

高等学校规划教材
GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

炉外处理

陈建斌 主编



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

高等学校规划教材

炉 外 处 理

主 编 陈建斌
副主编 杨治立 贺道中

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2008

内 容 提 要

本书为冶金工程专业教材,共分为七章,包括铁水预处理和钢水的炉外精炼。主要内容包括:绪论;炉外处理的物理化学基础;炉外处理的技术基础;常用的炉外处理方法;炉外处理与炼钢、连铸的合理匹配;典型钢种的冶炼方法;炉外精炼用耐火材料。本书内容不仅涉及炉外处理方法本身的工艺、设备及耐火材料,还涉及炉外处理必备的物理化学基础和技术基础的基本理论;作为炉外精炼具体应用的实例,还详细介绍了几个典型钢种近十几年来国内外广泛采用的新型的“炼钢炉+炉外精炼+连铸”方法的冶炼工艺和操作;此外,还介绍了作为钢铁生产流程中重要一环的炉外处理与炼钢炉和连铸之间合理匹配及典型的匹配模式。

本书力求能反映本学科的最新成果和进展,并力求用典型的例子来反映实际生产工艺和操作流程。

本书也可供相关专业的科技、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

炉外处理/陈建斌主编. —北京:冶金工业出版社,2008. 10

高等学校规划教材

ISBN 978-7-5024-4620-8

I. 炉… II. 陈… III. 钢水—炉外精炼—高等学校—教材 IV. TF769

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 143181 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 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 李枝梅 宋 良 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4620-8

北京鑫正大印刷有限公司印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2008 年 10 月第 1 版,2008 年 10 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;19.25 印张;513 千字;297 页;1—3000 册

39.00 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

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

随着我国经济建设和科学技术的飞速发展,对钢材的品种和质量提出了越来越高的要求;冶金科学技术的发展,也要求冶金工业“优质、高效、低耗、环境友好”。我国从20世纪80年代末、90年代初陆续开始了“技术改造、结构调整及产品更新换代”的优化钢铁生产流程的改造,铁水预处理和炉外精炼技术在我国得到了迅速的发展,已成为提高钢水质量的有效手段,并成为钢铁生产流程中重要的组成部分。

考虑到20世纪90年代初,我国已将铁水预处理和钢水炉外精炼统称为炉外处理,因此,本书包括了炉外精炼与铁水预处理的有关内容,并根据其内在的联系,按照物理化学基础、技术基础、常见的炉外处理方法的顺序有机地进行编排。

本书根据高等学校本科冶金工程专业“炉外处理”课程的教学要求编写。全书共分为七章,主要内容包括:绪论,炉外处理的物理化学基础,炉外处理的技术基础,常用的炉外处理方法,炉外处理与炼钢、连铸的合理匹配,典型钢种的冶炼方法,炉外精炼用耐火材料。本书内容不仅涉及炉外处理方法本身的工艺、设备及耐火材料,还涉及炉外处理必备的物理化学基础和技术基础的基本理论;作为炉外精炼具体应用的实例,还详细介绍了几个典型钢种近十几年来国内外广泛采用的新型的“炼钢炉+炉外精炼+连铸”方法的冶炼工艺和操作;此外,还介绍了作为钢铁生产流程中重要一环的炉外处理与炼钢炉和连铸之间合理匹配及典型的匹配模式。本书力求反映本学科的最新成果和进展,并结合典型的例子介绍实际生产工艺和操作流程。

本书编写成员有:陈建斌(编写第1、3、6章及4.1节和4.5节),杨治立(编写第2章及4.3节、4.4节),贺道中(编写第5、7章和4.2节)。全书由陈建斌

汇总统稿。编写过程中,宝钢股份研究院冶金工艺所黄宗泽博士对本书的内容提出了宝贵的意见;胡继业老师审阅了书稿,提出了许多宝贵的修改意见。在此一并表示衷心的感谢!

本书为冶金工程专业本科生教材,也可作为高职高专冶金工程专业教材,还可供相关专业的科技、工程技术人员参考。

由于作者的水平所限,书中难免有不妥之处,恳求同行与读者不吝赐教,恳请将宝贵的批评意见发给作者。E-mail 地址是 jianbin_chen63@163.com。

