

• 中国金属学会 •

冶金继续工程教育丛书



炉外精炼

知水 编著

1988年12月

《冶金继续工程教育丛书》

炉外精炼

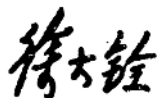
知水 编著

中国金属学会

序

中国金属学会组织编写了《冶金继续工程教育丛书》，为大家办了一件好事。积极开展继续教育，对于提高冶金科技人员水平，促进冶金工业的发展，具有重要意义。希望冶金战线各级领导重视这项工作，努力创造条件，为科技人员在职自学提供方便；同时也殷切希望广大冶金科技工作者坚持学习，不断吸收新知识，学习新技术，为实现四化，振兴中华做出更大贡献。

中国继续工程教育协会理事
冶金工业部副部长



一九八八年十二月

前 言

30多年来,钢铁工业发生了三件大事,一是氧气顶吹转炉炼钢,它从1952年问世之后便风靡全球,迄今已经和正在迅速取代平炉,成为主要的炼钢技术。另一件是连续铸钢,1949年,联邦德国曼内斯曼公司和容汉斯组成了连续铸钢共同体,以后,随着连铸技术的完善,经济效益逐渐提高,人们看到用连铸代替模铸可提高金属收得率8—10%,降低能耗50—70%,生产成本降低10—12%,劳动生产率提高20%以上,而钢材质量与模铸轧材质量相当或稍优于模铸轧材的质量。于是,世界各国竞相发展。由于连铸过程从一开始就必须与炼钢相适应,因此,在钢水包中脱氧与处理钢水对生产优质产品极为重要。实践表明,没有符合连铸要求的钢水质量,就不可能稳定连铸生产工艺和保证连铸坯的质量。第三件是炉外精炼技术,它把传统的炼钢方法分为两步。现代技术的发展,对钢的使用性能要求愈来愈高,为此,要求将钢的化学成分控制在较窄的范围内,特别是石油、天然气输送管;以及为改善板材厚度方向的性能,对低硫钢的需求日益迫切。当连铸钢坯用作热轧、冷轧板卷时,控制好钢水成分便显得更加重要。各种炉外精炼方法能保证钢水质量稳定,满足如下预期的要求。

- 1) 钢水中硫含量非常低;
- 2) 通过适当的钢水脱气,达到低的氢含量;
- 3) 成品钢的化学成分范围非常窄;
- 4) 调整钢水温度;

5) 保证对钢材质量越来越高的需要。特别是深海钻井用钢、油气输送管道用钢、高合金钢和不锈钢等，均要求成分均匀，清洁度高和杂质含量极少。

6) 炉外精炼技术可以减轻炼钢炉的精炼负荷，缩短冶炼时间，提高生产率和降低成本；并有利于消除钢中各类冶金缺陷，大幅度地提高钢质量。

目 录

前言

1 导论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 炉外精炼工艺特点	(4)
1.3 炉外精炼的工艺机能	(5)
2 炉外精炼的理论基础	(8)
2.1 钢液搅拌	(8)
2.2 真空的应用	(10)
2.3 合成渣洗理论	(13)
3 炉外精炼技术分析	(17)
3.1 精炼技术的选择	(17)
3.2 精炼脱碳技术	(17)
3.3 精炼脱硫技术	(18)
3.4 精炼脱磷技术	(19)
3.5 低氧钢生产技术	(20)
3.6 精炼脱氮技术	(23)
3.7 钢的清洁度及夹杂物变性技术	(25)
3.8 微量有害杂质去除技术	(29)
3.9 顶渣控制及挡渣技术	(31)
3.10 炉外精炼的热损失及热补偿技术	(34)
4 炉外处理技术	(36)
4.1 喷射冶金技术	(36)
4.2 钙处理技术	(45)
4.3 喂线技术	(49)

4.4 真空处理技术	(59)
5 清洁钢生产工艺技术	(63)
5.1 炉外精炼的钢质量	(63)
5.2 超纯钢生产技术	(64)
5.3 高质量钢的生产技术	(68)
6 分钢种生产工艺技术	(72)
6.1 不锈钢冶炼技术	(72)
6.2 高铬不锈钢的脱磷工艺	(75)
6.3 LF精炼技术	(86)
6.4 ASEA-SKF精炼技术	(89)
6.5 油、气管线用钢的精炼技术	(95)
7 当前炼钢技术动向	(100)
参考文献	

