



国家重点建设冶金技术专业高等职业教学改革成果系列教材

炉外精炼

主 编 李茂旺 胡秋芳
副主编 张邹华

· 冶金职业技能鉴定参考书

· 冶金职业岗位培训参考书

· 冶金行业职业技能竞赛参考书



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

国家重点建设冶金技术专业高等职业教学改革成果系列教材

炉外精炼

主 编 李茂旺 胡秋芳
副主编 张邹华

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2016

内 容 提 要

本书系统介绍了合成渣洗精炼法、钢包精炼法、真空脱气法、氩气精炼和氩氧精炼法、喷粉及合金元素特殊添加精炼、炉外精炼技术应用等内容。阐述了炉外精炼常用的五种精炼手段的原理，重点介绍了由不同精炼手段组合形成的常用的炉外精炼方法的基本工艺及应用。

本书可作为高职高专院校钢铁冶金技术专业的教材，也可作为钢铁企业职工的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

炉外精炼/李茂旺, 胡秋芳主编. —北京: 冶金工业出版社, 2016. 2

国家重点建设冶金技术专业高等职业教学改革成果系列教材
ISBN 978-7-5024-7188-0

I. ①炉… II. ①李… ②胡… III. ①炉外精炼—高等职业教育—教材 IV. ①TF114

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 049046 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 曾 媛 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7188-0

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 固安华明印业有限公司印刷

2016 年 2 月第 1 版, 2016 年 2 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 15.75 印张; 376 千字; 237 页

39.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

编写委员会

主任 谢赞忠

副主任 刘辉杰 李茂旺

委员

江西冶金职业技术学院	谢赞忠	李茂旺	宋永清	阮红萍
	潘有崇	杨建华	张洁	邓沪东
	龚令根	李宇剑	欧阳小纓	肖晓光
	任淑萍	罗莉萍	胡秋芳	朱润华
新钢技术中心	刘辉杰	侯兴		
新钢烧结厂	陈伍烈	彭志强		
新钢第一炼铁厂	傅曙光	古勇合		
新钢第二炼铁厂	陈建华	伍强		
新钢第一炼钢厂	付军	邹建华		
新钢第二炼钢厂	罗仁辉	吕瑞国	张邹华	
冶金工业出版社	刘小峰	屈文焱		
顾问	皮霞	熊上东		

前 言

自2011年起江西冶金职业技术学院启动钢铁冶金专业建设以来，先后开展了“国家中等职业教育改革发展示范学校建设计划”项目钢铁冶炼重点支持专业建设；中央财政支持“高等职业学校提升专业服务产业发展能力”项目冶金技术重点专业建设；省财政支持“重点建设江西省高等教育专业技能实训中心”项目现代钢铁生产实训中心建设，并开展了现代学徒试点。与新余钢铁集团有限公司人力资源处、技术中心以及下属5家二级单位进行有效合作。按照基于职业岗位工作过程的“岗位能力主导型”课程体系的要求，改革传统教学内容，实现“四结合”，即“教学内容与岗位能力”“教室与实训场所”“专职教师与兼职老师（师傅）”“顶岗实习与工作岗位”结合，突出教学过程的实践性、开放性和职业性，实现学生校内学习与实际工作相一致。

按照钢铁冶炼生产工艺流程，对应烧结与球团生产、炼铁生产、炼钢生产、炉外精炼生产、连续铸钢生产各岗位在素质、知识、技能等方面的需求，按照贴近企业生产，突出技术应用，理论上适度、够用的原则，校企合作建设“烧结矿与球团矿生产”“高炉炼铁”“炼钢生产”“炉外精炼”“连续铸钢生产”5门优质核心课程。

依据专业建设、课程建设成果我们编写了《烧结矿与球团矿生产》《高炉炼铁》《炼钢生产》《炉外精炼》《连续铸钢》以及相配套的实训指导书系列教材，适用于职业院校钢铁冶炼、冶金技术专业、企业员工培训使用，也可作为冶金企业钢铁冶炼各岗位技术人员、操作人员的参考书。

