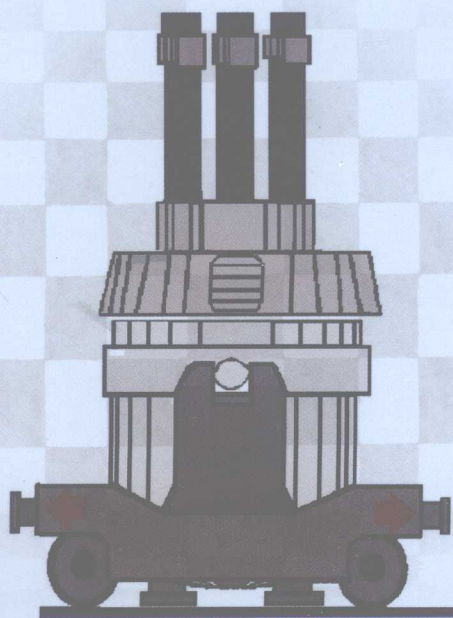


# LF 精炼技术

*LF Refining Technology*

李 晶 编著



冶金工业出版社

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

# LF 精炼技术

李 晶 编著

北 京  
冶 金 工 业 出 版 社  
2009

## 内 容 提 要

LF 的出现基本取消了电炉钢与转炉钢在质量方面的差别,改变了炼钢流程,成为钢铁生产流程中必不可少的设备,我国几乎所有的大中型钢厂都配有钢包精炼炉(LF)。

本书以 LF 精炼功能为主线,从 LF 精炼过程钢液洁净度控制、温度控制及成分控制三方面对 LF 精炼技术进行了全面、系统的论述。重点介绍了 LF 精炼过程中氧、硫、磷、氮、氢含量的控制技术及夹杂物变性处理技术,分析了影响钢液成分及温度精确控制的影响因素,建立了 LF 精炼过程的工艺模型,提出了 LF 精炼操作完全自动化的思想。

本书可作为从事炼钢生产的工程技术人员及管理的技术指导书,也可作为冶金专业本科生、研究生及教师的教学参考书,还可供希望了解 LF 精炼技术及有关洁净钢生产的人员阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

LF 精炼技术/李晶编著. —北京:冶金工业出版社,  
2009. 1

ISBN 978-7-5024-4520-1

I. L … II. 李 … III. 钢水—二次精炼(冶金)  
IV. TF769

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 149825 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 刘小峰 美术编辑 张媛媛 版式设计 张 青

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-4520-1

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009 年 1 月第 1 版,2009 年 1 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 11 印张; 291 千字; 165 页; 1—3000 册

35.00 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)

## 冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定价(元)
炉外精炼及铁水预处理实用技术手册	146.00
炉外精炼的理论与实践	48.00
铁水预处理与钢水炉外精炼	39.00
炉外精炼	30.00
炼钢氧枪技术	58.00
转炉溅渣护炉技术	25.00
氧气顶吹转炉炼钢工艺与设备(第2版)	29.80
转炉炼钢生产	58.00
转炉炼钢功能性辅助材料	40.00
转炉—连铸工艺设计与程序	159.00
中国电炉流程与工程技术文集	60.00
电炉炼钢500问(第2版)	25.00
电弧炉炼钢工艺与设备(第2版)	35.00
电炉炼钢原理及工艺	40.00
现代电炉—薄板坯连铸连轧	98.00
薄板坯连铸连轧(第2版)	45.00
薄板坯连铸连轧微合金化技术	58.00
薄板坯连铸连轧钢的组织性能控制	79.00
薄板坯连铸连轧工艺技术实践	56.00
薄板坯连铸装备及生产技术	50.00
新编连续铸钢工艺及设备(第2版)	40.00
连续铸钢原理与工艺	30.00
连续铸钢生产	45.00
实用连铸冶金技术	35.00
连铸及炉外精炼自动化技术	52.00
连续铸钢	25.00
连铸坯质量(第2版)	24.50
钢铁冶金学教程	49.00
钢铁冶金学(炼钢部分)	35.00
钢铁冶金原理(第3版)	40.00
现代冶金学(钢铁冶金卷)	36.00
冶金技术概论	28.00
炼钢学	40.00
炼钢工艺学	39.00
冶金流程工程学	65.00
洁净钢——洁净钢生产工艺技术	65.00
超细晶钢——钢的组织细化理论与控制技术	188.00
钢铁冶金及材料制备新技术	28.00
矿物直接合金化冶炼合金钢——理论与实践	26.00
2006年-2020年中国钢铁工业科学与技术发展指南	50.00
钢铁生产工艺装备新技术	39.00
冶金设备液压润滑实用技术	68.00
冶金工程设计·第1册·设计基础	145.00
冶金工程设计·第2册·工艺设计	198.00
冶金工程设计·第3册·机电设备与工业炉窑设计	195.00

