祥	
4 首钢 80T 转炉溅渣护炉工艺研究及实践	79
张心林	
5 旋流氧枪喷头对转炉溅渣护炉效果的影响	83
钟良才, 宋英雄, 姜永林, 屈正平, 查义山, 包兴普	
6 60Si2Mn 冶炼工艺技术分析	87
赵海峰	
7 转炉冶炼低碳钢低硅钢的生产实践	92
张庆国, 白连臣, 石玉良, 张洪波, 李殿平	

8 转炉炉渣气化脱硫动力学.....	96
吴胜文, 王书恒, 金山同	
9 武钢“平改转”OG 系统生产实践及其优化方向.....	102
俞波	
10 攀钢少渣炼钢复合造渣工艺试验研究.....	106
许立志, 文永才, 汤天宇, 杨震波, 杨森祥, 彭涛	
11 铝锰铁脱氧合金化试验研究.....	112
汤天宇, 荣秋生, 文永才, 杨震波, 王胜, 张槐, 陈守俊, 张大德	
12 基于过程结构分析的高炉-转炉区段物流控制逻辑.....	119
刘茂林, 徐安军, 田乃媛, 陆志新, 孙伟国	
13 武钢长寿复吹转炉底部供气元件透气机理.....	124
佟博源, 崔淑贤, 刘浏, 梁严, 徐静波, 骆忠汉, 彭玮珂, 田义胜, 于维军	
14 炼钢-连铸-热轧一体化系统炼钢计划子系统方案设计.....	130
彭其春, 徐安军, 田乃媛, 王德斌, 张汉新, 曾呈校	
15 转炉溅渣护炉的合理工艺参数.....	134
朱英雄, 钟良才, 刘承军, 金培洪, 任子平, 陈明, 程乃良, 邹俊苏	
16 底吹影响复吹转炉溅渣护炉的冷态模拟研究.....	138
朱英雄, 钟良才, 刘承军, 金培洪, 梦劲松, 李纯宝, 顾兴均, 屈正平	
17 氧枪喷头结构影响顶吹转炉溅渣护炉的冷态模拟试验研究.....	142
朱英雄, 刘承军, 钟良才, 金培洪, 程乃良, 郭振和, 任子平, 捷宏伟	
18 首钢三炼钢 VD 单联生产工艺探索.....	146
余光光, 齐振亚, 李明, 贾品贵	
19 转炉流程生产优质钢的实践与探讨.....	151
曹立国, 李士琦	
20 武钢二炼钢厂复吹转炉溅渣护炉及冶金效果分析.....	154
骆忠汉, 徐静波, 喻承欢, 李凤喜, 佟博源, 刘浏	

电炉炼钢

1 S45 电炉连铸圆坯中心缩孔影响因素分析.....	158
于艳, 刘俊江, 徐勇强, 陈依雯	
2 人工智能在电弧炉炼钢终点预报中的应用.....	162
郑少波, 洪新, 李青	
3 炼钢电弧炉过程动态模型与仿真.....	165
李青, 洪新, 郑少波	
4 南钢 70 吨高阻抗电弧炉非线性电抗模型研究.....	170
孙彦辉, 李士琦, 刘冰, 林国强, 陶健, 李翔	
5 莱钢特钢 50t 电炉用氧技术的实践.....	174
朱荣, 仇水全, 李桂海, 王勤朴, 王森, 吴京华	
6 炼钢生产中的过程计算机控制.....	177
徐志强, 王永福, 姚勇	

炉外精炼与铁水预处理

1 从 RH-OB 到 MFB 多功能氧枪.....	180
赵口云, 李炳源	
2 RH 与 VD/VOD 比较.....	184

刘川汉, 吕红斌	
3 RH-MFB 的冶金效果	187
李扬州, 薛念福	
4 武钢第二炼钢厂 RH-KTB 的生产实践	190
黄成红	
5 承钢在线 CAS-OB 精炼炉开发	194
何平, 布焕存, 刘涛, 米谷明, 白水贵, 白瑞国, 王彦, 夏青春, 翁玉娟, 张振中	
6 重轨钢精炼工艺研究	198
刘川汉	
7 RH 处理过程钢液脱硫	201
艾立群, 蔡开科	
8 RH 真空脱碳精炼过程的模拟研究	205
朱苗勇, 黄宗泽	
9 梅山冶金公司铁水脱硫工艺选择及实践	209
陈林权, 郑飞远	
10 铁包芯丝铁水脱硫研究	213
唐平, 文光华, 熊跟成, 朱斌, 龙怡菊, 赵知祥, 何宏侠	
11 钢包加盖钢液喷射脱硫脱氮热态试验	217
朱荣, 王新华, 迪林, 张书彦, 孟兆生, 王勤朴, 李猛	
12 节能钢包烘烤技术的应用	221
席福学, 陈亚峰, 张辉	
13 整体钢包技术及应用	226
朱向东, 俞玉碧	
14 碱土金属氧化物-卤化物渣系的物理化学性质	229
金成超, 姜茂发, 李连福	
15 包内衬耐火材料的选择及砌筑	234
陈林权	
16 无碳型钢包覆盖剂的研究与应用	239
薛迎, 杨海波	
17 钢包用铝镁浇注料的配比试验研究	242
李一为, 王习东, 丁伟中	
18 铁水脱硫复合喷吹技术和设备在中国的实践	247
周洲, 李项宜	

连铸与质量

1 宝钢连铸中间包热状态测试与分析	251
崔健, 郑盼裕, 顾建军, 吴晓东, 田乃媛, 徐安军	
2 二炼钢连铸改造工艺方案设计	255
刘国强, 刘丽	
3 连铸板坯表面纵裂金相分析	259
徐国妹, 朱志远, 王万军, 王新华	
4 通用连铸二冷配水模型及其软件开发	263
武小林, 蔡开科, 张家泉	
5 固定辊连续矫直技术在超低头板连铸机上的应用	268
黄玉超, 周英超, 吕建权, 李先奎, 张兴中, 胡国清	