本系列教材以国家职业技能标准为依据，以学生的职业能力培养为核心，以职业岗位工作过程分析典型的工作任务，设计学习情境。以工作过程为导向，设计学习单元，突出岗位要求，每个学习情境的教学过程都是一个完整的工作过程，结束了一个学习情境即是完成了一个工作项目。通过完成所有

项目（学习情境）的学习，学生即可达到钢铁冶炼各岗位对技能的要求。

本系列教材由宋永清设计课程框架。在编写过程中得到江西冶金职业技术学院领导和新余钢铁集团有限公司领导的大力支持，新余钢铁集团人力资源处组织其技术中心以及5家生产单位的工程技术人员、生产骨干参与编写工作并提供大量生产技术资料，在此对他们的支持表示衷心感谢！

由于编者水平所限，书中不足之处，敬请读者批评指正。

江西冶金职业技术学院教务处 **宋永清**

2016年2月

目 录

学习情境 1 走进炉外精炼	1
任务 1.1 认识炉外精炼	1
1.1.1 炉外精炼技术的发展原因	1
1.1.2 我国炉外精炼技术的发展与完善	2
1.1.3 炉外精炼技术的发展趋势	4
任务 1.2 炉外精炼的任务	6
任务 1.3 炉外精炼的手段	6
1.3.1 对精炼手段的要求	6
1.3.2 精炼手段的种类	7
任务 1.4 炉外精炼方法的分类	9
任务 1.5 炉外精炼技术的特点及选择	10
1.5.1 炉外精炼技术的特点	10
1.5.2 炉外精炼技术的选择	11
思考题	12
学习情境 2 合成渣洗精炼法	13
任务 2.1 合成渣洗	13
2.1.1 合成渣洗概念	13
2.1.2 合成渣的物理化学性能	14
任务 2.2 合成渣洗的精炼作用	18
2.2.1 合成渣的乳化和上浮	19
2.2.2 合成渣脱氧	19
2.2.3 夹杂物的去除	20
2.2.4 合成渣脱硫	21
任务 2.3 顶渣控制及挡渣技术	23
2.3.1 顶渣控制技术	23
2.3.2 挡渣技术	23
思考题	24
学习情境 3 钢包精炼法	25
任务 3.1 搅拌	25
3.1.1 搅拌方法	25

3.1.2	气体搅拌钢包内钢液的运动	29
3.1.3	搅拌对混匀的影响	30
3.1.4	气泡泵起现象	32
任务 3.2	加热	34
3.2.1	燃烧燃料加热	34
3.2.2	电阻加热	35
3.2.3	电弧加热	36
3.2.4	化学热法	38
3.2.5	其他加热方法	39
3.2.6	精炼加热工艺的选择	39
任务 3.3	真空	40
3.3.1	真空技术概述	40
3.3.2	钢液的真空脱气	45
3.3.3	钢液的真空脱氧	50
3.3.4	降低 CO 分压时的吹氧脱碳	56
任务 3.4	埋弧加热吹氩法 (LF 法)	62
3.4.1	LF、LFV 精炼法的基本含义	62
3.4.2	LF 设备构成	64
3.4.3	LF 的工艺制度	65
3.4.4	LF 的处理效果	74
3.4.5	LFV 的处理效果	75
任务 3.5	真空电弧加热法 (VAD 法)	75
3.5.1	VAD 法的特点	75
3.5.2	VAD 法的主要设备与精炼功能	76
3.5.3	VAD 法操作工艺	77
任务 3.6	真空吹氧脱碳法 (VOD 法)	78
3.6.1	VOD 法的特点	78
3.6.2	VOD 法的主要设备	79
3.6.3	VOD 法的基本功能与效果	80
3.6.4	我国 VOD、VOD/VAD 的发展	81
3.6.5	VOD/VAD 生产工艺	81
3.6.6	LF/VD/VOD 设备	83
3.6.7	SS-VOD 法	84
3.6.8	MVOD 法	84
任务 3.7	真空电磁搅拌-电弧加热法 (ASEA-SKF 法)	84
3.7.1	ASEA-SKF 炉的搅拌	85
3.7.2	ASEA-SKF 炉设备	86
3.7.3	精炼工艺及操作	88
3.7.4	ASEA-SKF 炉的精炼效果	90

