

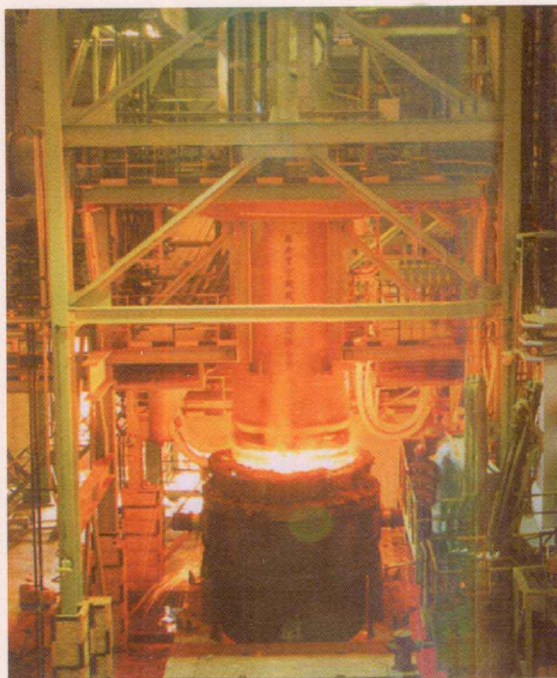


普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

炉外精炼教程

高泽平 主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

炉外精炼教程

主 编 高泽平
副主编 贺道中
主 审 李光强

北 京
冶金工业出版社
2011

内 容 提 要

本书为冶金工程专业的主干课程教材,系统地阐述了精炼过程的基本理论与工艺,以及纯净钢生产技术。作者本着“重视基础、强化工艺、突出应用”的原则,精心组织内容,力求内容全面、重点突出、先进实用。

本书主要用作高等学校冶金工程专业本科生教材,也可供从事钢铁生产的工程技术人员及管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

炉外精炼教程/高泽平主编. —北京:冶金工业出版社,
2011.9

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5685-6

I. ①炉… II. ①高… III. ①炉外精炼—高等学校—教材
IV. ①TF114

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第190423号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 马文欢 宋 良 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5685-6

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2011年9月第1版,2011年9月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;20印张;479千字;307页

40.00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(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

随着市场对钢材质量要求的不断提高，炉外精炼生产技术已成为现代钢铁生产流程中不可缺少的重要环节，也是现代钢铁生产技术进步的重要内容。高效、合理、经济地发挥各种炉外精炼技术装备的作用，对钢铁企业建立高效、低成本纯净钢生产技术平台，促进钢铁企业调整品种结构具有十分重要的意义。

为了适应炉外精炼技术发展的需要，更好地满足教学与生产的要求，按照普通高等教育“十二五”教材建设规划，根据冶金工程专业教学大纲的要求，我们编写了本书。

全书共分为6章，主要内容包括：绪论，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，纯净钢生产，炉外精炼用耐火材料。编写中本着“重视基础、强化工艺、突出应用”的原则，精心组织内容，力求内容全面、重点突出、先进实用。本书由湖南工业大学高泽平任主编、贺道中任副主编。第1章、第2章、第5章由高泽平编写，第3章、第4章、第6章由贺道中编写，衡阳华菱钢管有限公司首席专家周维汉，湖南工业大学刘竹林和苏振江，参与了部分章节的编写与审稿工作。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，得到了武汉科技大学薛正良教授的指导，以及宝钢集团新疆八一钢铁有限公司精炼工程师廖红军的大力支持，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。

由于编者水平所限，书中不足之处，诚请读者批评指正。

编 者

2011年6月

目 录

1 绪 论	1
1.1 炉外精炼的定义	1
1.2 炉外精炼的任务	1
1.3 炉外精炼的手段	1
1.3.1 对精炼手段的要求	1
1.3.2 精炼手段的种类	2
1.4 炉外精炼方法的分类	3
1.5 炉外精炼技术的特点	4
1.6 炉外精炼技术的发展	5
1.6.1 炉外精炼技术的发展历程	5
1.6.2 我国炉外精炼技术的发展与完善	6
1.6.3 炉外精炼技术的发展原因	7
1.6.4 炉外精炼技术的发展趋势	7
复习思考题	9
2 炉外精炼的理论与技术基础	10
2.1 顶渣控制	10
2.1.1 挡渣技术	10
2.1.2 顶渣改质	11
2.2 渣洗	12
2.2.1 合成渣的物理化学性能	12
2.2.2 渣洗的精炼作用	16
2.3 搅拌	21
2.3.1 氩气搅拌	21
2.3.2 电磁搅拌	28
2.3.3 气泡泵起现象	28
2.3.4 搅拌对混匀的影响	30
2.4 加热	32
2.4.1 电弧加热	33
2.4.2 化学热法	35
2.4.3 燃烧燃料加热	36
2.4.4 电阻加热	37

