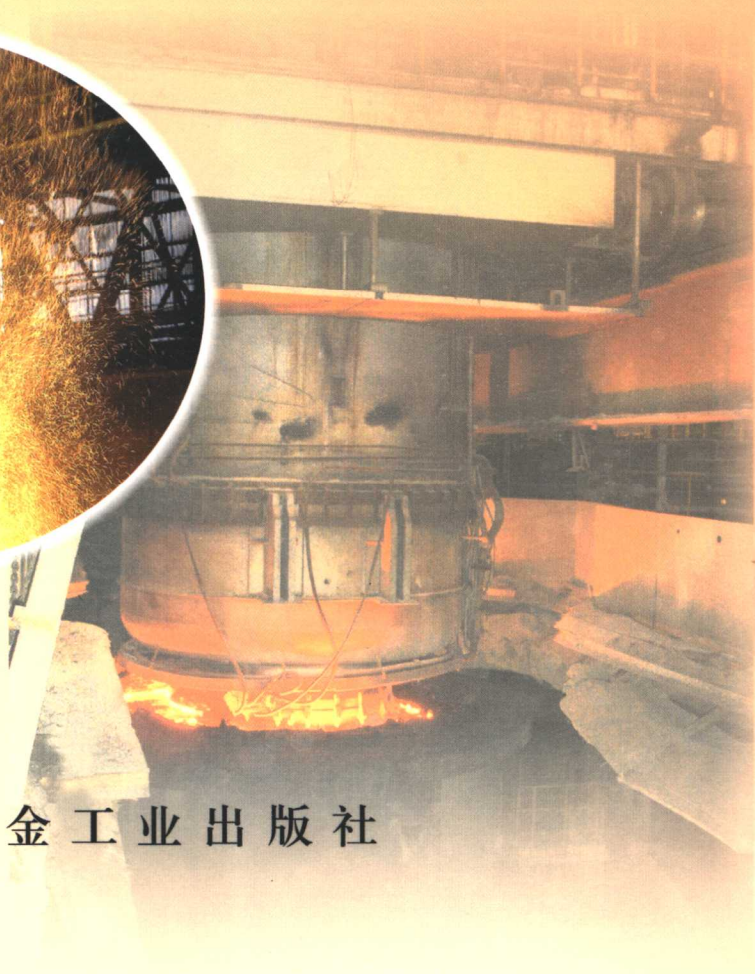
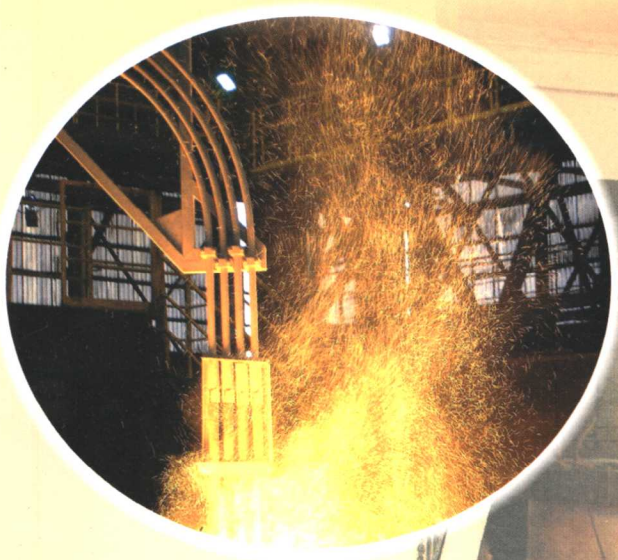


铁水预处理



钢水炉外精炼

冯聚和 艾立群 刘建华 编著



冶金工业出版社

Y-716

铁水预处理与钢水炉外精炼

冯聚和 艾立群 刘建华 编著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2006

内 容 简 介

全书共分 10 章, 主要内容分为铁水预处理和钢水炉外精炼两大部分。

铁水预处理的主要内容为铁水预脱硅、脱硫、脱磷的三脱处理, 介绍各种铁水脱硅剂、脱硫剂、脱磷剂及其特点, 铁水三脱预处理的基本原理、工艺及设备特点, 重点介绍铁水预脱硫处理, 尤其是镁脱硫技术。钢水炉外精炼重点介绍各种精炼方法的精炼原理、工艺及设备的特点, 精炼的主要工艺参数, 精炼效果。主要内容包括真空冶金理论和 RH 法等各种精炼方法, LF 炉精炼方法, 不锈钢冶炼的基础理论, VOD 和 AOD 精炼方法, 喷射冶金和喂线法等各种炉外精炼方法, 钢包热工分析及相关技术。最后介绍了几种典型的炉外精炼方法在现代钢铁生产流程中的应用。

本书可作为工程师继续教育的学习和技术工人的培训教材, 高等学校冶金工程专业的教材, 也可作为大专院校金属材料及热处理、压力加工、铸造等专业的师生及有关工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

铁水预处理与钢水炉外精炼/冯聚和等编著. —北京:
冶金工业出版社, 2006. 6

ISBN 7-5024-3983-8

I. 铁… II. 冯… III. 钢水—炉外精炼 IV. TF769

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 031255 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 王之光(联系电话:010-64027929 电子信箱:wzg5312@yahoo.com.cn)