编 者
2008 年 5 月

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
中国冶金百科全书·钢铁冶金	编委会 编	187.00
炉外精炼及铁水预处理实用技术手册	赵 沛 主编	146.00
钢铁冶金学教程(本科教材)	包燕平 等编	49.00
钢铁冶金原理(本科教材)	黄希祐 编	40.00
钢铁冶金原理习题解答(本科教材)	黄希祐 编	30.00
物理化学(第3版)(国规教材)	王淑兰 主编	35.00
热工测量仪表(国规教材)	张 华 等编	38.00
热工实验原理和技术(本科教材)	邢桂菊 等编	25.00
相图分析及应用(本科教材)	陈树江 等编	20.00
自动检测和过程控制(第3版)(本科教材)	刘元扬 主编	36.00
有色冶金概论(第2版)(本科教材)	华一新 主编	30.00
炼焦学(第3版)(本科教材)	姚昭章 主编	39.00
现代冶金学——钢铁冶金卷(本科教材)	朱苗勇 主编	36.00
冶金热工基础(本科教材)	朱光俊 主编	36.00
冶金原理(本科教材)	韩明荣 主编	35.00
冶金过程数值模拟基础(本科教材)	陈建斌 编著	28.00
炼铁学(本科教材)	梁中渝 主编	估 38.00
炼铁设备及车间设计(第2版)(国规教材)	万 新 主编	29.00
炼钢设备及车间设计(第2版)(国规教材)	王令福 主编	25.00
冶金生产概论(国规教材)	王明海 主编	45.00
冶金专业英语(国规教材)	侯向东 主编	28.00
物理化学(高职高专规划教材)	邓基芹 主编	28.00
烧结矿与球团矿生产(高职高专规划教材)	王悦祥 主编	29.00
冶金生产概论(高职高专规划教材)	王庆义 主编	28.00
炉外精炼(高职高专规划教材)	高泽平 等编	30.00
冶炼基础知识(职业技术学院教材)	马 青 主编	36.00
炼铁原理与工艺(职业技术学院教材)	王明海 主编	38.00
炼钢原理及工艺(职业技术学院教材)	刘根来 主编	40.00
转炉炼钢实训(职业技术学院教材)	冯 捷 主编	35.00
连续铸钢实训(职业技术学院教材)	冯 捷 主编	45.00
冶金过程检测与控制(职业技术学院教材)	郭爱民 主编	20.00
冶金通用机械与冶炼设备(职业技术学院教材)	王庆春 主编	45.00
炼钢基础知识(职业技能培训教材)	冯 捷 主编	39.00
转炉炼钢生产(职业技能培训教材)	冯 捷 主编	58.00
连续铸钢生产(职业技能培训教材)	冯 捷 主编	45.00

目 录

1 绪论	1
1.1 什么是炉外处理	1
1.2 炉外处理在钢铁生产中的地位	2
1.3 炉外处理的作用、冶金功能和精炼手段	2
1.4 炉外处理方法的分类	5
1.5 炉外处理技术的发展	6
1.5.1 萌芽阶段	6
1.5.2 炉外精炼基本理论确立阶段	6
1.5.3 各种炉外处理方法的开发和应用阶段	7
1.5.4 “铁水预处理—炼钢炉—钢水炉外精炼—连铸”的钢的生产流程	14
1.5.5 我国炉外处理技术的发展概况	16
1.5.6 21 世纪炉外处理的发展方向	18
复习思考题	20
2 炉外处理的物理化学基础	21
2.1 脱气(脱氢、脱氮)技术	21
2.1.1 钢液脱气的热力学	21
2.1.2 钢液脱气的动力学	23
2.1.3 去除钢中气体的措施	24
2.2 减压下的脱碳技术	25
2.2.1 脱碳反应的热力学	25
2.2.2 脱碳反应的动力学	26
2.3 脱氧和夹杂物形态控制技术	26
2.3.1 脱氧技术	27
2.3.2 夹杂物的形态控制技术	30
2.4 脱硫技术	32
2.4.1 渣-金属间的脱硫反应	33
2.4.2 脱硫速度	34
2.4.3 硫化物系夹杂物的形态控制	35
2.5 脱磷和脱硅技术	37
2.5.1 脱磷技术	37
2.5.2 脱硅技术	38
2.6 氩气的精炼作用	39

2.7 不锈钢精炼的“去碳保铬”原理	40
复习思考题	42
3 炉外处理的技术基础	43
3.1 挡渣技术	43
3.2 合成渣洗	45
3.2.1 合成渣的物化性能要求和成分的选择	46
3.2.2 合成渣的脱氧	47
3.2.3 合成渣的脱硫	47
3.2.4 合成渣吸收夹杂物的热力学分析	48
3.3 真空技术	48
3.3.1 真空及其度量	49
3.3.2 真空泵及其主要性能指标	50
3.3.3 真空泵系统的检漏	53
3.3.4 真空处理装置的主要形式	53
3.4 搅拌技术	54
3.4.1 搅拌的方式	54
3.4.2 搅拌强度和钢液混合特性	56
3.4.3 底吹搅拌用透气砖	59
3.5 加热技术	61
3.5.1 电弧加热	62
3.5.2 铝-氧加热	64
3.5.3 氧-燃加热	65
3.5.4 电阻加热法	67
3.5.5 等离子加热法	67
3.6 喷粉和喂线	68
3.6.1 喷粉	69
3.6.2 喂线	71
复习思考题	74
4 常用的炉外处理方法	75
4.1 铁水预处理方法	75
4.1.1 铁水预脱硫	75
4.1.2 铁水预脱硅	96
4.1.3 铁水预脱磷	100
4.2 钢包吹氩及简易钢包精炼法	115
4.2.1 钢包吹氩	115
4.2.2 简易钢包精炼法	119
4.3 真空脱气法	128
4.3.1 真空提升脱气法(DH 法)	128