1 导 论

1.1 概 述

炉外精炼是把转炉、平炉或电炉中初炼的钢水移到另一个容器中（主要是钢包）进行精炼的过程，也叫“二次炼钢”。炉外精炼把传统的炼钢方法分为两步，即初炼加精炼。初炼：在氧化性气氛下进行炉料熔化、脱磷、脱碳和主合金化。精炼：在真空、惰性气氛或可控气氛的条件下进行脱氧、脱硫、去除夹杂和夹杂变性，调整成分（微合金化）、控制钢水温度等。炉外精炼的发展可追溯到1933年Perrin用高碱度合成渣炉外脱硫。50年代的钢水真空处理技术，1956--1959年研究成功DH法和RH法。60年代研究成功的VAD、VOD和AOD炉。70年代以来又有LF、WF、IJ、CLU炉等相继出现。目前，全世界有500余台炉外精炼设备投入工业生产。

炉外精炼在现代化的钢铁生产流程中已成为不可少的一个环节。在1970年以前，几乎所有钢包精炼方法，都已有相当的工业规模，但它的应用尚限于特殊钢的生产，在总钢产量中的比例不足10%。直到70年代中期，由于能源危机，钢铁工业力求降低成本、提高经济效益，首先是日本，然后是西欧的钢铁企业，出现了两种技术趋势，一是连续铸钢技术的广泛应用，以取代传统的锭模浇铸；二是采用大型转炉生产优质钢、特殊钢，以提高产值及利润率。显然，为了使连铸工艺顺利进行，通过炉外精炼来降低钢中硫、氧含量，以及均匀钢包中的钢水温度、成分是十分必要的。目前，已用“钢

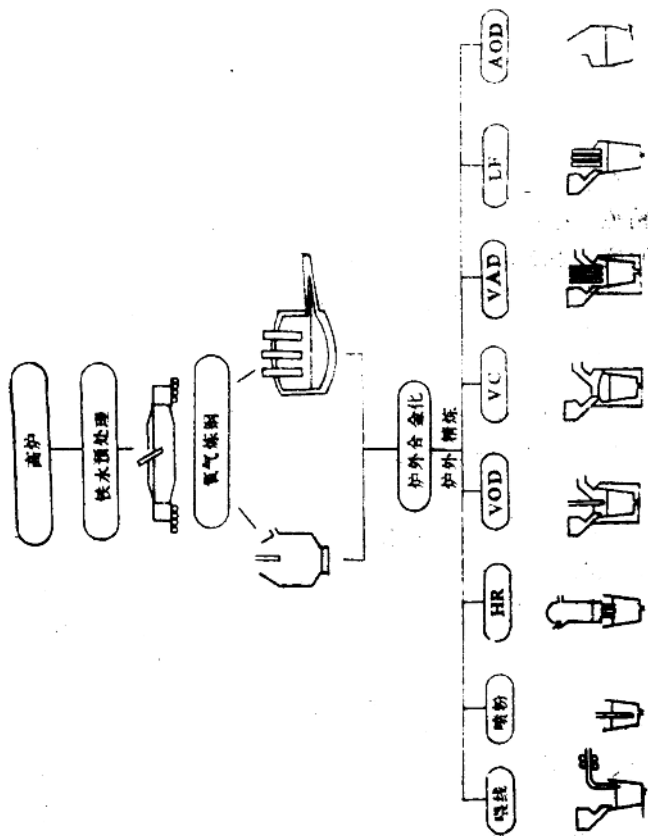


图1-1 现代炼钢模式图

水准备”一词来加以概括。

传统的钢铁生产流程：高炉→炼钢炉（转炉、平炉和电炉）→铸锭，已逐步地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，已成为国外大型钢铁企业技术改造后的普遍模式（图1-1）。

近年来，世界钢产量波动在 7 ± 0.5 亿吨，1986年产钢量为7.12亿吨，比1985年下降了0.7%，钢的产量变化不算大。但是铁水预处理、炉外精炼等新技术、新工艺却大量地应用于工业生产。以日本为例，钢产量、炉外精炼比和连铸比如表1-1。

表1-1 日本钢产量、炉外精炼比和连铸比

年		1973	1978	1983
钢产量, $\times 10^6$ t		119.5	102.1	97.2
炉外精炼比, %	LD初炼	4.4	13.8	48.0
	EF初炼	—	25.0	39.2
连铸比, %		20.7	46.2	66.2

由于新技术的应用，经济效益大增。近年来，日本的吨钢能耗下降18%，而钢材的收得率从84.8%提高到90.8%。

我国于1957年开始研制钢液真空处理技术，由于多种原因，这项技术没有得到推广。我国现有RH设备5台，ASEA—SKF 2台（15 t和100 t），VOD炉2台（15 t、60 t），VAD—VOD炉若干台在筹建中。真空铸锭在我国获

得一定的发展，目前，已掌握了50—250 t大钢锭的浇铸技术，并具有较高的水平。我国钢厂炉外精炼情况如表1-2。

表1-2 我国钢厂的炉外精炼装置(台)

钢厂	VD	DH	RH	钢包 喷粉	VOD/VAD	ASEA- SKF	LF	AOD
特钢厂		1	2	11	9	1	3	2
联合钢铁企业			2	28				
其他	4	1	2			2	1	
合计	4	2	6	39	9	3	4	2

我国的炉外精炼技术是密切结合国民经济需要大量优质钢材的情况而发展起来的。在以转炉和平炉炼钢为主的大型钢铁企业中，目前主要采用钢包吹氩、钢包加合成渣吹氩、钢包喷粉和真空处理技术。在以电炉为主的中型钢铁企业中，则多采用VOD/VAD、AOD、ASEA—SKF、LF和钢包喷粉等工艺。总之，我国的炉外精炼技术繁花似锦，方兴未艾，处于发展之中。

1.2 炉外精炼工艺特点

各种炉外精炼方法的工艺各异，其共同点为：1)有一个理想的精炼气氛条件，通常是应用真空、惰性气氛或还原性气氛；2)搅动钢水，可采用电磁力、惰性气体或机械搅拌的方法；3)为补偿精炼过程中钢水的温度损失，采用的加热设施有电弧加热、埋弧加热、等离子加热或增加钢水中

化学热等。

炉外精炼一般可分为两类：1) 钢包处理型炉外精炼法，如DH法、RH法、WF法和IJ法等；2) 钢包精炼型炉外精炼炉，如VAD、VOD、LF和AOD法等。各类炉外精炼的特征如表1-3。

表1-3 炉外精炼的特征

类型	精炼时间 min	补充 热源	精炼 机能	投资	设备
钢包处理型	<30	无	单一	少	简单
钢包精炼型	60—120	有	多种	多	复杂

1.3 炉外精炼的工艺机能

钢包精炼工艺机能可加速某些冶金反应，收得率高，再现性好，并能满足产品的特殊要求。与普通炼钢所不同的是钢包精炼在非氧化或还原性条件下进行。

钢包精炼特别适合如下的冶金过程。

温度和成分的均匀化；

合金化，调整钢的晶粒度；

脱氮；

改变非金属夹杂物组成或性状；

脱硫；

脱气，例如氢和氮；

去除有害元素；

净化晶界；

调整温度。

钢包精炼方法不同，采用的工艺操作也不同，因而，效果也不一样。与具有同样冶金条件的其它常规方法相比较，钢包精炼方法具有独特的优点，这就是钢水可以从精炼容器直接浇注。钢水从炉内倒入钢包时，有吸氧、氮和氢的危险；而直接浇注，不仅钢水不会暴露于空气中，而且还有以下优点。

1) 因为钢包已被加热到良好状态，处理过程中的钢水受到均匀搅拌，所以浇注过程中的钢水温度波动较小。

2) 不会有当渣子不能挡在炉内，与钢水一起冲入钢包。

表1-4 炉外精炼的工艺机能

冶炼机能 精炼机能	脱氢	脱氧	脱氮	脱硫	脱碳	控制成分	控制温度	去夹杂	控制形态	氧化物还原
真空	++	++	+	-	-	+	-	+	-	-
可控气氛	+	+	+	+	-	++	-	+	-	+
搅拌钢水	+	+	-	+	+	++	++	+	-	+
合成渣精炼	-	++	-	++	-	-	-	++	-	++
加热	-	-	-	+	+	++	++	+	-	++
吹氧	+	-	+	-	++	-	-	-	-	-
添加合金	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+
喷吹精炼剂	-	++	-	++	-	-	++	++	++	-

