

国外炉外精炼技术 (一)

冶金部炉外精炼办公室

北京 1993年10月



国外炉外精炼技术 (一)

编辑 刘 浏 钟甬芳 李伟立 张荣生

技术指导 邓开文

冶金部国外精炼办公室

北京 1993年10月

编 者 序

为了配合国家“八五”炉外精炼技术一条龙技术攻关，冶金部炉外精炼专家办公室选编了这本《国外炉外精炼技术》，供有关人员参考。

本文集精选入1984年以来国外有关杂志公开发表的炉外精炼研究论文34篇，内容包括：炉外精炼技术发展的综合评述；RH、CaS—OB和LF钢包炉精炼工艺和技术装备；超纯净钢冶炼工艺技术；炉外精炼有关的热力学、动力学，传热、传质和流动状态等技术基础理论研究以及耐火材料、自动化控制等炉外精炼相关技术。

炼钢技术发展到今天，炉外精炼已经不再是单纯冶炼少量特殊钢的精炼方法，而是现代化炼钢生产工艺中必不可缺的生产环节。在现代炼钢生产工艺中，炉外精炼的主要作用如下。

- (1) 均匀钢水成分和温度，减少钢中夹杂物和成分偏析；
- (2) 进一步降低硫、磷含量，提高钢水纯净度；
- (3) 真空脱气、脱碳和脱氧冶炼超纯净钢和超低碳钢；
- (4) 加热钢水，精确控制连铸钢水开浇温度；
- (5) 作为炼钢与连铸间的缓冲设备，利于提高连铸机的作业率。

目前，我国钢产量已位居世界第三，是名符其实的产钢大国。如何进一步提高钢材质量，降低生产成本，不断开发新产品，是急待解决的技术问题。解决上述问题，根本途径是抓好炉外精炼技术。

“八五”期间，炉外精炼技术已经列为国家重点攻关技术。通过引进和消化国外先进的工艺和装备技术，再经过国内研究开发，不断完善，一定能使我国的炉外精炼技术提高到一个新水平，赶上或超过国际先进水平。我们衷心希望，本文集能为实现这一攻关目标，作出一定的贡献。

——编者

目 录

1. 二次精炼设备的要求、工艺和方法 (1)
2. 二次精炼, 尤其是RH真空处理的发展方向 (8)
3. 多功能二次精炼工艺的发展 (14)
4. 名古屋钢厂RH真空脱气二次精炼工艺的发展 (21)
5. RH真空除气过程中加速脱碳的研究 (27)
6. RH反应器内脱碳变化的研究与操作改进 (35)
7. RH脱气装置中的真空脱碳速度 (44)
8. RH设备中的紊流和混合现象——下降管堵塞的影响 (48)
9. RH设备非稳态流场和浓度场的模拟计算 (55)
10. 有限元法分析RH脱气的温度、应力场 (62)
11. 多功能二次精炼技术RH喷粉法的开发 (65)
12. RH—PB—二次精炼新工艺 (73)
13. Chjba钢厂用RH顶吹法处理超低碳钢 (78)
14. 德国蒂森钢铁公司利用RH生产超低硫钢的实践 (81)
15. Q—BOP—RH流程综合精炼工艺生产超低碳钢 (86)
16. 加古川钢铁厂无间隙钢的精炼工艺 (91)
17. 北美第一台RH—OB真空脱气装置的投产 (97)
18. 内陆钢公司第4氧气转炉炼钢厂生产洁净钢的原料和工艺改进 (106)
19. STELCO公司ERIE湖钢厂(LEW) RH—OB/PB真空脱气装置的

投产运行情况	(114)
20. 炉外精炼是大同连铸的基础	(124)
21. 在SOLLAC Dunkirk钢厂超低碳钢的生产	(130)
22. 钢液经DH真空处理脱氢综述	(138)
23. 在圆筒形熔池中垂直吹氩容器的高度与直径比对混合速度 的影响	(145)
24. 钢包处理中耐火材料对钢质量的影响	(155)
25. RH用Mg质干性热修补材料的开发	(162)
26. 气体搅拌钢包系统中固—液相间热量和质量传输	(168)
27. 钢包冶金法去除钢水中杂质元素	(174)
28. 钢包冶金——真空钢包炉和真空罐钢包炉的比较	(184)
29. 使用一种发热合成渣的钢包精炼法	(191)
30. 喷入颗粒状碱性氧化物和还原剂混合物的钢包精炼	(198)
31. CAS/CAS—OB工艺	(206)
32. Fos—Sur—Mer炼钢车间的CAS—OB工艺构思与首次 操作结果	(212)
33. IR—UT——温度控制钢包处理	(217)
34. 国家钢铁公司GRANITE CITY厂钢包精炼炉的经验	(221)