4.3.2 真空循环脱气法(RH 法)	132
4.3.3 钢包真空脱气法(VD 法)	142
4.4 钢包精炼法	144
4.4.1 ASEA-SKF 法	144
4.4.2 VAD 法	150
4.4.3 LF 法	151
4.5 不锈钢的炉外精炼方法	164
4.5.1 氩氧脱碳法(AOD 法)	164
4.5.2 真空氧气脱碳法(VOD 法)	180
4.5.3 AOD 法与 VOD 法的比较	188
4.5.4 RH 法、VD 法与 VOD 法的比较	188
复习思考题	191
5 炉外处理与炼钢、连铸的合理匹配	192
5.1 合理匹配的必要性	192
5.1.1 炉外处理技术的选择依据	192
5.1.2 合理匹配的必要性	194
5.2 匹配原则	195
5.2.1 炼钢炉和钢水精炼设备匹配原则	196
5.2.2 炼钢炉、钢水精炼装置和连铸机的匹配原则	196
5.3 典型的炉外处理车间工艺布置	197
5.3.1 炉外处理方法的选择	197
5.3.2 典型钢厂炉外处理的匹配模式	199
复习思考题	201
6 典型钢种的冶炼方法	202
6.1 轴承钢	202
6.1.1 概述	202
6.1.2 影响轴承钢质量的关键成分和夹杂物及其控制	203
6.1.3 轴承钢的冶炼	207
6.1.4 轴承钢的连铸	213
6.2 不锈钢	221
6.2.1 概述	221
6.2.2 不锈钢的主要性能要求及质量问题	223
6.2.3 不锈钢冶炼方法的选择	227
6.2.4 电弧炉三步法冶炼不锈钢	231
6.2.5 转炉冶炼不锈钢	232
6.2.6 不锈钢的连铸	238
6.3 弹簧钢	244
6.3.1 概述	244

6.3.2 超净化钢的冶炼技术	246
6.3.3 弹簧钢的生产工艺	248
6.4 IF 钢	251
6.4.1 概述	251
6.4.2 IF 钢的冶炼工艺	253
6.4.3 IF 钢冶炼的几个工艺关键	254
6.5 石油管线钢	256
6.5.1 概述	256
6.5.2 我国管线钢的类型与组织特性	259
6.5.3 管线钢的冶炼	259
复习思考题	262
7 炉外精炼用耐火材料	264
7.1 炉外精炼对耐火材料的要求	264
7.1.1 炉外精炼对耐火材料的要求和分类	264
7.1.2 炉外精炼用主要耐火材料及性能	265
7.2 RH 用耐火材料	269
7.2.1 RH/RH-OB 炉用耐火材料	269
7.2.2 RH-KTB 耐火材料	274
7.2.3 DH 用耐火材料	275
7.3 AOD 炉用耐火材料	276
7.3.1 AOD 炉衬的工作条件	276
7.3.2 AOD 炉用 $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3$ 系砖	276
7.3.3 AOD 炉用 MgO-CaO 系砖	277
7.3.4 太钢 AOD 用耐火材料及寿命	277
7.4 CAS/CAS-OB 内衬用耐火材料	278
7.5 炉外精炼钢包内衬用耐火材料	280
7.5.1 LF(V) 用耐火材料	280
7.5.2 ASEA-SKF 钢包炉用耐火材料	283
7.5.3 VAD 钢包炉用耐火材料	284
7.5.4 VOD 炉用耐火材料	285
7.6 钢包吹氩用透气砖	289
7.6.1 底吹法透气砖类型与结构	289
7.6.2 透气砖材质与应用	289
7.7 喷射冶金喷枪用耐火材料	291
复习思考题	291
附录 常见炉外处理的英文缩写	292
参考文献	295

1 绪 论

1.1 什么是炉外处理

从炉外处理的发展过程来看,20 世纪 90 年代初开始将钢水炉外精炼和铁水预处理统称为炉外处理。参照斯派尔(Spire)的提法,可将炉外处理定义为:将传统冶炼炉(高炉、转炉和电炉)内生产得到的铁水或钢水导出,为得到比冶炼炉生产效率更高,铁水或钢水的品质更加优良的效果而在炉外进行的冶金操作。炉外处理包括铁水预处理和钢水炉外精炼。铁水预处理是在高炉出铁槽、铁水罐或鱼雷罐及专用的预处理站或预处理转炉内进行的预先脱除铁水中的硫、硅和磷,以及对一些特殊成分而进行的富集预处理并除去这些元素与化合物高含量的炉渣而进行的处理是在高炉—炼钢炉之间对铁水进行预备性的处理,国外称为“hot metal processing”,其目的是对铁水进行脱硫、脱硅和脱磷。而钢水炉外精炼是在炼钢炉—连铸之间,对钢水进行的进一步精炼处理。钢水炉外精炼包括在钢水包中对钢水进行调整温度、成分,去气、去夹杂及去除有害元素的操作和处理,以达到钢水洁净,成分和温度均匀与稳定的目的。甚至有人还将在中间包内进行的促进气体与夹杂上浮,稳定全浇注过程钢水温度的中间包冶金,以及在结晶器内进行的去除钢中杂质、促进形核、均匀结晶的处理和操作也归入到炉外精炼的范畴中。从冶金作用来看,钢水炉外精炼的目的是去气(脱氢和脱氮),脱硫,脱碳,脱氧,去夹杂,控制夹杂物形态,调整钢水成分和温度等。