6 矩形坯连铸机的高效化改造	272
刘占玲, 李建新, 李家征, 霍永臻	
7 八一钢厂合金钢方坯连铸机工艺特点	276
袁钢锦, 李玉良	
8 包钢 20 吨四流 T 型中间包模拟研究	281
智建国, 包燕平, 种法耀, 李春龙	
9 提高热送铸坯温度的试验研究	286
马勤学, 傅喜松, 王德城, 刘新宇, 张永超, 王万军, 王新华	
10 板坯连铸结晶器平均热流的研究	290
张立, 郑裕贻, 叶锦渭, 朱志远, 张炯明, 王新华	
11 连铸板坯钢中夹杂与钢板性能的研究	295
魏向东, 张丽娜, 王伟, 张宏峰	
12 连铸过程钢中夹杂物的控制	298
刘中柱, 蔡开科, 曾丹, 袁伟霞, 刘良田, 骆忠汉	
13 方坯高效连铸凝固的数值模拟	302
陈登福, 魏庆成, 冯科, 廖建云, 阮晓丰, 敬文辉, 余维江	
14 连铸保护渣的夹杂物吸收和粘性特性	308
刘承军, 王云盛, 朱英雄, 姜茂发	
15 钢板表面夹杂缺陷的来源分析	312
唐立东	
16 超低头连铸机浸入式水口优化研究	315
雷洪, 朱苗勇, 刘新, 倪满森, 刘家奇, 乌力平, 李建中, 杜松林	
17 转炉-RH-连铸工艺生产 03Al 深冲钢洁净度的研究	318
王德城, 周有禄, 汪晓川, 王文军, 王万军, 仇永泉, 王新华	
18 转炉-RH-连铸工艺生产高压气瓶用铝洁净度研究	323
周有禄, 袁凡成, 马勤学, 王文军, 王万军, 仇永泉, 王新华	
19 沟槽内壁结晶器连铸坯初期凝固传热过程的研究	328
沈明钢, 周延斌, 金山同, 靳山英楠	
20 反向凝固 0Cr13/15 复合铸带的界面剪切强度及断口分析	332
张建, 王新华, 王万军, 许中波	
21 连铸结晶器保护渣结晶温度的研究	337
舒俊, 金山同, 张丽, 曹卫文, 宋任波, 王向光	
22 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 渣系的粘度特性	341
宁国山	
23 连铸保护渣的新型骨架粒子—BN	346
刘承军, 王云盛, 朱英雄, 姜茂发	
24 连铸结晶器保护渣结晶相的研究	350
舒俊, 金山同, 张丽, 曹卫文, 宋任波, 王向光	
25 保护浇注对改善连铸钢内在质量的效果分析	354
魏向东, 王伟, 王英林	
26 关于板坯连铸结晶器传热系数的探讨	358
张炯明, 王新华, 张立	
27 优化中间包结构 提高钢的洁净度	364
王水胜, 张炯明, 成泽伟	

转炉炼钢技术的发展与展望

刘浏、余志祥、萧忠敏

摘 要 本文回顾 20 世纪氧气转炉炼钢技术的发展, 总结现代转炉炼钢的五项重大技术: 转炉大型化技术、复合吹炼工艺、转炉煤气回收与“负能”炼钢、转炉长寿技术和全自动吹炼工艺。预测 21 世纪转炉炼钢技术的发展趋势是: 优化炼钢工艺流程; 转炉高速吹炼工艺; 建立大批量廉价生产洁净钢的生产体系; 建立“零”排放的绿色生态钢厂。

关键词 转炉炼钢 发展 展望

PROGRESS AND PROSPECT ON CONVERTER STEELMAKING TECHNOLOGY

Liu Liu Yu Zhixiang Xiao Zhongmin

ABSTRACT This paper reviews the development of oxygen converter technology in 20th century with focus on five core technique: capacity enlargement, combined blowing, gas recovery and steelmaking with “negative” energy input, long campaign and full automatization of blowing. The predicted development trends in 21st century are: Further optimization of steelmaking route. Development of high speed blowing technology. Establishment of the system for mass production of clean steel with reasonable cost. Construction of ecological steel plant with “zero” pollution.

KEYWORDS Converter steelmaking Development Prospect

1 前言

人类已经跨进 21 世纪。

21 世纪钢铁工业的发展面临着机遇和挑战。根据市场预测^[1]: 至 2010 年发达国家钢材消费年均增长量为 0.7%; 而发展中国家将达到 3.8%; 太平洋地区的增长为 4.57%。世界钢材市场消费量的缓慢增长, 为钢铁工业发展, 特别是太平洋地区发展中国家钢铁工业发展提供了良好的机遇。

21 世纪国际钢铁工业发展也面临着严峻的挑战。主要来自三个方面:

- 钢铁生产能力过剩, 残酷的市场竞争将使一些落后的钢铁厂倒闭;
- 环境保护对钢铁工业发展产生巨大压力, 一些污染严重的落后工艺将被强制淘汰;
- 世界钢材价格呈下降趋势^[2]。

进入 21 世纪, 面对机遇和挑战, 钢铁企业必须努力发展高效生产工艺, 降低生产成本, 提高产品质量和减轻对环境的污染, 才可能立于不败之地。

本文追溯 20 世纪转炉炼钢技术的发展, 总结现代转炉炼钢的重大技术, 展望 21 世纪转炉炼钢技术的发展趋势。

2 20 世纪转炉炼钢技术的发展

氧气转炉炼钢是目前世界上最主要的炼钢方法。即使到 21 世纪的前期, 转炉钢的生产比例仍将保持在 60~70%。图 1 给出了转炉炼钢技术的发展概况。回顾 50 年氧气转炉炼钢发展史, 可划分为三个发展时期:

转炉大型化时期 (1950~1970 年)

这一历史时期, 以转炉大型化为技术核心, 逐步完善转炉炼钢工艺与设备。先后开发出大型转炉设计制造技术、OG 除尘与煤气回收技术、计算机静态与副枪动态控制技术、镁碳砖综合砌炉与喷补挂渣等护炉技术。转炉炉龄达到 2000 炉, 转炉吹炼制度为“三吹二”或“二吹一”。

转炉技术完善化时期 (1970~1990 年)

这一时期, 由于连铸技术的迅速发展, 出现了全连铸的炼钢车间, 对转炉炼钢的稳定性和终点控制的准确性, 提出更高的要求。为了改善转炉吹炼后期钢渣反应远离平衡, 实现平稳吹炼的目标。综合顶吹、底吹转炉的优点, 研究开发出各种顶底复合吹炼工艺, 在全世界迅速推广。这一时期, 转炉炉龄达到 5000