1. 二次精炼设备的要求、工艺和方法

Rüdiger Lemor

最重要的二次精炼工艺是真空脱气、真空吹氧脱碳、真空循环脱气和钢包加热炉。由于所处地区环境不同，二次精炼车间的概念有很大区别，不仅是建立VD—LF炉双联生产线，也包括建设VD (VOD)—LF炉或VCP—LF炉双联生产线。设计二次精炼车间，一方面要考虑精炼目标，另一方面也要考虑到和车间有关的方面。

目前，国际钢铁工业现状集中体现了对高质量钢的需求增长和努力降低生产成本和提高生产效率。

先进的钢铁厂生产规范可以满足最高的技术要求：改善钢水纯净度，进一步降低有害元素的含量；控制钢水温度更均匀，化学成分均匀；采用适当的工艺流程，降低生产成本；在熔炼炉容量保持不变的前提下尽可能改善能量利用率和提高原材料收得率；减轻熔炼炉的冶金负荷以提高其作业率。

以前，炼钢总是尽可能多地在熔炼炉内进行各种冶金反应，往往造成某种特殊类型的钢只限于某种特殊的炉子生产，即特殊炉子只限于少数生产工序。例如不锈钢不能在转炉中生产，而按合金化工艺可在电炉中生产。

为了优化生产工艺，改善钢水质量，超高功率电炉和纯氧转炉迅速发展，使熔炼炉的冶金灵活性降低。一部分精炼功能转到二次精炼中，使“二次精炼”兴起。

二次精炼的目的为：脱硫、脱碳和脱氧；

脱气（去除氢气、氧气和氮气）和CO气体还原；合金化、均匀钢水成分和温度；加热——化学法或电热法升温。

二次精炼工艺

从50年代真空脱气开始，已经开发出各种不同的处理工艺和方法，统称为“二次精炼”。

二次精炼基本工艺

	转 炉 过 程		钢 包 炉 过 程							
	常压操作		真空操作	真 空 操 作				常 压 操 作		
	AOD	ASM	VODC	VD	VOD	VAD	VCP	AP	IP	LF
脱硫	×	×	×	×	×	×			×	×
脱碳	×	×	×		×					
脱气			×	×	×	×	×			
脱氧	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
CO气体还原			×		×					
加热(化学法)	×	×			×					
(电热法)			×			×				
合金化	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
保 温						×				×

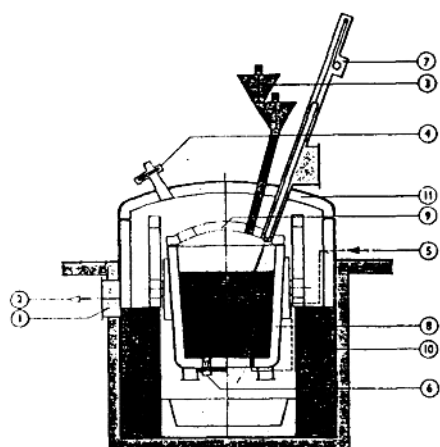


图1 VD脱气炉

1—真空管线；2—废气；3—合金密封仓；4—窥测孔；5—惰性气体；6—滑动水口；7—取样测温装置；8—钢包；9—挡热板；10—真空罐；11—真空盖。

根据车间布置、原材料及能源供应以及炉子容量、质量要求和生产工艺所选定的各类不同处理工艺，均易于达到冶金目标（表1）。

以上是主要的精炼工艺，但并不完全。二次精炼工艺还包括：铸流脱气、真空铸锭和电磁搅拌等。

各类二次精炼工艺的主要区别决定于熔炼炉和精炼炉分开后的冶金任务。任何一种特定的精炼工艺绝不可能对完成所有的冶金任务都是质量上和生产效率上最佳的方法。考虑到现有操作和工艺条件的每一种处理工艺，作为生产中的连接环节均是合理的。对某种特定情况，最佳的处理工艺和最有效的精炼车间配置应参考近似的车间模式。