由于钢水的炉外精炼是利用炼钢炉生产得到的钢水作为“粗钢水”,在传统的炼钢炉外进行的进一步的精炼,最终获得高质量的“精炼钢水”的方法,因此又将传统的、为炉外精炼设备提供钢水的炼钢炉称为“初炼炉”或“粗炼炉”,而所得的钢水被称为“初炼钢水”或“粗炼钢水”。将进行炉外精炼的设备称为“精炼炉”。由于炉外精炼是将传统炼钢炉冶炼所得钢水再次精炼,因此,国外并没有对应的“炉外精炼”一词,而是称为“Secondary Steelmaking”(二次炼钢)、“Secondary Refining”(二次精炼)、“Secondary Metallurgy”(二次冶金)或“Ladle Refining”(钢包精炼)、“Ladle Metallurgy”(钢包冶金)等。

炉外处理的目的是更高效地提高铁水和钢水的质量,除了要在冶炼炉外进行旨在提高钢水的纯净度,提高钢水质量的处理外,还包括三层含义:首先是完成初(粗)炼炉本身无法完成的精炼任务,如高炉内无法脱磷,而在炉外进行铁水预脱磷;又如,无论转炉还是电弧炉内都很难将钢水中的氢脱到 $3.0 \times 10^{-4}\%$,而通过真空处理却能很容易地将氢脱到 $3.0 \times 10^{-4}\%$ 以下;在炉内很难将钢水中的碳脱到 0.040%,而采用 RH-OB 或 VOD 却能较经济地达到。其次是原来在炼钢炉内完成的任务,转移到炉外在精炼设备中完成,从而提高初(粗)炼炉的生产效率,降低生产成本。如超高功率电弧炉冶炼取消还原期,将原来还原期的任务移到炉外精炼中完成。此外,炉外处理还能充分发挥炉外精炼设备的优势,高效、经济地生产各类品种的钢水,从而扩大初(粗)炼炉所能生产的品种。如转炉本身很难经济地生产不锈钢、轴承钢等特殊钢,但将转炉与 RH 和 LF 双联后,就能够经济地生产出优质的特殊钢。最后,炉外处理还可作为初(粗)炼炉与连铸之间的一个十分重要的缓冲器,协调初(粗)炼炉工序与连铸工序之间的生产节奏、产量的匹配以及成分和温度的均匀与稳定。因此,炉外精炼在钢的生产流程中占有十分重要的地位。

1.2 炉外处理在钢铁生产中的地位

1970 年以前,目前生产上大量使用的各种炉外精炼方法大多已投入工业生产,而且具有相当的生产规模,但其应用还仅限于特殊钢的生产,在钢的总产量中,经炉外精炼处理的钢水比例不到 10%。20 世纪 70 年代中期,由于发生了能源危机,要求产业部门减少能耗,降低生产成本,提高经济效益。因此,首先是日本,而后是西欧的钢铁企业,开始大力发展连铸,以取代传统的模铸,提高生产率,降低能源消耗;同时要采用转炉来生产优质钢、特殊钢,以降低生产成本。为使连铸工艺顺行,要求通过炉外精炼降低钢中的硫、氧含量;要求均匀钢包中钢水的成分、温度;要求通过炉外精炼来提高钢水的质量,进行成分微调。铁水预处理和炉外精炼技术的发展使初(粗)炼炉的前后工序综合成一个整体工艺,出现了“高炉—(铁水预处理)—转炉—炉外精炼—连铸”流程。

而电炉流程,由于超高功率电弧炉技术从 20 世纪 70 年代开始逐渐普及,随着变压器功率水平的日益提高,要求提高变压器的最大功率利用率 and 时间利用率,提高电弧炉炼钢的生产率,降低能耗和冶炼成本。为此提出了要求缩短甚至取消无法发挥最大功率利用率和时间利用率的效率低下的还原期。但取消还原期后,如何解决传统还原期的脱硫、脱氧以及合金化的任务等问题?如果在电弧炉后配备一个钢包精炼炉,这个问题就能圆满地解决。由此就促成了钢包精炼炉在电弧炉流程中站稳脚跟。同时,随着特殊钢连铸技术从 80 年代逐渐成熟,要求用炉外精炼来提高钢水的质量,均匀并稳定钢包中钢水的成分和温度,要求炉外精炼作为一个炼钢炉与连铸之间的一个缓冲器,因此就形成了“废钢—电弧炉—炉外精炼—连铸”的电弧炉短流程,并确立了炉外精炼在钢的生产流程中不可或缺的作用和地位,使得炼钢电弧炉仅作为一个“熔化设备”而应用。