注：++—效果显著；+—一般；-—无效果。

时，被去除的元素再从渣中返回到钢中的危险。

3) 从精炼完毕到浇注之间的间隔时间短，因此，减小了已去除元素从渣中返回的危险。

4) 钢包添加合金元素的收得率较高。

5) 非金属夹杂物，特别是大型夹杂物的含量低，因为在钢处理中，搅拌促进了钢中夹杂物的去除。

几种炉外精炼法的工艺机能如表1-4。

2 炉外精炼的理论基础

炉外精炼的目的是提高钢的质量，强化冶金反应过程，提高钢的清洁度，控制夹杂物形态。下列操作技术及其组合是保证完成炉外精炼的重要工艺。

- 钢液搅拌
- 真空的应用
- 渣洗理论
- 钢液加热

2.1 钢液搅拌

钢液搅拌是炉外精炼过程中加强冶金反应动力学条件的重要手段。一般地说，钢液搅拌就是向系统内供应能量。使金属和熔渣产生运动。它可借助气体、电磁感应和机械的方法来实现。

2.1.1 气体搅拌

气体搅拌是钢液搅拌方法中最简单的一种，气体可通过透气砖、风眼或喷枪来吹入。吹入气体的比搅拌能与气体流量有关，按照下列方程式计算。

$$\varepsilon = \frac{6.2 \times 10^3 \times Q \times t_1}{M} - \ln(1 + 9.68 \times 10^{-3} \rho \times Z) + (1 - t_0/t_1) \quad (2-1)$$

式中 ε ——搅拌能密度， W/t钢；
 Q ——气体流量， L/min；
 M ——钢液重量， t；

ρ ——钢液密度, g/cm^3 ;

Z ——插入深度, cm ;

t_1 ——钢液温度, K ;

t_0 ——气体温度 K 。

根据不同的冶金目的, 可采用不同的氩气流量,

温度成分均匀化 $0.08\text{--}0.13 \text{ m}^3/\text{min}$,

熔解钢包加入物 $0.30\text{--}0.45 \text{ m}^3/\text{min}$,

渣钢反应(去硫) $0.45\text{--}0.90 \text{ m}^3/\text{min}$,

喷枪喷粉 $0.90\text{--}1.80 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

2.1.2 感应搅拌

采用低频率电流, 通过改变熔体中的电磁场来搅拌钢液, 可用式(2-2)计算。例如, ASEA-SKF, 采用直线式电磁线圈时, 搅拌效果在 $40\text{--}130 \text{ W/m}^3$ 内变化, 采用圆筒形电磁线圈时, 其变化范围为 $300\text{--}400 \text{ W/m}^3$ 。

$$\varepsilon = 1.2 \times 10 \times d^2 \times \rho_1 \times h^{2/3} / M_1 \quad (2-2)$$

$$h = 316 \sqrt{\frac{u \cdot \mu}{r \cdot f}} \times \frac{p}{S} \times \frac{1}{\rho_1}$$

式中 d ——钢包直径, cm ;

ρ_1 ——钢液密度, g/cm^3 ;

M_1 ——钢液重量, t ;

h ——钢液上升高度, cm ;

μ ——导磁率;

f ——频率, Hz ;

p ——输入功率, kW ;

u ——钢水流动速度, cm/s ;

r ——电阻系数, cm^{-2} ;

S ——钢液表面积, cm^2 。

感应搅拌可以通过多相运动磁场或单相感应圈中的电动压强来实现。比搅拌能是线圈电流、线圈与钢水之间距离的函数。ASEA—SKF中的比搅拌能被动范围很宽。它取决于搅拌线圈的形状, 直线形搅拌器是 $40\text{—}150 \text{ W/m}^3$, 圆柱形搅拌器是 $300\text{—}400 \text{ W/m}^3$ 。

2.1.3 RH与DH输入搅拌能的计算

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} &= \frac{1}{2} v^2 \cdot W / W_s \\ &= 0.00835 v^2 \cdot W / W_s \end{aligned} \quad (2-3)$$

式中 v ——下降管的线速度;

W ——环流量;

W_s ——钢水重量。

2.1.4 钢液循环与搅拌混合时间

钢液搅拌对促进精炼反应十分重要, 而加入物与钢液的混合均匀时间 t_c , 是冶金反应的参量。中西归纳了混合均匀时间与输入搅拌能的关系, 如图2-1。

$$t_c = K_c \cdot e^{-0.4} \quad (2-4)$$

式中 K_c ——常数(800)。

2.1.5 钢液的搅拌效果

温度梯度和浓度梯度通过搅拌很容易消除。一般的情况下, 用 15 L/min 气体, 经过 $2\text{—}3 \text{ min}$ 就可达到均匀化的目的。表2-1列出一系列均匀化的数据。

2.2 真空的应用

按照希维茨(Sieverts)定律, 金属中的气体含量(氢、