

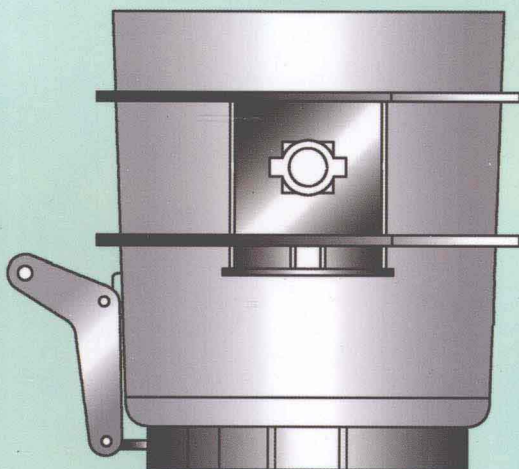


人力资源和社会保障部职业能力建设司推荐
冶金行业职业教育培训规划教材

电炉钢水的 炉外精炼技术

DIANLU GANGSHUI DE
LUWAI JINGLIAN JISHU

俞海明 主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

人力资源和社会保障部职业能力建设司推荐
冶金行业职业教育培训规划教材

电炉钢水的炉外精炼技术

俞海明 主编

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2010

内 容 提 要

本书为冶金行业职业技能培训教材,根据冶金企业的生产实际和岗位技能要求编写,并经人力资源和社会保障部职业培训教材工作委员会办公室专家评审通过。

本书介绍了炉外精炼原理、炉外精炼设备与耐火材料、电炉炼钢流程中的各种炉外精炼方法的操作工艺(LF、VD、RH、VOD、VAD、AOD)、精炼过程中夹杂物的变性与去除以及部分电炉钢的冶炼和精炼工艺。本书以作者亲身操作和相关理论为基础,详实地介绍了电炉炼钢流程中的炉外精炼操作技术以及高质量电炉钢的冶炼和精炼工艺。

本书可以作为钢铁企业职工的培训教材,可以作为中高职院校的教材或者学生熟悉和了解现场的参考书,也可以作为工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电炉钢水的炉外精炼技术/俞海明主编. —北京:冶金工业出版社, 2010. 8

冶金行业职业教育培训规划教材

ISBN 978-7-5024-5219-3

I. ①电… II. ①俞… III. ①钢水—炉外精炼—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①TF769

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 053056 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 yicbs@cnmip.com.cn

责任编辑 刘小峰 美术编辑 张媛媛 版式设计 孙跃红

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5219-3

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

2010 年 8 月第 1 版, 2010 年 8 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 18.25 印张; 484 千字; 276 页

49.00 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)

序

吴溪淳

改革开放以来，我国经济和社会发展取得了辉煌成就，冶金工业实现了持续、快速、健康发展，钢产量已连续数年位居世界首位。这期间凝结着冶金行业广大职工的智慧 and 心血，包含着千千万万产业工人的汗水和辛劳。实践证明，人才是兴国之本、富民之基和发展之源，是科技创新、经济发展和社会进步的探索者、实践者和推动者。冶金行业中的高技能人才是推动技术创新、实现科技成果转化不可缺少的重要力量，其数量能否迅速增长、素质能否不断提高，关系到冶金行业核心竞争力的强弱。同时，冶金行业作为国家基础产业，拥有数百万从业人员，其综合素质关系到我国产业工人队伍整体素质，关系到工人阶级自身先进性在新的历史条件下的巩固和发展，直接关系到我国综合国力能否不断增强。

强化职业技能培训工作，提高企业核心竞争力，是国民经济可持续发展的重要保障，党中央和国务院给予了高度重视，明确提出人才立国的发展战略。结合《职业教育法》的颁布实施，职业教育工作已出现长期稳定发展的新局面。作为行业职业教育的基础，教材建设工作也应认真贯彻落实科学发展观，坚持职业教育面向人人、面向社会的发展方向和以服务为宗旨、以就业为导向的发展方针，适时扩大编者队伍，优化配置教材选题，不断提高编写质量，为冶金行业的现代化建设打下坚实的基础。

为了搞好冶金行业的职业技能培训工作，冶金工业出版社在人力资源和社会保障部职业能力建设司和中国钢铁工业协会组织人事部的指导下，同河北工业职业技术学院、昆明冶金高等专科学校、吉林电子信息职业技术学院、山西工程职业技术学院、山东工业职业学院、济钢集团总公司、中国职工教育和职业培训协会冶金分会、中国钢协职业培训中心等单位密切协作，联合有关冶金企业和职业技术学院，编写了这套冶金行业职业教育培训规划教材，并经人力资源和社会保障部职业培训教材工作委员会组织专家评审通过，由人力资源和社会保障部职业能力建设司给予推荐。有关学校、企业的各级领导和编写人员在时间紧、任务重的情况下，克服困难，辛勤工作，在相关科研院所的工程技

术人员的积极参与和大力支持下，出色地完成了前期工作，为冶金行业的职业技能培训工作的顺利进行，打下了坚实的基础。相信这套教材的出版，将为冶金企业生产一线人员理论水平、操作水平和管理水平的进一步提高，企业核心竞争力的不断增强，起到积极的推进作用。