因此,炉外精炼在钢铁生产中的地位,不仅起到不可缺少的冶金作用,提高钢水的质量,还起到了在整个钢的生产流程中的缓冲器的作用。没有炉外处理,就不可能使上述两大流程确立其在钢铁生产流程中的统治地位。因此,人们将转炉、超高功率电弧炉、连铸和炉外处理一起称为 20 世纪钢铁生产具有流程革命意义的四大技术。这四项技术相互依存、相互促进,奠定了现代钢铁生产两大流程稳固的技术基础。

1.3 炉外处理的作用、冶金功能和精炼手段

炉外处理在整个钢铁生产流程中的作用主要包括三个方面:

(1) 冶金作用:炉外处理方法或设备所能起到的如脱硫、脱碳等的作用,称为该方法或设备所具有的冶金作用、冶金目的、冶金任务或精炼任务等,而将所能达到的脱硫、脱碳等的具体结果,称为该方法或设备所具有的冶金效果或精炼效果。各种炉外处理设备所具有的冶金作用至少包含下列冶金目的之一:去气(氢和氮)、脱氧、脱碳、脱硫、脱磷、脱硅、去夹杂、夹杂物控制、钢水成分和温度微调及均匀化等。这是炉外处理提高产品质量、扩大品种所不可缺少的手段。

(2) 缓冲器作用:要求钢水炉外精炼设备具有协调炼钢和连铸生产能力,协调钢水的成分和温度以满足连铸的要求,以及协调炼钢和连铸的时间步调和生产节奏的作用。这是“铁水预处理—初(粗)炼炉—钢水炉外精炼—连铸”钢的生产流程的形成和工艺流程优化对钢水炉外精炼提出的,所必需的工艺手段。目前,炉外处理已成为钢铁生产工艺流程中独立的、不可替代的生产工序。

(3) 扩大生产品种,提高生产率的作用:其内容包括促进生产流程中各设备功能的分化,分工协作,从而提高生产率;补充和拓展初(粗)炼炉功能,提高初(粗)炼炉生产能力、扩大初(粗)炼炉的生产品种。如转炉通过精炼炉功能的补充和拓展,用于生产不锈钢等特殊钢。高炉铁水通过炉外的铁水预脱磷,拓展了高炉的脱磷功能,提高了转炉的脱磷效率和效果。超高功率电弧炉将还原期移到炉外精炼设备中完成,大大缩短了电弧炉的冶炼周期,提高了超高功率电弧炉的

生产率。

为了起到上述作用,完成以上冶金任务,相应地要求处理装置具有不同的精炼技术手段,从而使处理设备具备相应的精炼功能或冶金功能。具体的精炼手段有:搅拌(可采用吹气搅拌、电磁搅拌或机械搅拌);气氛调整(还原气氛或氧化气氛);减压或真空;加渣或除渣;加热(化学加热、电弧加热或电阻加热);成分微调(添加合金);喷粉和喂线等。将这些技术手段在精炼装备中经过适当地组合,就可以使精炼设备具备相应的精炼功能(冶金功能)。同时,不同的精炼设备又可以根据所冶炼的品种、产量以及初(粗)炼炉的不同,相互组合,形成生产某一品种的最佳生产流程,最终达到“优质、高效、低耗”的目的。

表 1-1 给出了常用的精炼装置所具备的精炼技术手段(冶金功能)及其所能达到的冶金目的。表 1-2 给出了炉外处理的冶金目的与冶金功能之间的关系。表 1-3 给出了不同精炼方法可获得的精炼效果。

表 1-1 常用的精炼方法的精炼手段和冶金目的

精炼方法	精炼手段										冶金目的										特 点
	搅拌	减压 或真空	添加 合金	喷粉	吹氧 精炼	气氛 调整	加热	造渣	脱氢	脱氮	脱碳	脱磷	脱硫	脱氧	去夹杂	夹杂 物控制	合金 化	调温	氧化 还原		
LF	○		●			●	●	●					●	●	○	○	●	●		适应性强	
VD	○	●				●			●	○	○				○					常与 LF 双联	
LF/VD	○	○	●			●	●	●	●	○			●	●	●		●	●		较方便地进行 真空精炼、脱氧、 去夹杂,控制成分、 温度。适应性 强	
ASEA-SKF	●	○	●			●	●	●	○	○	○	○	●	●	○	○	●	●			
VAD	●	●	●		●	●	●	●	○	○	○		●	●	●	○	●	●	●		
DH	●	●	○			○			●	○	○			●						迅速高效去 气,大钢水量处 理,温降小,合金 化准确	
RH	●	●				○			●	○	○				○	○					
RH-OB/PB	●	●	○	●	●	○	○	○	●	○	●		○		○				○	除具有 RH 特 点“迅速高效去 气,大钢水量处 理,合金化准确” 外,还附加吹氧 脱碳、各种加热 升温功能,温降 更低	
RH-KTB/KPB	●	●	○	●	●		○	○	●	○	●		○		○				○		
RH-MFB	●	●	○		●		○		●	○	●				○						
RH-MESID	●	●	○		●		○	○	●	○	●		○		○				○		
VOD	○	●	●		●	●		○	○	○	●				○	●		●	●	主要用于冶炼 超低碳不锈钢, 铬收得率高,电 弧炉生产率高	
AOD	●	○	●		●			●	○	○	●		●	●	●		●		●		
钢包吹氩	●	○													●					简易的钢包钢 水精炼法	
CAB	●														●	●		●			
TN				●										●	●					使用方便,有 脱硫、脱氧、去 夹杂,夹杂物形态 控制功能。应用 广泛。主要用于 转炉流程	
SL				●										●	●		●	●			
喂线			●											●	●		●	●			