本文将对精炼车间的建设原则及其典型的处理效果进行详细的讨论。

1) VD——真空脱气炉

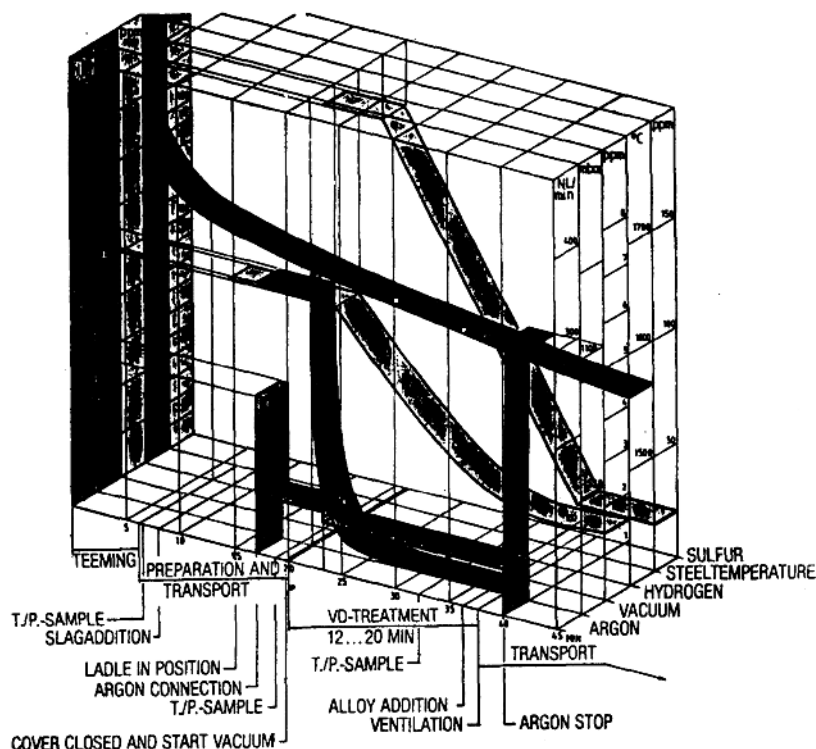


图2 典型的VD处理程序

如图1所示将留有一定净空高度的钢包放入密封的真空罐内，吹Ar促进反应过程。对大容量钢包也可采用吊装工艺。VD炉可以精确地控制脱氧脱硫反应和进行合金微调。尽管受到处理过程降温的限制，但惰性净化气体可使钢水成分和温度更加均匀。

在高真空下，图2给出VD炉典型的处理效果。同时进行抽真空和吹Ar搅拌，使脱硫和脱气同时进行。处理时间决定于熔炼炉的出钢温度。

真空下不吹氧也可进行脱碳反应，生产出 $[C] \leq 0.01\%$ 的超低碳钢水。这种称为VCD（真空碳脱氧）法的工艺，利用钢中未脱除的氧，在真空下去除与气相中CO（约200mbar）相平衡的碳量。初始 $[C] = 0.04\%$ 时，处理终点 $[C] \approx 0.005\%$ 。进一步降低真空度可继续进行深脱碳处理。

2) VOD——真空吹氧脱碳炉

当VD炉在真空下采用氧枪进行氧化精炼，就变为VOD炉（见图3）。由于真空下剧烈的C-O反应，要求钢包净空高度达到1~1.2m。当生产高铬低碳不锈钢时，在真空下吹氧脱碳几乎不造成任何铬氧化。停止吹氧后，随着压力进一步降低，发生碳沸腾使熔池继续保持较低的脱碳速度。

尽管该工艺最初发展是为了冶炼不锈钢，但它也可以用来生产中、低合金含量的钢种。在这种工艺中，Si或Al的燃烧提供足够的热量以保证以后的冶金反应。

图4示出典型的VOD钢包处理工艺，包括以下两个步骤：

- 第一阶段，吹氧进行冶金反应，得到足够的温度裕量保证其后的高真空处理；
 - 第二阶段，真空脱气处理，包括低速脱碳、还原、脱硫和脱气以及进行合金微调。
- 每一阶段的处理时间决定于生产钢种的质量要求。

3) VCP——真空循环脱气工艺

如图5所示，VCP工艺是一种可以将部分钢水从钢包中提升到真空室内的连通器。在真空室内脱气后的钢水又返回到钢包中。耐火材料砌筑的真空室与蒸气喷射真空泵相连接。真空室下部两只浸入管插入钢水中。真空室内的真空度可保证钢水上升，而上升管内吹入惰性气体作为输送气体使钢水连续环流。

真空室内钢水处理前后的温降可用石墨加热系统补偿。在真空条件下可连续、有效地加入合金，在无渣条件下进行合金微调。处理时间8~20min。处理完成后用N₂气冲洗真空室至常压，钢水全部流入钢包内，并准备浇铸。

和VD炉一样，VCP炉也可以进行真空下碳脱氧。

4) LF——钢包精炼炉

如图6，钢包精炼炉（LF）可以在钢包内利用电弧加热钢液。不论下一步如何精炼，均可保证精确的浇注温度。如果没有LF炉，必须提高熔炼炉的出钢温度以补偿各种温降。而提

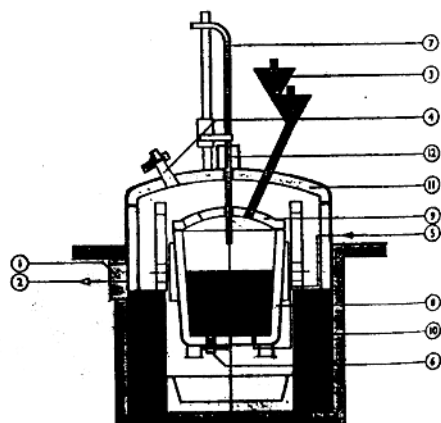


图3 VOD——真空吹氧脱碳炉

- 1—真空管线；2—废气；3—真空合金料仓；4—窥视孔；5—惰性气体；6—滑动水口；7—氧枪；8—钢包；9—挡热板；10—真空罐；11—真空盖；12—真空密封套筒