随着近年来冶金行业的高速发展，职业技能培训工作也取得了巨大的成绩，绝大多数企业建立了完善的职工教育培训体系，职工素质不断提高，为我国冶金行业的发展提供了强大的人力资源支持。今后培训工作的重点，应继续注重职业技能培训工作者队伍的建设，丰富教材品种，加强对高技能人才的培养，进一步强化岗前培训，深化企业间、国际间的合作，开辟冶金行业职业培训工作的新局面。

展望未来，任重而道远。希望各冶金企业与相关院校、出版部门进一步开拓思路，加强合作，全面提升从业人员的素质，要在冶金企业的职工队伍中培养一批刻苦学习、岗位成才的带头人，培养一批推动技术创新、实现科技成果转化的带头人，培养一批提高生产效率、提升产品质量的带头人；不断创新，不断发展，力争使我国冶金行业职业技能培训工作跨上一个新台阶，为冶金行业持续、稳定、健康发展，做出新的贡献！

前言

本书是按照人力资源和社会保障部的规划，得到冶金工业出版社的支持，参照行业职业技能标准和职业技能鉴定规范，根据企业的生产实际和岗位技能要求编写的。书稿经人力资源和社会保障部职业培训教材工作委员会办公室组织专家评审通过，由人力资源和社会保障部培训就业司推荐作为行业职业技能培训教材。

本书可以作为钢铁企业职工的培训教材，可以作为中高职院校的教材或者学生熟悉和了解现场的参考书，也可以作为工程技术人员的参考资料。书中介绍的各项操作方法和技术，以笔者的现场操作和切身体会为基础，大多曾在《钢铁》、《特殊钢》、《炼钢》、《工业加热》、《江苏冶金》等期刊杂志上发表。与作者主编的《现代电炉炼钢操作》的目的—致，本书注重改进电炉炼钢生产操作和提高电炉钢质量，希望这两本书能够为我国现代电炉炼钢生产有所帮助。

笔者主编的这两本书均参考了大量文献，这些参考文献给予笔者很大启发和帮助。在写作过程中，《特殊钢》杂志社的汪学瑶老师将自己的研究成果无私提供给笔者参考，《工业加热》杂志社也给予了笔者鼓励和支持。全书草成以后，冶金工业出版社提出了许多具体的修改意见，使得全书的内容焕然一新，更具有可读性。冶金工业出版社的严谨、负责、专业的作风，给笔者以深深的感动，帮助笔者少走了许多弯路。

在本书出版之际，笔者感谢教育和培养我、支持和鼓励我的师长、同事、朋友和家人，感谢教我炼钢的启蒙师傅张谊，感谢八钢——这个具有优良传统的企业，激励了我，给了我许多学习的机会。感谢参考文献的作者，感谢为本书编写提供资料和帮助的人们。

由于笔者学识所限，书中不足之处，真诚希望读者给予批评指正。

俞海明
2009年12月

目 录

1 炉外精炼原理	1
1.1 非真空精炼原理	2
1.1.1 搅拌	2
1.1.2 加热	8
1.1.3 精炼炉熔渣的泡沫化	11
1.1.4 钢液的氩氧吹炼	14
1.1.5 CLU 法	16
1.1.6 非真空条件下的脱氧	17
1.2 真空精炼原理	22
1.2.1 真空脱碳	22
1.2.2 真空脱气和吹氩脱气	24
1.2.3 真空下钢中元素的挥发	31
1.2.4 真空下耐火材料的分解与还原	34
2 炉外精炼设备和耐火材料	36
2.1 LF 设备和耐火材料	36
2.1.1 LF 机械设备	36
2.1.2 钢包炉的连锁关系	44
2.1.3 自动控制系统	44
2.1.4 LF 用耐火材料	45
2.2 VD 设备	81
2.2.1 真空室	82
2.2.2 真空泵	82
2.2.3 其他设备	84
2.3 RH 设备和耐火材料	84
2.3.1 RH 概述	84
2.3.2 RH 设备简介	85
2.3.3 RH 用耐火材料	88
2.4 AOD 主要设备和耐火材料	93
2.4.1 AOD 主要设备与结构	93
2.4.2 AOD 用耐火材料及寿命	94
2.4.3 低碳镁炭砖在 AOD 上的应用	95
2.5 VOD 设备和钢包耐火材料	97
2.5.1 VOD 设备	97
2.5.2 VOD 钢包耐火材料	101