3.7.5 ASEA-SKF 炉的自动控制	91
思考题	92
学习情境4 真空脱气法	93
任务 4.1 真空循环脱气法 (RH 法)	93
4.1.1 RH 主要设备	93
4.1.2 RH 的基本原理	95
4.1.3 RH 工艺参数	95
4.1.4 RH 真空精炼的冶金功能与冶金效果	97
4.1.5 RH 各类技术的发展	99
4.1.6 RH 真空吹氧技术	101
4.1.7 RH 的技术开发及意义	103
任务 4.2 真空提升脱气法 (DH 法)	105
4.2.1 DH 法的设备	105
4.2.2 脱气工作原理	106
4.2.3 DH 法的主要优缺点	106
4.2.4 DH 法的操作工艺	106
4.2.5 DH 法的实际效果	107
任务 4.3 真空罐内钢包脱气法 (VD 法)	107
4.3.1 早期的真空脱气设备	107
4.3.2 脱气设备的初步改进	108
4.3.3 VD 设备	109
4.3.4 VD 精炼工艺及其效果	111
4.3.5 LF 与 RH、LF 与 VD 法的配合	111
思考题	112
学习情境5 氩气精炼法和氩氧精炼法	113
任务 5.1 钢包吹氩成分微调法 (CAS 法)	113
5.1.1 CAS 法概述	113
5.1.2 CAS 工艺	114
5.1.3 CAS-OB 工艺	115
5.1.4 CAS、CAS-OB 的精炼效果	117
5.1.5 ANS-OB	119
5.1.6 IR-UT	120
任务 5.2 带盖钢包吹氩法 (CAB 法)	121
任务 5.3 氩氧脱碳精炼法 (AOD 法)	122
5.3.1 氩氧吹炼炉的主要设备与结构	122
5.3.2 氩氧吹炼炉的操作工艺	123

5.3.3	氩氧吹炼的主要优点	125
5.3.4	AOD 精炼控制及检测的进步	125
5.3.5	CLU 法	126
5.3.6	AOD-VCR 法和 VODC 法	126
	思考题	127
学习情境 6 喷粉及合金元素特殊添加精炼		128
任务 6.1	喷吹	128
6.1.1	喷吹的基本概念	128
6.1.2	气力输送中固体粉粒流动的条件	129
6.1.3	粉气流在管道输送中的流动特性	131
6.1.4	粉气流中固体粉粒的运动速度	133
6.1.5	粉气流的密度	134
6.1.6	粉气流进入熔池内的行为	135
任务 6.2	钢包喷粉处理	139
6.2.1	钢包喷粉	139
6.2.2	TN 喷粉精炼法	140
6.2.3	SL 喷粉精炼法	140
6.2.4	钢包喷粉冶金工艺参数	141
6.2.5	钢包喷粉冶金效果	141
6.2.6	我国钢包喷粉精炼法的发展	142
任务 6.3	喂线	142
6.3.1	喂线的基本概念	142
6.3.2	喂线设备	143
6.3.3	包芯线	143
6.3.4	工艺操作要点	144
6.3.5	冶金效果	146
任务 6.4	夹杂物的形态控制	147
6.4.1	钢中塑性夹杂物的生成与控制	147
6.4.2	稀土处理	150
6.4.3	钙处理	153
任务 6.5	其他精炼方法	158
6.5.1	有搅拌功能的真空钢包脱气法	158
6.5.2	铝弹投射法	159
6.5.3	NK-AP 法	159
	思考题	160
学习情境 7 炉外精炼与炼钢、连铸的合理匹配		161
任务 7.1	炉外精炼技术的选择依据	161

