



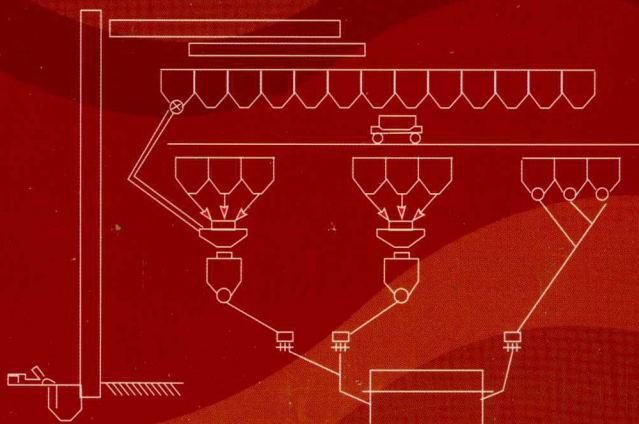
冶金操作岗位培训丛书

YEJIN CAOZUO GANGWEI PEIXUN CONGSHU

# 炉外精炼工

## LUWAI JINGLIAN GONG

张士宪 赵晓萍 主编



化学工业出版社



冶金操作岗位培训丛书

YEJIN CAOZUO GANGWEI PEIXUN CONGSHU

# 炉外精炼工

## LUWAI JINGLIAN GONG

张士宪 赵晓萍 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书参照冶金行业职业技能标准和技能鉴定规范,根据冶金企业的生产实际和岗位群的技能要求,内容涵盖了炉外精炼工所必须掌握的基本知识和技能。主要包括炉外精炼技术基础以及典型炉外精炼方法(CAS、LF-VD、RH、VOD、AOD等)的工作原理、生产设备、操作工艺、注意事项以及具体实例等。同时,书中也注意反映新知识、新技术、新工艺、新方法的应用和发展。

本书可作为炉外精炼工的培训教材,也可供冶金专业技术人员、企业技术工人提高专业知识和工作技能参考,还可供职业院校冶金专业学生阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

炉外精炼工/张士宪,赵晓萍主编. —北京:化学工业出版社,2012.5

(冶金操作岗位培训丛书)

ISBN 978-7-122-13642-8

I. 炉… II. ①张…②赵… III. 炉外精炼-岗位培训-教材 IV. TF114

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第028895号

---

责任编辑:刘丽宏

文字编辑:向东

责任校对:王素芹

装帧设计:刘丽华

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市延风印装厂

850mm×1168mm 1/32 印张11 $\frac{1}{2}$  字数312千字

2012年6月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:49.00元

版权所有 违者必究

# 前言

炉外精炼，就是按传统工艺，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、气体和夹杂物）、调整及均匀化成分和温度等任务，部分或全部地移到钢包或其他容器中进行，为得到比初炼更高的生产率、更高的质量而进行的冶金操作，也称为“二次精炼”或“钢包冶金”。近年来，随着纯净钢生产技术的进步、连铸技术的发展以及降低生产成本的要求，炉外精炼工艺与设备迅速得到普及，它已经成为现代炼钢工艺中不可缺少的重要环节。随着炉外精炼技术的发展，对冶炼人才的需求不断加大。为了顺应行业的发展，必须提高冶炼技术人员知识和技能水平。本书就是为适应上述要求而编写的。

本书参照冶金行业职业技能标准和技能鉴定规范，根据冶金企业的生产实际和岗位群的技能要求，主要介绍了炉外精炼工所必须掌握的基本知识和技能。内容主要包括炉外精炼技术基础以及典型炉外精炼方法（CAS、LF-VD、RH、VOD、AOD等）的工作原理、生产设备、操作工艺、注意事项以及具体实例等。全书在内容编排上努力做到基本概念清晰，强调实践，突出技能。语言上力求深入浅出，通俗易懂。同时，书中也注意反映新知识、新技术、新工艺、新方法的应用和发展。本书可作为炉外精炼工的培训教材，也可供冶金专业技术人员、企业技术工人提高专业知识和工作技能参考，还可供职业院校冶金专业学生阅读。