3 LF 精炼操作工艺	102
3.1 LF 接钢准备	102
3.1.1 钢包材质的选择	102
3.1.2 钢包运行情况的选择	102
3.1.3 钢包的烘烤和引流砂的填充	103
3.1.4 电炉出钢过程中钢包情况的监控	103
3.2 钢包吹氩	103
3.2.1 吹氩工艺参数对精炼效果的影响	104
3.2.2 钢液流速与吹氩量的确定	105
3.2.3 钢包吹氩操作	105
3.2.4 常见吹氩不通的处理与应对方法	107
3.3 LF 温度控制	111
3.3.1 LF 温度控制基础知识	111
3.3.2 钢包炉能量平衡计算	112
3.3.3 实际生产中的温度控制	113
3.3.4 温度回归关系的建立	115
3.4 LF 脱氧	115
3.4.1 不同脱氧剂脱氧能力的比较	115
3.4.2 脱氧速度的控制	117
3.4.3 温度对脱氧速度的影响	118
3.5 LF 造渣	119
3.5.1 炉渣成分的选择和控制	119
3.5.2 LF 造渣基础知识和操作	125
3.6 LF 脱硫	132
3.6.1 脱硫反应	132
3.6.2 脱硫速度和脱硫率	135
3.6.3 LF 脱硫影响因素分析	136
3.6.4 70t 电炉—LF 生产线的脱硫操作和工艺改进	138
3.7 LF 成分控制	141
3.8 LF 精炼操作实例	142
3.8.1 LF 精炼准备	142
3.8.2 LF 精炼操作	144
3.9 LF 常见事故的预防与处理	152
3.9.1 LF 常见事故的处理	152
3.9.2 LF 常见事故案例分析	153
4 VD 处理操作工艺	158
4.1 VD 处理前的要求	158
4.2 VD 处理操作	158
4.2.1 真空度的时间控制	158
4.2.2 处理过程的吹氩控制	159

4.2.3 温度控制	159
4.2.4 成分控制	160
4.2.5 真空设备的操作	160
4.2.6 蓄热器的操作	161
4.2.7 脱氢、脱氧工艺	161
4.3 低氮钢生产的 VD 处理控制要点	163
4.4 VD 操作内容控制	164
4.4.1 VD 作业前的准备确认	165
4.4.2 送汽操作和停汽操作	165
4.4.3 ACC 相关操作	166
4.4.4 低压蒸汽操作	166
4.4.5 钢包接卸吹氩管就位作业	166
4.4.6 VD 加盖作业	167
4.4.7 抽气及破真空作业	167
4.5 VD 处理常见事故的预防	167
5 RH 精炼操作工艺	169
5.1 RH 精炼过程描述	169
5.2 RH 精炼过程一些常见参数的确定方法	170
5.2.1 脱气时间的控制	170
5.2.2 循环次数的控制	171
5.2.3 环流量的控制	171
5.2.4 钢水提升高度	171
5.3 RH 真空处理的冶金功能	172
5.3.1 脱氧	172
5.3.2 脱氢	173
5.3.3 脱氮	173
5.3.4 脱碳	173
5.4 RH 用氧技术	176
5.4.1 RH-O 真空吹氧技术	176
5.4.2 RH-OB 真空侧吹氧技术	176
5.4.3 RH 顶枪吹氧及多功能化	177
5.5 RH 脱硫操作	180
5.5.1 脱硫剂渣系的确定	180
5.5.2 RH 处理脱硫操作	181
5.6 RH 温度控制	181
5.7 RH 合金化过程	182
5.8 RH 的喂丝操作	184
5.9 RH 精炼操作控制	184
5.9.1 RH 精炼操作步骤	184
5.9.2 RH 操作过程中先行加碳的要点	186

5.9.3 RH 轻处理	186
5.9.4 RH 本处理	186
5.10 RH 处理过程中冷钢的形成和去除	188
5.11 RH 处理过程中的常见事故处理	189
5.11.1 RH 处理过程中吸渣	189
5.11.2 RH 处理过程中钢包穿漏钢	190
5.11.3 RH 顶枪漏水	190
5.11.4 RH 处理过程中槽体法兰大量漏水	190
5.11.5 RH 工位不能处理钢水的情况	191
6 AOD、VOD 和 VAD 精炼操作工艺	192
6.1 AOD 精炼操作工艺	192
6.1.1 AOD 工艺简介	192
6.1.2 AOD 脱碳分析与计算模型	194
6.1.3 AOD 脱氮数学模型	195
6.1.4 AOD 精炼操作	196
6.1.5 AOD 工艺的发展	197
6.2 VOD 精炼操作工艺	199
6.2.1 VOD 工艺简介	199
6.2.2 电炉 + VOD 生产时的电炉操作要点	201
6.2.3 VOD 精炼操作	203
6.2.4 VOD 精炼操作实例	208
6.3 VAD 精炼操作工艺	210
7 精炼过程中夹杂物的变性处理与去除	212
7.1 脱氧与钢中夹杂物	212
7.1.1 金属铝脱氧	212
7.1.2 钙及含钙合金脱氧	214
7.2 夹杂物的去除与水口堵塞	215
7.2.1 夹杂物去除机理	215
7.2.2 吹氩对夹杂物去除的影响	216
7.2.3 水口堵塞机理	217
7.3 钙处理对夹杂物的变性作用	217
7.3.1 钙处理基本原理	217
7.3.2 钙处理对钙量的基本要求	220
7.3.3 喂丝过程中钢中夹杂物尺寸的变化	220
7.3.4 铝、钙含量的控制及对钢水浇铸性的影响	221
7.3.5 喂丝过程中对丝线要求	222
7.3.6 钙处理效果	222
7.3.7 钙处理实际操作要点	223
7.4 稀土元素的变性作用	229