任务 7.2 炉外精炼与炼钢、连铸合理匹配	163
7.2.1 合理匹配的必要性	163
7.2.2 匹配的原则	164
7.2.3 炉外精炼方法选择及匹配模式	166
思考题	169
学习情境 8 炉外精炼技术的应用	170
任务 8.1 纯净钢生产	170
8.1.1 纯净钢的概念	170
8.1.2 纯净钢的质量和性能	172
8.1.3 纯净钢生产技术	178
8.1.4 “超显微夹杂”钢的精炼工艺	190
任务 8.2 典型钢种的炉外精炼	191
8.2.1 轴承钢	191
8.2.2 硬线用钢	198
8.2.3 石油管线钢	204
8.2.4 齿轮钢	211
8.2.5 不锈钢	217
8.2.6 重轨钢	227
8.2.7 弹簧钢	230
思考题	236
参考文献	237

走进炉外精炼

学习任务：

- (1) 理解炉外精炼的概念；
- (2) 了解炉外精炼技术的发展；
- (3) 理解炉外精炼的任务；
- (4) 理解炉外精炼的手段；
- (5) 了解炉外精炼方法的分类；
- (6) 熟悉炉外精炼技术的特点。

任务 1.1 认识炉外精炼

随着现代科学技术的进步和工业的迅猛发展，各行各业对钢材质量的要求日趋提高。为此，必须提高钢的纯净度，最大限度地降低钢中杂质含量并对杂质的组成形态进行控制，而用普通炼钢炉（转炉、电炉）冶炼出来的钢水已经难以满足质量的要求；为了提高生产率，缩短冶炼时间，希望能把炼钢的一部分任务移到炉外去完成；连铸技术的发展，对钢水的成分、温度和气体的含量等也提出了更严格的要求。这几方面的因素，促使炼钢工作者去寻求一种新的炼钢工艺，于是就产生了各种炉外精炼方法。经实践经验证明，炉外精炼是改善冶炼效果、提高钢材质量的重要环节和扩大品种的重要手段，近十年来我国炉外精炼技术获得了迅速发展。

所谓炉外精炼，就是把常规炼钢炉（转炉、电炉）初炼的钢液倒入钢包或专用容器内，进行脱氧、脱硫、脱碳、去气、去除非金属夹杂物和调整钢液成分及温度，以达到进一步冶炼目的的炼钢工艺。亦即是将在常规炼钢炉中完成的精炼任务，如去除杂质（包括不需要的元素、气体和夹杂）和夹杂变性、成分与温度的调整和均匀化等任务，部分或全部地移到钢包或其他容器中进行，把一步炼钢法变为二步炼钢法，即初炼加精炼。国外也称之为二次精炼（secondary refining）、二次炼钢（secondary steelmaking）和钢包冶金（ladle metallurgy）。

1.1.1 炉外精炼技术的发展原因

氧气转炉炼钢、炉外精炼和连铸这三项技术，被誉为现代炼钢生产的三大关键技术，也有人称其为冶金史上的三大技术革命。目前氧气转炉炼钢和连铸普及面比较广，已具备

了相当的规模；而炉外精炼起始于 20 世纪 50 年代，进入 80 年代以后直到现在，炉外精炼和铁水预处理技术水平已成为现代钢铁生产流程水平与钢铁产品高质量水平的标志，它的发展也朝着功能更全、效率更高、冶金效果更佳的方向迅速完善。早在 1986 年，日本转炉钢的炉外精炼比都达到 70.8%，特殊钢生产的炉外精炼比高达 94%。目前日本、欧美等先进的钢铁生产国家，炉外精炼比都超过 90%。2004 年，日本转炉钢真空处理比达到 72.7%；而新建的电炉短流程钢厂和转炉钢厂 100% 采用炉外精炼。

炉外精炼起初仅限于生产特殊钢和优质钢，后来扩大到普通钢的生产上，现在已基本成为炼钢工艺中必不可少的环节。它是连接冶炼与连铸两大工序的桥梁，用以协调炼钢和连铸的正常生产。未来的钢铁生产将向着近终形连铸（如薄板坯）和后道工序高度一体化的方向发展。这就要求浇注出的钢坯无缺陷，并且能在操作上实现高度连续化作业。因此，要求钢水具有更高的质量特性，就必须进一步发展炉外精炼技术，使冶炼、浇注和轧制等工序能实现最佳衔接，进而达到提高生产率、降低生产成本、提高产品质量的目的。