本书由河北工业职业技术学院张士宪、赵晓萍主编，河北工业职业技术学院时彦林、关昕，河北联合大学梁精龙，邯郸钢铁集团公司殷向光副主编。参加编写的还有河北工业职业技术学院刘燕霞、董中奇、李建朝、黄伟青、张欣杰。北京科技大学包燕平教授

在百忙中审阅了全书。本书在编写过程中得到了许多同行的大力帮助，还参阅了很多有关炉外精炼技术方面的著作、杂志及其有关人员提供的资料与经验，在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平所限，加之时间仓促，书中不当之处难免，敬请读者批评指正。

**编者**

# 目 录

---

<b>第 1 章 炉外精炼技术基础</b> .....	1
1.1 炉外精炼工艺概述 .....	1
1.2 炉外精炼的目的 .....	2
1.3 炉外精炼技术的任务 .....	2
1.4 炉外精炼技术的手段 .....	3
1.4.1 真空 .....	3
1.4.2 搅拌 .....	7
1.4.3 成分调整 .....	12
1.4.4 温度调整 .....	15
1.4.5 造渣 .....	17
1.5 炉外精炼技术的分类 .....	19
1.5.1 真空脱气法 .....	20
1.5.2 非真空精炼法 .....	22
1.5.3 其他精炼法 .....	22
1.6 炉外精炼技术迅速发展的原因 .....	23
1.6.1 稳定连铸生产 .....	24
1.6.2 科学技术进步要求提高钢材质量和开发新钢种 .....	26
1.7 世界和我国炉外精炼技术的发展历史 .....	29
1.7.1 世界炉外精炼技术的发展历史 .....	29
1.7.2 我国炉外精炼技术的发展现状 .....	33
1.8 炉外精炼技术的发展趋势 .....	34
1.8.1 钢铁行业的发展模式 .....	34
1.8.2 炉外精炼技术的主要发展趋势 .....	36

1.8.3	需要解决的问题	38
<b>第2章</b>	<b>CAS精炼法</b>	<b>40</b>
2.1	概述	40
2.1.1	CAS法	41
2.1.2	CAS-OB法	42
2.1.3	ANS-OB法	43
2.1.4	IR-UT法	44
2.2	密封吹氩气合金成分调整的原理和功能	45
2.2.1	CAS法精炼原理与精炼功能	45
2.2.2	CAS-OB法精炼原理与精炼功能	45
2.3	密封吹氩气合金成分调整工艺流程	48
2.3.1	CAS法工艺流程	48
2.3.2	CAS-OB法工艺流程	49
2.4	密封吹氩气合金成分调整方法的设备	55
2.4.1	CAS法设备	55
2.4.2	CAS-OB法设备	56
2.4.3	ANS-OB系统	59
2.5	CAS-OB具体操作过程	59
2.5.1	工艺过程	59
2.5.2	新包的使用	60
2.5.3	钢包内衬耐火材料的选择	63
2.5.4	分渣技术及操作	67
2.5.5	吹氩操作	75
2.5.6	吹氩装置的拆装	75
2.5.7	喂线料的识别	77
2.5.8	喂线操作	79
2.5.9	钢包喂Ca-Si线操作	83
2.5.10	钢包喂含镁包芯线操作	85
2.5.11	操作举例	90