宋 良

美术编辑 李 心 责任校对 侯 璐 李文彦 责任印制 牛晓波

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

2006 年 6 月第 1 版, 2006 年 6 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 17 印张; 412 千字; 261 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

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

科学技术的进步和工业的发展，对钢材质量和性能的要求越来越高，传统的冶炼工艺生产的钢材质量已经不能满足发展的需要，铁水预处理和钢水炉外精炼是提高产品质量、优化工艺流程、降低生产成本，生产洁净钢和品种钢的主要技术措施。目前已经发展成为现代钢铁生产工艺流程中一个重要的环节。

为了适应钢铁冶金的迅速发展，满足专业技术人员和企业管理人员学习新技术、新工艺的需要，作者在多年来讲授炉外精炼课程的资料和研究成果的基础上，结合生产实践，参考近年来国内外发表的文献资料，编著了这本书。

本书在编写过程中，力求先进性和实用性相结合，既介绍比较先进的炉外精炼方法、精炼工艺和精炼工艺参数，又参考我国钢铁企业的实际。为发展我国钢铁事业，提高企业的装备水平，实现钢铁产品的升级换代，提高我国钢铁产品国际竞争力贡献微薄之力。

本书在编写过程中，甄云璞、朱新华、李秀娟、李小红、王占国和郑玉平等在书稿的文字整理和图表编排等方面做了大量工作，在此表示深深的谢意！

限于作者水平有限，书中难免有不当之处，恳请读者批评指正。

作 者
2005年12月

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定价(元)
炉外精炼与铁水预处理实用技术手册	146.00
2005 中国钢铁年会论文集(1~4卷)	600.00
冶金设备液压润滑实用技术	68.00
炼钢辅助材料应用技术	50.00
钢铁冶金学(炼钢部分)	35.00
钢铁冶金学(炼铁部分)(第2版)	29.00
超细晶钢——钢的组织细化理论与控制技术	188.00
冶金热力学数据测定与计算方法	28.00
高炉生产知识问答	29.80
非高炉炼铁工艺与理论	28.00
实用高炉炼铁技术	29.00
现代高炉粉煤喷吹	19.00
高炉炼铁生产技术手册	118.00
高炉喷吹煤粉知识问答	25.00
炼铁节能与工艺计算	19.00
高炉炼铁设计原理	28.00
高炉炼铁过程优化与智能控制系统	36.00
高炉炼铁理论与操作	35.00
钢铁工业自动化·炼铁卷	40.00
钢铁工业自动化·炼钢卷	65.00
电炉炼钢原理及工艺	40.00
电炉炼钢除尘	45.00
电弧炉炼钢工艺与设备(第2版)	35.00
筑炉手册	106.00
转炉溅渣护炉技术	25.00
中国钢铁工业五十年数字汇编(上、下册)	598.00
冶金炉料手册(第2版)	69.00
铁矿粉烧结生产	26.00
真空材料技术丛书——真空材料	29.00

目 录

1 铁水预处理与钢水炉外精炼概述	1
1.1 铁水预处理概述	1
1.1.1 铁水预处理原理及方法	3
1.1.2 中国铁水预处理技术的产生与发展	4
1.2 钢水炉外精炼概述	7
1.2.1 炉外精炼的产生与发展	7
1.2.2 炉外精炼的主要目的和任务	10
1.2.3 炉外精炼的手段	10
1.2.4 炉外精炼的技术特点	11
2 铁水预脱硅处理	13
2.1 铁水预脱硅处理的意义	13
2.2 铁水预脱硅处理原理	15
2.2.1 脱硅剂	15
2.2.2 硅在铁水中的优先氧化	15
2.2.3 脱硅的基本反应	16
2.2.4 脱硅渣性质	17
2.3 铁水预脱硅处理方法	19
2.3.1 高炉出铁场的铁水沟内连续脱硅法	19
2.3.2 向铁水罐或混铁车内喷射脱硅剂脱硅法	23
2.3.3 向铁水罐或混铁车内吹氧脱硅	23
2.3.4 脱硅方式的比较与选择	23
2.4 铁水预脱硅工艺	24
2.4.1 合适的铁水含硅量	24
2.4.2 影响脱硅效果的因素	25
2.4.3 脱硅过程中脱硅渣起泡喷溅及抑制	27
2.4.4 炉前脱硅的过程控制	30
2.4.5 脱硅用耐火材料	31