820-195

377-2

3

## 前 言

钢包精炼炉(LF)设置在电炉炼钢厂,缩短或省略了电弧炉的还原期,保证了电弧炉炼钢+LF精炼+连铸工艺的顺行,使电弧炉不再仅仅是生产高质量钢种的设备,而发展成为可以用一般废钢和生铁生产普通钢种的高效率的短流程炼钢设备。由于转炉挡渣出钢技术的日趋成熟,LF在转炉炼钢厂的应用得到发展。在转炉炼钢厂利用LF可以生产特殊钢,淘汰了过去用炼钢法来区别钢质量的方式,确立了“转炉初炼(粗炼)+LF精炼+连铸”工艺生产多品种、高质量钢的方式。LF的出现基本取消了电炉钢与转炉钢在质量方面的差别,改变了炼钢流程,成为钢铁生产流程中必不可少的设备。

LF精炼技术在我国发展迅速,几乎所有的大中型钢厂都配有钢包精炼炉,也有不少专家、学者对LF精炼技术进行研究。但到目前为止,尚缺少关于LF精炼技术的书籍。鉴于此,本人将十多年来在LF精炼方面所做的科研成果及对LF精炼技术方面的认识,归纳总结成书。

本书以LF精炼功能为主线,从钢液洁净度控制、温度控制及成分控制三方面对LF精炼技术进行了全面的论述。在钢液洁净度控制方面,重点介绍了钢中极低氧、硫含量工艺控制技术及初炼炉控制钢中磷含量、精炼防止回磷的工艺技术研究。在气体控制方面,着重介绍了影响钢中的氮含量工艺因素及生产低氮钢的工艺技术,对氮含量的控制也做了简单描述。在钢液温度控制方面,分析了影响钢液温度的因素,建立LF精炼过程钢液温度控制模型,以指导实际生产。在成分控制方面,建立了最低成本下的钢液成分控制模型,对电炉流程有害金属杂质元素的控制进行了研究。此外,还提出了标准化操作制度下,以工艺模型为基础,实现LF精炼过程完全自动化的思想。

本书全面、系统地介绍了LF精炼技术,可作为大专院校本科生、研究生及冶金专业教师的参考书,也可作为从事炼钢生产的工程技术人员及管理人員的技术指导书,还可供希望了解LF精炼技术及有关洁净钢生产的人员阅读。

在本书完成之际,感谢傅杰教授对作者的培养及我所指导的研究生在科研方面的支持!

由于本人水平所限,书中观点有不妥的地方,恳请批评指正,以进一步改进提高。

李 晶  
2008年2月

# 目 录

<b>1 LF 精炼技术概况</b> .....	1
1.1 LF 精炼技术的发展 .....	1
1.2 LF 的形式 .....	3
1.2.1 交流钢包炉 .....	3
1.2.2 直流钢包炉 .....	4
1.2.3 等离子枪加热钢包炉 .....	5
1.3 LF 设备 .....	5
1.3.1 电极加热系统 .....	5
1.3.2 水冷炉盖系统 .....	5
1.3.3 合金渣料加入系统 .....	6
1.3.4 喂线系统 .....	6
1.3.5 除尘系统 .....	7
1.3.6 测温取样系统 .....	7
1.3.7 吹氩搅拌系统 .....	7
1.3.8 钢包及钢包车系统 .....	8
1.4 LF 耐火材料 .....	8
1.4.1 炉盖用浇注料 .....	9
1.4.2 渣线部位用耐火材料 .....	9
1.4.3 包壁用耐火材料 .....	9
1.4.4 包底用耐火材料 .....	10
1.4.5 包底透气砖 .....	10
1.5 LF 精炼工艺技术 .....	12
1.5.1 LF 精炼的目的 .....	12
1.5.2 LF 精炼的主要操作 .....	12
1.5.3 LF 精炼工艺 .....	13
1.5.4 LF 渣的回收利用 .....	14
参考文献 .....	15
<b>2 LF 精炼过程氧含量及夹杂物控制技术</b> .....	16
2.1 脱氧的理论基础 .....	16
2.1.1 脱氧热力学 .....	16

2.1.2	脱氧动力学 .....	18
2.1.3	钢中不同铝含量对夹杂物的形成影响 .....	19
2.2	LF 脱氧实践 .....	20
2.2.1	转炉及电炉终点碳含量的控制 .....	20
2.2.2	出钢过程的脱氧 .....	22
2.2.3	LF 精炼过程脱氧 .....	25
2.3	精炼过程钢液二次氧化的控制 .....	31
2.3.1	模拟研究的吹气量与实际吹气量的关系 .....	31
2.3.2	LF 精炼过程钢液裸露面大小模拟研究 .....	32
2.3.3	钢液二次氧化的模拟研究 .....	34
2.4	LF 精炼过程钢液卷渣控制技术 .....	35
2.4.1	LF 精炼过程钢液卷渣机理研究 .....	35
2.4.2	钢液卷渣临界搅拌强度模拟研究 .....	39
2.5	氧化物夹杂控制及变性处理技术 .....	41
2.5.1	氧化物夹杂的成分控制 .....	41
2.5.2	氧化物夹杂对水口结瘤的影响 .....	43
2.5.3	镁对夹杂物含量及板材性能的影响 .....	45
2.5.4	氧化物夹杂的钙处理技术 .....	49
	参考文献 .....	52
<b>3</b>	<b>LF 精炼过程硫含量控制技术 .....</b>	<b>55</b>
3.1	脱硫的理论基础 .....	55
3.1.1	脱硫热力学 .....	55
3.1.2	脱硫动力学 .....	56
3.2	LF 脱硫实践 .....	57
3.2.1	出钢过程脱硫 .....	57
3.2.2	LF 精炼过程脱硫 .....	58
3.3	硫化物夹杂变性处理技术 .....	61
3.3.1	硫化物夹杂的有害性 .....	61
3.3.2	硫化物夹杂形态的控制 .....	61
3.3.3	硫化物夹杂需要的钙量 .....	61
3.4	低硫钢生产工艺 .....	62
3.4.1	转炉 + LF/VD 生产超低硫钢 .....	62
3.4.2	电炉 + LF/VD 生产超低硫钢 .....	70
3.4.3	VD 脱硫机理 .....	70
3.4.4	低硫钢生产精炼工艺 .....	71
	参考文献 .....	72

<b>4 LF 精炼过程氮含量控制技术</b> .....	73
4.1 氮对钢性能的影响 .....	73
4.1.1 氮对钢性能的有害影响 .....	73
4.1.2 氮对钢的有益作用 .....	75
4.2 吸氮的理论基础 .....	76
4.2.1 吸氮热力学 .....	76
4.2.2 吸氮的动力学 .....	77
4.3 LF 精炼过程氮含量控制 .....	77
4.3.1 初炼炉钢液氮含量的控制 .....	77
4.3.2 LF 精炼过程钢液氮含量的控制 .....	85
4.3.3 连铸过程氮含量控制 .....	95
参考文献 .....	98
<b>5 LF 精炼过程中磷、氢含量控制</b> .....	101
5.1 钢液脱磷的条件分析 .....	101
5.1.1 钢液脱磷的热力学 .....	101
5.1.2 钢液脱磷反应的动力学 .....	102
5.1.3 钢液脱磷的工艺条件分析 .....	102
5.2 转炉冶炼过程钢液磷含量控制研究 .....	104
5.2.1 冶炼过程枪位变化对脱磷的影响 .....	104
5.2.2 底吹流量对钢液脱磷的影响 .....	105
5.2.3 炉渣控制对脱磷的影响 .....	106
5.2.4 钢液温度对脱磷的影响 .....	107
5.3 转炉冶炼终点控制对钢中磷含量的影响 .....	108
5.3.1 转炉冶炼终点温度对脱磷的影响 .....	108
5.3.2 转炉终点炉渣控制对脱磷的影响 .....	109
5.3.3 转炉终点钢中残 Mn 对钢液脱磷的影响 .....	109
5.3.4 出钢过程磷含量的控制技术 .....	110
5.3.5 LF 精炼过程钢液的回磷控制 .....	110
5.4 氢含量的控制 .....	111
5.4.1 氢对钢的有害影响 .....	111
5.4.2 脱氢的理论基础 .....	111
5.4.3 LF 精炼过程防止吸氢的措施 .....	112
参考文献 .....	112



<b>6 LF 精炼过程中的钢液成分控制</b> .....	113
6.1 钢中金属杂质元素的控制 .....	113
6.1.1 炉料资源情况调查 .....	113
6.1.2 炉料结构模型的建立 .....	115
6.1.3 炉料结构模型的应用 .....	119
6.2 LF 过程钢液混匀模拟研究 .....	120
6.2.1 钢液混匀模拟研究方案 .....	120
6.2.2 模拟研究结果及讨论 .....	121
6.3 钢液成分控制的条件与铝含量的控制 .....	121
6.3.1 实现钢液窄成分控制的条件 .....	121
6.3.2 精炼过程中铝含量的控制 .....	122
参考文献 .....	125
<b>7 LF 精炼过程中的钢液温度控制</b> .....	126
7.1 钢包热状态对钢液温度的影响 .....	126
7.1.1 钢包热状态现场试验研究 .....	126
7.1.2 出钢过程钢液温降模型的研究开发 .....	127
7.1.3 包衬蓄热及钢壳散热 .....	128
7.2 渣对钢液温度的影响 .....	133
7.2.1 渣散热数学模型 .....	133
7.2.2 渣表面散热对钢液温度的影响 .....	134
7.3 合金加入对钢液温度的影响 .....	136
7.3.1 合金加入钢液产生的物理热 .....	136
7.3.2 合金加入钢液产生的化学热 .....	137
7.3.3 合金加入钢液引起钢液温度的变化 .....	137
7.4 吹氩搅拌对钢液温度的影响 .....	138
7.4.1 氩气带走物理热 .....	138
7.4.2 钢包包衬蓄热 .....	139
7.4.3 钢液裸露面造成钢液温降 .....	139
7.4.4 钢包内钢液的温度分层 .....	141
7.5 喂铝线对钢液温度的影响 .....	142
7.5.1 铝线喂入钢液产生的物理热 .....	142
7.5.2 铝线喂入钢液产生的化学热 .....	143
7.6 LF 过程成渣热及渣钢反应热对钢液温度的影响 .....	144
7.6.1 现场实验及渣中氧化物、钢中元素的变化 .....	144
7.6.2 成渣热及渣钢反应热对钢液温度影响程度的分析 .....	145
7.7 电极供热 .....	147

---

7.8 电弧功率确定 .....	148
参考文献 .....	148
<b>8 LF 精炼的全自动化控制 .....</b>	<b>151</b>
8.1 LF 精炼全自动控制的基础及目的 .....	151
8.2 LF 工艺模型的研究 .....	152
8.2.1 氧含量预报模型 .....	152
8.2.2 喂线工艺模型 .....	155
8.2.3 钢液成分控制模型 .....	157
8.2.4 吹氩搅拌模型 .....	158
8.2.5 脱硫模型 .....	160
8.2.6 钢液的温度预报(控制)模型 .....	160
8.3 LF 精炼的完全自动化 .....	162
参考文献 .....	165

# 1 LF 精炼技术概况

## 1.1 LF 精炼技术的发展

LF(Ladle Furnace)精炼技术的研究始于1968年,当时发现用电弧炉预造还原渣、钢渣混出、钢包吹氩处理,还原精炼效果显著,因此进行了以省略电弧炉还原期为目的的有电弧加热功能的钢包精炼技术的开发。1971年,日本大同特殊钢厂第一台钢包精炼炉(LF)投入使用<sup>[1]</sup>。1973年,新日铁八幡制铁所在转炉厂设置了LF<sup>[2]</sup>。

LF使用初期由于下渣控制较难,出现了以下工艺<sup>[3]</sup>:

(1) 电弧炉或转炉出钢→去渣→脱氧(加还原渣、加脱氧剂)→加热(加合金、取样)→浇注。

(2) 对冶炼时不能采用任何脱氧剂的钢种,采用的工艺为:电弧炉或转炉出钢→去渣→加热 LF(加渣料、强搅、加碎石墨)→真空碳脱氧(加合金)→加热(加合金、取样)→真空→真空下浇注。

(3) 对生产低硫、超低硫钢,通过多次加渣料、除渣而达到脱硫的目的。采用的工艺为:电弧炉或转炉出钢→去渣→加热 LF(加渣料、强搅、加铝脱氧)→去渣→真空(吹氩、加铝)→LF精炼(加铝、加Ca-Si)。

以上三种工艺的共同点是电弧炉或转炉出钢后,要进行钢包去渣处理,例如采用钢包扒渣法、倒包法、压力罐法、闸板法、真空吸渣法等。钢包去渣处理一方面会增加设备或工人的劳动强度,另一方面还会降低钢液的温度、影响钢液质量并降低钢液收得率。

为了省略去渣工序,防止氧化渣进入钢包炉,发展了无渣或少渣技术。对电弧炉主要是无渣出钢技术<sup>[4]</sup>,如1979年蒂森特钢公司维顿厂正式投产的中心底出钢电弧炉,1983年在丹麦特殊钢厂投产的偏心底出钢EBT(Eccentric Bottom Tapping)电弧炉,之后相继出现了侧面炉底出钢法SBT(Side Bottom Tapping)、水平无渣出钢法HOT(Horizontal Tapping)、偏位炉底出钢法OBT(Off-centre Bottom Tapping)及滑动阀门SG(Slide Gate)法等<sup>[5]</sup>,这些出钢方法使电弧炉少渣或无渣出钢成为可能。对转炉主要是少渣出钢技术,继1970年挡渣球法在日本新日铁公司发明后,相继出现了挡渣塞、避渣罩法、气动挡渣及电磁挡渣等12种挡渣方法<sup>[6]</sup>,使转炉挡渣技术不断完善并日趋成熟,转炉下渣量得到了合理的控制。电炉无渣出钢及转炉少渣出钢技术的发展,为LF精炼技术的发展与完善起到了巨大的推动作用。但是在实际生产中要实现电弧炉的无渣出钢及转炉的少渣出钢相当困难,因此出现了目前电炉流程及转炉流程普遍采用的出钢后变渣处理工艺,即:

电弧炉或转炉出钢→LF精炼(加铝、加渣料、加Ca-Si或加改渣剂)

LF设置在电弧炉炼钢厂,减少了电弧炉还原时间,最终取消了电弧炉的还原期,缩短了电弧炉的冶炼周期,提高了电弧炉的生产率,同时在一定时间内为连铸提供符合温度、成分及洁净度要求的钢液,保证了电弧炉+LF精炼+连铸工艺的顺行,使电弧炉发展成为可以用普通废钢和生铁生产普通钢种的高效率的短流程炼钢方式,而不再仅仅是生产高质量钢种的设备。LF精炼技术的出现对电弧炉炼钢技术发展的影响如图1-1所示。电弧炉发展的第一阶段是包括熔化、氧化、还原的传统型电弧炉。第二阶段是由于电弧炉炉型(出钢槽式电弧炉)的原因,为避免氧化渣污染钢液及发挥钢渣脱氧、脱硫的作用,在电弧炉内必须造好还原渣,钢渣混出,由LF来完