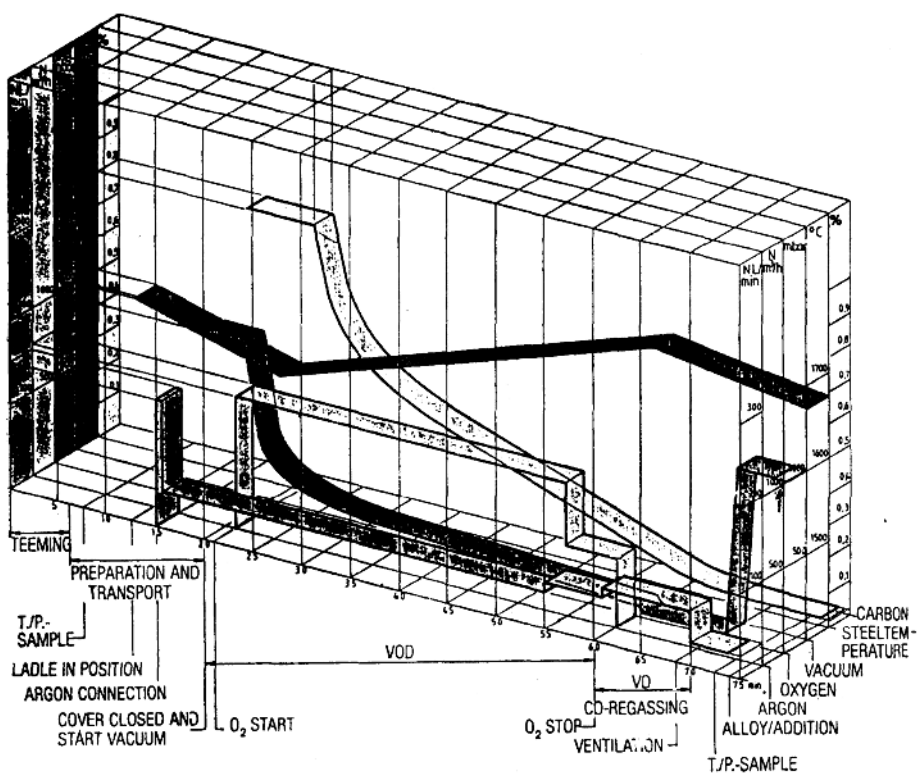


图4 典型的VOD处理程序

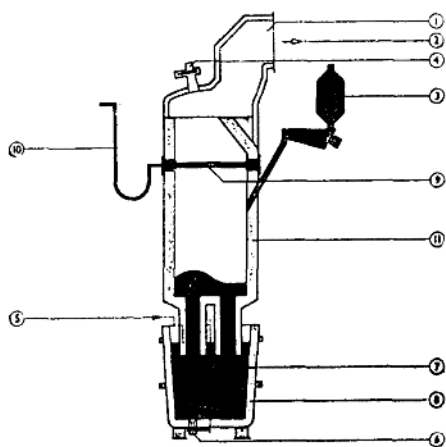


图5 VCP真空循环工艺

- 1—真空管；2—废气；3—合金料仓；4—窥视孔；
5—惰性气体；6—滑动水口；7—上升、下降管；
8—钢包；9—直流电极加热；10—大电流电缆；11
—真空室

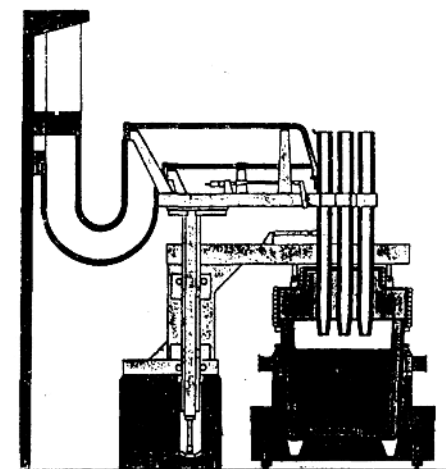


图6 LF钢包精炼炉

高出钢温度必然使熔炼炉的化学或电能消耗增加,并延长冶炼时间。其结果不仅生产成本升高并使耐火材料消耗增大。而且,冶炼低磷钢几乎是不可能的。除了加热,LF炉还可以同时进行以下精炼:如钢水保温至下一炉开浇,初步合金化,脱硫,进一步净化钢水改善纯净度。