3 铁水预脱硫处理	32
3.1 铁水预脱硫处理的产生与发展.....	32
3.1.1 钢材性能对硫的要求.....	32
3.1.2 铁水预脱硫处理的技术优点.....	33
3.1.3 国内外铁水预脱硫技术的发展现状.....	35
3.2 常用铁水脱硫剂及其特点.....	37
3.2.1 碳化钙.....	37
3.2.2 石灰系脱硫剂.....	37
3.2.3 金属镁及镁基脱硫剂.....	38
3.2.4 苏打.....	42
3.2.5 稀土.....	42
3.3 常用脱硫剂的脱硫机理.....	42
3.3.1 铁水脱硫的基本反应.....	42
3.3.2 镁脱硫机理.....	45
3.3.3 CaO 脱硫机理.....	50
3.3.4 CaC ₂ 脱硫机理.....	52
3.4 铁水预脱硫方法.....	54
3.4.1 搅拌法脱硫.....	54
3.4.2 气体提升法脱硫.....	56
3.4.3 喷粉法脱硫.....	57
3.4.4 镁焦法脱硫.....	65
3.4.5 喷吹颗粒镁脱硫.....	65
3.4.6 喂线法加入镁基脱硫剂.....	68
3.5 不同脱硫剂的脱硫效果和经济效益.....	69
3.5.1 不同脱硫剂的脱硫效果.....	69
3.5.2 铁水预脱硫的经济效益.....	72
4 铁水预脱磷处理	75
4.1 铁水预脱磷处理的产生与发展.....	75
4.2 脱磷剂.....	76
4.2.1 苏打 (Na ₂ CO ₃) 系脱磷剂.....	76
4.2.2 石灰 (CaO) 系脱磷剂.....	76
4.3 铁水脱磷基本原理.....	77
4.3.1 碱性氧化物脱磷.....	77

4.3.2 碱性渣脱磷	78
4.4 铁水预脱磷处理的方法及效果	79
4.4.1 喷吹法	79
4.4.2 典型的铁水脱磷工艺方法	80
4.4.3 影响脱磷效果的主要因素	83
4.5 铁水同时脱磷、脱硫	85
4.5.1 铁水同时脱磷、脱硫的基本原理	85
4.5.2 铁水同时脱磷、脱硫方法	88
4.5.3 铁水预脱磷、脱硫效果	91
4.6 脱磷铁水的应用效果	92
4.7 铁水预脱磷、脱硫处理操作	94
5 钢液的真空处理	96
5.1 真空冶金原理	96
5.1.1 真空冶金的一般规律——压力对化学平衡的影响	96
5.1.2 真空下碳还原固体金属氧化物能力的提高	97
5.1.3 钢液的真空脱氧	97
5.1.4 钢液的真空脱气	101
5.2 钢液滴流脱气法	105
5.3 真空提升脱气法(DH法)	106
5.3.1 DH法脱气工作原理	107
5.3.2 DH法的主要优缺点	107
5.3.3 DH法的操作工艺	107
5.3.4 DH法主要工艺参数的选定	107
5.3.5 DH法的实际效果	108
5.4 真空循环脱气法(RH法)	109
5.4.1 RH法的产生及发展概况	109
5.4.2 RH法的设备	110
5.4.3 RH法的循环脱气工作原理和冶金功能	115
5.4.4 RH法主要工艺参数的选定	119
5.4.5 RH法精炼工艺技术	123
5.4.6 RH法的冶金效果	137
5.4.7 RH法的发展	139
5.5 钢包吹氩	145
5.5.1 钢包吹氩原理	146

5.5.2 吹氩工艺参数的选定	148
5.6 真空吹氩脱气法(VD法)	149
5.6.1 VD法的方法特点	149
5.6.2 VD法的装置及工艺特点	150
5.6.3 VD法的精炼效果	151
5.7 CAS-OB法和IR-UT法	151
5.7.1 CAS-OB法	151
5.7.2 IR-UT法	159
5.7.3 CAS-OB法和IR-UT法的优点及精炼效果	161
6 钢包炉精炼法	163
6.1 钢包加热电磁搅拌精炼法(ASEA-SKF法)	164
6.1.1 ASEA-SKF炉的设备组成	164
6.1.2 ASEA-SKF法精炼操作工艺	167
6.1.3 ASEA-SKF法的优点和精炼效果	170
6.2 真空电弧加热脱气法(VAD法)	171
6.2.1 VAD法的主要设备	171
6.2.2 VAD法精炼工艺	174
6.2.3 VAD法的特点	176
6.3 钢包炉精炼法(LF(V)法)	177
6.3.1 LF炉的设备组成	177
6.3.2 LF法的功能及特点	180
6.3.3 LF炉精炼工艺技术	181
6.3.4 LFV法	189
7 高铬低碳钢的炉外精炼	192
7.1 高铬钢液脱碳的热力学及动力学	192
7.1.1 高铬钢液脱碳的热力学	192
7.1.2 富铬渣的还原	193
7.1.3 高铬钢液脱碳的动力学	194
7.2 真空吹氧脱碳法(VOD法)	196
7.2.1 VOD的产生	196
7.2.2 VOD法设备及其特点	197
7.2.3 VOD法的基本功能	200
7.2.4 VOD法精炼工艺	202