成进一步还原精炼的任务。第三阶段是由于无渣出钢技术的开发,还原期全部由 LF 精炼来完成,也即形成了现代电弧炉炼钢流程 EAF + LF + CC 的形式。

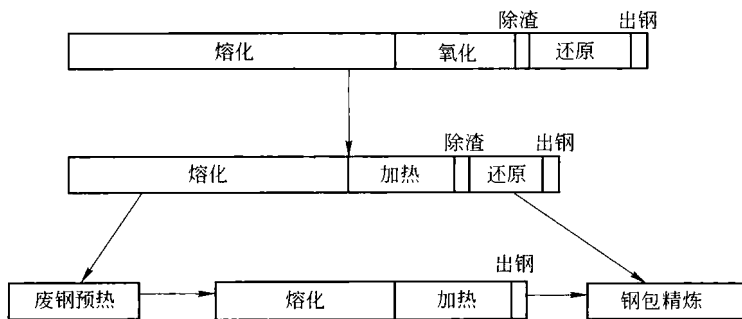


图 1-1 LF 精炼对电炉技术发展的影响

LF 用于转炉流程生产特殊钢,淘汰了过去用炼钢方法来区别钢质量的方式,确立了“初炼(电炉或转炉) + LF 精炼 + 连铸”的生产多品种、高质量钢的思想。LF 技术开发成功后,向多功能方向发展,1981 年在日本钢管福山制铁所开发了 NK-AP 法,即插入式喷枪代替透气砖进行气体搅拌法,1987 年开发了有喷吹设备和真空设备的 LF 法。

由于 LF 设备结构简单,具有多种冶金功能和使用中的灵活性,精炼效果显著,具有较高的经济效益,成为钢铁生产流程中的重要设备。

我国于 1979 年设计了第一台 40tLF/V 型钢包炉,从此 50 t 以下的 LF 纷纷被各钢厂使用,但大型 LF 还是依靠进口,如 1993 年天津无缝钢管公司从 Danmeg 引进的 150tLF、1994 年大冶特殊钢股份有限公司第四炼钢厂引进 Danieli 的 60tLF。当时冶金部组织了由大冶特殊钢股份有限公司、冶金自动化研究院、北京科技大学、钢铁研究总院等单位组成的攻关组,进行国家“八五”重点科技(攻关)项目“钢包精炼技术”(编号 6-3)的研究工作,在包括钢液温度控制、成分控制及洁净度控制方面取得了很好的效果,形成了具有自主知识产权的 LF 精炼技术。1996 年宝钢集团上海浦钢公司建成了一台国产三相三臂式 100tLF/VD,表明我国已具备了设计制造大型 LF 的能力,一年后宝钢集团上海五钢公司投产了一台三相电缆吊挂式 100tLF/VD,它是没有横臂结构的新型导电结构方式的钢包炉。1999 年武钢一炼钢厂建成了一台三相单臂式 100tLF/VD,这样经多年努力我国钢包炉设计技术和装备水平基本与进口相当,可以替代进口钢包炉。据不完全统计,我国已拥有大小 LF 120 台以上。表 1-1 所示为国内部分大型 LF 有关情况,包括 LF 的炉容、变压器、电极直径、升温速度、处理周期等<sup>[7]</sup>。

表 1-1 国内部分大型 LF 有关情况

厂名	生产钢种	LF 容量 /t	变压器容量 /MV · A	电极直径 /mm	升温速度 /℃ · min <sup>-1</sup>	处理周期 /min
武钢一炼钢厂	硬线钢、弹簧钢、重轨钢、低合金钢、焊丝、冷锻钢等	100	22 + 20%	457	3 ~ 5	25 ~ 40
上海五厂	弹簧钢、调质钢、高压锅炉钢管等	100	18	400	4 ~ 5	36
攀钢	普通碳素钢、低合金钢、优质碳素钢、深冲钢等	120	20	400	~ 2	24 ~ 34
宝钢电炉厂	油井管、高压锅炉管、中低压锅炉管、一般管线钢等	150	18		3 ~ 5	30

续表 1-1

厂名	生产钢种	LF 容量 /t	变压器容量 /MV·A	电极直径 /mm	升温速度 / $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	处理周期 /min
包钢	重轨钢、管线钢、气瓶钢、低合金钢、合金结构钢、优质碳素钢	80×2	14+20%	400	4~5	33~35
鞍钢一炼钢厂	重轨钢、低合金钢、合金结构钢、优质碳素钢等	80×2	16	400	3~5	37
兴澄钢厂	普通碳素钢、低合金钢、结构钢、优质碳素钢等	100			3~5	
张家港润忠公司	Q235 钢、20 钢、45 钢、20MnSi 钢等	100	13.5	400	3~5	20~25
南京钢厂	普通碳素钢、45 钢、65 钢、70 钢、80 钢、62B 钢等	70	12+20%		3~5	20~38
安阳钢铁公司	碳素结构钢、桥梁低合金钢	100	18			
抚顺特殊钢公司	碳素钢、合金结构弹簧钢、轴承不锈钢	60	10+20%			
张家港沙景钢铁公司	碳素结构钢、合金结构弹簧钢	80	13.5			
贵阳钢厂	碳素结构钢、合金结构弹簧钢	60	10			
涟源钢厂	碳素结构钢、合金结构弹簧钢、油气管钢	70	10			
宝钢三炼钢厂	油井管、压力管、锅炉管钢	150	22+20%			
八一钢厂	碳素结构钢、合金结构弹簧钢、低合金钢	70	12			

## 1.2 LF 的形式

钢包炉按加热方式可分为交流钢包炉、直流钢包炉以及等离子枪加热钢包炉。LF 在炼钢流程中的布置方式分为在线布置与离线布置。

### 1.2.1 交流钢包炉

交流钢包炉如图 1-2 所示,主要由钢包、钢包车、炉盖及电极组成。

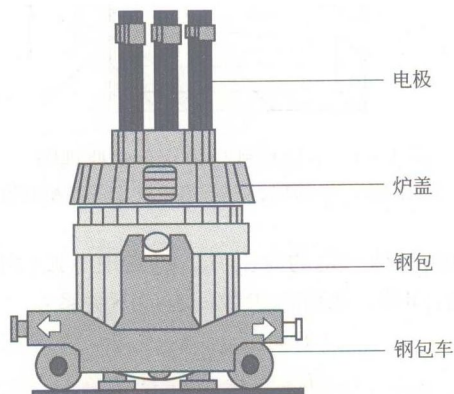


图 1-2 交流钢包炉示意图

### 1.2.2 直流钢包炉

对于小容量钢包炉(50 t 以下)采用交流形式会加重包衬的热负荷,降低钢包寿命,宜采用直流形式。直流钢包炉包括单电极直流钢包炉、双电极直流钢包炉和三电极直流电弧电渣钢包炉。

单电极直流钢包炉是采用中空石墨电极吹氩和底电极的匹配<sup>[1]</sup>形成的钢包炉。

第一台双电极直流钢包炉如图 1-3 所示,在英国 Brymbo 厂研制成功<sup>[8]</sup>。

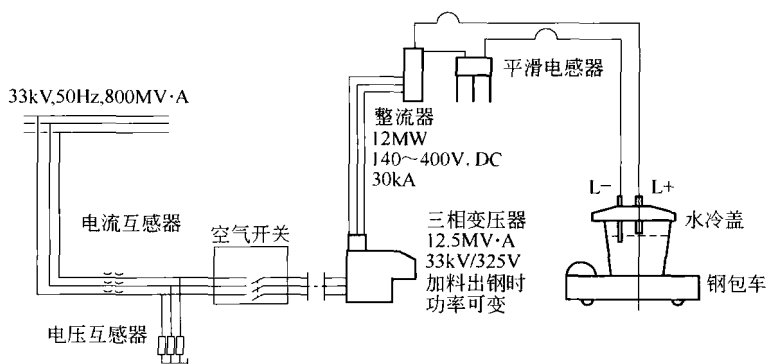


图 1-3 英国 Brymbo 厂的双电极直流电弧钢包炉

三电极直流电弧电渣钢包炉<sup>[9]</sup>原理如图 1-4 所示。采用连接钢包 1 外壳和金属熔池 2 的金属讯号极 6 和专门的控制系统将两根石墨阳极 4 控制在具有一定电阻的熔炉渣层 3 中的一定

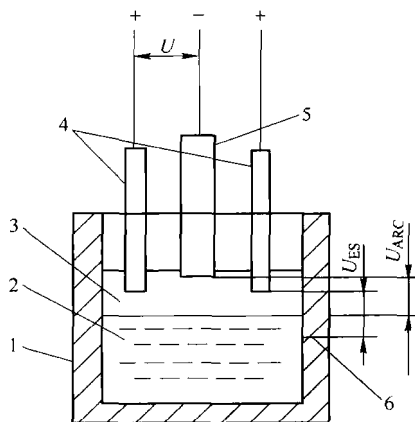


图 1-4 直流电弧电渣钢包炉原理图

1—钢包;2—金属熔池;3—渣层;4—石墨阳极;5—石墨阴极;6—讯号极

位置,使阳极端部与金属熔池间保持一定的电压  $U_{ES}$ ,以实现电弧(阴极 5 与金属熔池 2 之间)电渣(阳极 4 与金属熔池 2 之间)加热。系统电参数间有以下关系:

$$U = U_{ARC} + U_{ES}$$

$$I_{ARC} = I_{ES1} + I_{ES2}$$

$$P = U_{ARC} I_{ARC} + U_{ES} (I_{ES1} + I_{ES2})$$

式中,  $U$  为负载电压;  $U_{\text{ARC}}$  为电弧电压;  $U_{\text{ES}}$  为电渣电压;  $I_{\text{ARC}}$  为阴极电流;  $I_{\text{ES1}}$  为阳极 1 电流;  $I_{\text{ES2}}$  为阳极 2 电流;  $P$  为加热功率。通过调节  $U_{\text{ES}}$  可调节电弧与电渣供热比例。

### 1.2.3 等离子枪加热钢包炉

三相交流等离子钢包炉, 由于没有电极造成的增碳, 有利于生产高洁净度的极低碳钢。新日铁广畑制铁所使用的是三相交流等离子 PLF 法<sup>[2]</sup>, 如图 1-5 所示。

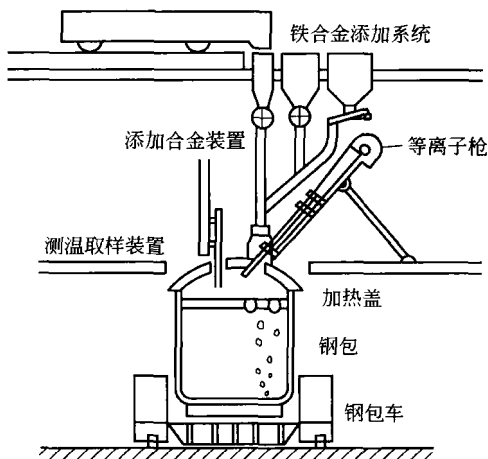


图 1-5 三相交流等离子钢包炉

## 1.3 LF 设备

现在普遍应用的 LF 是以电弧加热为主要技术特征, 包括电极加热系统、水冷炉盖系统、合金渣料加入系统、喂线系统、除尘系统、测温取样系统、底透气砖吹氩搅拌系统、钢包及钢包车控制系统。

### 1.3.1 电极加热系统

LF 所用电极加热系统与电弧炉相同。由于 LF 内无熔化过程, 二次电压相对较低。精炼时钢液面比较平稳, 电流波动小, 没有熔化炉料时引起的短路冲击电流, 许用电流密度选得较大, 所以 LF 采用低电压、大电流埋弧加热精炼钢液。要求电极调节系统要反应良好、灵敏度高, 电极升降速度一般为  $2 \sim 3 \text{ m/min}$ 。同时为避免电弧对钢包衬的热辐射, 三根电极采用紧凑式布置, 如图 1-6 所示。

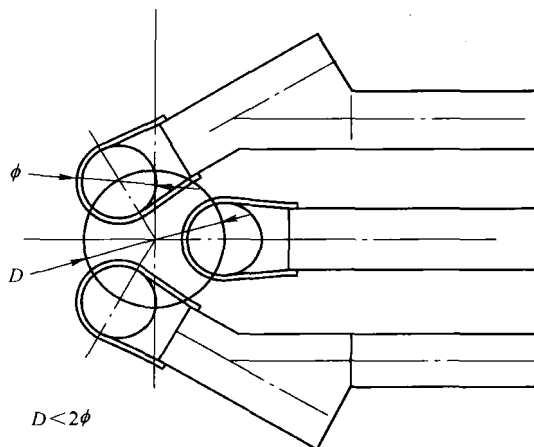


图 1-6 电极布置形式

### 1.3.2 水冷炉盖系统

LF 炉盖一般是管式水冷的, 以保证钢包内的强还原气氛及防止钢包散热, 提

高加热效率。水冷炉盖和排烟尘罩相连接,炉盖内衬有耐火材料,为了防止钢液喷溅而引起炉盖与桶体的粘连,在炉盖下吊挂防溅挡板。一般水冷炉盖悬挂在门形吊架上,吊架上有升降机构,可根据需要调整炉盖的位置,LF 炉盖的示意图如图 1-7 所示。LF 炉盖上开孔情况如下:

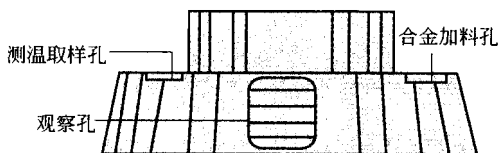


图 1-7 LF 炉盖示意图

- (1) 三个电极孔;
- (2) 除尘孔,与除尘系统连接;
- (3) 自动加料孔;
- (4) 炉盖侧面或在顶面边部开有观察孔,便于人工加料及测温取样,同时还可通过它观察炉内冶炼情况;

- (5) 喂线孔,喂铝线脱氧或喂硅钙线进行夹杂物变性处理;
- (6) 如果有自动测温取样装置,在炉盖上还开有自动测温取样孔。

水冷炉盖各路回水分别设有监测回水温度的热电阻,以反映出各冷却部位的工作状况,便于调整和处理。

### 1.3.3 合金渣料加入系统

LF 炉盖上如设有合金及渣料孔,合金或渣料就可通过贮料仓、称量漏斗、运输皮带、导向溜槽、炉盖上的合金及渣料孔,定量地加入,可实现加料的自动控制。炉盖上的加料孔最好正对钢包底部透气砖,以保证精炼时加入的料正好到由于吹氩搅拌造成钢液面裸露的位置,提高合金等的收得率。某厂加料系统示意图如图 1-8 所示,可在初炼炉出钢、LF 工位及 VD 工位加入合金或渣料。部分厂家没有贮料系统,合金或渣料在操作平台上称量后,通过观察孔定量加入。

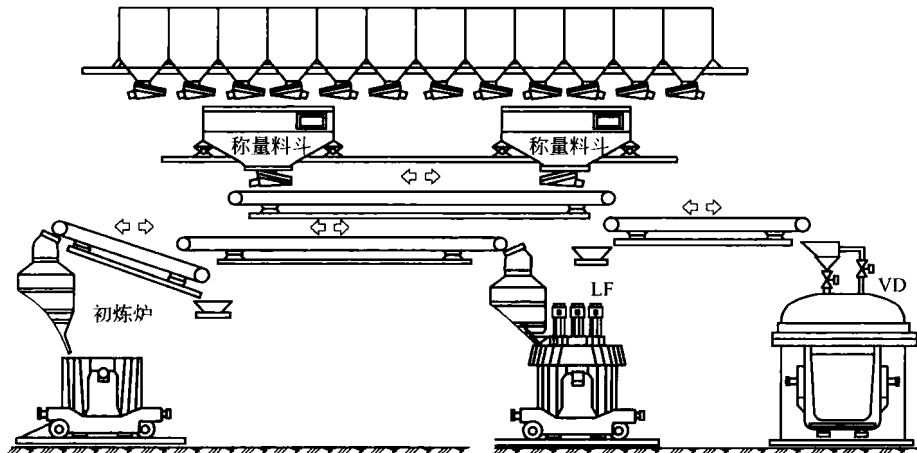


图 1-8 合金或渣料加入系统

### 1.3.4 喂线系统

通过喂线技术,将不同的合金加入钢液,能显著提高加入合金的收得率。一般 LF 都配有喂线设备,根据不同钢种的冶炼需要,向钢液中喂入钛线、碳线、铝线、硫线以及硅钙线等。喂线系统的组成如图 1-9 所示,由线圈、喂线机及喂线导管组成。喂线机最大喂入速度应根据最大盛钢液量时钢包的容量及不同喂入料的熔化时间确定。喂入速度可调,以保证喂入合金具有较高的收得率。



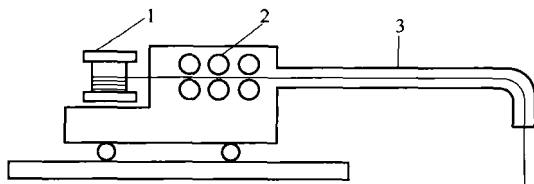


图 1-9 喂线系统

1—线圈;2—喂线机;3—导管

### 1.3.5 除尘系统

LF 烟尘通过 LF 除尘管汇集到主除尘系统,由厂统一集中处理。

### 1.3.6 测温取样系统

LF 一般都配有自动测温取样设施,自动测温可实现定点测温,所测温度值更具有代表性,可避免人为因素对钢液温度测量产生的波动。同时使用自动测温取样系统,也减轻了工人的劳动负荷。自动测温取样系统如图 1-10 所示。但目前 LF 即使有自动测温设备,现场操作时由于习惯及设备可能出现故障等原因,大部分生产厂仍采用人工测温,这样有可能出现不同操作者测出的钢液温度值有所偏差的结果。

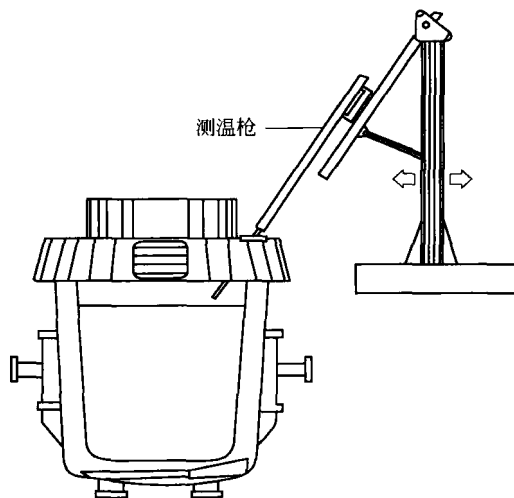


图 1-10 自动测温取样系统

### 1.3.7 吹氩搅拌系统

氩气通过氩气管道、流量调节阀及压力调节阀,由钢包底部透气砖吹入金属熔池。为保证透气砖有良好的透气性,透气砖应有足够的孔隙,但孔隙直径过大会引起钢液渗入,影响透气性能。为了防止钢液渗透,透气砖孔径与熔池深度间应有适当的关系。

透气砖安装在钢包底部的合适位置,才可充分发挥吹氩搅拌的作用,透气砖越靠近包底边缘,混匀时间越短,但透气砖靠近包底边缘,包底会因冲刷而侵蚀严重,所以一般把透气砖安装在包底半径中心位置,也有安装在中心位置的。图 1-11 为钢包透气砖的安装图。