注:“○”表示“捎带有”或“有作用”;“●”表示“功能良好”或“有强烈作用”。

表 1-2 炉外处理的冶金目的与冶金功能之间的关系

功能 目的	真空	气氛调整	搅拌	合成渣精炼	加热	吹氧精炼	添加合金	喷吹精炼剂
成分调整	+	++	++	-	++	-	-	-
脱碳	-	-	+	-	+	++	-	-
去氢	++	+	+	-	-	+	-	-
去氮	+	+	-	-	-	+	-	-
去夹杂	+	+	+	++	+	-	-	++
脱氧	++	+	+	++	-	-	+	++
脱硫	-	+	+	++	+	-	+	-
温度调整	-	-	++	-	++	-	-	++
夹杂物形态控制	-	-	-	-	-	-	+	++
还原氧化物	-	+	+	++	++	-	+	-
典型精炼方法	VOD、VD VAD、AOD		各种方法	LF、ASEA- SKF	LF、VAD ASEA-SKF	AOD VOD	多数都可	TN、SL

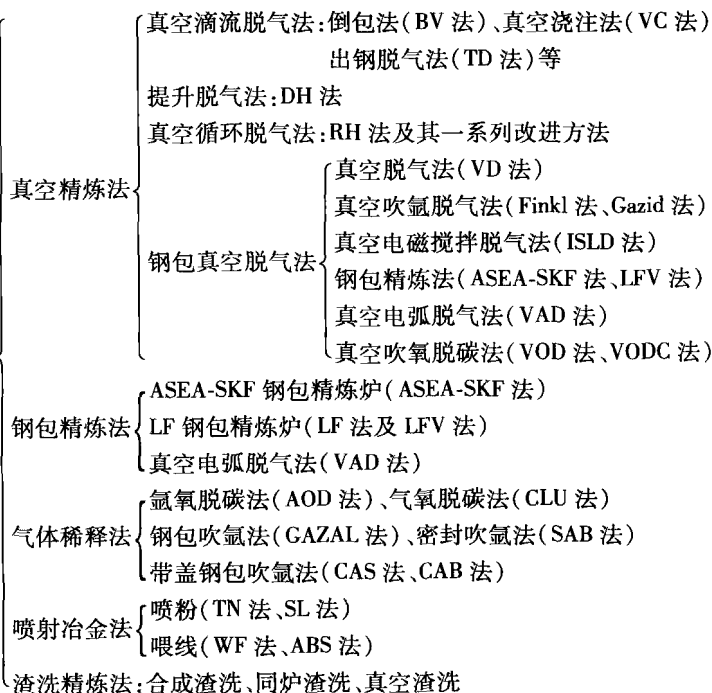
注：“++”表示“效果显著”；“+”表示“效果一般”；“-”表示“无效果”。

表 1-3 不同精炼方法可达到的精炼效果

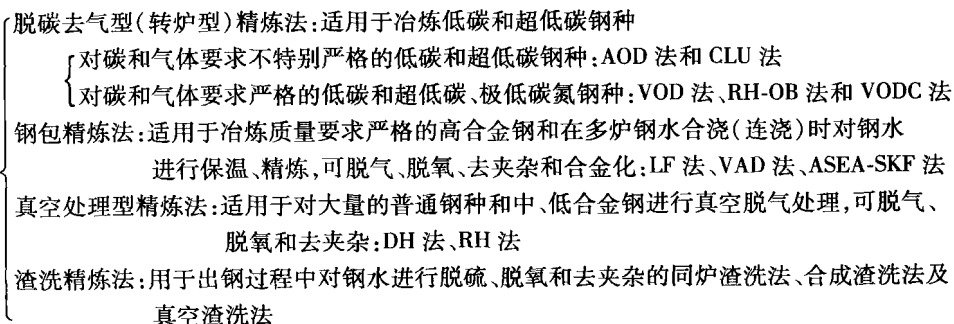
项 目	喷粉 (SL,TN 等)	VD	DH	RH	VOD	AOD	LF	CAS-OB 或 IR-UT
$w_{[H]}/10^{-4}\%$	降约 20	1~3	1~3	1~3	1~3	略降	1~3	略降
$w_{[O]}/10^{-4}\%$	至 15	20~40	10~40	10~40	30~60	50~150	可到 10	可到 20
$w_{[N]}/10^{-4}\%$	略增	大流量 Ar 可脱[N]	原始高时 略降,~40	原始高时 略降,~40	大流量 Ar 可脱[N]	150~200	大流量 Ar 可脱[N]	略增
$w_{[S]}/\%$	平均 0.006 可达 0.002	加渣时 可脱硫	加渣时 可脱硫	加渣时 可脱硫	可到 0.006	可到 0.015	可到 0.002	—
脱[C]/%	可增[C]	可脱到 0.001	可脱到 0.003	可脱到 0.003	可脱到 0.005	可脱到 0.015	可脱到 0.01	—
去夹杂/%	去除 80	去除 40~50	去除 50~70	去除 50~70	去除 40~50	略降	去除 ~50	去除 40~50
合金收得率 /%	喷合金 粉时 100	90~95	95~100	95~100	Cr:90~99	Cr: ≥98	90~95	Ti: 50~80
成分微调	喷合金粉时 可精确微调	可微调	可精确 微调	可精确 微调	可微调	不能微调	可微调	可微调
均匀成 分、温度	有效	有效	有效	有效	有效	有效	有效	有效
钢水温度升 降/℃·min ⁻¹	约降 3~4	约降 2~3	带电加热 约降 1~2	带电加热 约降 1~2	升温	升温	升温 2~4	降 5~10