7.5 钒合金对钢脱氧及夹杂物变性影响	230
7.6 合成渣的应用	233
7.6.1 合成渣的物理化学性能	234
7.6.2 合成渣的主要作用	234
7.6.3 合成渣使用量的确定	237
8 电炉流程部分钢种的生产工艺	238
8.1 品种钢冶炼合金加入量计算举例	238
8.1.1 低合金钢铁合金的加入量计算举例	238
8.1.2 单元素高合金钢的合金加入量计算举例	238
8.1.3 多元素高合金钢的补加系数法合金加入量计算举例	239
8.1.4 合金加入量的方程式联合计算法举例	241
8.1.5 合金加入量的影响计算举例	241
8.2 现代电炉冶炼品种钢时的工艺准备	243
8.2.1 工艺作业卡	243
8.2.2 原料准备	245
8.2.3 冶炼时机	245
8.2.4 工艺路线制订的基本思路	245
8.3 高强度螺纹钢的生产	246
8.3.1 高强度螺纹钢	246
8.3.2 含钛高强度螺纹钢的生产	247
8.3.3 钒微合金化螺纹钢的生产	252
8.4 弹簧钢的冶炼	254
8.5 非调质钢的冶炼	257
8.6 抽油杆钢的冶炼	258
8.7 轴承钢的生产	259
8.8 齿轮钢的生产	262
8.8.1 齿轮用钢的质量要求和影响因素	262
8.8.2 电炉冶炼齿轮钢的技术要求	263
8.9 碳素钢的冶炼	263
8.10 冷轧板坯的生产	264
8.10.1 冷轧深冲用钢 SPHC 的电炉冶炼成分控制	265
8.10.2 冷轧深冲钢 08Al 的生产工艺	266
8.11 热轧板坯的生产	267
8.12 低合金高强度钢的生产	269
参考文献	272

1 炉外精炼原理

电炉炼钢流程的炉外精炼的基本工艺配置及其冶炼特点包括：

(1) EAF + LF + CCM。这种工艺配置主要生产对于气体含量要求不高的优质合金钢，在采用严格控制的工艺条件下，也可以生产一些气体含量较低的钢种。一般的工艺过程是电炉严格控制钢中的有害元素的含量，电炉出钢过程中进行脱氧合金化处理，精炼炉接钢以后进行脱氧、成分和温度的调整以后，把钢水吊往连铸工序浇铸。

(2) EAF + LF + VD + CCM。这种工艺配置生产对于气体含量和夹杂物要求较高的优质合金钢，例如管线钢、轴承钢、齿轮钢等。基本工艺过程是精炼炉调整好不易氧化合金元素的成分，调整好炉渣的流动性以及钢水的温度，钢水的温度要考虑到连铸的温度要求，加上 VD 处理过程的温降和综合温降，再将钢水吊往 VD 罐进行真空脱气、脱硫和去除夹杂物的处理，以及调整一些微量元素，然后钢水上连铸机浇铸。

(3) EAF + LF + RH + CCM。这种工艺配置的 LF + RH 复合精炼过程是首先利用 LF 将钢水升温，利用 LF 的搅拌和渣精炼功能进行还原精炼，使钢水脱硫和预脱氧。然后将钢水送入 RH 中进行脱氢和二次脱氧。这样的处理不仅大大提高了钢水的洁净度，而且将钢水的温度调整到连铸需要的温度，为多流连铸和多炉连浇提供了保证。LF 与 RH 配合生产轴承钢，轴承钢中的总氧量达到 0.00058% 的水平，同时国外有的厂家利用这种生产线生产优质的弹簧钢取得的实物质量也非常令人满意。

(4) EAF + AOD(VOD) + CCM。这种工艺配置主要是用来生产不锈钢。基本工艺是电炉提供不锈钢母液，在 AOD 或者 VOD 内进行脱碳、脱硫、脱磷处理，然后还原精炼，还原结束以后钢水上连铸机浇铸。这种流程也叫做两步法生产。此外，EAF + AOD + VOD + LF + CCM 也在低碳低气体含量的不锈钢生产中得到了充分的应用，这种流程也叫三步法生产。炉外精炼是指在转炉或电炉内初炼之后的钢液在钢包或专门的冶金容器内再次精炼的工艺过程，故又称二次精炼。用于精炼的钢包或其他专用容器均称为精炼炉。

钢液的炉外精炼是近 30 多年迅速发展起来的一个领域。钢液进行炉外精炼的目的在于，进一步去除夹杂物获得洁净钢，精确调整钢液成分和温度，改善非金属夹杂物的形态等。例如，钢中最常涉及的有害元素磷、硫、氮、氢、氧五种，现代洁净钢已经可以将钢中总杂质含量降低到 0.005% 的水平。电炉钢水的特点，例如气体含量高，如果使用炉外精炼的手段，就会减轻或者消除。

炉外精炼的作用主要是：

(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) 进一步提高钢水洁净度，满足成品钢材性能要求；控制残留在钢中夹杂物的形态。例如，减轻硫元素导致的热脆效应，使硫成为第一类夹杂物，即硫化物呈球形；使 Al_2O_3 变成铝酸钙，以改善钢的切削性能等。