炉，吹炼制度转变为“二吹二”或“三吹三”。

转炉综合优化时期 (1990~2010 年)

这一时期, 社会对洁净钢的市场需求日益增高。迫切要求建立起一种全新的、能大规模廉价生产纯净钢的生产体系。围绕纯净钢生产, 研究开发出铁水“三脱”预处理、高效转炉生产、全自动吹炼控制与长寿炉龄等重大新工艺技术。这一时期, 转炉炉龄超过 10,000 炉, 初步实现“一座转炉吹炼制”: 即一座转炉的产量完全可满足一套主轧机机的生产能力, 形成炼钢—轧钢短流程生产线。使联合企业逐步走向一个炼钢厂的生产体制, 降低投资成本和生产成本, 大幅度提高生产效率。

复合吹炼, 用各种成分的惰性气体

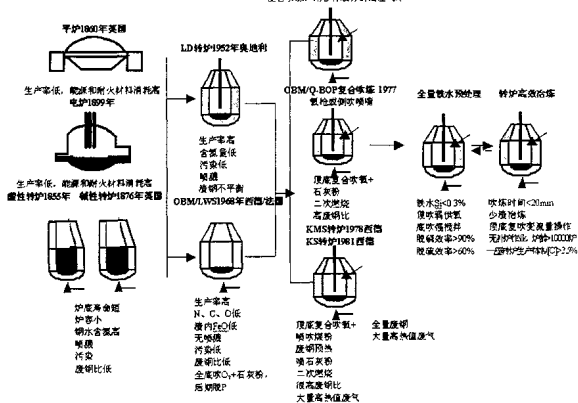


图 1 炼钢方法发展图

3 现代转炉炼钢的重大技术

3.1 转炉大型化技术

表1 现代转炉的基本配置

装备技术	● 合理的 H/D, 合理的炉容比 ● 全悬挂倾动机构, 水冷托圈、耳轴、炉帽、汽水冷却炉壳 ● 上料, 称量与下料程序控制 ● 下渣检测与有效的渣铁分离装置 ● 多孔水冷拉瓦尔氧枪, 兼喷二次燃烧、化渣、脱硫与搅拌功能
工艺控制技术	● 灵活可控的炉底供气系统、长寿喷嘴与大气量调节强化搅拌功能 ● 炉渣、炉气与钢渣的在线动态检测 ● 全自动吹炼控制与信息管理系统 ● 除尘与煤气回收, 二次除尘设施, 尽可能采取干法系统
节能环保技术	● 炉口微压差控制与余热锅炉 ● 炉衬厚度检测与炉体维护设施 ● 拆、砌炉机械

转炉大型化是一个历史的概念,是氧气顶吹转炉从诞生走向成熟的重要标志。今天,讨论转炉大型化应赋予新的概念:

- 转炉大型化, 是指转炉应具备现代化的基本设备配置 (详见表 1);
- 转炉容量的选择, 应充分考虑生产的钢材品种、连铸机类型与铸坯尺寸, 做到炉机匹配, 并能充分与连轧机的生产协调、匹配;
- 转炉大型化的技术核心, 是实现高效快节奏生产, 精确控制吹炼终点。

总之,对不同钢材的生产,转炉应有一个合理的容量。容量太小不适应现代化生产管理,但也不是容量越大越好。

3.2 转炉顶底复合吹炼工艺

表2给出了顶吹转炉、底吹转炉和顶底复吹转炉冶金特点的比较。从表中可以看出:复吹转炉结合了顶吹、底吹转炉的优点,却避免了二者的缺点。因而,成为非常有效的精炼工艺。

表2 氧气转炉吹炼方式的技术比较

	顶吹转炉	底吹转炉	复吹转炉
反应速度	脱碳速度快,氧效率较高	脱碳速度更快,氧效率很高	脱碳速度快,氧效率高
热效率	可二次燃烧,热效率高	无二次燃烧,热效率低	可二次燃烧,热效率高
化渣速度	化渣速度较快	化渣困难	更易于成渣
脱磷能力	较强	弱	强,脱磷反应接近平衡
吹炼平稳性	差,易发生喷溅	好,基本不喷溅	较好,可控制喷溅
终点控制	较困难	易于吹低碳	较容易
脱碳能力	差,后期钢渣易过氧化	好,钢渣不会过氧化	较好,有利于避免钢渣过氧化

复吹转炉的吹炼特点可用“复吹特征参数”ISCO (Index of Selective Carbon Oxidation) 表示^[3]:

$$ISCO = \left\{ \frac{2Q_{O_2}}{(2Q_{O_2} + Q_{Ar})\tau} \right\} \left\{ \frac{Q_{O_2}}{W/\tau} \right\} \quad (1)$$

ISCO 值越小,说明底吹搅拌气量越大,熔池混匀时间 τ 越短。其冶金效果表现为:随 ISCO 值减小,熔池 C-O 反应更趋于平衡,适宜冶炼超低碳钢;终渣 FeO 含量降低,残锰提高;但化渣不好,给脱磷造成一定困难。表3给出几种不同复吹工艺的特征参数及冶炼效果。

表3 不同复吹工艺 ISCO 参数与冶金效果比较^[4]

工艺名称	LD	LD-KG	K-BOP	Q-BOP
吹炼气体	无	CO, Ar, N ₂	O ₂ -C, H ₂	O ₂ -C, H ₂
供气强度(Nm ³ /t·min)	0	0.005-0.2	1.0-1.5	3.5-4.0
ISCO	225	130	64	58
终渣 TFe(%)	20	18	13	10
[%C]=0.07%时				

对于 80° 以上的大中型转炉,采用复吹工艺可以获得明显的冶金效果:

- 渣中 TFe 降低 2.5~5.0%;
- 石灰消耗减少 3~10kg/t;
- 金属收得率提高 0.5~1.5%;
- 氧气消耗减少 4~6Nm³/t;
- 残锰含量提高 0.02~0.06%。

复吹转炉的经济效益,因冶炼的品种、炉子大小和各钢厂具体情况不同而有差异。一般说来,在欧洲约为 2~3.6 马克/t;在美国约为 0.25~1.5 美元/t;在中国为 6~15 元/t。