二次精炼车间

设计二次精炼车间,一方面要决定主要设备的参数;另一方面要考虑具体的现场条件。当然,对完成同一精炼任务,车间可采用根本不同的工艺流程。

1) VD炉车间

如图7, VD车间应配备以下主要设备:真空密封罐,可升降和行走的钢包盖;真空抽气系统;合金加入系统和控制室。

真空罐安装在地平面以下,深度应能保证其上上部真空密封系统接近正常工作范围。通过真空盖升降和移动系统可方便地开启或放入钢包后关闭真空罐。蒸气喷射泵系统包括喷射泵、冷凝器和管网。为了节约空间,真空系统往往放在柱列区。至于加料系统只是从皮带运输机到密封加料系统和紧固在真空罐上处于关闭位置的包盖连接。根据现场空间条件决定采用任何其它设施。

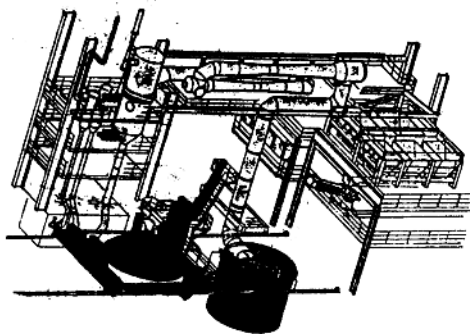


图7 VD脱气车间布置

2) LF车间

钢包加热炉车间主要包括以下设备:变压器室、电极支架、包盖提升系统、钢包车。

变压器输出的电流经过柔性水冷电缆与电极臂连接。电极臂用液压升降并带动水冷电缆、电极横臂和电极一起运动。支撑结构可保证当钢包开进时用液压系统提升包盖。钢包盖采用盘管结构,而电极孔和二次排烟罩对精炼时排烟是有效的。

3) 双连工艺

将VD炉与VOD炉或LF炉放在一起可实现不同的双联工艺。可根据VOD处理工艺来选择钢包固定在一个位置上或是频繁地移动。如果仅单独VD处理,钢包可固定在真空罐内。这种情形,加热系统可安排在同一位置,水平旋转是可行的。在常压下通过炉盖中心的开孔下降电极进行加热。如果VD炉加上吹氧(VOD),氧枪总要通过真空系统的中心而使电极不能插入。这种情形下,VD炉与LF炉必须分开布置。如图9所示,钢包和真空罐放在钢包车上,开入适当的处理工位。两个处理站可共用一套原料系统,互相独立工作。渣料等可从同一个料仓内分别加入。每套系统各自配备一套独立的测温取样枪。