2.4.5	其他加热方法	37
2.4.6	精炼加热工艺的选择	38
2.5	真空	39
2.5.1	真空技术概述	39
2.5.2	钢液的真空脱气	45
2.5.3	钢液的真空脱氧	51
2.5.4	降低 CO 分压时的吹氧脱碳	56
2.6	喷粉和喂线	63
2.6.1	喷粉	63
2.6.2	喂线	73
2.7	夹杂物的形态控制	78
2.7.1	夹杂物分类	78
2.7.2	钢中塑性夹杂物的生成与控制	86
2.7.3	稀土处理	89
2.7.4	钙处理	93
	复习思考题	99
3	炉外精炼工艺	100
3.1	RH 法与 DH 法	100
3.1.1	RH 精炼法	100
3.1.2	DH 精炼法	112
3.2	LF 法与 VD 法	113
3.2.1	LF、LFV 精炼法的基本含义	113
3.2.2	LF 的设备构成	114
3.2.3	LF 的精炼功能	116
3.2.4	LF 精炼工艺与操作	117
3.2.5	LF 的处理效果	130
3.2.6	VD 法	131
3.2.7	LF 与 RH、LF 与 VD 法的配合	134
3.3	ASEA-SKF 钢包精炼炉	135
3.3.1	ASEA-SKF 炉设备	136
3.3.2	精炼工艺及操作	139
3.3.3	ASEA-SKF 炉的精炼效果	141
3.4	AOD 法	142
3.4.1	氩氧吹炼炉的主要设备与结构	142
3.4.2	氩氧吹炼炉的操作工艺	143
3.4.3	氩氧吹炼的主要优点	147
3.4.4	AOD 炉工艺和设备的改进	148
3.4.5	CLU 法	149

3.4.6 AOD - VCR 法和 AOD - L 法	150
3.5 VAD 法与 VOD 法	151
3.5.1 VAD 法	151
3.5.2 VOD 法	153
3.6 CAS 法	158
3.6.1 CAS 法/CAS - OB 概述	158
3.6.2 CAS 工艺	160
3.6.3 CAS - OB 工艺	161
3.6.4 CAS、CAS - OB 的精炼效果和优越性	164
3.7 钢包喷粉处理	168
3.7.1 TN 喷粉精炼法	168
3.7.2 SL 喷粉精炼法	169
3.7.3 钢包喷粉冶金工艺参数	169
3.7.4 钢包喷粉冶金效果	170
3.7.5 我国钢包喷粉精炼法的发展	170
3.8 其他精炼方法	171
3.8.1 CAB 吹氩精炼法	171
3.8.2 有搅拌功能的真空钢包脱气法	171
3.8.3 铝弹投射法	171
3.8.4 NK - AP 法	172
3.8.5 REDA 法	172
3.8.6 多功能 LF 法	173
复习思考题	173
4 炉外精炼与炼钢、连铸的合理匹配	175
4.1 合理匹配的必要性	175
4.2 匹配的原则	176
4.2.1 冶炼炉和精炼设备的匹配原则	176
4.2.2 冶炼炉、精炼装置和连铸机的匹配原则	177
4.3 典型的炉外精炼车间工艺布置	178
4.3.1 炉外精炼技术的选择依据	178
4.3.2 炉外精炼方法的选择	182
4.3.3 典型钢厂炉外精炼的匹配模式	183
4.3.4 炉外精炼的布局	186
复习思考题	186
5 纯净钢生产	187
5.1 纯净钢的概念	187
5.2 纯净度与钢的性能	188