7.2.5 VOD 法的发展	206
7.3 氩氧精炼法 (AOD 法)	206
7.3.1 AOD 法的产生及发展概况	206
7.3.2 AOD 炉的设备及其特点	207
7.3.3 AOD 法的基本操作工艺	209
7.3.4 AOD 法的特点	212
7.3.5 AOD 法的精炼效果	213
8 喷射冶金和喂线法	214
8.1 喷射冶金	214
8.1.1 喷射冶金的产生	214
8.1.2 喷射冶金系统的设备组成	215
8.1.3 典型的喷粉系统	216
8.1.4 喷射冶金的特点	217
8.1.5 喷射冶金的应用	218
8.1.6 喷射冶金原理	218
8.1.7 喷吹工艺参数	222
8.1.8 喷射冶金效果	225
8.1.9 喷粉处理站和喷粉罐的设计	226
8.2 喂线法 (WF 法)	227
8.2.1 喂线法的产生	227
8.2.2 喂线机和包芯线	228
8.2.3 喂线法的理论基础及工艺	230
8.2.4 喂线工艺方法	232
8.2.5 喂线法特点	234
8.2.6 冶金效果	234
8.2.7 非金属夹杂物的变性处理	235
9 钢包热工分析及相关技术	239
9.1 钢包的工况分析	239
9.1.1 急冷急热工况	239
9.1.2 钢水 (LF) 精炼条件下的钢包工况	239
9.1.3 钢包中温度不均的工况	240
9.2 钢包工况改善的原则	241
9.3 薄板坯、高速连铸、连铸连轧工艺条件下对钢包工况的新要求	241

9.4 炼钢车间内钢包烘烤的重要作用	242
9.5 高温低氧空气燃烧 HTAC 技术简介及应用	242
9.5.1 工业燃烧的基本概念和目的	243
9.5.2 燃烧与余热再生技术的理论研究	243
9.5.3 高温低氧空气燃烧技术的应用和发展	244
9.5.4 蜂窝体 (honey comb) 换热特性	245
9.5.5 高温低氧空气燃烧 HTAC 技术初始应用于钢包	246
9.6 普通的烤包装置、烘烤参数和典型的烘烤曲线	246
9.7 燃气-空气双预热高效钢包烘烤——HTAC 技术	247
9.7.1 转炉煤气的高效燃烧技术 HTAC 及其工作原理	247
9.7.2 燃气-空气双预热高效钢包烘烤基本设计原则	248
9.7.3 烘烤装置的车间布置原则	249
9.7.4 主要工艺参数选择 (150t 钢包)	249
9.8 HTAC 技术烘烤的火焰特征和工艺技术效果	250
9.8.1 火焰特征	250
9.8.2 工艺技术效果	251
10 炉外精炼在现代钢铁生产流程中的应用	254
10.1 现代钢铁生产工艺流程	254
10.1.1 现代氧气转炉炼钢车间	255
10.1.2 现代电弧炉炼钢车间	255
10.1.3 典型精炼方式特点比较	255
10.1.4 精炼方式的选择	256
10.2 几种典型的炼钢生产工艺流程	257
10.2.1 典型转炉炼钢生产工艺流程	257
10.2.2 典型电炉炼钢生产工艺流程	257
参考文献	259

1 铁水预处理与钢水炉外精炼概述

铁水预处理与钢水炉外精炼是 20 世纪 50 年代以来迅速发展起来的两项重要的钢铁冶炼工艺技术。铁水预处理包括高炉铁水的炉外预脱硫、脱硅、脱磷处理，为转炉炼钢提供优质铁水；经过转炉初炼的钢液再进入钢包或专用容器内进一步精炼（称炉外精炼或二次冶金），调整和均匀钢液的温度和成分，去除钢中的气体、有害元素和非金属夹杂物等，达到洁净钢液、提高钢液质量的目的。铁水预处理与钢水炉外精炼最初仅仅是为了解决普通炼钢炉不能顺利冶炼高质量品种钢的冶炼问题，随着炉外精炼技术的不断发展，已逐渐发展成为现代化钢铁生产工艺流程中两个不可缺少的工艺环节。它是提高钢材产品质量和使用性能，扩大冶炼品种的重要措施，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。

铁水预处理与钢水炉外精炼技术产生于 19 世纪末期，发展于 20 世纪 50 年代。由于各种钢材的性能对钢的成分以及纯净度的要求不同，研究发明了各种不同功能的炉外精炼方法。70 年代以后随着连铸技术的发展，铁水预处理与钢水炉外精炼技术也得到了迅速发展，并且促进了连铸生产的优化。它不仅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作用，成为连接炼钢与连铸的桥梁，用以协调炼钢与连铸生产的重要手段，为连铸提供准确的目标成分和温度的钢液。

20 世纪 80 年代以后，工业技术的发展需要更多超低碳，超深冲，超低硫、磷的优质钢材。而传统的冶炼工艺，难以生产出工业发展需要的优质钢材。为适应对钢材质量要求的不断提高，又促进了炉外精炼技术的发展，在原有设备的基础上开发出许多新的冶金功能，形成了真空和非真空两大系列不同功能的系统技术。铁水预处理技术也得到了迅速发展，发展了脱硫、脱硅和脱磷的三脱处理工艺。转炉实现了少渣冶炼操作，降低了石灰和钢铁料的消耗。铁水预处理、转炉和炉外精炼结合成连续冶炼工序，针对不同的钢种，将各种工艺优化组合成最佳的冶炼工艺，便可达到优质、高效、低耗的冶炼目的。

1.1 铁水预处理概述

铁水预处理是指铁水进入炼钢炉之前所进行的某种处理，可分为普通铁水的脱硫、脱硅和脱磷预处理（简称铁水三脱处理）和特殊铁水的提钒、提铌、提钨预处理（简称铁水三提处理），同时提取其他虽不贵重但在经济上对综合利用有利的元素。