1.4 炉外处理方法的分类

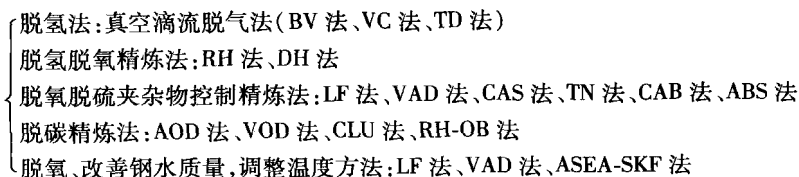
按照被处理金属(液态铁水或钢水)不同或处理时间是在炼钢炉之前还是在炼钢炉之后,可将炉外处理分为铁水预处理和钢水炉外精炼。铁水预处理可分为铁水预脱硫、预脱硅和预脱磷。而目前已知的炉外精炼法达几十种之多,但炉外精炼的分类没有统一。按照所采用的主要冶金手段分类,可将钢水炉外精炼方法分为:



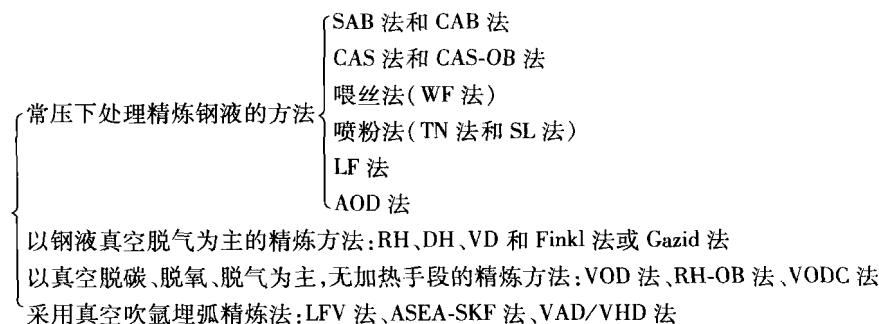
按照炉外精炼方法的用途可分为:



按照钢水炉外精炼方法的主要精炼目的分类,可分为:



按照炉外精炼所具有的主要精炼功能组合不同,可分为:



1.5 炉外处理技术的发展

纵观炉外处理技术的发展历史,大致可分为五个阶段:萌芽阶段、炉外精炼基本理论的确立阶段、各种炉外处理方法的开发和应用阶段、“初(粗)炼炉—炉外精炼—连铸”的钢的生产流程形成阶段及流程优化阶段。

1.5.1 萌芽阶段

萌芽阶段大致年代为 19 世纪 60 年代~20 世纪 30 年代。1860 年,亨利·贝塞麦报告了进行有关钢水真空处理试验的结果。克里斯伦(T. Chrithlen)和基德(J. Kidd)在 1875 年,埃特金(R. A. Aitkin)在 1882 年分别取得了真空去气法的专利,其中 Aitkin 的方案类似于后来的真空滴流去气(Bochumer 法)和真空提升去气(DH)法,但由于没有大容量排气能力真空泵技术,因此未能实现工业生产。

在渣洗精炼方面,最早可追溯到托马斯(Thomas)于 1879 年英国钢铁协会会议上发表的碱性转炉用 CaO 系渣脱磷试验结果。但用碱性渣冶炼,钢中氢增高。为解决该问题,进行了各种研究从而导致了钢包精炼法的开发。电弧炉炼钢在氧化精炼后进行还原精炼的方法于 1920 年实现了工业应用。1930 年前后,佩兰(Perrin)成功地进行了将预先熔化的合成渣注入钢包,然后接受炼钢炉钢水,利用出钢钢流造成的激烈搅拌,造成钢渣间的强烈混合精炼进行脱硫、脱氧的合成渣洗法的工业试验,但由于需要专门的炉渣熔化设备,耐火材料易熔损,操作困难等原因没有得到普及。1925 年,苏联托金斯基(A. S. Tochinskii)等人提出采用渣洗钢包精炼法,并于 1935 年进行了工业试验。该法将平炉钢水兑入钢包,在钢包内用渣洗来提高平炉钢质量。此法导致了苏联钢包精炼法和电渣重熔法的发展。

在双联炼钢法炼钢方面,由于优质废钢不足,希望用廉价的铁水高效地生产高质量钢,1890 年奥地利采用转炉和平炉双联,在转炉中进行脱硅、脱碳,在平炉中进行脱磷的双联炼钢法实现了工业生产。1894 年又开发了平炉—平炉双联的巴特兰德·西尔法,在一平炉中造碱性渣脱硅、脱磷,在另一平炉中造酸性渣进行脱碳。1915 年美国平炉钢产量中的 10% 由双联法生产。采用双联法生产将炼钢生产中的反应分成不同的“单元过程”,在不同精炼条件的炉内进行不同的精炼反应,使得各“单元反应”都能在最有利的热力学和动力学条件下进行,从而在高的生产率下提高钢水的质量,得到高纯度的钢水。

在铁水预处理方面,为避免出现号外铁水,1877 年依斯顿(A. E. Eaton)等人对硫不合格的生铁进行脱硫处理。

1.5.2 炉外精炼基本理论确立阶段

炉外精炼基本理论方面的大部分工作完成于 20 世纪 20 年代~70 年代。这一时期也是冶金

物理化学、冶金传输原理的建立、工业应用与逐渐完善的时期。由于“液态精炼—铸锭—轧制”的钢材大生产方式的形成,同时随着钢材用途的扩大,钢材使用条件的苛刻化,要求生产高质量的钢材,提高钢材加工的收得率,开展了钢材的宏观和微观分析,促进了炼钢物理化学学科的确立,使得炼钢操作由熟练工完全依靠经验的操作转变为科学理论指导下的操作,稳定了钢的质量,炼钢生产朝向高洁净化发展。

关于精炼反应的基础研究方面,从20世纪20年代开始陆续发表了平炉炼钢条件下关于钢中五大元素(碳、锰、硅、磷、硫)反应的热力学研究论文,逐渐建立了炉内各反应的数量关系,明确了各种炼钢炉内的反应热力学特征和精炼界限(平衡)。使得炼钢操作更加有效,并可通过控制化学成分,按照需要生产各种类型的钢。还建立了炉外精炼技术基础的脱氧和去气的热力学。1911年,西华特(Sievert)发现了铁水中的H、N的溶解规律。1935年,德国人申克(Shenck)提出了“白点起因于钢中氢”的观点,开始了钢液去氢的研究。1920~1940年,在吹氧脱碳的热力学、渣金反应热力学等方面进行了研究,并积累和完善了钢铁冶金过程热力学数据等。

20世纪50年代开始,逐步开展了炼钢过程动力学方面的研究。二次精炼理论的研究和完善主要集中在70年代。使人们对精炼过程中的一系列现象的了解更加清晰,明确了反应的机理和限速步骤,从而为炉外精炼设备的设计和工艺确定提供了理论的指导。正是由于动力学研究,进一步加速了炉外精炼技术的发展和完善。

反之,由于冶金过程的热力学和动力学理论在炉外精炼技术开发、设备设计及工艺的确定中的成功应用,因此又激发了冶金工作者进行热力学和动力学理论研究的热情和动力,大大促进了冶金过程理论研究的发展。

20世纪60年代以来,现代冶金学开始转向过程动力学和反应工程学。1972年日本的鞭岩教授等出版了《冶金反应工程学》,1972年盖格出版了《冶金中的传输现象》,美国麻省理工学院(MIT)的舍克里(Szekely)教授出版了“冶金中的流体流动现象”等,奠定了冶金过程模拟研究的基础。20世纪80年代初期,肖泽强教授提出全浮力模型,为气泡冶金作出了杰出贡献,得到国内外同行的认可。之后,他在瑞典研究人员的研究成果的基础上,在喷射冶金领域的工作成果,为中国喷射冶金技术的发展奠定了基础,大大推动了我国炉外处理技术的发展。

20世纪70年代以来,计算机技术的发展推动了冶金数学模拟技术的进步。1981年,世界上第一套商业CFD软件——PHOENICS软件推出。之后,1983年,FLUENT软件推出,冶金模拟研究进入快速发展期。

1990年,新日铁的沟口庄三教授首次提出氧化物冶金的概念,对精炼工艺提出了更高的要求。

可以这么说,整个炉外精炼技术的发展史,是冶金工作者应用冶金过程理论指导炉外精炼装备和技术发展的历史,是炉外精炼装备、技术发展促进理论研究发展的一个相互促进相互影响的发展史。

1.5.3 各种炉外处理方法的开发和应用阶段

此阶段大致年代为20世纪50年代~70年代。在此时期,从第一台真空铸锭和真空滴流脱气法的工业应用开始,目前所广泛应用的各种主要的炉外精炼法都基本完成了工业应用。为新型钢的生产流程的出现和发展打下了坚实的基础。

20世纪60年代和70年代,是钢水炉外精炼多种方法发明的繁荣时期,这与纯净钢生产概念的提出,各工业、建筑、军事、交通行业对钢材质量和性能提出了越来越高的要求,以及连铸生产工艺的稳定和连铸品种扩大的强烈要求是密切相关的。表1-4给出了各时期对钢中杂质元素单