5.2.1	钢的纯净度的评价方法	188
5.2.2	钢中非金属夹杂物存在形式与钢材的破坏类型	191
5.2.3	纯净度对钢材性能的影响	194
5.3	纯净钢生产技术	196
5.3.1	低硫钢生产技术	197
5.3.2	低磷钢生产技术	198
5.3.3	低氧钢生产技术	200
5.3.4	低碳低氮钢生产技术	202
5.3.5	氢的去除与钢中残余有害元素控制技术	207
5.3.6	减少钢中夹杂物技术	208
5.3.7	“超显微夹杂”钢的精炼工艺	210
5.3.8	纯净钢生产体系的建立	211
5.4	纯净钢生产技术应用	212
5.4.1	轴承钢	212
5.4.2	硬线用钢	219
5.4.3	石油管线钢	225
5.4.4	齿轮钢	235
5.4.5	不锈钢	241
5.4.6	重轨钢	256
5.4.7	弹簧钢	260
5.4.8	IF 钢	266
	复习思考题	271
6	炉外精炼用耐火材料	273
6.1	炉外精炼用耐火材料概述	273
6.1.1	炉外精炼用耐火材料要求与类型	273
6.1.2	炉外精炼常用耐火材料及性能	275
6.2	钢包精炼装置用耐火材料	280
6.2.1	LF (V) 用耐火材料	280
6.2.2	ASEA-SKF 钢包炉用耐火材料	284
6.2.3	VAD 钢包炉用耐火材料	285
6.3	不锈钢精炼装置用耐火材料	286
6.3.1	VOD 炉用耐火材料	286
6.3.2	AOD 炉用耐火材料	290
6.4	真空处理装置用耐火材料	292
6.4.1	RH/RH-OB 炉用耐火材料	292
6.4.2	RH-KTB 耐火材料	298
6.4.3	DH 法用耐火材料	298
6.5	其他精炼技术用耐火材料	299

6.5.1 钢包吹氩精炼用耐火材料	299
6.5.2 喷射冶金喷枪用耐火材料	301
6.5.3 CAS/CAS-OB 内衬用耐火材料	302
复习思考题	304
参考文献	305

1 绪 论

1.1 炉外精炼的定义

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、去除非金属夹杂物并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、成分和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）。

1.2 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是：

（1）降低钢中氧、硫、氢、氮和非金属夹杂物含量，改变夹杂物形态，以提高钢的纯净度，改善钢的力学性能。

（2）深脱碳，满足低碳或超低碳钢的要求。

（3）微调合金成分，把合金成分控制在很窄的范围内，并使其分布均匀，尽量降低合金的消耗，以提高合金收得率。

（4）调整钢液温度到浇注所要求的温度范围内，最大限度地减小包内钢液的温度梯度。

（5）作为炼钢与连铸间的缓冲，提高炼钢车间整体效率。

为完成上述任务，一般要求炉外精炼设备具有：熔池搅拌功能、钢水升温 and 控温功能、精炼功能、合金化功能、生产调节功能。

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，某一种精炼方法只能完成其中一项或几项任务。由于各厂条件和冶炼钢种不同，一般是根据不同需要配备一至两种炉外精炼设备。

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，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。

(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，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，加热的升温速率等，必须是可以按照精炼的要求进行控制和调节的。

(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，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。

1.3.2 精炼手段的种类

虽然各种炉外精炼方法各不相同，但是无论哪种方法都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。炉外精炼手段主要有：渣洗、真空（或气体稀释）、搅拌、喷吹和加热（调温）等五种。此外还有连铸中间包的过滤。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，采用一种或几种手段组成一种炉外精炼方法。

(1) 渣洗：将事先配好（可在专门炼渣炉中熔炼）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、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。

(4) 加热：调节钢水温度的一种重要手段，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。

(5) 喷吹：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。它们完成脱碳、脱硫、脱氧、合金化和控制夹杂物形态等精炼任务。

1.4 炉外精炼方法的分类

各种炉外精炼方法如图 1-1 所示。从图 1-1 可以看出，精炼设备通常分为两类：一是基本精炼设备，在常压下进行冶金反应，如 LF、AOD、CAS-OB 等，可适用于绝大多数钢种；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，适于生产纯净钢与超纯净钢，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 1-1 给出了炉外精炼主要方法的大致分类情况。