3.3 煤气回收与负能炼钢

转炉炼钢属于“自热式”冶炼,依靠铁水中 C、Si、Mn、P 等元素的氧化反应放热,完成精炼过程,并生成大量高温 CO 燃气(详见表 4)。燃气温度(物理热)约为 1500℃,燃气热值(化学潜热)约为 2100kcal/Nm³,煤气发生量波动在 97~115Nm³/t 之间^[5]。

表4 转炉煤气成分、热值和发生煤气量

煤气成分					煤气热值	煤气发生量
CO	CO ₂	N ₂	H ₂	O ₂	(kcal/Nm ³)	(Nm ³ /t)
67.7-71.2	14.4-15	13.3-15.8	0.9-1.2	0.1	2080-2189	97-115

表5 宝钢、武钢三炼钢、君津钢厂煤气回收效果^[6]

	宝钢	武钢三炼钢	君津钢厂
铁水比 (%)	82.75		89.0
回收煤气量 (Nm ³ /t)	105.9	105.8	99.8
转炉工序能耗 (kg/t)	-10.67	-2.82	-6.27
钢产量 (万吨)	849	266	—

采用煤气回收技术回收转炉烟气的化学潜热;采用余热锅炉回收烟气的物理热。当炉气回收的总热量 > 转炉生产消耗的能量时(如电力、钢包烘烤燃料、氧气等),实现了转炉工序“负能炼钢”。当炉气回收的总热量 > 炼钢厂生产消耗的总能量时(包括炼钢、精炼、连铸等工序的能量消耗),实现了炼钢厂“负

能炼钢”。如表 5 所示,我国宝钢、武钢和日本君津钢厂均已实现了转炉工序“负能炼钢”,而宝钢已实现了炼钢厂“负能炼钢”。

1978 年~1998 年 20 年间,我国吨钢能耗下降 48.8%,节能效果显著。据 1998 年统计,我国大中型钢铁企业吨钢的可比能耗为 901kg 标准煤,仍比日本吨钢能耗高 245kg 标准煤(为 37%)。炼钢节能潜力巨大。炼钢厂节能的技术措施是:

- (1) 降低铁钢比。每降低 0.1% 铁钢比,可降低吨钢能耗 70~85kg 标准煤;
- (2) 提高连铸比。和模铸相比,连铸可降低能耗 50~80%,提高成材率 7~18%,折合标准煤 63~162kg/t;
- (3) 回收利用转炉煤气。可降低吨钢能耗 3~11kg 标准煤;
- (4) 提高连铸坯热送比,可降低吨钢能耗 1.9~2.1kg 标准煤;
- (5) 提高转炉作业率,可降低工序能耗 3kg 标准煤。

3.4 转炉长寿技术

炉龄是转炉炼钢的重要技术指标。提高炉龄不仅降低了生产成本而且提高了转炉的生产效率。九十年代,美国开发成功转炉溅渣护炉技术,创造了 25000 炉的世界最高炉龄纪录。溅渣护炉在中国推广也取得显著的经济效益:炉龄普遍提高 3~4 倍,最高炉龄已接近 20,000 炉,吨炉衬耐火材料消耗降低 0.2~1.0kg,补炉料消耗减少 0.5~1.0kg/t,转炉利用系数提高 2~3%。国内钢厂采用溅渣护炉工艺后的平均经济效益为 4.0 元/t,每年全国可获经济效益 1.8 亿元。

溅渣护炉的基本原理是利用高速氩气把成分调整后的剩余炉渣喷溅在炉衬表面形成溅渣层。溅渣层固化了镁碳砖表层的脱碳层,抑制了炉衬表层的氧化,并减轻了高温炉渣对砖表面的冲刷侵蚀^[7]。

溅渣护炉作为一项先进的工艺技术,还处于发展完善阶段。今后的研究工作主要集中在以下方面:

- (1) 开发和完善复吹转炉溅渣护炉工艺

钢铁研究总院与武钢公司合作,开发出复吹转炉溅渣护炉工艺,采用控制底吹转炉喷嘴前蘑菇头生长的技术,使底吹喷嘴的一次寿命与转炉炉衬同步,达到 15000 炉,创造了世界底吹喷嘴一次寿命的纪录^[8]。如图 2 所示,炉龄达到 18000 炉时,复吹转炉终点钢水的[C]·[O]浓度积达到 0.0028%,接近[C]·[O]反应的平衡值。

提高底吹喷嘴寿命的核心技术是控制喷嘴前端生成透气蘑菇头,避免喷嘴烧损;但在炉役中后期,应严格控制蘑菇头生长高度,防止喷嘴堵塞。

- (2) 开发炉体冷却工艺,进一步提高炉衬寿命。

溅渣后,炉龄升高炉衬减薄,会使炉壳变形更为严重。

开发炉壳冷却技术,抑制炉壳变形,可使炉壳寿命提高到 10~15 年。进一步优化溅渣工艺,研究溅渣层与炉衬砖的结合机理,将转炉炉龄进一步提高,并能与轧钢机加热炉、制氧机等设备同步运行,同步检修,以获得更好的经济效益。

- (3) 研究开发长寿命水冷烟罩、烟道等辅属设备,实现转炉整体设备长寿命。

3.5 全自动转炉吹炼技术

转炉吹炼过程控制是实现转炉正常冶炼的关键技术。根据转炉吹炼的技术特点:①脱碳速度快,准确控制吹炼终点比较困难;②热效率高,升温速度快;③容易发生炉渣或金属喷溅;④吹炼后期脱碳速度减慢,金属-炉渣之间远离平衡,容易造成钢渣过氧化。针对上述冶金特点,对转炉自动化控制的具体要求是:

- (1) 能实现远程预报,根据目标钢种要求和铁水条件,能确定基本命中终点的吹炼工艺方案;
- (2) 能精确命中吹炼终点,通常采用动态校正方法,修正计算误差,保证终点控制精度和命中率;
- (3) 具备容错性,可消除各种系统误差,随机误差和检测误差;
- (4) 响应迅速,系统安全可靠。