(5) 作为电炉炼钢与连铸机之间的缓冲, 提高电炉炼钢的灵活性和整体效率。

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) 钢水的升温和控制功能——精确控制钢水温度, 使得连铸尽可能做到恒速浇铸, 并且能够降低中间包的过热度波动对钢坯质量的影响;

(3) 精炼功能——包括渣洗、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;

(5) 生产调节功能——均衡电炉炼钢和连铸之间的生产。

炉外精炼的工艺手段包括真空和非真空, 以及为了提高精炼处理效果、补偿处理过程中的热量损失和增加调整成分等功能而添加的搅拌、加热、吹氧、吹氩、喂丝、喷粉等。目前, 炉外精炼的方法达 30 多种, 按其精炼原理不同大致分为非真空精炼和真空精炼两大类。

1.1 非真空精炼原理

电炉的非真空精炼主要指 LF 钢包精炼和氩氧炉 (AOD) 氩氧混吹精炼, 主要包括搅拌原理、加热原理、精炼炉泡沫渣原理以及降低一氧化碳分压进行脱碳的原理。

1.1.1 搅拌

1.1.1.1 搅拌方式的介绍

一般来说, 搅拌就是向流体系统供应能量, 使该系统内产生运动。为实现这一目的, 可以借助于喷吹气体, 也可以使用电磁感应或机械的方法。

A 机械搅拌

机械搅拌用于常温或工作温度不太高的系统, 如化工、选矿、轻工、食品等部门广泛应用着各种旋转、振动、转动着的倾斜容器, 或通过叶片、螺旋桨等进行机械搅拌。这类搅拌有设备简单、搅拌效率高、操作方便等优点。但是对于高温的冶金熔体, 很少选用这种简便的机械搅拌方法, 目前应用的只有铁水预处理的 KR 法。该工艺具体的操作方法是用一个耐火材料做成的截面为十字形的搅拌器, 垂直插入铁水罐中旋转而搅动铁水。它具有机械搅拌的全部优点, 但由于搅拌器材质方面的问题, 不适合对钢液的搅拌。所以现有的几十种炉外精炼方法中, 没有一种是采用机械搅拌方法的。

B 利用重力或大气压力搅动钢液

利用重力搅拌钢液的炉外精炼方法有异炉渣洗、同炉渣洗、混合炼钢、VC、SLD、TD、VSR 等。利用钢流的冲击, 可以在不增加设备和影响正常的工艺条件下, 产生非常剧烈的搅拌。但是, 这种搅拌是由于工艺特有的过程而出现的, 搅拌时间决定于其他工艺过程的时间, 搅拌强度也不容易调节。例如, 在电炉的出钢过程中, 钢水从出钢槽或者 EBT 流出, 在进入钢包以后就会因为钢水的势能转化为动能, 对钢液产生冲击搅拌, 搅拌的效果与钢水的温度、出钢的时间等因素有关, 所以它只适用于特定工艺场合, 很难作为一种专门的手段广泛地被选用。

综合利用大气压力和重力搅动钢液的炉外精炼方法有 RH、DH 法。它利用大气压力将钢包中被处理的钢液压入真空室, 处理后的钢液再借助重力返回钢包, 并利用返回钢流的动能搅动钢包中的其他钢液。

这类搅拌的一个突出优点是不必增设搅拌的附加设备, 但是它的应用有一定的局限性。

C 喷吹气体搅拌

喷吹气体搅拌是一种应用较为广泛的搅拌方法，主要是各种形式的吹氩搅拌和吹氮气搅拌。应用这类搅拌的炉外精炼方法有 VD、CAB、CAS、Finkle、LF、VAD、VOD、AOD、SL、TN 等。采用气体搅拌时，所喷吹的气体多为氩气或者氮气，而且是从底部吹入熔池，故常称为底吹氩搅拌。其搅拌原理是底吹氩时熔池内出现了“气泡泵”现象。

当氩气从底部中心吹入时，喷嘴上方的钢液中生成许多气泡，这些气泡因密度小而带动周围的钢液向上浮出，靠近气—液两相区外缘的液体被上浮的两相流抽引向上流动，这就是所谓的“气泡泵”现象；到达顶面后，气泡逸入气相，而被抽引的液体转向水平流动，由中心流向四周，在靠近器壁处转向向下流动，以补充被抽引的流体，从而形成了“中心向上，四周向下”的环流。当熔池顶面有渣层时，则可能被水平流动的流体卷入熔池。如此循环反复进行，熔池内的钢液便会得到良好的搅拌和混合。

这种搅拌方法可以取得以下方面的效果：

(1) 调温，主要是冷却钢液。对于开浇温度有比较严格要求的钢种或浇铸方法，都可以用吹氩的办法将钢液温度降低到规定的要求。例如德国 BSW 厂，采用轧制过程中产生的不合格产品，在电炉出高温钢以后，加入钢包内进行吹氩调温，一是降低了部分炼钢成本，二是方便了调温过程。

(2) 混匀。在钢包底部适当位置安放气体喷嘴，可使钢包中的钢液产生环流，用控制气体流量的方法来控制钢液的搅拌强度。实践证明，这种搅拌方法可促使钢液的成分和温度迅速地趋于均匀。