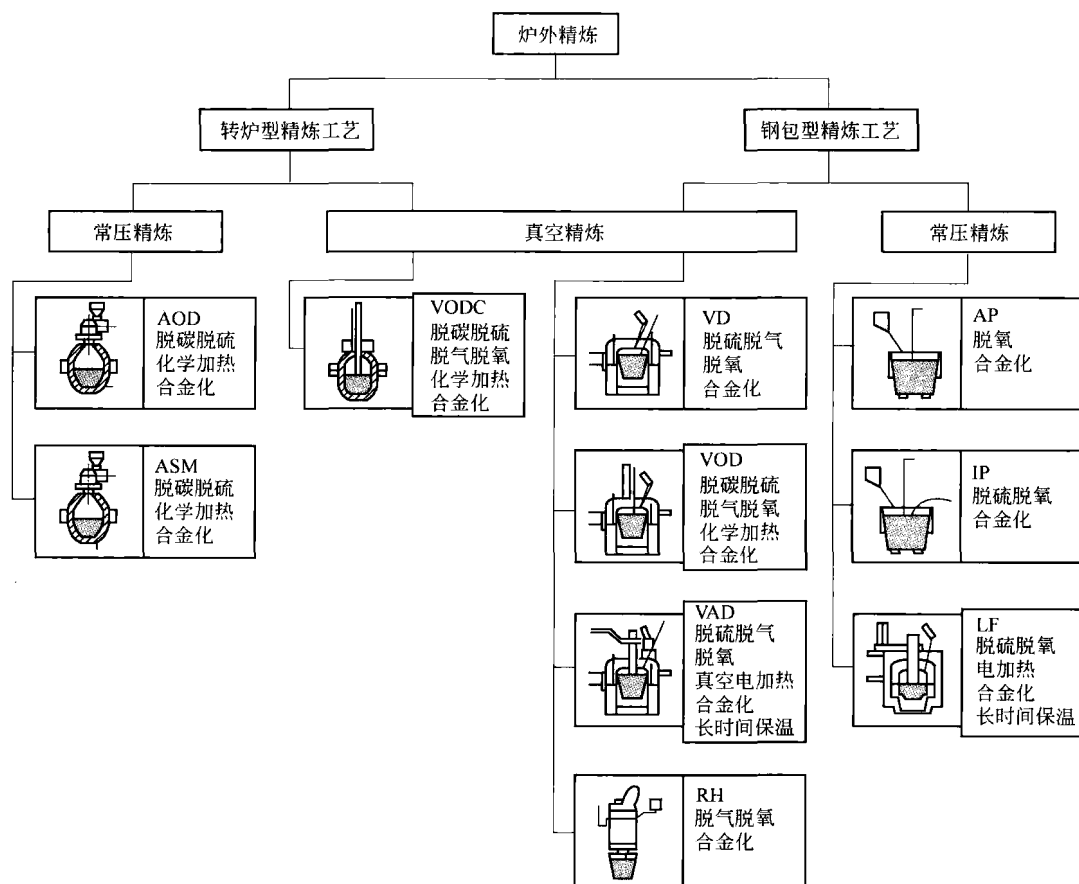


图 1-1 各种炉外精炼方法

表 1-1 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)	1933	法国	脱硫, 脱氧, 去除夹杂物
	固态合成渣洗	—	—	

续表 1-1

分 类	名 称	开发年份	国 别	适 用
钢包吹氩精炼	GAZAL (钢包吹氩法)	1950	加拿大	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
	CAB (带盖钢包吹氩法)	1965	日本	
	CAS 法 (封闭式吹氩成分微调法)	1975	日本	
真空脱气	VC (真空浇注)	1952	联邦德国	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	联邦德国	
	SLD (倒包脱气法)	1952	联邦德国	
	DH (真空提升脱气法)	1956	联邦德国	
	RH (真空循环脱气法)	1957	联邦德国	
	VD 法 (真空罐内钢包脱气法)	1952	联邦德国	
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	联邦德国	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, 尤适于以转炉为主的大型钢铁企业
	TN (蒂森法)	1974	联邦德国	
	SL (氏兰法)	1976	瑞典	
	ABS (弹射法)	1973	日本	
	WF (喂线法)	1976	日本	

1.5 炉外精炼技术的特点

各种炉外精炼法所采用的手段与功能见表 1-2。

表 1-2 各种炉外精炼法所采用的手段与功能

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	+	*	√		√	*	√	√		+	√	√	
ASEA-SKF	+	√	√	+	√	√	√	√		+	√	√	+
VAD	+	√	√	+	√	√	√	√		+	√	√	+
CAS-OB			√	√	√		√	√			√	√	
VOD		√	√	√		√	√	√					√

续表 1-2

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
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；

“*”表示 LF 增设真空装置后被称为 LF-VD，具有与 ASEA-SKF 相同的精炼功能。

各种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污染。

炉外精炼可以与电炉、转炉配合，现在已成为炼钢工艺中不可缺少的一个环节。尤其与超高功率电弧炉（UHP-EAF）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。