2.6	生产效果	90
2.6.1	CAS 法精炼效果	90
2.6.2	CAS-OB 的精炼效果	92
2.6.3	ANS-OB 精炼效果	95
2.7	实例	95
2.7.1	宝钢 300t 钢包 CAS 工艺	95
2.7.2	宝钢 300t 钢包 CAS-OB 工艺流程	96
2.7.3	武钢二炼钢 CAS-OB 工艺	97
2.7.4	鞍钢 ANS-OB 精炼工艺	98
<b>第 3 章</b>	<b>LF-VD 操作</b>	<b>100</b>
3.1	LF 法	100
3.1.1	概述	100
3.1.2	原理与功能	102
3.1.3	设备	103
3.1.4	工艺流程	107
3.1.5	优点及效果	108
3.2	VD 法	109
3.2.1	概述	109
3.2.2	原理与功能	111
3.2.3	设备	111
3.2.4	工艺流程	115
3.2.5	优点及效果	116
3.3	LF 法与 VD 法的配合	117
3.4	具体操作过程	120
3.4.1	出钢	120
3.4.2	生产前准备	125
3.4.3	坐包位	127
3.4.4	精炼过程	127
3.4.5	造渣具体要求	132



3.4.6	加热与温度控制具体要求 .....	142
3.4.7	合金化 .....	151
3.4.8	典型钢种精炼工艺操作 .....	161
3.5	LF 法常见问题及处理 .....	165
3.6	LF 法实例 .....	170
3.6.1	120t LF 炉底吹氩操作 .....	170
3.6.2	35t LF 炉底吹氩气基本曲线 .....	171
3.6.3	临钢炼钢厂 LF 精炼炉工艺实践 .....	171
3.6.4	淮钢 LF 钢包精炼炉 .....	175
3.6.5	鞍钢 100t LF 精炼炉概述 .....	183
3.6.6	邯钢 120t 钢包精炼炉操作要点 .....	184
3.6.7	某钢厂 LF 精炼技术操作规程 .....	185
<b>第 4 章</b>	<b>RH 精炼法 .....</b>	<b>194</b>
4.1	RH 法 .....	194
4.1.1	概述 .....	194
4.1.2	RH 技术的发展历史 .....	194
4.1.3	RH 技术的功能拓展及技术研究 .....	197
4.2	RH 法的原理、功能及特点 .....	205
4.2.1	基本原理 .....	205
4.2.2	冶金目的及功能 .....	208
4.2.3	冶金特点 .....	210
4.2.4	RH 法钢液运动特征 .....	211
4.3	RH 法的工艺流程与技术参数 .....	212
4.3.1	工艺流程 .....	212
4.3.2	RH 法精炼工艺技术 .....	213
4.4	RH 法的设备组成 .....	233
4.4.1	基本结构 .....	233
4.4.2	具体设备 .....	235
4.5	RH 法处理方法和生产效果 .....	249

4.5.1	处理方法 .....	249
4.5.2	冶金效果 .....	252
4.6	RH 法的具体操作过程 .....	256
4.6.1	RH 脱碳操作 .....	256
4.6.2	RH 脱氮操作 .....	257
4.6.3	RH 脱氢操作 .....	258
4.7	RH 法的新技术 .....	259
4.7.1	应用情况 .....	259
4.7.2	技术进展 .....	260
4.7.3	发展趋势 .....	264
4.7.4	RH 新技术 .....	268
<b>第 5 章</b>	<b>不锈钢冶炼</b> .....	<b>270</b>
5.1	不锈钢 .....	270
5.1.1	不锈钢的概念及其分类 .....	270
5.1.2	不锈钢的钢号 .....	276
5.1.3	不锈钢的特性 .....	277
5.2	不锈钢的生产过程 .....	291
5.2.1	不锈钢的生产过程 .....	291
5.2.2	不锈钢生产设备简介 .....	292
5.3	AOD 法治炼不锈钢 .....	293
5.3.1	理论支持 .....	293
5.3.2	AOD 法的产生及发展概况 .....	299
5.3.3	AOD 炉的设备 .....	301
5.3.4	AOD 法的生产工艺及技术参数 .....	304
5.3.5	AOD 法的特点 .....	310
5.3.6	操作技能及注意事项 .....	312
5.3.7	AOD 精炼控制及检测的进步 .....	313
5.4	VOD 法治炼不锈钢 .....	313
5.4.1	VOD 的产生 .....	313