(3) 净化。搅动的钢液增加了钢中非金属夹杂物碰撞长大的机会。上浮的氩气泡不仅能够吸收钢中的气体，还会黏附悬浮于钢液中的夹杂物，把这些黏附的夹杂物带至钢液表面被渣层所吸收。精炼过程的喷吹气体搅拌主要是钢包吹氩，通常有两种形式。大多数炉外精炼的吹氩形式是通过安装在钢包底部一定位置的透气砖，或者其他型式的喷嘴将氩气吹入钢液。也有采用类似塞棒的吹氩喷枪，插入钢包内的钢液中，在接近包底处将氩气吹入钢液。

(4) 利用氩气的搅拌作用，清除夹渣和夹杂物，均匀温度和成分，减少偏析，提高脱氧剂和金属材料的收得率。

(5) 利用氩气的保护作用，可进一步避免或减少钢液的二次氧化。钢包吹氩精炼法适用于结构钢、轴承钢、电工钢、不锈钢、耐热钢等多钢种。生产实践证明，脱氧良好的钢液经钢包吹氩精炼后，钢中的氢可去除约 15% ~ 40%，氧可去除约 30% ~ 50%，电解夹杂物总量可减少 50%，尤其是大颗粒夹杂物更有明显减少，而钢中的氮含量虽然也减少，但不是特别稳定。钢包吹氩能够减少因中心疏松与偏析、皮下气泡、夹杂等缺陷造成的废品，同时又提高了钢的密度及金属收得率等。

D 电磁搅拌

利用电磁感应的原理使钢液产生运动称为电磁搅拌。电磁搅拌是用电磁感应产生的洛伦兹力驱动钢液流动而达到搅拌目的的。用一种简单的比喻，把电动机的定子剖开并拉直就成了一片感应搅拌器，而钢液就是电动机的转子。通电后，搅拌器中会产生磁场，并以一定速度切割钢水导体，于是便在钢水中产生感应电流，载流钢水与磁场相互作用产生电磁力，从而驱动钢水运动。这就是电磁搅拌的工作原理。搅拌器可以做成圆筒形，也可以做成片状，片状搅拌器安装方便而应用普遍。就片状搅拌器而言，可以单片安装，也可以双片对称安装。双片对称安装可以使钢流产生双向流股，也可现成单向流股。单片安装的搅拌效果最差，只适用于小型精炼炉；双向对称安装并现成单向流股时，搅拌效果最好，能耗也较低。

电磁搅拌分为推斥搅拌和运动搅拌两种。单相的交变电流通过感应绕组（或称搅拌器），会产生一脉动磁场，若被搅拌的金属液处于该磁场中，所产生的搅拌称为推斥搅拌。推斥搅拌

的搅拌力几乎与金属熔体的容器壁相垂直。感应炉坩埚中的金属熔体的搅拌就属于这种搅拌。运动搅拌,是由移动磁场的作用而产生,搅拌力作用于切线方向,金属熔体沿器壁内表面运动。这种搅拌广泛应用于电炉或炉外精炼的电磁搅拌中。

由于感应电流在钢水中形成的涡流产生了热量,电磁搅拌还有一定的保温作用,这是吹氩搅拌无法达到的。

20 世纪 50 年代以来,一些大吨位的电炉采用了电磁搅拌,以促进诸如脱硫、脱氧等精炼反应的进行,保证熔池内温度及成分的均匀。各种炉外精炼方法中,SKF 采用了电磁搅拌,美国的 ISLD 也采用了电磁搅拌。

1.1.1.2 搅拌方法的比较和选择

吹气搅拌和电磁搅拌是各种炉外精炼方法中应用较多的两种搅拌方法,比较有利于控制和调节搅拌强度的大小,并容易与其他精炼手段组合的搅拌方法。但是它们之间无论在装备上,还是在产生的功能和效果上都有很大的差别:

(1) 搅拌能力和调节性能的比较。在吹气搅拌中,上浮的气泡带动着钢液的运动,搅拌钢液所消耗的能量来自于上浮气泡的本身。当处理容量增大时,熔体的体积增大,即熔体所形成的熔池深度加深,截面积增大。而熔池深度增加时,上浮气泡提供的能量也将成比例增加。熔池截面的增大,可相应增加透气砖的截面和数量,以增大吹气量,从而也增大了吹入气体所提供的搅拌能量。所以吹气搅拌时,其搅拌能力将不受处理容量的限制。

采用电磁搅拌时,电磁搅拌器的型号、大小、钢包炉的尺寸,炉衬厚度等结构条件一定时,搅拌器所提供的搅拌能取决于输入搅拌器电功率的大小。电磁搅拌的搅拌能力没有吹气搅拌的适应能力强。

两种搅拌方法的搅拌能力,即向金属熔体提供的搅拌能量,分别与各自的工艺因素和结构因素有关。实际生产中,影响搅拌能力的因素,对于吹气搅拌则是吹气量 (m^3/t) 或吹气强度 ($\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$),对于电磁搅拌则是搅拌器的工作电流。所以在运行过程中,可以改变这两个参数,分别对这两种搅拌方法搅拌的强弱予以调节。