转炉自动控制的发展经历了三个阶段:静态控制—动态控制—全自动吹炼控制。表 6 给出了三种转炉

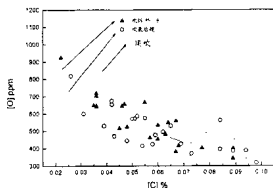


图 2 顶底复吹转炉炉龄 18000 炉时
终点钢水 C-O 平衡关系

自动控制技术性能和方法比较。

表6 三种转炉自动控制技术性能和方法比较^[9]

控制方式	检测内容	控制目标	控制精度	命中率
静态控制	铁水温度、成分和重量, 各种 辅料成分和重量, 氧气流量 和枪位	根据终点[C]、T 要求确定吹炼方案, 供氧 时间和渣、辅料加入量	$[\text{C}] \pm 0.03\%$ ($T = 15^\circ\text{C}$)	$\leq 50\%$
动态控制	静态检测内容全部保留, 并增 加副枪测温、定碳、取钢水样	静态模型预报副枪检测点, 根据[C]、T 检 测值修正计算结果, 预报达到终点的供氧 量和冷却剂加入量	$[\text{C}] \pm 0.02\%$ ($T = 12^\circ\text{C}$)	80~90%
全自动吹炼 控制	动态检测内容全部保留, 并增 加: (1)炉渣状况检测 (2)炉气分析设备 (3)Mn 光谱强度连续检测	在线计算机闭环控制: (1)顶吹供氧工艺 (2)底吹搅拌工艺 (3)造渣工艺 (4)终点预报 T、[C]、[S]、[P] 全程预报碳含 量和温度	$[\text{C}] \pm 0.015\%$ ($T = 10^\circ\text{C}$) 对吹炼的控制精度 超过 5 年以上的熟 炼操作人员	$\geq 90\%$

静态控制属于吹炼前远程预报技术, 不能消除吹炼过程中由于“喷溅”、“返干”等干扰因素造成的误差, 也很难适应铁水、原材料质量的波动, 终点控制精度和命中率不高。采用动态控制, 利用炉内反馈信息校正吹炼误差, 显著提高了终点控制精度。动态控制通常采用两种方法:

(1) 副枪动态控制技术: 在吹炼接近终点时 (供 O_2 量 85% 左右), 插入副枪测定熔池[C]和温度, 校正静态模型的计算误差并计算达到终点所需的供 O_2 量和冷却剂加入量。

(2) 炉气分析动态控制技术: 通过连续检测炉口逸出的炉气成分, 计算熔池瞬时脱碳速度和 Si、Mn、P 氧化速度, 进行动态连续校正, 提高控制精度和命中率。

采用动态控制技术基本解决了转炉终点控制问题, 但也存在以下缺点:

- 不能对吹炼造渣过程进行有效监测和控制, 不能降低转炉喷溅率;
- 不能对终点[S]、[P]进行准确控制, 由于[S]、[P]成分不合格, 造成“后吹”;
- 不能实现计算机对整个吹炼过程进行闭环在线控制。

全自动转炉吹炼技术, 弥补了动态控制的上述缺点。全自动吹炼控制技术, 通常包括以下控制模型:

- 静态模型——确定吹炼方案, 保证基本命中终点;
- 吹炼控制模型——利用炉气成分信息, 校正吹炼误差, 全程预报金属熔池成分 (C、Si、Mn、P、S) 和炉渣成分变化;
- 造渣控制模型——利用炉渣检测信息, 动态调整顶枪枪位和造渣工艺, 避免吹炼过程“喷溅”和“返干”。
- 终点控制模型——通过终点副枪校正或炉气分析校正, 精确控制终点, 保证命中率。
- 采用人工智能技术, 提高模型的自学习和自适应能力。

转炉采用全自动吹炼控制技术后, 获得良好的冶金效果^[10]:

① 提高了终点控制精度: 对低碳钢 ($[\text{C}] < 0.06\%$), 控制精度为 $\pm 0.015\%$; 对低碳钢 ($[\text{C}] = 0.06 \sim 0.20\%$), 控制精度为 $\pm 0.02\%$; 高碳钢 ($[\text{C}] > 0.20\%$), 控制精度为 $\pm 0.05\%$; 温度 $\pm 10^\circ\text{C}$, 命中率 $\geq 95\%$ 。

② 实现了对终点 S、P、Mn 的准确预报, 精度为: $\text{S} \pm 0.0009\%$; $\text{P} \pm 0.0014\%$; $\text{Mn} \pm 0.09\%$ 。

③ 对中、高碳钢冶炼, 后吹率从 60% 下降到 32%;

④ 喷溅率从 29% 下降到 5.4%;

⑤ 终点拉碳至出钢时间从 8.5min 缩短到 2.5min;

⑥ 铁收得率提高 0.49%, 石灰消耗减少 3kg/t, 炉龄提高 30%。

4 21 世纪转炉炼钢技术的发展

展望 21 世纪, 转炉炼钢技术的发展将会出现以下发展趋势。

4.1 合理优化工艺流程, 形成紧凑式连续化的专业生产线

发展目标: 以产品为核心, 将铁水预处理—转炉炼钢—炉外精炼—高效连铸—热送和连轧有机地结合起来, 形成紧凑式连续化生产的专业生产线。从铁水到成品钢材的生产周期将缩短到 2.5~3 小时, 全员劳动生产率 (不包括炼铁) 将超过 3000 吨/人·年。

新工艺流程的基本特征为:

- 100%铁水采用“三脱”预处理工艺技术;
- 转炉实现高速吹炼, 冶炼周期达到 20min。在此基础上实现各工序快节奏均衡生产;
- 100%钢水炉外精炼, 其中真空精炼比将大幅度提高;
- 采用高速连铸技术, 厚板坯的拉速将提高到 3.5~4.5M/min, 单流产量达到 300 万吨/年;
- 100%连铸坯高温热送、热装;
- 采用无头连续轧制。

最近, 日本住友和歌山钢厂按上述原则建立起面向 21 世纪的新型炼钢厂: 实现了 100%铁水“三脱”预处理; 100%钢水真空精炼; 100%连铸坯热送和 20min 等生产节奏高效化生产等先进工艺措施。

4.2 转炉高速吹炼工艺

高效化生产是 21 世纪转炉炼钢技术发展的核心。因为只有高效化生产才能显著降低钢铁产品的投资成本和生产成本, 才能适应 21 世纪钢铁市场的残酷竞争, 迎接新世纪的挑战。

发展目标: 建立一座转炉吹炼制, 使一座转炉的产量达到传统 2 座转炉的生产能力。转炉冶炼周期缩短到 20~25min, 年产炉数 ≥ 15000 炉, 转炉炉龄 ≥ 15000 炉。

实现高效转炉工艺的基本技术措施为:

- 100%铁水采用“三脱”预处理工艺, 处理后铁水 P、S $\leq 0.01\%$;
- 转炉采用少渣冶炼工艺, 渣量 $\leq 30\text{kg/t}$;
- 快速吹炼, 供氧强度从 $3.5\text{Nm}^3/\text{t}\cdot\text{min}$ 提高到 $5.0\text{Nm}^3/\text{t}\cdot\text{min}$, 供氧时间缩短到 10min 以内;
- 采用全自动吹炼控制技术, 控制喷溅率 $\leq 1\%$;
- 快速出钢, 从终点到出钢结束时间缩短到 5min 以内;
- 采用炉龄长寿技术, 消除补炉操作, 使转炉炉龄提高到 15000 炉以上。

3.3 建立大规模、廉价生产洁净钢的生产体系

产品质量是 21 世纪转炉炼钢的生命线。如表 7 所示, 入炉铁水的洁净度是转炉与电炉流程竞争的重要前提。因此, 面向 21 世纪, 转炉炼钢厂如何尽快建立起大规模、廉价生产洁净钢的生产体系, 将是提高转炉钢厂市场竞争力的基本保证。

表 7 铁水、直接还原球团 (DRI) 和废钢的洁净度比较^[11, 12]

品种	杂质成分 (%)	P	S	残余元素 (Cu、Cr、Sn 等) 总量
铁水 (三脱后)		0.003~0.01	0.003~0.01	0.06
DRI 球团		0.07	0.01~0.03	0.02
厂内废钢		0.03	0.03	0.35
1#重废钢		0.03~0.05	0.03~0.05	0.5
社会废钢		0.05~0.10	0.06~0.11	1.0

发展目标:

大规模生产的钢材洁净度高, 某些钢种如 IF 钢、石油管线钢等应达到: 钢中杂质总量 $\Sigma \text{S} + \text{P} + \text{T.O} + \text{N} + \text{H} \leq 100 \times 10^{-6}$;

钢材成分控制精度: $\text{C} \pm 0.01\%$, Si 、 $\text{Mn} \pm 0.02\%$, ΔTi 、 ΔV 、 $\Delta \text{Nb} \leq \pm 0.01\%$;

钢中夹杂物控制: $d_s \leq 10 \mu\text{m}$, 无脆性夹杂物。

生产成本低于或接近传统工艺生产普通钢材的成本。

主要技术措施:

- 100%铁水采用“三脱”预处理工艺;
- 转炉高速吹炼, 少渣冶炼, 严格控制终点钢水 $[\text{O}] \leq 450 \times 10^{-6}$;
- 分渣出钢 (钢包下渣量 $< 3\text{kg/t}$), 出钢时炉渣改质 (渣中 $(\% \text{FeO} + \text{MnO}) \leq 3\%$);
- 100%钢水采用炉外精炼工艺生产洁净钢;
- 钢水保护浇注和中间包冶金;
- 结晶器电磁制动去除大型夹杂物。

采用“三脱”铁水少渣冶炼工艺的高效转炉, 是建立大批量廉价生产洁净钢生产体系的技术核心与基本保障。实践已经证明, 高效转炉具有以下冶金特点^[13]:

- 提高了熔池脱碳速度和供 O_2 强度。脱碳反应速率限制环节的折点向低碳区转移,使终点控制更精确;
- 渣量少,渣钢反应更接近平衡。避免了钢水过氧化,降低钢水[O]含量;
- 终点残锰回收率高;
- 减少石灰用量,终点钢水H含量 $\leq 2 \times 10^{-6}$;
- 提高熔池脱碳速度和实现不倒炉直接出钢,终点钢水N含量低于 10×10^{-6} 。

4.4 节能与环境保护

21 世纪炼钢厂的技术进步必须与环境协调发展。就转炉炼钢厂而言,必须采用各种综合节能技术,实现“负能”炼钢。为了消除对大气环境的污染,必须进一步做好烟尘处理,积极采用干法除尘技术,节约水资源。必须采用各种环保与综合利用措施,将炼钢厂建设为无污染、零排放与生态平衡的绿色工厂。

发展目标:转炉炼钢工序实现“负能”炼钢;工序能耗达到 10kg 标准煤(t(按输出煤气折算)),减少炼钢全过程的炉渣量 50~60%,全部烟尘回收利用。

主要技术措施:

- 采用铁水脱 Si 工艺,减少炉渣生成量;
- 精炼渣、炼钢炉渣返回利用,资源再生;
- 烟气粉尘回收处理,提倡采用干法除尘工艺,综合利用;
- 推广煤气回收技术,余能发电;
- 不用混铁炉,并控制好各种无序排放物。

5 结论

本文追溯了 20 世纪氧气转炉炼钢从诞生走向成熟的发展历程。总结出现代转炉炼钢的五项重大技术:转炉大型化、复合吹炼、转炉煤气回收与“负能”炼钢、转炉长寿和全自动吹炼控制技术。

展望 21 世纪,转炉炼钢技术的发展重点将是:优化炼钢工艺流程,实现转炉高速吹炼,建立大批量廉价生产洁净钢的生产体系,建立“零”排放的绿色生态钢厂。并提出具体的发展目标和技术措施。

致 谢

本文受金属学会炼钢学会的委托撰写,在写作中殷瑞钰院士多次进行具体指导和重要修改;写作过程中曾与王新华、李士琦、苏天森三位教授共同商讨。对此,作者仅向上述学者表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 刘静海,2000 年钢铁大会论文集·战略卷,2000,5,33D
- 2 P.M.Fish,2000 年钢铁大会论文集·战略卷,2000,5,278
- 3 K.KATO,Japan-Sweden Joint Symposium on Ferrous Metallurgy,1978,12
- 4 川上正博,铁与钢,76(1990),11,1791
- 5 R.D.佩尔克(邵象华译),氧气顶吹转炉炼钢(上册),冶金工业出版社,1980,622
- 6 李志祥,钢铁工业的前沿技术,中国金属学会,2000,9,127
- 7 刘润,钢铁研究学报,10(1998),6,11
- 8 喻承欢,钢铁,35(2000),增刊,144
- 9 刘润,冶金自动化,1999,4,1
- 10 坂田义治,川崎制铁技报,1983,15(2),126
- 11 史占彪,钢铁工业的前沿技术,中国金属学会,2000,9,98
- 12 马忠仁,炼钢,(待发表)
- 13 刘润,钢铁,34(1999),10,433

现代电弧炉炼钢技术进展

李士琦 孙彦辉 刘冰 季淑娟

(北京科技大学)

张喆君

(北京钢铁设计研究总院)

摘要 本文从四个方面阐述了现代电弧炉炼钢技术进展: (1)电弧炉炼钢生产的发展; (2)电弧炉炼钢的主要技术特点; (3)主要技术发展方向和动态; (4)电弧炉炼钢的可持续发展。

关键词 电弧炉 炼钢 发展

TECHNOLOGY DEVELOPMENT OF MODERN EAF STEELMAKING

Li Shiqi Sun Yanhui Liu Bing Ji Shujuan

(University of Science and Technology Beijing)

Zhang Zhejun

(Beijing Central Engineering and Research Incorporation of Iron and Steel Industry)

ABSTRACT In this paper was listed the development of modern EAF steelmaking from four aspects: (1)the development of EAF steelmaking; (2)the main feature of EAF steelmaking; (3)the main technology development and direction of EAF steelmaking; (4)the continuous development of EAF steelmaking.

KEY WORDS EAF Steelmaking Development

1 电弧炉炼钢生产的发展

电能具有清洁、高效、方便、种种优越的特性,是工业化发展的优选能源,大量开发和利用电能是人类社会现代化的重要标志。19世纪中叶以后,钢铁冶金领域内开始寻求应用电能冶炼的技术,各种大规模实现电—热转换的冶炼装置陆续出现:1879年威廉·西门子(William Siemens)首先进行了使用电能熔化钢铁炉料的研究,1889年出现了普通感应炼钢炉,1900年法国人埃尔(P.L.T.Heroult)设计的第一台炼钢电弧炉投入生产。电弧炉炼钢在近一百年中得到了长足的发展,成为最重要的炼钢方法之一。

表1 世界总年产量、电炉钢产量和电炉钢所占百分数

年份	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	1996	1997	1998
世界年产量(万吨)	9500	14200	18960	34120	59640	71690	77080	75200	79900	77500
电炉钢产量(万吨)	117	600	1250	3456	8519	15752	21154	24463	26663	26277
电炉钢比例(%)	1.23	4.23	6.51	9.9	14.2	22.0	27.5	32.9	33.7	33.9

表2 世界主要产钢国家近年来电炉钢比例(%)

年份	1990	1991	1992	1993	1995	1996	1997	1998
全世界合计	—	28.4	29.4	30.9	32.6	32.9	33.7	33.9
中国	21.1	21.1	21.8	23.2	19.0	18.0	17.6	15.8
日本	31.4	31.4	31.5	31.2	32.3	33.3	32.8	31.9
美国	37.3	38.4	38.0	38.2	39.4	42.1	43.2	44.6
原苏联	13.0	13.8	(10.9)	13.0	11.6	12.5	12.2	12.3
德国	18.5	22.1	22.9	21.6	24.1	26.0	26.4	27.5
巴西	26.0	18.9	19.2	19.9	17.6	20.4	19.8	19.3
韩国	31.1	29.1	30.2	33.2	37.8	39.5	43.1	40.3
中国台湾	41.5	44.6	48.8	47.1	43.0	46.2	41.6	41.9
[注]全世界总产量(亿吨)	7.70	7.34	7.23	7.31	7.56	7.52	7.99	7.75

由表1可以看出:

①五十年代以前,全世界电炉钢的总产量很低,电炉钢所占百分比也很低,当时电炉炼钢是一类“特殊”的炼钢方法。

②五、六十年代以后,电炉钢迅速发展,1950年至1990年的41年间全世界电炉钢总产量增长近17

倍, 平均年递增率为 7.14%, 每年平均增加 485 万吨。电炉钢占的百分比也由 6.5% 增至 27.5%, 平均每年增加 0.51 个百分点。

其间, 五十年代出现了小钢厂 (minimill), 六十年代诞生了超高功率电弧炉 (UHP—Ultra High Power) 技术。

③九十年代以来, 全世界电炉钢产量仍然持续高速增长, 1990 年至 1998 年全世界电炉钢, 平均每年增加 569 万吨, 年递增率为 2.44%。电炉钢占的百分比进而增长至 33.9%, 平均每年增加 0.71 个百分点。

表 2 数据表明:

①我国电炉钢比例远低于经济发达国家, 也低于世界平均值。

②我国电炉钢比自 1993 年后持续下滑, 平均每年约降低一个百分点。

2 电弧炉炼钢的主要技术特点

2.1 原料

任何冶炼过程都是以其原料为基础的, 电弧炉炼钢也不例外。传统的电弧炉炼钢是全废钢工艺——以冷废钢为主, 配加 10% 左右的生铁块。除冷生铁外, 现代电弧炉炼钢使用的其它原料还有: 直接还原铁 (DRI, HBI)、热铁水、碳化铁等。

电弧炉炼钢的原料构成对其工艺、装备、指标等有决定性影响, 不同的原料结构之间是不可比的, 相互比较的基准应是上述全废钢 (或基于全废钢) 工艺。

(1) 废钢

一般废钢中只含有极少量的碳、硅、锰等易氧化元素, 依靠这些元素氧化产生的热量远远不足以满足冶炼的要求, 因此基于全废钢的任何冶炼方法都必须有足够的外来热源, 其中电能是最合适的。

废钢是一种非天然的、再生利用的资源, 是伴随钢铁产品的大量制造而形成的废弃物, 由于其中全铁和金属铁含量很高, 具有极好的回收再利用价值, 提高返回废钢比有着重要的经济意义。不能再循环利用的废钢不仅是铁源的巨大浪费, 甚至会对环境造成严重的污染。

对于电炉炼钢工序, 废钢是基本原料, 精料是首要的基础工作, 废钢原料的鉴别、分类等管理工作 and 打包、剪切等预处理工作都是非常重要的。

当前电炉炼钢使用废钢原料的最大问题是金属残留元素, 主要是残留的 Ni, Cr, Mo 等合金元素和 Cu, Sn, Bi, Sd, Pb 等有害元素。它们在电炉炼钢过程中尚无有效方法去除, 残留在钢材中造成种种危害, 并在废钢循环再利用过程中不断积累。目前采用的对策主要有: ①加强废钢管理; ②在废钢预加工过程中挑选或分离; ③冶炼过程配加其他铁源, 稀释残留元素的浓度。

(2) 冷生铁

冷生铁也是基本的电炉炼钢原料。配入冷生铁的目的是提高入炉金属料中的碳和其他发热元素的百分含量, 减少铁的损失, 并具有沸腾、造渣等冶金功能, 保证冶炼过程的合理顺行。生铁中带入的各种易氧化元素将使耗氧量增加, 而硅、锰等氧化产物使渣量增加, 并使脱磷任务加重。由于生铁中有害金属残余元素含量一般都很低, 适当配入生铁可以用来达到稀释残留元素含量的目的。

(3) 直接还原铁

直接还原铁的生产技术近五十年来有重大的进步, 直接还原铁由原始的块状海绵铁发展为粒状的直接还原铁 (DRI) 和块状的热压块 (HBI), 其质量有极大的提高, 特别是配碳量也增至 2% 左右, 更加适合电炉炼钢的应用。由于直接还原铁中磷、硫和金属残留元素含量非常低, 因而是电弧炉生产优质洁净钢的重要铁源, 直接还原铁的使用量日益增多, 1998 年全世界直接还原铁的生产量已达到 3710 万吨, 约为世界生铁产量的 7%, 与电炉钢产量相比已达到 1:7 左右。

(4) 热装铁水

在一定条件下, 热装铁水对电弧炉炼钢工序而言是有利的。除与使用冷生铁相同的优缺点外, 热铁水带入大量的物理热使电炉冶炼效率大大提高。在有廉价铁水资源的条件下, 适当的热装铁水的工艺已为一些企业所采用。例如多配 10% 的热铁水, 带入的物理热约为 25kwh/t-steel, 化学热约 25kwh/t-steel, (而氧耗量须增加 6~7m³/t-steel)

热装铁水是电弧炉炼钢的炉料结构的重大改变, 要求对工艺、装备做适当的改动, 特别是流程的性质

有所变化。因此,一定要充分考虑投资成本,劳动生产率,经济效益和环境保护等因素,综合判断后,再决策。

(5) 碳化铁

碳化铁(Fe_3C),因其化学潜热高、有害杂质及金属残留元素含量极低,因而被认为是电炉炼钢、特别是生产优质钢、洁净钢的理想原料。但因种种技术、经济等原因尚未能实现工业化生产和应用。

2.2 能源

典型的现代电炉炼钢过程的能量衡算如图1所示:

(1) 电炉炼钢过程能量的输入—支出项的平衡值为 630kWh/t 。在衡算中总能量仅仅依赖于支出项,节能的主动项是“节流”,使用其他能源以获取节能效果,仅仅是不同类型能源的“换代”。

(2) 在支出各项中,合格钢水的物理热为 380kWh/t ,对于大多钢种而言基本是没有太大的差别。炉渣带走的 50kWh/t 的能耗属于不可避免的损失,在正常的工艺和炉况下,一般变动也不大。

(3) 在支出项中,炉气带走的热量非常大。减少炉气造成的热损失是当代电炉炼钢过程中有最大节能潜力的方向,因此近年来许多技术开发都是围绕炉气废热利用——度钢预热这一领域展开的,

逸出的废炉气中含有大量的 CO ,未能完全燃烧生成 CO_2 ,因此在逸出的废炉气中还含有巨大的“化学余热”有待利用(并未在图1之中示出)。

(4) 缩短冶炼周期,减少非通电时间有助于减少热损失,在60年代生产节奏较慢($\tau > 180\text{min}$)的情况下这项所占比例较大,在现代电炉炼钢过程中($\tau \leq 60\text{min}$)减少非通电时间的潜力有限,然而, $\leq 60\text{min}$ 的电炉炼钢节奏,将促进电炉——连铸过程的多炉连浇,而导向向连续生产技术的发展。

(5) 电能是最主要的能量投入项,约占总能量的70%左右。按图2中给出的典型值(410kWh/t)计算,若有效通电时间为54min,可知钢液承受的电炉功率为 456kW/t 。若取 $\cos \phi = 0.82$,电效率、热效率各为0.9,可求出变压器的功率级别应为 688kVA/t 。若通电时间降至45min,则变压器的功率级别应提高至 825kVA/t-steel 。可以看出:对于电炉炼钢,提高变压器功率级别非常重要,其中技术内容包含改进电炉炉的电气运行状态、合理供电、以及提高功率因数、电效率、热效率等。

(6) 关于氧燃烧嘴的研究和报道很多,在总的能量构成中该项所占比例其实并不很大,主要原因是在整个冶炼过程中氧燃烧嘴的工作时间相对较短。但是氧燃烧嘴对冷区的加热助熔效果则是不可忽视的。烧嘴所用燃料有固体、液体和气体三类。

(7) 吹氧产生的化学反应热在能量输入中占了相当大的比例,这是现代电炉炼钢工艺的一个特点。各种氧枪和碳枪的开发和应用是电炉炼钢技术进步的重要组成部分。

化学反应中各发热元素的来源首先是炉料——废钢和生铁,还有是由碳枪喷入的碳粉或焦粉。对于普通铁水,每吹入 1m^3 的氧气所含各元素在 1600°C 时反应理论发热值约为 4kWh 。

2.3 成本构成

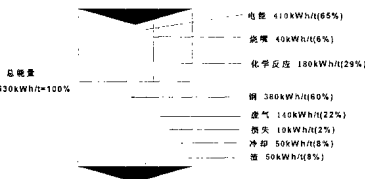


图1 典型的能量衡算

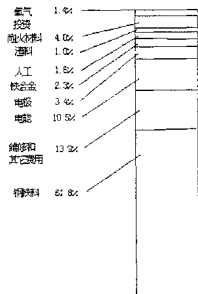


图2 典型的电炉冶炼碳素钢的成本构成
(90年代中国某厂)