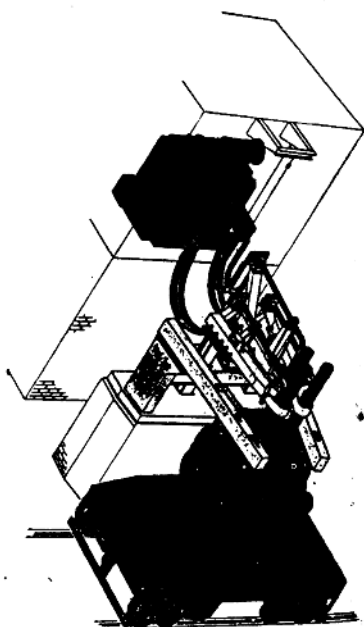


图8 LF钢包精炼炉结构

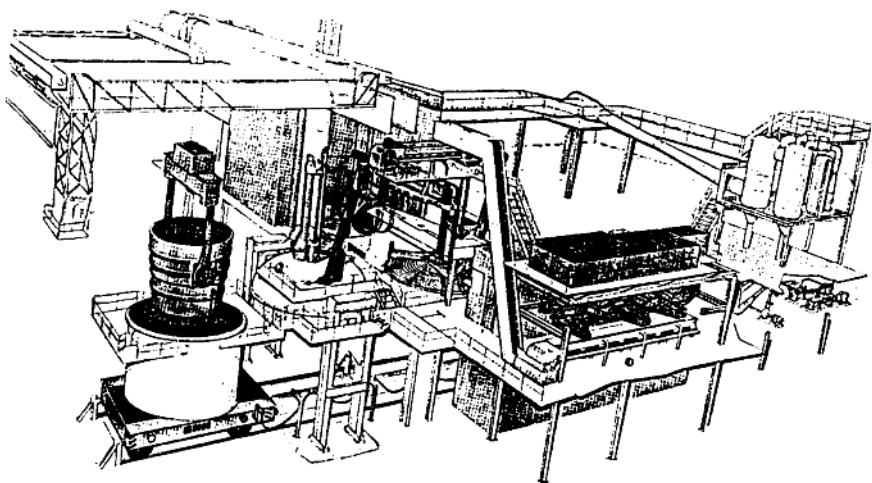


图9 VD/VOD—LF炉双联车间工艺布置

4) VCP车间

精炼钢包一般要求最小的净空高度约为600mm。因此，采用钢包精炼工艺或者要求增加钢包高度，或者需要减少处理钢水量。较高的钢包需额外增加吊车的能力。如果受条件限制，不可能，或者由于出钢、浇注及钢包烘烤现场缺乏足够的高度以及不允许降低车间的生产能力。在这些情况下采用钢包精炼为主的工艺是不可行的。而采用VCP工艺可以解决上述问题。

在决定采用VCP工艺以前，必须慎重考虑以下关键问题：

- 1) 车间的适应性；
- 2) 真空室的移动；
- 3) 钢包的运输。

生产能力决定于作业时间，主要是熔炼炉和连铸的作业周期。二次精炼车间必须在要求的作业时间内完成其精炼任务。车间的作业率主要决定于维修时间、准备工作和炉衬耐火材料寿命。根据车间作业率决定其自动化程度。

真空室浸入管要插入钢液中才能处理，可采用以下两种办法解决：1)降低真空室位置；2)提升钢包。

下降真空室需要一个特殊的防护罩，结构复杂、造价昂贵。而且真空室更换程序的操作成本很高。提升钢包需要造价较高的液压和卷扬系统。该系统也需要特殊的防护以避免万一漏钢时烧损。采用钢包吊装回转台或钢包吊装台车两种钢包吊装系统可将上述两种方法结合起来。

钢包回转台的优点是在处理过程可吊装第二只钢包，即便在吊车占用时也有很大的灵活性。相反，采用钢包吊装台车投资便宜。

图10显示出具有很高生产效率的精炼车间。车间正中正在进行处理，其左面是一个处于等待位置的真空室。采用顶吹喷枪燃烧器加热保温。其右面是钢包准备和烘烤站。钢包使用前，底部和中部分别烘烤，而包盖在另一个专用炉上干燥。

真空脱气站的上方设有铁合金料仓而真空泵系统在处理容器的右面。

这一特例是钢包移动。处理罐放在罐车上。当交换处理罐时，烟道、加热电极电缆线和合金加入系统可以迅速脱离。

5) VCP与LF炉双联

和VD炉相比，VCP炉处理过程温降小，但也要求一定的钢水过热度。由于处理时间长，不可能不降温。在VCP炉前面或后面加上单独的LF炉是值得推荐的。部分钢水可单独进行VCP或LF处理，工艺流程很方便。

结论

在不增加炼钢车间生产能力的前提下，为了改善钢质量、降低生产成本和提高生产效率，导致二次精炼工艺的发展。目前，二次精炼工艺提供了许多精炼方法和工艺流程，并获得以下效益：

- 1) 缩短熔炼炉的冶炼周期，提高设备作业率；
- 2) 降低出钢温度使耐火材料消耗减少；
- 3) 提高了能量利用率和金属收得率使生产成本降低。

对于设计和建设最佳的二次精炼车间，设计人员一方面要考虑精炼目标，另一方面也要注意和车间有关的选择。过去几年建设的许多VD车间中，最成功的范例是成功地兼顾了真空脱气、合金化、取样和测温与常压下对敞口钢包进行合金化或喂丝的冶金可行性。最大容量达到160t。

摘译自《Metallurgical Plant and Fechnology》，1986，4，74~85。

刘 测 译 钟雨芳 校

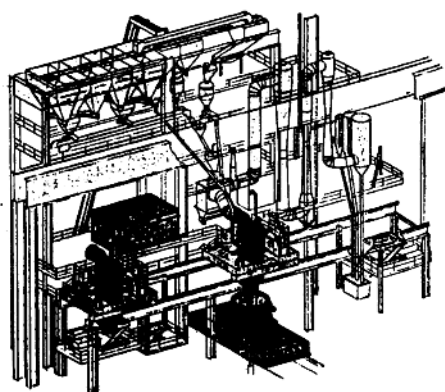


图10 VCP车间布置

2. 二次精炼,尤其是RH真空处理的发展方向

H.P. Haastert

在现代化钢厂的物料流动中,初炼过程后的二次精炼炉后处理是必不可少的。

表1 二次精炼的目的及措施

目 的	措 施
1.合金化/均匀化,调整钢液成分和温度	合金添加技术,搅拌、喷吹、真空处理喷射处理
2.提高纯度,减少不需要的元素和非金属夹杂	用添加剂进行处理、搅拌、喷吹、真空处理、降低分压、喷射处理
3.夹杂物变性	喷射含钙的变性剂
4.加热,为提高温度而加热、保持恒温、蓄热	提供电能和其他热能
在设备利用率、耐火材料磨损、能源、脱磷方面减轻初次工艺的负担	