在通过包底的透气砖吹气搅拌的水模型可以观察到,在气体入口的正上方,两相流(吹入气体和被搅拌的液体)流速最高,被气体带动向上流的液体到达液面后向四周流动,然而在包壁附近向下流动而形成环流。这种流动形式,对于 300 ~ 350t 的大钢包,在包底的四周有低速流动的“死点”,而电磁搅拌的钢液,在包内各点的动能要比吹气搅拌均匀一些。在相同的处理容量和正常操作所用的工艺参数下,电磁搅拌所产生的搅拌能量比气体搅拌要弱一些。但是出于某种冶金目的的考虑,例如促进非金属夹杂物的上浮排出,就不要求很强烈的搅拌;而钢包炉的脱硫以及增碳操作,需要较大的搅拌能力,吹开钢渣面的一部分,或者要求强烈的搅拌,增加钢渣界面的反应能力,达到快速脱硫的目的。由于气体从透气砖中排出、气泡的数量、大小、上浮速度等过程和参数,受很多难以有效控制的因素影响,所以可以这样认为,电磁搅拌比吹气搅拌容易控制,也比较可靠,特别适合于冶炼成分控制比较稳定的合金钢,吹气搅拌则适应面比较广一些。

(2) 对钢包的要求。钢包也叫钢水罐,具有盛载、运输钢液和浇铸的功能,其外形相似于只用于浇铸的普通钢包。两种钢包的差别,前者的熔池直径 D 与深度 H 的比值更小一些,即钢包更细高一些。这种形状有利于钢包的烘烤和保温;可以节省包衬耐火材料的用量;提高输入的搅拌能量和降低钢包炉径向的距离,当选用电弧加热时,可缩短短网的长度,以降低供电回路的总阻抗。对于电磁搅拌,为了取得更高的搅拌效率,要求搅拌器尽可能高一些,炉衬尽可能薄一些,钢包设计应选取较大的熔池深度 H ,通常选 $D/H = 1$ 。由于钢包炉(特别是具备真空手段的钢包炉)要求液面以上留出高度为 800 ~ 1000mm 的自由空间,所以 SKF 钢包炉的

外形就更显细高。此外,应用电磁搅拌的钢包炉外壳,要求用无磁性钢制成。这些要求除提高制作费用外,还在创造精炼反应条件方面产生不利的影响。例如,在相同的处理容量下,为提高 H ,必然缩小 D ,较小的熔池直径使钢包炉中渣钢比表面积减小,这样对于炉渣(也叫做顶渣)起着重要作用的脱硫反应就受到了抑制,降低了顶渣的脱硫作用。此外,钢包直径缩小,在电弧加热时,电弧与炉衬间的距离缩短,加剧了炉衬的热侵蚀。对于吹气搅拌,则 D/H 值的选取,就可以更多地考虑耐火材料的寿命、渣钢比表面积的大小等工艺方面的要求。所以,吹气搅拌的钢包炉, D/H 值通常都选取大于1。为了改善钢包炉内钢液的运动,提高钢包炉底部的寿命,减少底部的散热,增加包衬与电弧之间的距离,吹气搅拌的钢包炉内形不一定要设计成直桶形,而更多的是设计成锥桶形。从对钢包要求的比较来看,吹气搅拌的优势大于电磁搅拌。

(3) 搅拌形式对冶金效果的影响。强烈的搅拌对夹杂物的上浮排出不一定有利,悬浮于钢液中的夹杂物可能会随钢流循环运动,而仍保留于钢液中。此外,运动中的钢流还有可能从顶渣中卷入渣滴和冲刷炉衬耐火材料,造成新的夹杂物来源。对于洁净度要求很高的钢,从去除夹杂物这一点来看,电磁搅拌优于吹气搅拌。应用电弧加热的钢包炉,当采用吹气搅拌时,其增碳的倾向要大于电磁搅拌。对于精炼一般的含碳钢种,这种增碳倾向的差别可能还不太明显。但是,对于超低碳钢的精炼,在增碳这一点上,电磁搅拌又优于吹气搅拌。此外,吹气搅拌时,在钢液中形成了大量的气泡,从而显著地扩大了气液界面。每一个气泡对溶解于钢中的氢和氮来说,就相当于一个小的真空室,从而促进了钢中氢和氮的排出。钢液中的气泡同样也促进了碳氧反应的进行。在脱气方面,电磁搅拌的能力不如吹气搅拌。

(4) 搅拌形式对钢液温度的影响。吹气搅拌会加速钢液的降温,吹入的气体将带走一部分热量。所带走热量的多少,取决于所吹气体的比热容、吹气量和钢液温度等。当吹氩搅拌时,因为氩气的比热容为 $0.5234\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,只是氮气的 $1/2$,氢气的 $1/28$,所以氩气带走的热量并不算多。加速降温的主要原因是强烈的液面搅动,增加了液面的热辐射。电磁搅拌在钢液降温方面就要优越得多。

(5) 设备投资和运行费用的比较。电磁搅拌的设备复杂,其投资要比吹气搅拌装置高得多。在运行过程中设备的维护工作量也大,技术要求也高。但是,其运行操作要比吹气搅拌简单。若不考虑设备的折旧和备品备件,则其运行费用也将比吹氩搅拌低一些。