5.4.2	VOD 法设备及其特点	315
5.4.3	VOD 法的基本功能	320
5.4.4	VOD 法精炼工艺	323
5.4.5	VOD 用耐火材料	329
5.4.6	VOD 法的发展	330
5.4.7	AOD 与 VOD 的比较	331
<b>附录</b>		<b>333</b>
附录 1	炉外精炼工理论知识复习题	333
附录 2	炉外精炼工理论知识复习题参考答案	342
附录 3	炉外精炼工实际操作内容及评分标准	348
<b>参考文献</b>		<b>356</b>

# 第1章 炉外精炼技术基础

随着世界的进步和社会的发展，人类对钢材品种的需求不断扩大，对钢材产品的质量要求也日益提高，普通钢种已经远远不能满足现实社会的需求了。而炉外精炼作为一种扩大品种范围、提高产品质量、降低生产成本的有力手段，被世界绝大多数钢铁厂认可和采用。近20年，随着纯净钢生产技术的进步、连铸技术的发展以及降低生产成本的要求，炉外精炼工艺与设备迅速得到普及，它已经成为现代炼钢工艺中不可缺少的重要环节。

## 1.1 炉外精炼工艺概述

所谓炉外精炼，就是按传统工艺，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、气体和夹杂物）、调整及均匀化（成分和温度）等任务，部分或全部地移到钢包或其他容器中进行，为得到比初炼更高的生产率、更高的质量而进行的冶金操作，也称为“二次精炼”或“钢包冶金”。

炉外精炼把传统的炼钢方法分为两步，即“初炼”加“精炼”。初炼是在氧化性气氛下进行炉料熔化、脱磷、脱碳和主合金化；精炼是在真空、惰性气氛或可控气氛的条件下进行脱氧、脱硫、去除夹杂物和夹杂物变性、调整成分（微合金化）、控制钢水温度等。

长期以来，特殊钢大多是在电弧炉内熔化和精炼的。随着科学技术的发展，对炼钢的生产率、钢的成本、钢的纯洁度以及使用性能都提出了越来越高的要求。传统的炼钢设备和炼钢工艺难以满足用户越来越高的要求。20世纪60年代，在世界范围内，传统的炼钢方法发生了根本性的变化，即由原来单一设备初炼与精炼的一步

炼钢法，变成由传统炼钢设备初炼，然后在钢包或其他容器中进行炉外精炼的二次炼钢法，出现了各种各样的炉外精炼法。

传统的钢铁生产流程：高炉→炼钢炉（转炉和电弧炉）→铸锭，已逐步被新的工艺流程所代替，即高炉→铁水预处理→炼钢炉→炉外精炼→连铸，这已成为国内外大型钢铁企业技术改造后的普遍模式。

### 1.2 炉外精炼的目的

炉外精炼在现代化的钢铁生产流程中已成为一个不可缺少的环节，尤其炉外精炼与连铸相结合，是保证连铸生产顺行、扩大连铸品种、提高铸坯质量的重要手段。

炉外精炼设备的构思各不相同，依各自条件而定。不仅要建造真空脱气设备和钢包炉，而且要综合使用真空脱气（VD）、真空吹氧脱碳（VOD）和钢包炉（LF）设备或真空循环脱气法（RH）和钢包炉（LF）。当设备制造厂设计一种炉外精炼设备时，必须考虑操作目的以及和这种设备有关的精炼方案。

自从开始采用真空脱气方法以来，已开发了许多不同的炉外处理方法，所有这些方法都属于炉外精炼范围。为达到冶金和操作目标，可采用不同的炉外精炼方法和工艺，这取决于设备布置，可利用的原料、炉料、能源及公共设施，炉容量以及对钢质量的要求诸因素。

采用炉外精炼方法进行钢水精炼的目的有：脱硫；脱碳；去除氧化物；用CO还原；加热（包括化学加热和电加热）；脱气（包括氢、氧、氮）；均匀化（成分和温度）；合金化；控制和改变夹杂物形态。

### 1.3 炉外精炼技术的任务

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，控制夹杂物形态，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、去除夹杂物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。各厂条件和冶炼钢种不同，一般根据不同需要配备 1~2 种炉外精炼设备。

## 1.4 炉外精炼技术的手段

钢水的炉外精炼可完成：脱碳、脱硫、脱氧、去气、调整温度和成分并使其均匀化，脱除夹杂物或调整夹杂物形态，细化晶粒，特殊元素的添加等任务。为完成上述任务可采取真空处理，吹氩或电磁搅拌，加合金、喷粉或喂线，加热或加冷料调整温度以及造渣处理等手段。可根据不同的目的选用一种或几种手段组合的炉外精炼技术，完成精炼任务。

### 1.4.1 真空

真空是炉外精炼中广泛应用的一种手段。在真空科学中，真空

的含义是指在给定的空间内低于 1atm (1atm=101325Pa) 的气体状态。在工程应用上, 真空是指在给定的空间内, 气体分子的密度低于该地区内大气压气体分子密度的状态, 是指稀薄的气体状态, 一般分为低真空、中真空、高真空、超高真空以及极高真空几种状态。冶金行业生产过程中所使用的真空状态为低真空状态。

目前使用的炉外精炼方法中, 将近有 2/3 配有真空装置。要获得真空状态, 只有靠真空泵对某一给定容器抽真空才能实现。按照热力学分析, 真空将对有气相参加而且反应前后气相分子数不等的反应产生影响。真空促使反应向生成气相的方向移动。在当前选用真空手段的各种炉外精炼方法中, 最高的真空度通常有几十帕, 所以炉外精炼的真空只对钢液的脱气、用碳脱氧、超低碳钢种的脱碳等反应产生影响。尽管真空度不算太高, 但对促进炉外精炼的一些反应已是足够了。在该真空条件下, 可以有效地对钢液脱气。只要钢液暴露于真空中, 在较短的时间内, 就可使钢中氢的析出反应进行得比较完全。现有的各种带真空的炉外精炼方法, 都能将钢中的氢降到  $(2\sim 3)\times 10^{-6}$  以下, 若辅以吹氩、脱碳反应或延长真空脱气时间, 可以进一步将氢降到  $1\times 10^{-6}$  甚至更低的水平。由于氮在钢液中溶解平衡常数较高, 扩散速度慢, 真空脱氮的效果就不及脱氢, 一般脱氮 20%~30%。真空促进了碳氧反应的发展, 所以在真空下碳的脱氧能力显著提高, 利用这一特点, 真空精炼可将碳作为有效的脱氧剂, 从而获得很纯洁的钢。例如在 VOD 精炼工艺的安排中, 吹氧脱碳结束后, 立即提高真空度, 利用钢中的碳来脱氧, 这不仅保证了钢的纯洁度, 还为精确控制成分创造了条件。深度的脱氧还为脱硫提供了有利条件。此外, 真空还为精炼超低碳钢种提供了可能。因此, 冶金功能比较齐全的炉外精炼方法无例外地具备真空手段。

使用真空处理的目的包括: 脱除氢和氧, 并将氮气含量降至较低范围; 去除非金属夹杂物, 改善钢水的清洁度; 生产超低碳钢; 使一种元素比其他元素优先氧化 (如碳优先于铬); 控制浇注温度等。同时, 真空还促进了钢液或溶解在钢液中的碳与炉衬的作用以

及合金元素的挥发，对冶炼过程产生负面影响。

由于具备真空手段的各种炉外精炼方法，其工作压力均大于 50Pa，所以炉外精炼所应用的真空只对脱气、脱氧、脱碳等反应产生较为明显的影响。

(1) 真空脱气 氧、氢、氮是钢中主要的气体杂质，真空的一个重要目的就是去除这些气体。但是，氧是一种较活泼的元素，它与氢不一样，通常不是以气体的形态被去除，而是依靠特殊的脱氧反应形成氧化物而被去除。所以在真空脱气中，主要讨论脱氢和脱氮。

在小于  $10^5$  Pa 的压力范围内，氢和氮在铁液（或钢液）中的溶解度都符合平方根定律，用通式表示为：

$$\frac{1}{2}X_2(g)=[X]$$

$$a_{[X]}=f_X w[X]=K^\ominus \sqrt{p_{X_2(g)}} \quad (1-1)$$

$$p_{X_2(g)}=p'_{X_2(g)}/p^\ominus$$

式中， $X_2(g)$  为  $H_2$ ， $N_2$ ； $a_{[X]}$  为气体（氢或氮）在铁液中的活度； $f_X$  为气体的活度系数； $w[X]$  为气体在铁液中的质量分数； $K^\ominus$  为气体（氢或氮）在铁液中溶解的平衡常数； $p_{X_2(g)}$  为气相中氢、氮的量纲一的分压； $p'_{X_2(g)}$  为  $X_2$  的分压，Pa； $p^\ominus$  为标准态压力，100kPa。

所以，在脱气过程中，只要降低相应的气相分压就可以使溶解在钢液中的气体排出。

降低气体分压的方法有以下三种。

- ① 真空法：即降低整个系统的气体总压力。
- ② 稀释法：即用其他气体来稀释，使被处理的气体进入氩气或水蒸气等气泡中而被带走。从而实现在假真空下脱除气体。
- ③ 两者组合法：边抽真空边吹入其他气体。

然而，钢水在冶炼过程中是一个非常复杂的系统，它受到整个处理工艺的影响，要降低钢水中的气体含量，就必须将所有的影响因素全部考虑在内。降低钢水中气体的措施包括以下五种。



① 使用干燥的原材料和耐火材料。

② 降低与钢液接触的气相中气体的分压：这可从两方面采取措施。一是降低气相的总压，即采用真空脱气，将钢液处于低压的环境中。也可采用各种减小钢液和炉渣所造成的静压力的措施。另一方面是用稀释的办法来减小  $p_{X_2}$ ，如吹氩、碳氧反应产生一氧化碳气体所形成的气泡中， $p_{X_2}$  就极低。

③ 在脱气过程中增加钢液的比表面积 ( $A/V$ )：使钢液分散是增大比表面积的有效措施。在真空脱气时使钢液流滴化，如倒包法，真空浇注，出钢真空脱气等。或使钢液以一定的速度喷入真空室，如 RH 法、DH（真空提升脱气）法等。采用搅动钢液的办法，使钢液与真空接触的界面不断更新，也起到了扩大比表面积的作用，使用吹氩搅拌或电磁搅拌的各种真空脱气的方法都属于这种类型。

④ 提高传质系数：各种搅拌钢液的方法都能不同程度地提高钢中气体的传质系数。

⑤ 适当地延长脱气时间。

(2) 真空脱氧 传统炼钢方法脱氧主要是依靠硅、铝等与氧亲和力较铁大的元素来完成。这些元素与溶解在钢液中的氧作用，生成不溶于钢液的脱氧产物，它们聚集长大并浮出钢水进入钢渣而使钢中含氧量降低。但是仍有大量的脱氧产物没有达到排出钢液的指标，它们就继续悬浮在钢液中不能排除。所以，指望用通常的脱氧方法而获得完全脱氧的钢，在理论上也是不可能的。

如果脱氧产物是气体或低压下可以挥发的物质，那么就有可能利用真空条件来促使脱氧更趋完全，而且在成品钢中并不留下以非金属夹杂形式存在的脱氧产物。在炉外精炼的真空条件下，就可以利用碳作为脱氧剂，使氧变为一氧化碳气体排出而降低钢中的氧含量。

有效利用碳来真空脱氧的措施如下。

① 进行真空碳脱氧前尽可能使钢中氧处于容易与碳结合的状态，例如溶解的氧或  $Cr_2O_3$ 、 $MnO$  等氧化物。避免真空处理前用