铁水预处理技术始于铁水炉外预脱硫处理，作为避免出现号外铁水的补救措施而用于生产。1877 年伊顿（A. E. Eaton）等人将之用于处理不合格生铁。铁水预脱硅、脱磷处理则始于 1897 年，英国人赛尔（Thiel）等人用一座平炉进行预处理铁水，脱硅、脱磷后在另一座平炉中炼钢，比两座平炉同时炼钢效率成倍提高。到 20 世纪初，人们主要致力于炼钢工艺的开拓和改进，铁水预处理技术发展曾一度迟缓。直至 20 世纪 60 年代，随着炼

钢工艺的不断完善和材料工业对钢铁产品质量的严格要求,铁水预处理得到了迅速发展,逐步形成为钢铁冶金的必要环节;与此同时,不断发展了铁水预处理过程提钒、提铌、提钨、提铬等技术,使铁水预处理成为钢铁冶金中综合利用的一项技术。

铁水预处理技术的日臻成熟,已成为现代化钢铁企业生产流程的重要环节。近年来,铁水三脱处理在日本研究得较多,已在一些钢厂推广应用,尤其是铁水预脱硫处理已在工业发达国家的钢厂得到较普遍的推广应用。我国的宝钢、武钢、鞍钢、攀钢、唐钢、邯钢等也都采用了铁水预脱硫处理,宝钢和太钢还采用了铁水三脱处理。特殊铁水的预处理正在结合我国攀钢、包钢、承钢等共生矿资源综合利用开展开发性的研究,以提取钒、铌、钨为主要目的,综合铁水脱硫、脱硅和脱磷。下面主要讨论铁水三脱预处理。

现代工业的发展和科学技术的进步,对钢材的质量和实用性能要求越来越高,要求钢的化学成分控制在较窄的范围内。石油及天然气输送管线、汽车工业要求钢材具有高强度、低温韧性、良好的冷成型和焊接性能,以及为改善板材厚度方向的性能,对低硫钢的要求日趋迫切,如火车时速已由 100km/h 提高到 200km/h 以上,要求钢轨能承受高速冲击和车轮磨滚,车体结构轻而牢固,汽车的轻便高速化要求有高深冲性的车壳钢板和高强度的传动零件及车架;深层采油深达 5000m 以上,要求高强度耐冲击扭震的钻杆和油井管,如果一根管断裂,就会造成钻井报废,损失上百万元以上; $(40 \sim 100) \times 10^4 \text{ kW}$ 的火力发电机组,要求经受蒸汽温度 625℃ 和压力 18MPa 的锅炉管和磁感应强度高而铁芯损失少的电机硅钢片;长跨度大桥要求易焊耐蚀并有 185MPa 的高强厚板;大型化工和炼油工业要求耐蚀耐压钢材;仪表电机工业的发展要求光洁而高强度钢和易切削钢;处于狂风巨浪的海上采油平台,载重 30 万 ~ 50 万 t 的货轮以及超高层建筑,都对钢材性能提出了严格的要求。而原子能工业、导弹和军工等对钢材性能及质量要求更高。

用户对钢材质量的要求,其主要指标是钢材纯净度、均匀性能和精度,这是稳定钢材质量的重要方面。为了满足市场需求,世界各国钢铁工业都在不遗余力地通过降低钢中杂质特别是磷、硫含量的途径来提高钢材质量,而各种炉外处理技术则是获得高纯净度、均匀性能和高精度钢材的重要措施,关键环节是选择相应的精炼措施达到一定的冶金目的,保证用户的需要。

传统的转炉生产工艺流程已逐渐被现代化钢铁生产工艺流程所代替,即高炉炼铁→铁水预处理→转炉冶炼→炉外精炼→连铸连轧或连铸→铸坯热送直接轧制,这已成为国内外大型钢铁企业技术改造后的普遍模式。目前,铁水预处理已被公认为高炉-转炉-连铸工艺流程降低钢中杂质含量的最佳工艺,是改善和提高转炉操作的重要手段之一。

为了减轻转炉冶炼负担,长期以来对铁水预脱硫处理开展了大量研究并得到了迅速发展。20 世纪 70 年代后期,由于超低硫、磷钢需求量的增长,又在铁水预脱硫处理基础上开发成功铁水预脱磷处理技术。因为脱磷必须先脱硅,这样铁水的三脱处理技术与旨在分离转炉功能的目标相结合,导致产生了多种认为是最佳工艺流程的生产模式。

铁水预处理和炉外精炼技术的发展,使炼钢炉的前后工序整合成一个整体工艺,一些新的联合前后工序的最佳流程的出现使冶炼效益进一步提高,钢质量得到进一步改善,能耗和成本进一步降低,从而将转炉炼钢推进到一个全新的发展时期。

转炉采用低硫、低磷、低硅铁水冶炼,能给转炉带来一系列好处:减少造渣材料(石灰等)的消耗,吹炼过程中产生的渣量少。因此,吹炼过程中炉渣外溢和喷溅减少,

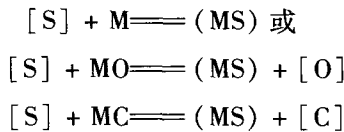
炉渣对炉衬的侵蚀减少，炉龄显著提高，并且提高了转炉生产率、钢液收得率和钢液余锰量（由炉渣带走的铁和锰量减少），转炉的吹炼时间缩短，生产率提高，钢水质量提高。

铁水预处理目的针对炼钢而言，主要是使其中硫、磷、硅含量降低到所要求范围，以简化炼钢过程，提高钢的质量。铁水预处理按需要可以分别在炼铁工序和炼钢工序的设备内，如铁水沟、鱼雷罐、铁水包或专用冶金炉内进行，而对回收某些有益成分的处理则有铁水提钒、提铌、提钨和提铬等，对这些特殊铁水，通过预处理可有效地回收利用有益元素，实现综合利用。

1.1.1 铁水预处理原理及方法

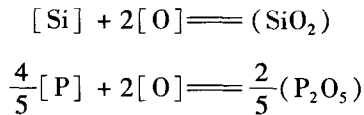
铁水预处理是在原则上不外加热源的情况下，利用处理剂中活性物质与铁水中待脱除元素进行快速反应，形成稳定的渣相而和铁水分离的过程。

铁水预处理的热力学过程属于钢铁精炼反应过程。铁水预处理脱硫反应为：



式中，M 指金属脱硫剂中金属元素（如 Mg, Ca, Ca-Si）；MO 为金属氧化物脱硫剂（如 CaO）；MC 为金属碳化物脱硫剂（如 CaC₂）。

铁水预处理脱硅、脱磷反应为：



概括起来，铁水预处理过程受温度、气氛（即氧势）、被脱除（或提取）元素在渣铁相间分配率以及在铁相中的活度影响。

铁水预处理属瞬时快速反应过程，反应的动力学条件尤其需要引起重视，以利于脱除反应的快速进行，满足炼钢对铁水成分的要求。

铁水预处理工艺方法有：铁水沟连续处理法、铁水罐喷吹法、机械搅拌法、专用炉法、摇包法、转鼓法、钟罩法以及喷雾法等。

(1) 铁水沟连续处理法。一种最简单的铁水预处理方法，它又分投入法和喷吹法两类。前者只需将预处理剂（铁水脱硫剂、脱硅剂或脱磷剂）铺撒在铁水沟适当位置，预处理剂即随铁流而下，靠铁流的搅动和冲击使预处理剂和铁液发生反应而脱除有害杂质元素；后者则需在铁水沟上设置喷吹搅拌枪或喷粉枪，使预处理剂经喷吹搅拌强化与铁水的接触。

(2) 铁水罐喷吹法。利用喷吹系统将预处理剂经过插入铁水罐内的喷枪喷入铁水内，使其与铁水充分反应，达到脱除（或提取）有关元素，净化铁水的目的。铁水罐有鱼雷罐和敞口罐之分，喷枪除喷粉枪外，有时设喷氧或空气的副枪。

(3) 机械搅拌法。将置于铁水表面的预处理剂通过搅拌桨的搅动使其与铁水有效接触的一种高效方法，这种方法多用于深度脱硫。

(4) 专用炉法。专用炉亦称 H 炉，是一种容量宽松易于控制的铁水预处理专用设备，

亦有将备用炼钢转炉做专用炉的。

1.1.2 中国铁水预处理技术的产生与发展

1.1.2.1 铁水预脱硫技术的产生与发展

由于铁水预处理在技术上先进和经济上合理,逐渐演变成为当今用于扩大原材料来源、提高钢材质量、扩大品种和提高技术经济指标的必要手段。

我国的一些大、中型钢铁企业和铁水含硫比较高的地区都开展了铁水预脱硫处理。早在 20 世纪 60 年代,为了解决铁水硫高给工艺与钢水质量带来的问题,鞍钢、首钢、上钢、重钢等钢铁企业就试验在高炉铁水罐和化铁炉前炉内进行苏打 (Na_2CO_3) 脱硫。但是,因为环境污染严重,脱硫效率极不稳定,一直未成为正常的生产手段。到 70 年代末 80 年代初,武钢、宝钢、太钢等都分别引进了新日铁 KR 法,新日铁鱼雷罐喷吹法脱硫和三脱及住友金属铁水罐三脱技术。天津钢厂化铁炉铁水包脱硫技术和包钢铁水罐三脱技术的研究开发取得了成果,并用于生产。宣化钢厂、酒泉钢厂、冷水江钢厂也进行了脱硫技术的研究。90 年代初,为了满足连铸生产的要求,迅速地实现了铁水脱硫研究成果的产业化。这个时期,无论是引进技术还是自行研究开发的技术,脱硫剂都是以 CaO 为基本原料的,如 $\text{CaO} + \text{CaF}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO} + \text{CaC}_2$, $\text{CaO} + \text{CaC}_2 + \text{CaF}_2$ 等几种混合脱硫剂,除 KR 法以外,均以喷吹方式加入鱼雷罐或铁水包中。