1.1.1.3 搅拌过程中的能量消耗

由于国内和电炉匹配的精炼搅拌方式主要为吹气搅拌,所以本节主要介绍吹气搅拌的能量消耗。

LF炉和VD罐应用搅拌的目的主要在于:

- (1) 均匀钢液的成分和温度,增加冶炼过程中的热交换,消除高温区的存在对于钢包的威胁。
- (2) 加速冶金反应和反应产物的传输,控制冶金反应的进行速度;
- (3) 促进钢中杂质的聚集和上浮。

搅拌的特征及质量将决定上述目的实现的程度。考虑到钢液的搅拌是由于外力做功的结果,所以单位时间内,输入钢液内引起钢液搅拌的能量越大,钢液的搅拌将越剧烈。现在常用单位时间内向 1t 钢液(或 1m^3 钢液)提供的搅拌能量来作为描述搅拌特征和质量的指标,称为能量耗散速率或比搅拌功率,用符号 ε 表示,单位为 W/t 或 W/m^3 。

对于不同搅拌方法的能量耗散速率可写出相应的关系式,但是有些关系式是极其近似的。吹气搅拌的比搅拌功率用单位时间内吹入 1t 钢液的气体所做功的总和来表示:

$$\varepsilon = \frac{0.0062T_1}{M} \left[\left(1 - \frac{T_n}{T_1} \right) + \ln \frac{p_1}{p_2} \right] Q \quad (1-1)$$

式中, M 为钢水的总量, t; T_1 为钢液的温度, K; Q 为气体的流量, L/min; T_n 为氩气或者氮气的温度, K; p_1 为钢液底部的压力, Pa; p_2 为精炼炉炉膛内的气氛压力, Pa。

RH 真空脱气时, 钢包中钢液搅动所消耗的能量, 可以认为等于经“下降管”流入钢包的钢流的动能。其比搅拌功率为:

$$\varepsilon = \frac{83.5}{G} u^2 w \quad (1-2)$$

式中, 83.5 为单位换算系数; u 为钢流自下降管流出时的线速度, m/s; w 为钢液的循环流量, t/min; G 为处理的钢水重量, t。

当下降管的内径一定时, 钢液的循环流量决定了钢液流回钢包的线速度, 所以 w 是决定比搅拌功率大小的主要因素。循环流量的大小取决于驱动气体吹入的位置、驱动气体的体积流量、上升管和下降管的直径等参数。

对于循环流量为 30 ~ 50 t/min 的 RH 脱气过程, 被脱气处理的钢液量 G 大约为 120 ~ 300 t, 钢包中的比搅拌功率大约是 500 ~ 1000 W/m³。

1.1.1.4 熔体的混匀时间与比搅拌功率的关系

混匀时间 τ 是另一个较常用的描述搅拌特征和质量的指标。它是这样定义的: 在被搅拌的熔体中, 从加入示踪剂到它在熔体中均匀分布所需的时间。如设 C 为某一特定的测量点所测得的示踪剂浓度, 按测量点与示踪剂加入点相对位置的不同, 当示踪剂加入后, C 逐渐增大或减小。设 C_∞ 为完全混合后示踪剂的浓度, 则当 $C/C_\infty = 1$ 时, 就达到了完全混合。实测发现, 当 C 接近 C_∞ 时, 变化相当缓慢, 为保证所测混匀时间的精确, 规定 $0.95 < \frac{C}{C_\infty} < 1.05$ 为完全混合, 即允许有 $\pm 5\%$ 以内的不均匀性。允许的浓度偏差范围是人为的, 所以也可将允许的偏差范围标在混匀时间的符号下。

混匀时间取决于钢液在钢包内的循环次数, 钢液被搅拌得越剧烈, 混匀时间就越短。大多数冶金反应速率的限制性环节都是传质, 所以混匀时间将与冶金反应的速率会有一定的联系。表 1-1 为一座 100t 钢包炉的吹气搅拌流量。

表 1-1 一座 100t 钢包炉的吹气搅拌流量

项 目	启动搅拌	加合金量/kg			加重合金	正常加热
		>200	50 ~ 200	<50		
流量(标态) /L · min ⁻¹	300 ~ 400	150 ~ 250	100 ~ 200	50 ~ 100	100 ~ 200	40 ~ 120
时间/min	1	3	2	1	5	全过程

日本学者中西恭二等人用 50t 吹氩搅拌的钢包、50t SKF 钢包精炼炉、200t RH、65kg 吹氩搅拌的水模型中实测的 ε 和 τ 的数据, 标在一双对数的坐标中, 发现所有这些点都分布在一条直线的周围, 由此提出统计规律 (s):

$$\tau = 800\varepsilon^{-0.4} \quad (1-3)$$

由上式可知, 随着 ε 的增加, 混匀时间 τ 缩短, 加快了熔池中的传质过程。可以推论, 所有以传质为限制性环节的冶金反应, 都可以借助增加 ε 的措施而得到改善。

式 1-3 中的系数会因 ε 的不同计算方法和实验条件的改变而有所变化。例如, 在钢包吹氩搅拌中, 若搅拌动力只考虑气泡上浮所做的膨胀功, 则: