

高职高专规划教材

LUWAI JINGLIAN

炉外精炼

高泽平 贺道中 编著

冶金工业出版社

中國經濟學人選集

THE CHINA JOURNAL

海外精煉

中國經濟學人選集

中國經濟學人選集

高职高专规划教材

炉外精炼

高泽平 贺道中 编著

北京

冶金工业出版社

2005

内 容 提 要

本书主要内容包括：炉外精炼的理论与技术基础，炉外精炼工艺，炉外精炼与炼钢、连铸的合理匹配，炉外精炼技术的应用，炉外精炼用耐火材料等。阐述了必要的理论与技术基础，重点介绍了常用炉外精炼基本工艺及其应用，内容全面详实、新颖实用。

本书为高职高专冶金工程（钢铁冶金）专业教材，也可作为本科院校相关专业的教学参考书，还可供从事钢铁冶金生产及科研的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

炉外精炼/高泽平等编著. —北京：冶金工业出版社，
2005.9

ISBN 7-5024-3815-7

I. 炉… II. 高… III. 炉外精炼 IV. TF114

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 091770 号

出版人 曹胜利（北京沙滩嵩祝院北巷39号，邮编 100009）

责任编辑 宋良 杨敏 美术编辑 李心

责任校对 王贺兰 李文彦 责任印制 牛晓波

北京百善印刷厂印刷；冶金工业出版社发行；各地新华书店经销

2005年9月第1版，2005年9月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16；15.75印张；419千字；242页；1~5000册

30.00元

冶金工业出版社发行部 电话：(010)64044283 传真：(010)64027893

冶金书店 地址：北京东四西大街46号(100711) 电话：(010)65289081

（本社图书如有印装质量问题，本社发行部负责退换）

前 言

随着科学技术的进步，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。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，近十多年来，我国炉外精炼技术获得了迅速发展。

为了适应炉外精炼技术发展的需要，根据中国钢协“十一五”高职教材建设规划的要求，受全国钢铁冶金专业课程组的委托，按高职高专冶金工程（钢铁冶金）专业教学大纲的要求，我们编写了《炉外精炼》一书。

本书是在自编讲义的基础上，吸收多年来的教学经验与科研成果，并参考国内外有关文献编写而成。主要内容包括：炉外精炼的理论与技术基础，炉外精炼工艺，炉外精炼与炼钢、连铸的合理匹配，炉外精炼技术的应用，炉外精炼用耐火材料等。阐述了必要的理论与技术基础，重点介绍了常用炉外精炼基本工艺及其应用，力求内容全面详实、新颖实用。本书的第1章、第2章、第5章由湖南工业大学高泽平执笔，第3章、第4章、第6章由湖南工业大学贺道中执笔。全书由高泽平汇总定稿。

本书由武汉科技大学博士生导师李光强教授担任主审，李光强教授提出了许多宝贵意见，在此谨致谢意。在编写过程中，编者曾到湘钢、涟钢、衡钢、武钢、宝钢等单位调研学习，得到了有关工程技术人员的大力支持；此外还得到了企业专家和同行的指导，在此表示衷心的感谢。编写本书时参阅了有关炼钢、精炼等方面的文献，在此向有关作者致谢。

本书为高职高专冶金工程（钢铁冶金）专业教材，也可作为本科院校相关专业的教学参考书，还可供从事钢铁冶金生产及科研的工程技术人员参考。

由于编者水平有限，而且炉外精炼技术在迅速发展之中，书中不足之处，诚请读者批评指正。

编 者
2005年7月

目 录

1 绪论	1
1.1 炉外精炼技术的发展原因	1
1.2 我国炉外精炼技术的发展与完善	1
1.3 炉外精炼的任务	3
1.4 炉外精炼的手段	3
1.4.1 对精炼手段的要求	3
1.4.2 精炼手段的种类	4
1.5 炉外精炼方法的分类	6
1.6 炉外精炼技术的特点	7
1.7 炉外精炼技术的发展趋势	8
复习思考题	10
2 炉外精炼的理论与技术基础	11
2.1 合成渣洗	11
2.1.1 合成渣的物理化学性能	12
2.1.2 渣洗的精炼作用	15
2.1.3 顶渣控制及挡渣技术	19
2.2 搅拌	20
2.2.1 搅拌方法	20
2.2.2 气体搅拌钢包内钢液的运动	24
2.2.3 搅拌对混匀的影响	25
2.2.4 气泡泵起现象	27
2.3 加热	28
2.3.1 燃烧燃料加热	29
2.3.2 电阻加热	30
2.3.3 电弧加热	30
2.3.4 化学热法	32
2.3.5 其他加热方法	33
2.3.6 精炼加热工艺的选择	33
2.4 真空	34
2.4.1 真空技术概述	34
2.4.2 钢液的真空脱气	39
2.4.3 钢液的真空脱氧	43
2.4.4 降低 CO 分压时的吹氧脱碳	48

2.5 喷吹	54
2.5.1 气力输送中固体粉粒流动的条件	55
2.5.2 粉气流在管道输送中的流动特性	56
2.5.3 粉气流中固体粉粒的运动速度	58
2.5.4 粉气流的密度	59
2.5.5 粉气流进入熔池内的行为	60
2.5.6 喂线	64
2.5.7 夹杂物的形态控制	68
复习思考题	78
3 炉外精炼工艺	79
3.1 LF法与VD法	79
3.1.1 LF、LFV精炼法的基本含义	79
3.1.2 LF设备构成	81
3.1.3 LF的工艺制度	82
3.1.4 LF的处理效果	90
3.1.5 LF的计算机控制	91
3.1.6 VD法	91
3.1.7 LF与RH、LF与VD法的配合	95
3.2 RH法与DH法	95
3.2.1 RH精炼法	95
3.2.2 DH精炼法	105
3.3 ASEA-SKF钢包精炼炉	106
3.3.1 ASEA-SKF炉的搅拌	106
3.3.2 ASEA-SKF炉设备	107
3.3.3 精炼工艺及操作	109
3.3.4 ASEA-SKF炉的精炼效果	111
3.3.5 ASEA-SKF炉的自动控制	112
3.4 AOD法	112
3.4.1 氩氧吹炼炉的主要设备与结构	113
3.4.2 氩氧吹炼炉的操作工艺	113
3.4.3 氩氧吹炼的主要优点	114
3.4.4 AOD精炼控制及检测的进步	115
3.4.5 CLU法	115
3.4.6 AOD-VCR法和VODC法	116
3.5 VAD法与VOD法	116
3.5.1 VAD法	116
3.5.2 VOD法	118
3.6 CAS法	123

3.6.1 CAS 法概述	123
3.6.2 CAS 工艺	125
3.6.3 CAS-OB 工艺	126
3.6.4 CAS、CAS-OB 的精炼效果	127
3.6.5 ANS-OB	129
3.6.6 IR-UT	130
3.7 钢包喷粉处理	131
3.7.1 TN 喷粉精炼法	131
3.7.2 SL 喷粉精炼法	132
3.7.3 钢包喷粉冶金工艺参数	132
3.7.4 钢包喷粉冶金效果	133
3.7.5 我国钢包喷粉精炼法的发展	133
3.8 其他精炼方法	134
3.8.1 CAB 吹氩精炼法	134
3.8.2 有搅拌功能的真空钢包脱气法	134
3.8.3 铝弹投射法	135
3.8.4 NK-AP 法	135
3.8.5 REDA 法	136
复习思考题	136
4 炉外精炼与炼钢、连铸的合理匹配	137
4.1 炉外精炼技术的选择依据	137
4.2 炉外精炼与炼钢、连铸合理匹配	139
4.2.1 合理匹配的必要性	139
4.2.2 匹配的原则	140
4.2.3 炉外精炼方法选择及匹配模式	143
复习思考题	145
5 炉外精炼技术的应用	146
5.1 纯净钢生产	146
5.1.1 纯净钢的概念	146
5.1.2 纯净钢的质量和性能	148
5.1.3 纯净钢生产技术	153
5.1.4 “超显微夹杂”钢的精炼工艺	164
5.2 典型钢种的炉外精炼	165
5.2.1 轴承钢	165
5.2.2 硬线用钢	172
5.2.3 石油管线钢	177
5.2.4 齿轮钢	183

5.2.5 不锈钢	190
5.2.6 重轨钢	200
5.2.7 弹簧钢	203
复习思考题	208
6 炉外精炼用耐火材料	209
6.1 炉外精炼用耐火材料概述	209
6.1.1 炉外精炼用耐火材料使用条件及要求	209
6.1.2 炉外精炼用主要耐火材料	210
6.2 钢包精炼装置用耐火材料	214
6.2.1 LF (V) 钢包炉用耐火材料	214
6.2.2 ASEA-SKF 钢包炉用耐火材料	219
6.2.3 VAD 钢包炉用耐火材料	220
6.3 不锈钢精炼装置用耐火材料	220
6.3.1 VOD 炉用耐火材料	220
6.3.2 AOD 炉用耐火材料	224
6.3.3 CLU 炉用耐火材料	226
6.4 真空处理装置用耐火材料	226
6.4.1 RH/RH-OB 炉用耐火材料	227
6.4.2 RH-KTB 耐火材料	233
6.4.3 DH 法用耐火材料	234
6.5 其他精炼技术用耐火材料	235
6.5.1 搅拌精炼技术用耐火材料	235
6.5.2 喷粉精炼技术用耐火材料	237
6.5.3 CAS/CAS-OB 内衬用耐火材料	238
复习思考题	240
参考文献	241

1 绪 论

随着现代科学技术和工业的发展,对钢的质量(如纯净度)要求越来越高,用普通炼钢炉(转炉、电炉)冶炼出来的钢水已经难以满足其质量的要求;为了提高生产率,缩短冶炼时间,也希望能把炼钢的一部分任务移到炉外去完成;另外,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,促使炼钢工作者寻求一种新的炼钢工艺,于是就产生了各种炉外精炼方法。

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 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,也有人称之为冶金史上的三大技术革命。氧气转炉炼钢和连铸普及面比较广,目前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年代以后直至现在,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,日本转炉钢的二次精炼比已达到70.8%,特殊钢生产的二次精炼比高达94%。目前日本、欧美等先进的钢铁生产国家,炉外精炼比皆超过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炼钢厂,100%采用二次精炼。

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,现在已基本上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型连铸(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,那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。

1.2 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。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，并进而实现了RH-OB及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。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地选择相应的炉外精炼方法，并合理地搞好工艺布置。

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，主要是：

(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的不同层次的需要。

(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) 已经在产品结构的优化调整、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，已明显地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上取得突破；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，而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。这些都有待进一步解决。

1.3 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是：

(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。

1.4 炉外精炼的手段

1.4.1 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，而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，钢中碳的氧化放热可使钢液温度升高，但是这种加热是伴随脱碳过程而出现的，它从属于吹氧氧化这个冶金过程，同样也不能根据钢液升温的要求来规定脱碳过程。所以，化学热法虽是加热手段中的一种方法，但是在 VOD、AOD 精炼低碳钢的过程中，这种化学热的释放，不能认为是一种加热的手段。只有为了加热钢液的目的，有意识地添加一些易氧化的元素，然后吹氧氧化，这才是独立的加热手段，如 CAS-OB 法。

(2) 作用时间可以控制。作为一种手段其作用时间必须可以根据该手段的目的而控制。例如，在许多精炼方法中都应用了真空手段，主要是为了脱气、脱氧或脱碳。作为手段，就应该能满足根据脱气等精炼过程所要求的真空的建立和真空维持的时间。又如搅拌，如要求整个精炼过程中自始至终地一直搅拌钢液，则作为搅拌手段，就应该充分满足这点。电磁搅拌和吹氩搅拌之所以被认为是搅拌手段，原因之一就是它们的作用时间可以人为地控制。

(3) 作用能力可以控制。精炼手段的能力或强度，如真空的真空度，搅拌的搅拌强度，加热的升温速度等，必须是可以按照精炼的要求进行控制和调节的。例如，真空吹氧脱碳时，为了防止钢中其他元素的氧化和碳氧反应过分剧烈而引起的喷溅，要求在吹氧过程中随着碳含量的降低，逐渐提高真空度。在 VOD 精炼中，就可以逐级启动蒸汽喷射泵，以控制和调节真空度在冶炼要求的范围内。

(4) 精炼手段的作用能力再现性要强。也就是影响精炼手段的能力的因素不宜太多，这样才能保证能力的再现性。例如出钢过程所造成的搅拌，影响其搅拌强度的因素较复杂，且不能有效地控制，所以再现性较差。而吹氩搅拌或电磁搅拌的搅拌强度影响因素就比较单一，分别控制吹氩量或工作电流，就能对应地调节搅拌强度，且有较强的再现性。

(5) 便于与其他精炼手段组合。一种精炼手段的装备和工艺过程，应该尽可能地不阻碍其他精炼手段的功能的发挥，这样才能为几种手段组合使用创造条件。例如，燃料燃烧可以加热钢液，但是一般不用它作为加热手段，特别是同时应用真空手段时，因为燃烧产生的大量烟气，将会妨碍真空的冶金功能的发挥。

(6) 操作方便，设备简单，基建投资和运行费用低。

1.4.2 精炼手段的种类

各种炉外精炼技术的出现，都是为了解决厂家所要求解决的具体问题，同时又密切结合着该厂的厂房、设备、工艺等具体条件。虽然各种炉外精炼方法各不相同，但是无论采用哪种方法，都会力争创造完成某种精炼任务的最佳热力学和动力学条件，使得现有的各种精炼方法在采用的精炼手段方面有共同之处。到目前为止，人们所采用的主要精炼手段有渣洗、真空（或气体稀释）、搅拌、喷吹和加热（调温）等五种。当今名目繁多的炉外精炼方法，都是这五种精炼手段的不同组合，综合一种或几种手段便构成成为一种方法（见图 1-1）。

(1) 渣洗：这是获得洁净钢并能适当进行脱氧、脱硫的最简便的精炼手段。将事先配好（可在专门渣洗炉中熔炼）的合成渣倒入钢包内，借出钢时钢流的冲击作用，使钢液与合成渣充分混合，从而完成脱氧、脱硫和去除夹杂等精炼任务。

(2) 真空：将钢水置于真空室内，由于真空作用使反应向生成气相方向移动，达到脱气、

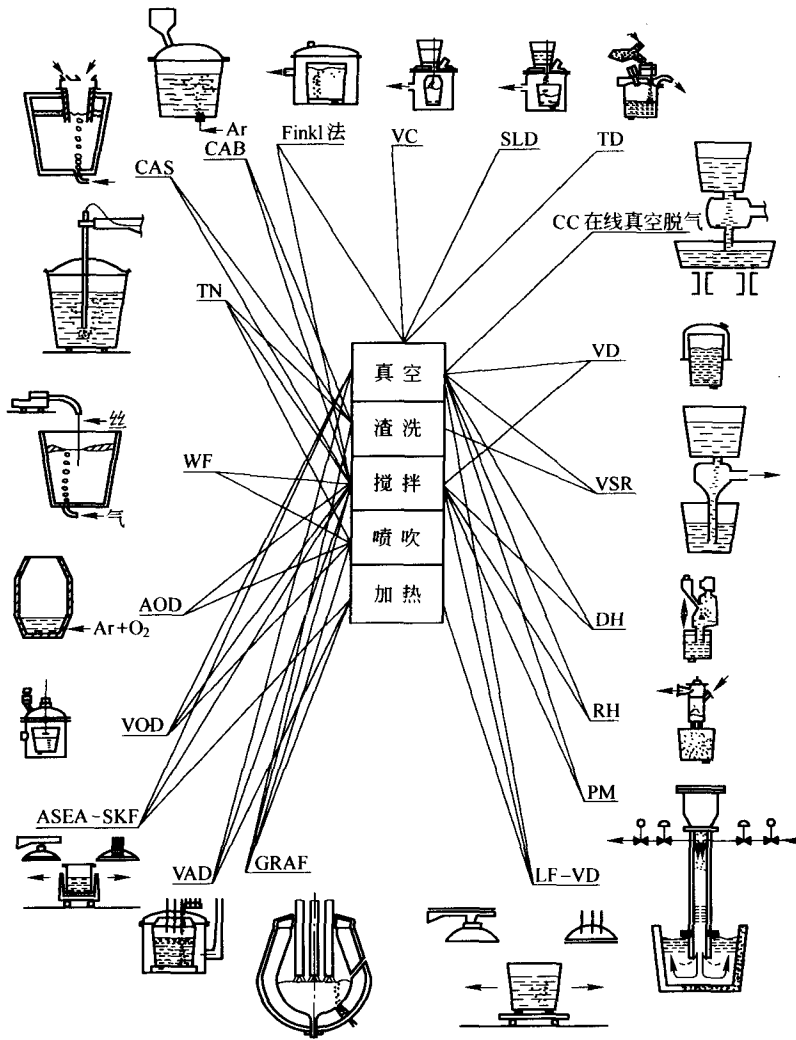


图 1-1 各种炉外精炼法示意图

脱氧、脱碳等的目的。

(3) 搅拌：通过搅拌扩大反应界面，加速反应过程，提高反应速度。搅拌方法主要有吹氩搅拌、电磁搅拌等。

(4) 加热：这是调节钢水温度的一项重要手段，使炼钢与连铸更好地衔接。加热方法主要有电弧加热，化学热法等。

(5) 喷吹：这是将反应剂加入钢液内的一种手段，喷吹的冶金功能取决于精炼剂的种类，可完成脱碳、脱硫、脱氧、合金化和控制夹杂物形态等精炼任务。

上述五种精炼手段是当前技术水平的反映，随着技术的进步，完全有可能出现一些新的精炼手段，使精炼钢的质量和精炼的效率进一步提高，精炼的费用降低。过滤作为一种新的精炼手段，如利用陶瓷过滤器将钢中悬浮的氧化物夹杂等过滤掉，用于炼钢，目前还只限于连铸的中间包。精炼方式的选择可参见表 1-1。

表 1-1 各种炉外精炼法所采用的手段与目的

名 称	精 炼 手 段					主 要 冶 金 功 能							
	造渣	真空	搅拌	喷吹	加热	脱气	脱氧	去除夹杂	控制夹杂物形态	脱硫	合金化	调温	脱碳
钢包吹氩			√					√				√	
CAB	+		√				√	√		+	√		
DH		√				√							
RH		√				√							
LF	+	①	√		√	①	√	√		+	√	√	
ASEA-SKF	+	√	√	+	√	√	√	√		+	√	√	+
VAD	+	√	√	+	√	√	√	√		+	√	√	+
CAS-OB			√	√	√		√	√			√	√	
VOD		√	√	√		√	√	√					√
RH-OB		√		√		√							√
AOD				√		√							√
TN				√			√			√			
SL				√			√		√	√	√		
喂线							√		√	√	√		
合成渣洗	√		√				√	√	√	√			

注：符号“+”表示在添加其他设施后可以取得更好的冶金功能。

①LF 增设真空装置后被称为 LFV，具有与 ASEA-SKF 相同的精炼功能。

1.5 炉外精炼方法的分类

从图 1-1 可以看出，精炼设备通常分为两类：一类是基本精炼设备，在常压下进行冶金反应，可适用于绝大多数钢种，如 LF、CAS-OB、AOD 等；另一类是特种精炼设备，在真空下完成冶金反应，如 RH、VD、VOD 等，只适用于某些特殊要求的钢种。目前广泛使用并得到公认的炉外精炼方法是 LF 法与 RH 法，一般可以将 LF 与 RH 双联使用，可以加热、真空处理，适于生产纯净钢，也适于与连铸机配套。为了便于认识至今已出现的四十多种炉外精炼方法，表 1-2 给出了主要炉外精炼方法的大致分类情况。

表 1-2 主要炉外精炼方法的分类、名称、开发与适用情况

分 类	名 称	开发年份, 国别	适 用
合成渣精炼	液态合成渣洗 (异炉) 固态合成渣洗	1933 法国 — —	脱硫, 脱氧, 去除夹杂物
钢包吹氩精炼	GAZAL (钢包吹氩法) CAB (带盖钢包吹氩法) CAS 法 (封闭式吹氩成分微调法)	1950 加拿大 1965 日本 1975 日本	去气, 去夹杂, 均匀成分与温度。CAB、CAS 还可脱氧与微调成分, 如加合成渣, 可脱硫, 但吹氩强度小, 脱气效果不明显。CAB 适合 30~50t 容量的转炉钢厂。CAS 法适用于低合金钢种精炼

续表 1-2

分 类	名 称	开发年份, 国别	适 用
真空脱气	VC (真空浇注)	1952 德国	脱氢, 脱氧, 脱氮 RH 精炼速度快, 精炼效果好, 适于各钢种的精炼, 尤适于大容量钢液的脱气处理。现在 VD 法已将过去脱气的钢包底部加上透气砖, 使这种方法得到了广泛的应用
	TD (出钢真空脱气法)	1962 德国	
	SLD (倒包脱气法)	1952 德国	
	DH (真空提升脱气法)	1956 德国	
	RH (真空循环脱气法)	1958 德国	
	VD 法 (真空罐内钢包脱气法)	1952 德国	
带有加热装置的钢包精炼	ASEA-SKF (真空电磁搅拌, 电弧加热法)	1965 瑞典	多种精炼功能。尤其适于生产工具钢, 轴承钢, 高强度钢和不锈钢等各类特殊钢。LF 是目前在各类钢厂应用最广泛的具有加热功能的精炼设备
	VAD (真空电弧加热法)	1967 美国	
	LF (埋弧加热吹氩法)	1971 日本	
不锈钢精炼	VOD (真空吹氧脱碳法)	1965 德国	能脱碳保铬, 适于超低碳不锈钢及低碳钢液的精炼
	AOD (氩、氧混吹脱碳法)	1968 美国	
	CLU (汽、氧混吹脱碳法)	1973 法国	
	RH-OB (循环脱气吹氧法)	1969 日本	
喷粉及特殊添加精炼	IRSID (钢包喷粉)	1963 法国	脱硫, 脱氧, 去除夹杂物, 控制夹杂形态, 控制成分。应用广泛, 尤其适于以转炉为主的大型钢铁企业
	TN (蒂森法)	1974 德国	
	SL (氏兰法)	1976 瑞典	
	ABS (弹射法)	1973 日本	
	WF (喂线法)	1976 日本	

1.6 炉外精炼技术的特点

各种炉外精炼技术都是为了解决常规炼钢设备的某些不足和缺陷而开发出来的。为了提高钢的质量、产量、降低成本, 虽然在冶金功能、设备结构、操作方法等方面都各不相同, 但是所有炉外精炼技术至少有以下三个共同特点:

(1) 二次精炼, 在不同程度上完成脱碳、脱磷、脱氧、脱硫, 去除气体、去除夹杂, 调整温度和成分等冶金任务。

(2) 创造良好的冶金反应的动力学条件, 如真空、吹氩、脱气、喷粉, 增大表面积, 应用各种搅拌增大传质系数, 扩大反应界面。

(3) 二次精炼容器具有浇注功能。为了防止精炼后的钢液再次氧化和吸气, 一般精炼容器 (主要是钢包) 除可以盛放和传送钢液外, 还有浇注功能 (使用滑动水口), 精炼后钢液不再倒出, 直接浇注, 避免精炼好的钢液再被污染。

图 1-2 表示从初炼炉起到二次炼钢法的精炼作用。炉外精炼可以与电弧炉、转炉配合, 现在已成为炼钢工艺中不可缺少的一个环节 (如日本五大钢铁公司所有转炉钢水都经过 RH 处理, 以提高质量)。尤其与超高功率电弧炉 (UHP) 配合, 更能发挥超高功率技术的优越性, 提高超高功率电弧炉的功率利用率。超高功率电弧炉的出现, 显著提高了废钢的熔化速度, 从而提高了生产率。但是, 按照传统工艺冶炼, 在炉内经过长时间地氧化和还原才出钢, 这样超高功率缩短熔化期的效果就被冲淡, 并且使大功率变压器长时间地低负荷运行, 降低了功率利

用率。这显然是不合理的。所以，为了发挥 UHP 优越性，应将还原精炼移至炉外进行，尽量提高熔化时间占整个冶炼时间的比例。

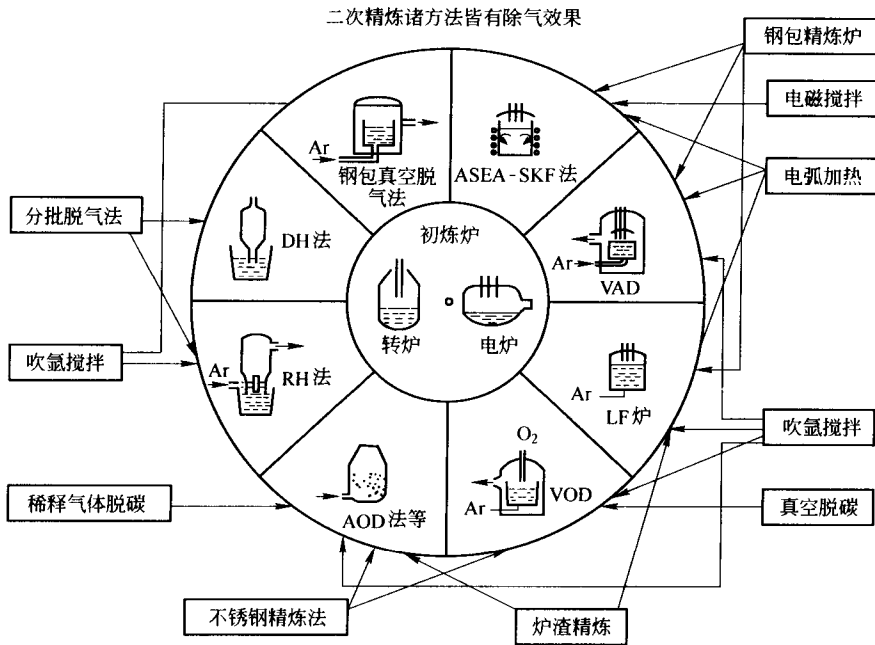


图 1-2 二次炼钢法的精炼作用

1.7 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和使用，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。精炼过程钢水温度的降低，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。钢水采用化学加热方法，如 CAS-OB，向钢液中加铝（或硅），同时吹氧保证处理后的钢液温度符合连铸要求，但这种方法增加了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，其加热速度不大，为 2~6℃/min。这不利于提高生产率，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。这样修炉频繁，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，也存在钢水增碳的可能，并