在发展铁水脱硫的同时,脱硫剂的开发也逐渐深入。以 CaO 粉为例,一开始并未对石灰粉进行钝化处理,石灰粉运输和储存过程中结团的现象,妨碍了生产也造成了浪费。80 年代中期则基本解决了石灰表面钝化处理的问题。湖南、上海、黑龙江等地先后建设了专业化的石灰粉剂制造厂,一般包装后储存半年以上不水化,不结团。与此同时,石灰活性度也大大提高,基本解决了远距离运输,供各厂生产的要求。另外,铁水扒渣设备也逐渐完善,现在已能生产各种型号的气动和液压扒渣机。在 20 世纪 80 年代末 90 年代初,还研究过真空吸渣技术与装备,但因 CaO 基脱硫剂产生的脱硫渣的流动性差,无法正常使用。

90 年代中期开始,鞍钢、天钢等企业和一些高校、研究机关开始研究以表面钝化的镁粒为基本原料的镁基脱硫剂,并进行了实验,取得初步的成效。由于中国是镁金属最大的生产和出口国,这些自行开发的镁基脱硫技术,全部采用了自己研究的金属镁粒加工(各种形状与粒度)、钝化的工艺与自行配比的镁基脱硫剂,在国内学术会议和期刊杂志上也发表了一系列镁基脱硫应用原理和效果的论文。马钢二钢还与华东冶金学院一起,从 1999 年开始,研究实验含金属镁粒 40% 和 30% 的混合粉剂制成的包芯线,喂入 30t 铁水包,加上液氮搅拌,进行铁水脱硫的技术,目的在于开发一种设备投资少,操作与调整简便,反应平稳,适合小容量铁水包的镁基脱硫新途径。

由于认识到了镁基脱硫剂进行铁水脱硫在增加冶金效果、减少金属损失和处理温降、提高生产效率方面的优势,中国钢铁企业已逐渐把镁基脱硫剂列为铁水脱硫的首选材料。

1998 年宝钢从美国 ESM 公司引进的镁基脱硫技术与装备投入使用,随后本钢、马钢、梅钢、包钢、武钢先后引进了美国罗斯伯格公司与荷兰霍戈文公司联合开发的镁基铁水脱硫技术和装备,使中国镁基铁水脱硫剂的应用迅速增加。进入 21 世纪后,美国 ESM 公司的复合喷吹技术又分别在鞍钢及包钢确立了用户,德国阿尔麦特 (ALMAMET) 公司

也开始在中国确定了与马钢、济钢、武钢、本钢等企业提供镁基脱硫剂技术进行合作的意向。另外，从2001年开始中乌合资的戴斯玛克公司，全面在中国采用纯镁脱硫技术和装备。目前，武钢一炼钢厂、唐钢一炼钢厂和邯钢三炼钢厂等已全面采用纯镁脱硫的技术与装备，首钢等企业也与该公司签订了合同或意向。由上述情况可见，我国从20世纪90年代中期以来，出自对降低成本、简化工艺、提高生产效率和冶金效果的迫切要求，已掀起了一股镁基脱硫应用的潮流，推动着铁水脱硫的迅速发展。

早期用于转炉铁水预处理的设备，主要采用容器运动法（例如转鼓法、摇包法），继而发展到搅拌法（例如KR法）。70年代以后，由于喷射冶金技术的发展，喷射法被引入到铁水预处理。喷射法设备简单、投资少，可以适应较大范围的处理罐容，逐渐发展成为预处理的主流处理方法。

1.1.2.2 铁水脱硅、脱磷技术的产生与发展

铁水预脱硅处理是基于铁水预脱磷而发展起来的。由于铁水中硅的氧势比磷的氧势低得多，当脱磷过程中加入氧化剂后，硅与氧的结合能力远远大于磷与氧的结合能力，所以硅比磷优先氧化，这样形成的 SiO_2 势必会大大降低渣的碱度。因此，为了减少脱磷剂用量、提高脱磷效率，必须先将铁水硅氧化到一定程度，为此开发了铁水预脱硅工艺。石灰系熔剂进行脱磷脱硫试验得到的脱磷剂用量与处理前铁水含 $[\text{Si}]$ 量的关系表明：当铁水 $[\text{Si}]$ 大于0.15%时，脱磷剂用量急剧增大。因此，脱磷处理前需将铁水 $[\text{Si}]$ 量脱至0.15%左右。铁水脱硅以后转炉炼钢工艺也进一步稳定。

另一方面，虽然转炉本身已经取得了明显的技术进步，但仅仅靠转炉冶炼来满足高质量和低成本的要求，显然是不可能的，这就要求将转炉的功能加以分散，将其某些功能（如脱磷、脱硫）转移到转炉以外。例如，铁水预处理工艺、钢包炉外精炼工艺，这也是当前铁水预脱硅处理工艺得以发展的重要原因。因此，把高炉低硅冶炼及铁水脱硅作为一种手段加以研究。

铁水预脱磷处理在平炉年代开展研究得比较多，由于氧气顶吹转炉炼钢法出现以后，使脱磷变得比较容易，铁水预脱磷处理研究停止。近年来，考虑到转炉冶炼的钢种发生了较大的变化，由过去冶炼低碳钢、低合金钢为主向高附加值的中、高碳钢，品种钢，纯净钢发展，另外转炉采用的供氧强度提高，使得吹氧时间缩短，因此对铁水中 $[\text{P}]$ 提出更严格的要求，考虑到铁水脱磷的整个经济效益，铁水预脱磷又重新活跃起来。

铁水预脱磷处理是从20世纪80年代初冶炼低磷钢（ P 不大于0.01%）的需要和由于转炉顶底复吹冶炼高碳钢困难发展起来的。现在，在一些工业发达国家铁水预脱磷已发展成为转炉少渣或无渣冶炼法生产普通钢所必需的流程。

为了实现少渣炼钢，适应一些钢种生产的要求，全面优化转炉生产，降低综合成本，已有越来越多的企业，在考虑铁水脱硫外的铁水脱硅、脱磷问题。前面提到的我国自行开发或引进铁水三脱技术，因脱硅、脱磷处理周期长、喷溅大等问题，一直未能纳入正常生产。20世纪90年代中期以后，除继续优化已开发和引进的“三脱”技术外，又有了一些新的发展。如宝钢、济钢在高炉出铁沟脱硅已取得了应用性成果，还在包钢进行了SRP转炉脱磷的大量实验，取得了一定的成果。又如本世纪初开始，一些企业在关注转炉铁水三脱技术的应用，力求实现更高的生产效率和更佳的冶金效果，配加转炉渣脱磷，力图降低成本的研究工作也取得了进展。在20世纪70年代中后期，首钢还实验用纯氧底吹转炉

处理高磷铁水，脱除铁水中磷并富集供化肥行业应用，还试验氧气底吹转炉，提取铁水中的铌等工作，攀钢更是进行铁水预处理，综合利用铁水中钒、钛资源，脱硫、脱磷等实验，取得了良好的效果。

目前，铁水预处理技术已经发展到比较成熟的阶段，我国各种不同的铁水预处理方法都已达到了一定的水平。如铁水脱硫，从初始硫 0.025% ~ 0.060% 脱到 0.01% 以下，甚至脱到 0.002% 都已很普遍。以 0.03% 脱到 0.008% 为例，CaO 消耗小于 7kg/t；用 80% CaO、20% Mg 粒复合喷吹，消耗小于 2kg/t；使用纯镁则小于 0.26kg/t，温降小于 20℃。但在诸如熔剂、工艺和设备、耐火材料、余能回收和利用等方面依然有待进一步完善和发展。总的来看，我国铁水预处理的发展虽然缓慢，但处理的绝对量增长很快，而且取得了全面的进展，已为下一步的发展打好了基础。中国铁水预处理的发展见表 1-1。

表 1-1 中国铁水预处理的发展

年 份	1990	1995	2000	2001	2005
铁水预处理比/%	1.82	17	25.3	26.1	50
铁水预处理量/万 t	69	1016	2532	3200	10155

1.1.2.3 我国铁水预处理技术的发展特点

从我国铁水预处理的发展过程可见，我国铁水预处理起步较早，但发展较慢，主要是从 20 世纪 90 年代中期开始才得到比较普遍的应用，但与主要产钢国家相比，仍存在普及率不高、预处理比较低、“三脱”技术还不成熟等一系列问题，并已影响到了钢铁工业清洁生产的发展。

我国铁水预处理的发展主要有以下特点：

(1) 由于我国大、中、小型高炉和转炉并存，小容量铁水包（不大于 50t）占相当的比例，因而铁水预处理的温度将成为一个重要的问题。20 世纪 80 年代，一些高校曾研究具有加热功能的铁水脱硫技术，但未能产业化。另外，小铁水包给镁基脱硫剂的应用也带来困难，这是发展铁水预处理技术时必须考虑的一个特点。

(2) 中国铁水预处理几乎包括了世界上各种工艺与装备，这种多种类型处理方法并存，满足不同层次需要的铁水预处理生产方式，在相当长的一段时间的发展中还能继续保持下去。但还是由于各种方法的比较，已明显地表现出了冶金效果、温降、铁损、生产效率及最终反映在成本上的差异，可以肯定，在现有条件下，将会有越来越多的大中型钢铁企业选择镁基脱硫的发展方向。以 CaO 基脱硫剂为主的脱硫工艺中，近几年的优化成果将改变长期由武钢二炼钢厂一家使用的局面，在一些中、小型企业中推广应用。CaC₂ 基脱硫剂由于成本高，运输和使用中需建设复杂的安全系统，正逐渐失去它的重要地位。另外，大型企业中将逐渐改变在鱼雷罐中进行铁水预处理的思路，主要转向铁水包脱硫或专用转炉脱硫，其他一些有利于资源综合利用的方法，也将继续保持自己的特点，进一步优化。

(3) 我国还加快铁水预处理工艺与装备的优化，并采用科研与生产相结合，国内外相结合的办法，继续开发新的铁水预处理工艺和装备。发展的重点是各类铁水“三脱”技术，其中转炉“三脱”预处理，高炉出铁沟脱硅“三脱”技术的研究最受关注。另外，铁水预处理计算机自动控制，在线动态检测和监控水平的提高也已成为重要的目标。