炉外精炼技术的发展原因主要有两个：第一，适应了连铸生产对优质钢水的严格要求，大大提高了铸坯的质量，而且在温度、成分及时间节奏的匹配上起到了重要的协调和完善作用，可定时、定温、定品质地提供连铸钢水，成为稳定连铸生产的因素；第二，与调整产品结构、优化企业生产的专业化进程紧密结合，可以提高产品的市场竞争力。

1.1.2 我国炉外精炼技术的发展与完善

我国炉外处理技术的开发应用始于 20 世纪 50 年代中后期，至 70 年代，我国特钢企业和机电、军工行业钢水精炼技术的应用和开发有了一定的发展，并引进了一批真空精炼设备，还试制了一批国产的真空处理设备，钢水吹氩精炼在首钢等企业首先投入生产应用。20 世纪 80 年代，国产的钢包精炼炉、合金包芯线喂线设备与技术、钢水喷粉精炼技术等得到了初步的发展。这期间，宝钢引进了现代化的大型 RH 装置，并实现了 RH-OB 和 KIP 喷粉装置的生产应用；首钢引进了 KTS 喷粉装置；齐齐哈尔钢厂引进了 SL 喷射冶金技术和设备。在开发高质量的钢材品种和优化钢铁生产中，这些设备发挥了重要的作用。20 世纪 90 年代，与世界发展趋势相同，我国炉外精炼技术随着现代电炉流程的发展以及连铸生产的增长和对钢铁产品质量要求的提高得到了迅速的发展，不仅装备数量增加，处理量也由过去的占钢水量的 2% 以下，持续增长到 1998 年达 20% 以上。此外，经吹氩、喂线处理的钢水已占 65%。2000 年，冶金系统不包括吹氩和喂线的钢水精炼比为 28%。到 2002 年，我国已拥有不包括吹氩装置在内的各种炉外精炼设备 275 台。

1991 年召开的全国首次炉外精炼技术工作会议，明确了“立足产品、合理选择、系统配套、强调在线”的发展炉外处理技术的基本方针。

立足产品，是指在选择炉外精炼方法时，最根本的是从企业生产的产品质量要求（主要是用户要求）为基本出发点，确定哪些产品需要进行何种炉外处理，同时认真分析工艺特点，明确基本工艺流程。

合理选择，是指在选择炉外处理方法时，首先要明确各种炉外处理方法所具备的功能，结合产品要求，做到功能对口。其次是考虑企业炼钢生产工艺方式与生产规模，衔接匹配的合理性、经济性。还要根据产品要求和工艺特点分层次选择相应的炉外精炼方法，并合理做好工艺布置。

系统配套,是指严格按照系统工程的要求,确保设计和施工中,主体设备配套齐全,装备水平符合要求;严格按各工序间的配套要求,使前后工序配套完善,保证炉外处理功能的充分发挥;一定要重视相关技术和原料的配套要求,确保炉外处理工序的生产过程能正常、持续地进行。

强调在线,是指在合理选择炉外处理方法的前提下,一定要从加强经营管理入手,把炉外精炼技术纳入分品种的生产工艺规程中去,保证在生产中正常运行;也是指在加强设备维修的前提下,确保设备完好,保证设计规定的要求,确保作业率;还意味着要充分发挥设备潜力,达到或超过设计能力。

这些方针,对我国炉外精炼技术从“八五”开始直至现在的发展起到了重要推动作用。

1992年初召开的炼钢连铸工作会议,明确了连铸生产的发展必须实现炼钢、炉外精炼与连铸生产的组合优化。1992年底,还召开了首次炉外精炼学术工作会议,深入研究了我国炉外处理技术发展的方向和重点。

1998年的炼钢轧钢工作会议,又明确提出要把发展炉外精炼技术作为一项重大的战略措施,放到优先位置上,促进流程工艺结构和装备的优化。

进入21世纪以后,为适应连铸生产和产品结构调整的要求,炉外精炼技术得到迅速发展。钢水精炼中RH多功能真空精炼发展迅速,另外LF炉不但在电炉厂而且在转炉厂也被大量采用,并配套有高效精炼渣工艺。到2003年,包括RH、LF在内的主要钢水精炼技术,均具备了完全立足国内并可参与国际竞争的水平。

50多年来,我国炉外精炼技术发展取得了显著的成绩:

(1) 广大钢铁企业领导和技术人员对炉外精炼技术在钢铁生产中的作用和地位逐渐提高了认识,将炉外精炼技术作为企业技改和生产组织工作的重点。这种认识源于企业流程优化、生产顺行、高效低耗,尤其是市场对钢材产品的品种质量日益提高的要求,因而是深刻的,也是下一步发展的重要前提。

(2) 已形成一支有一定水平的科研、设计、生产与设备制造的工程技术队伍,有一大批具有自主知识产权并达到相当水平的科技成果,具备了各种炉外精炼技术深入开发研究和工程总承包的能力。

(3) 炉外精炼技术相关配套设备、材料同步发展,基本满足了国内各类炉外精炼设备不同层次的需要。

(4) 已形成了一批高炉—铁水预处理—复吹转炉—钢水精炼—连铸/超高功率电弧炉—钢水精炼—连铸的现代工艺流程,具有典型示范作用。

(5) 已经在产品结构优化调整、促进洁净钢及高附加值产品的生产中,起到了不可替代的重要作用,是优质高效、节能降耗、降低生产成本的可靠保证。

虽然成绩显著,但还有很多问题,如钢水精炼比仍较低,与发达国家相比,有较大差距,而且也与我国连铸生产飞速发展的形势不适应,已明显影响了连铸生产的优化与完善;又如在我国特有的中小冶金炉占较大比例的条件下,中小钢厂炉外精炼的难题还没有从根本取得突破;还有引进的高水平炉外精炼装备,因软件技术的消化吸收与自主开发和国外相比存在明显的差距,不能充分发挥其功能与生产效率;对环境友好的炉外精炼技术开发尚未引起足够的重视等,这些都有待进一步解决。

1.1.3 炉外精炼技术的发展趋势

炉外处理技术本身的发展和相关技术的完善,对于钢铁生产流程的整体优化及钢铁产品质量的影响十分重要。在完善钢铁生产系统工艺和炉外处理技术中,钢液温度补偿技术——加热方法,炉外处理设备所用的耐火材料的质量和使用的,防止处理后钢液再氧化,以及小型炼钢车间炉外处理方法的最佳选择等问题,还需要进一步研究。

(1) 钢水降温后的温度补偿技术。精炼过程中钢水温度降低,需要热补偿。若采用电弧加热,会使耐火材料寿命降低,增加钢中夹杂物含量;电阻加热升温速度慢,且电耗量大;采用化学加热方法,如CAS-OB,向钢液中加入铝(或硅),同时吹氧保证处理后的钢液温度符合连铸要求,会增加铝和其他合金的消耗量,而且适用的钢种有限。目前用于炉外处理的加热方法,其加热速度不快,为 $2\sim 6^{\circ}\text{C}/\text{min}$,不利于提高生产率,不能适应生产需要。所以,温度补偿技术是炉外精炼存在的一个难题,有待研究解决。

(2) 耐火材料使用寿命。炉外精炼设备用耐火材料寿命较低;电磁搅拌要求炉衬要薄,为此炉龄一般只能为200~300炉,修炉频繁,造成精炼成本高。尤其是局部损坏较多,有待开发新型耐火材料。

钢包作为精炼容器,浇注完毕温度降低,内衬温度急变使抵抗性能欠佳,容易剥落。此外,滑动水口滑板的工作条件恶劣,需要在红包条件下更换,换后立即烘烤。

吹氧、吹氩后,钢水的成分和温度均匀化了,但钢包内衬侧壁的不均匀冲刷,影响其使用寿命。炉外精炼一般用高铝质耐火材料,如渣线等部位用镁碳砖,又存在钢水增碳的可能,并需经常修补等。

(3) 精炼后期钢水再污染。精炼处理时间越长,过程中的二次氧化、吸气越严重;洁净度越高,污染越厉害。

(4) 老厂改造困难大。由于精炼设备的投资、布置、设备容量等因素的限制,老厂技术改造困难较大。

当前炉外精炼技术的主要发展趋势是:

(1) 多功能化。多功能化是指由单一功能的炉外精炼设备发展成为多种处理功能的设备,并将各种不同功能的装置组合到一起,建立综合处理站,如LF-VD、CAS-OB、IR-UT、RH-OB、RH-KTB。上述装置中分别配了喂合金线(铝线、稀土线)、合金包芯线(Ca-Si、Fe-B、C芯等)等。这种多功能化的特点,不仅适应了不同品种生产的需要,提高了炉外精炼设备的适应性,还提高了设备的利用率、作业率,缩短了流程,在生产中发挥了更加灵活、全面的作用。

(2) 提高精炼设备生产效率和炉外精炼比。表1-1给出了常用炉外精炼设备生产效率的比较。影响炉外精炼设备生产效率的主要因素是:钢包净空高度、吹氩强度和混匀时间、升温速度和容积传质系数以及冶炼周期和包衬寿命。

显然,RH和CAS-OB是生产效率比较高的精炼设备,一般与生产周期短的转炉匹配使用。

为了提高炉外精炼的生产效率,近几年国外采用以下技术:

1) 提高反应速度,缩短精炼时间。如RH通过提高吹Ar强度,扩大下降管直径,顶吹供氧等技术,使容积传质系数从 $0.15\text{cm}^3/\text{s}$ 提高到 $0.3\text{cm}^3/\text{s}$,可缩短脱碳时间3min。

AOD 采用顶供氧技术后, 升温速度从 $7^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 提高到 $17.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 脱碳速度从 $0.055\%/\text{min}$ 上升到 $0.087\%/\text{min}$; 平均降低电炉电耗 $78\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。

表 1-1 常用炉外精炼设备的生产效率

精炼设备	钢包净空高度/mm	吹 Ar 流量 $/\text{L}\cdot(\text{min}\cdot\text{t})^{-1}$	混匀时间 /s	升温速度 $/^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	容积传质系数 $/\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$	精炼周期 /min	钢包寿命/次
CAS-OB	150 ~ 250	6 ~ 15	60 ~ 90	5 ~ 13		15 ~ 25	60 ~ 100
LF	500 ~ 600	1 ~ 3	200 ~ 350	3 ~ 4		45 ~ 80	35 ~ 70
VD	600 ~ 800	0.25 ~ 0.50	300 ~ 500	—		25 ~ 35	17 ~ 35
VOD	1000 ~ 1200	2.4 ~ 4.0	160 ~ 400	2.36 (平均)		60 ~ 90	40 ~ 60
RH	150 ~ 300	5 ~ 7	120 ~ 180	—	0.05 ~ 0.50	15 ~ 25	底部槽 420 ~ 740 升降管 75 ~ 120 钢包 80 ~ 140

2) 采用在线快速分析钢水成分, 缩短精炼辅助时间。将元素的分析周期从 5min 降至 2.5min, 一般可节约辅助时间 5 ~ 8min。

3) 提高钢包寿命, 加速钢包周转。炉外精炼钢包的寿命和炉容量有关。美国 WSPC 钢厂, 290t 转炉配 CAS-OB 生产 LCAK 钢板采用以下技术提高钢包寿命: ①包衬综合砌筑, 根据熔损机理对易熔损部位选择合适的耐火材料; ②关键部分采用高级耐火材料, 如包底钢流冲击区采用高铝砖 ($w(\text{Al}_2\text{O}_3) \geq 96.3\%$), 寿命可提高 20 ~ 30 炉; ③每个包役对侵蚀严重部位 (如渣线和钢水冲击区) 进行一次修补。采用上述工艺后, 平均包龄从 60 炉提高到 120 炉, 最高包龄到达 192 炉, 降低耐火材料总成本的 20%。

4) 采用计算机控制技术, 提高精炼终点命中率。炉外精炼的自动化控制系统, 通常包括以下功能: ①精炼过程设备监控与自动控制; ②精炼过程温度与成分在线预报; ③数据管理与数据通信; ④车间生产调度管理。