已经证实二次精炼包中比在初次冶金熔炼装置中能更有效和更可靠地满足对炼钢提出的日益增高的要求。利用二次精炼可以帮助初次冶金完成特种精炼任务、缩短流程时间以及提高钢的质量。此外,钢液加热还可以改善炼钢流程的能量平衡、提高命中率以及在浇铸前为钢液蓄热。

图1(略)示出现代化炼钢生产线,表1列出二次精炼的目的及措施,图2(略)示出二次精炼的工艺及设备。

炉外精炼的开发方向

图3示出新近开发的几种炉外精炼工艺。由于采用炉外精炼工艺而提高了炼钢的效益,所以炉外精炼工艺及其设备今后将会进一步得到迅速推广。其具体原因如下:世界上正在使用的大批老化炼钢厂的设备必须进行现代化改造,需要配备新的熔炼技术和连铸技术。此外,

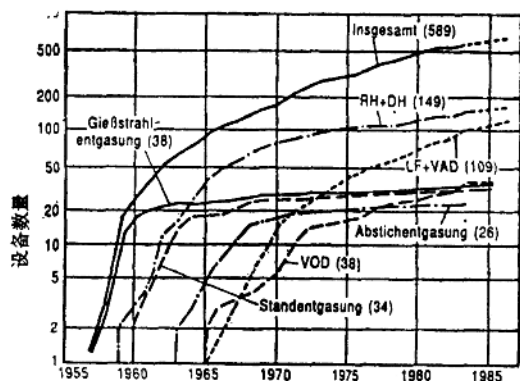


图3 几种炉外精炼工艺

钢流脱气 (38); 总量 (589); 出钢时脱氮 (26);
真空罐脱气 (34)

由于世界粗钢消耗量的进一步提高,需要设新的钢厂。而目前已被采用的炉外精炼工艺和设备需要进一步改善并需开发新的炉外精炼工艺和设备。炉外精炼工艺的日益完善化和自动化的结果不仅是操作简便,而且控制冶金参数时具有更大的操作可靠性,使工艺过程合理化。目前,除了添加剂和设备工艺参数之外,自动化取样及自动化测定方法所得成分快速分析结果、与之平衡的废气计算结果以及温度、氧和氢的逐点直接测量结果也都用来控制工艺过程。为了进一步进行在线监测,目前世界上很多地方都在进一步开发设备配置的仪器仪

表（尤其是开发逐点连续直接测量实际状况的探头）以及工艺过程的程序。其中研究了很多新的技术手段，例如采用激光光纤来直接分析成分（图4，略）。最后，要进一步开发程序控制，通过采集直接测量的值对主要的工艺过程进行程序控制，图5（略）示出RH真空处理工艺程序控制探头的应用方案。

加工厂和用户对产品质量再次提出了更高的要求，例如：通过减少不希望有的伴生元素和非金属夹杂来进一步提高钢的纯净度，前一步提高钢的均匀性并且缩小钢的伴生元素的允许偏差范围，进一步改善钢铁产品的表面质量，开发新钢种和新的钢铁产品。另外，为了降低钢厂的生产成本和加工厂的加工成本，人们越来越要求准时交货。因此，可以保障高命中率的外精处理是必不可少的工艺。

产品质量的提高

尽管目前钢铁材料已达到较高的质量水平，但是，由于技术的进一步发展仍然要求钢铁材料不断地提高其使用性能（材料性能及表面性能）。近年来，扩充了很多新钢种用来生产板、管、梁、棒、丝、绳和复合材料部件，得到了大量新的用途，这些钢种有微合金化贝氏体高强结构钢、微合金化特殊深冲钢、含磷钢、双相钢和高氮含量不锈钢。其他性能更好的钢种尚处于开发之中，例如，薄带连铸对于材料性能的改善将起重要作用。

主要根据产品的使用性能来评定产品的质量，而产品的使用性能则主要取决于钢液成分的最终调整、钢液的均匀度、内部纯净度和表面性能。

如果利用钢材设计制造高技术产品，则需要更高纯度和均匀度的钢材。因此，要求进一步减少伴生元素（对于扁平产品来说，主要降低C、P、S、N、O和H）和杂质。图6示出德国蒂森钢公司深冲钢上述诸元素总含量自1930年以来的逐步降低情况。