1.6 炉外精炼技术的发展

1.6.1 炉外精炼技术的发展历程

1933 年，法国派林（Perrin）应用专门配制的高碱度合成渣，在出钢过程中对钢液进行“渣洗脱硫”，这是炉外精炼技术的萌芽。1950 年，联邦德国用真空处理脱除钢中的氢以防止产生“白点”。此后，各种炉外精炼方法相继问世。1956~1959 年，研究成功了钢液真空提升脱气法（DH）和钢液真空循环脱气法（RH），1965 年以来，真空电弧加热脱气炉（VAD）、真空吹氧脱碳炉（VOD）和氩氧精炼炉（AOD）以及喂线法（WF）和 LF、钢包喷粉法等先后出现。到 20 世纪 90 年代，已有几十种炉外精炼方法用于工业生产，世界各国的炉外精炼设备已超过 500 台。1970 年以前，炉外精炼主要用于电炉车间的特殊钢生产，其产量尚不足钢总产量的 10%。20 世纪 70 年代中期以后，工业技术进步对钢材质量提出了更高的要求，进一步推动了炉外精炼技术的应用，工业先进国家的转炉车间拥有炉外精炼设备的占 50% 以上，逐步形成了一批“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”的现代化工艺流程。

1.6.2 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,喂线设备与技术,钢水喷粉精炼技术得到了初步的发展。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 的生产应用,及 KIP 喷粉装置;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它们发挥了重要的作用。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 年冶金行业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。2007 年国内大、中型骨干企业钢水二次精炼的比例迅速增长到 64%,精炼设备 474 台(见表 1-3)。

表 1-3 2007 年国内二次精炼设备能力汇总(不包括吹氩)

精炼种类	台数/台	总公称吨位/t
RH	61	9040
AOD	43	1712
VOD	27	1475
LF	295	23440
VD	32	2510
CAS-OB	16	2190
合计	474	40367

1991 年召开了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,要首先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,并合理地设计工艺流程。

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范中去,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年初又召开炼钢连铸工作会议, 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, 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不但在电炉厂而且在转炉厂也大量采用, 并配套有高效精炼渣。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。

多年来, 我国从事炉外精炼技术装备研究、设计和制造的企业, 通过自主创新, 使我国炉外精炼技术装备实现大型化、系列化、精细化发展, 加快了我国纯净钢工艺生产向高端化迈进的步伐。虽然成绩显著, 但还有很多问题, 如钢水精炼比仍较低, 与我国连铸生产飞速发展的形势不适应; 中小钢厂炉外精炼的难题还没有从根本上取得突破; 炉外精炼装备核心配件和软件研制水平与国外差距更大, 尚未形成自主的过程控制技术; 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。

1.6.3 炉外精炼技术的发展原因

20世纪80年代至今, 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%; 现在日本、欧美等先进的钢铁生产国家, 炉外精炼比超过90%, 2004年日本转炉钢真空处理比达到72.7%; 而新建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。

炉外精炼技术的主要发展原因有两个: 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, 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, 提高产品的市场竞争力。

1.6.4 炉外精炼技术的发展趋势

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和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 装置中分别配备了喂合金线(铝线、稀土线)、合金包芯线(Ca-Si、Fe-B 等)等装置。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二次精炼比。表 1-4 给出了常用二次精炼设备生产效率的比较。影响二次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。

表 1-4 常用二次精炼设备的生产效率

精炼设备	钢包净空高度/mm	吹氩(Ar)流量/ $L \cdot (\min \cdot t)^{-1}$	混匀时间/s	升温速度/ $^{\circ}C \cdot \min^{-1}$	容积传质系数/ $cm^3 \cdot s^{-1}$	精炼周期/min	钢包寿命/次
CAS-OB	150~250	6~15	60~90	5~12		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	0.7~1.0		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

显然 RH 和 CAS 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。

为了提高二次精炼的生产效率,近几年国外采用了以下技术:

1) 提高反应速度,缩短精炼时间技术。如 RH 通过提高吹氩强度,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 $78 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ 。

2) 采用在线快速分析钢水成分,缩短精炼辅助时间技术。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,加速钢包周转技术。二次精炼钢包的寿命和炉容量有关。美国 WPSC 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,最高包龄达到 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。二次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数据管理与数据通讯;④车间生产调度管理。

5) 扩大精炼能力技术。北美新建的短流程钢厂,生产能力一般为 120~200 万吨/年,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),平均精炼周期达到 20min,