5) 扩大精炼能力。北美新建的短流程钢厂, 年生产能力一般为 120 ~ 200 万吨, 多数采用一座双炉壳电炉或竖炉电炉, 平均冶炼周期为 45 ~ 55min。为了提高车间的整体生产能力, 采用 1 台电炉配 2 台 LF (或 1 台 LF、1 台 CAS), 使平均精炼周期达到 20min, 以保证炼钢车间的整体能力。

(3) 炉外精炼技术的发展不断促进钢铁生产流程优化重组、不断提高过程自动控制和冶金效果在线监测水平。例如, LF 钢包精炼技术促进了超高功率电弧炉生产流程的优化, AOD、VOD 实现了不锈钢生产流程优质、低耗、高效化的变革等。

50 多年来, 炉外处理技术已发展成为门类齐全、功能独到、系统配套、效益显著的钢铁生产主流技术, 发挥着重要的作用。但炉外处理技术仍处在不断完善与发展之中。未来炉外处理技术将在以下几个重点方面取得进展:

(1) 以转炉作为主要手段的全量铁水预处理, 不仅将大大提高铁水预处理的生产效率, 而且还将为现有冶金设备的功能优化重组开辟新的方向。

- (2) 中间包冶金及结晶器冶金技术将逐渐显示其对最终钢铁产品质量优化的重要意义。
- (3) 电磁冶金技术对炉外处理技术的发展将起到积极的推动作用。
- (4) 中小型钢厂炉外处理技术。
- (5) 配套同步发展辅助技术,包括冶炼炉准确的终点控制技术、工序衔接技术智能化等。
- (6) 无污染的处理技术及过程的环保技术。

任务 1.2 炉外精炼的任务

在现代化钢铁生产流程中,炉外精炼的任务主要如下:

- (1) 承担初炼炉原有的部分精炼功能,在最佳的热力学和动力学条件下完成部分炼钢反应,提高单体设备的生产能力。
- (2) 均匀钢水,精确控制钢种成分。
- (3) 精确控制钢水温度,适应连铸生产的要求。
- (4) 进一步提高钢水纯净度,满足成品钢材性能要求。
- (5) 作为炼钢与连铸间的缓冲,提高炼钢车间整体效率。

为完成上述精炼任务,一般要求炉外精炼设备具备以下功能:

- (1) 熔池搅拌功能,均匀钢水成分和温度,促进夹杂物上浮和钢渣反应。
- (2) 钢水升温和控温功能,精确控制钢水温度,最大限度地减小包内钢水的温度梯度。
- (3) 精炼功能,包括脱气、脱碳、脱硫、去除夹杂和夹杂物变性处理等。
- (4) 合金化功能,对钢水实现窄成分控制,并使其分布均匀。
- (5) 生产调节功能,均衡炼钢—连铸生产。

完成上述任务,就能达到提高质量、扩大品种、降低消耗和成本、缩短冶炼时间、提高生产率、协调好炼钢和连铸生产的配合等目的。但是到目前为止,还没有任何一种炉外精炼方法能完成上述所有任务,某一种方法只能完成其中一项或几项任务。各厂根据自身条件和冶炼钢种的不同,一般是根据不同需要配备一至两种炉外精炼设备。

任务 1.3 炉外精炼的手段

1.3.1 对精炼手段的要求

作为一种精炼方法的精炼手段,必须满足以下要求:

- (1) 独立性。精炼手段必须是一种独立的手段,它不能依附于其他冶金过程,成为伴随其他冶金过程而出现的一种现象。例如,出钢过程中,由于钢流的冲击会导致钢包内钢液的搅拌。但是不能认为出钢是一种搅拌手段,因为这种搅拌是伴随出钢而出现的,一旦出钢过程完成,这种搅拌很快就停止,不可能按照搅拌的要求来改变出钢过程,所以出钢时造成的搅拌是从属的、非独立的。又如 VOD、AOD 在精炼低碳钢种时,钢中碳的氧化