之所以要求减少伴生元素，不仅仅是为了改善材料性能。半成品各个加工工序（如后部热处理和退火处理）所节省的费用起着越来越重要的作用。因此，在生产厚板时可以根据钢液中达到的氢含量而降低热处理费用。并且，对于加工性能非常好的微合金化特殊深冲钢（无间隙钢）、高强薄板钢和电工钢来说，通过钢液的深脱碳和控制低氮含量可以省掉退火处理费用和脱碳脱氮用的昂贵的微合金化元素（铌或钛）的费用。当采用降低这些元素含量的所有措施时，即对初次冶金过程炉料进行精选和预处理，充分发挥初次冶金和二次冶金的可能性时，钢液中可达到的C、P、S、N、O和H的含量如下：

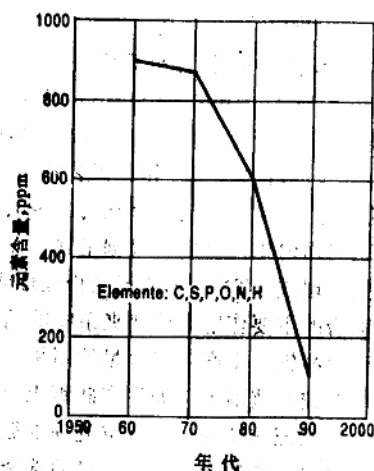


图6 深冲钢伴生元素的总浓度

元 第	C	P	S	N	O _总	H	总含量
含量, ppm	≤20	≤15	≤5	≤15	≤10	0.7	65.7

据日本预测，到2000年，批量生产高纯度钢时，可达到以下含量：

元 素	C	P	S	N	O ₂	H	总含量
含量, ppm	6	2	<1	14	5	0.2	28.2

然而, 究竟这些含量要控制在多低范围内才更经济, 最终要取决于材质要求和生产成本。

如果想达到这么低的含量, 则必须先为分析成分创造必要的先决条件。此外, 还必须进一步开发真空冶金、耐火材料和加热工艺。就这方面来说, 进一步开发不被电磁加热的钢包材料是非常重要的, 例如Calidus工艺。

蒂森钢公司各钢厂的炉外精炼工艺

蒂森钢公司的几个钢厂装备了现代化炼钢设备。图7(略)示出蒂森钢公司开发的几种著名的工艺, 例如铁水喷射脱硫工艺、顶底复吹转炉精炼工艺(TBM工艺)、钢液喷粉炉后处理工艺(TN工艺)、RH循环脱气工艺以及VOD工艺。除了自己开发的工艺以外, 为了对钢液进行二次精炼处理, 蒂森钢公司的钢厂还装备有进行DH1虹吸脱气的真空处理设备、钢包站脱气的钢包炉以及喂丝设备。

RH循环脱气工艺是在30多年以前由亨里希斯钢厂开发的钢液脱氢工艺, 此后由于解决了一系列炉外精炼任务而得到进一步开发, 实践证明该工艺操作简便, 应用灵活。目前全世界已有130座按循环脱气原理工作的设备投入使用, 其中有20座RH—OB设备可以同时吹氧(图8, 略)德国蒂森钢公司鲁尔奥特钢厂目前有一座140吨RH设备正在运转、贝克斯特钢厂有一座260吨RH设备正在运转。

贝克斯特钢厂的RH真空处理设备

图9(略)示出年产400~500万吨优质扁平产品的贝克斯特钢厂的生产流程。通过喷射处理使平均成分为0.35%Si、0.20%Mn、0.065%P和0.045%S的铁水脱硫, 使其硫含量达到0.001%, 目的是减轻转炉工艺的负担。在3×260 t转炉中, 采用TBM顶底复合吹炼工艺进行精炼。在转炉中已精炼到0.02~0.03%C的钢液按照要求进行脱氧、合金化, 并通过吹氩而达到均匀化。然后, 根据用途的不同, 钢液分别直接进入连铸机, 或者先在RH设备中进行真空处理或按TN工艺进行喷粉处理或进行复合处理然后再进入连铸机。

喷粉的主要作用是改变夹杂物的结构; RH真空处理工艺的主要任务如下: 生产低碳和超低碳深冲钢, 生产低氢含量的厚板, 使钢液即使是在添加大量合金元素时也均匀化并把成分控制在较小范围(例如生产硅钢板时), 在一定限度内尽可能降低氮。

为了保证连铸连浇, 真空处理的循环时间不得长于30min。

经过进一步的考虑, 为此目的选择了可以喷吹更大量输送气体的典型的RH工艺设备。利用蒂森公司现有的其他RH设备进行的预试验证实可以不用RH—OB工艺的吹氧技术也可使钢液的碳含量控制在15ppm。

图10示出1987年11月投产的处理能力为15万吨/月的设备的结构, 表2示出其技术数据。真空室砌有镁铬砖内衬。利用直流电石墨棒加热法来加热内衬并在1400℃以上保温, 此外, 该法还有利于消除真空室内冷钢。在0.67mbar时, 真空泵的抽气能力为500kg/h。

拥有33个料仓的加料设备可以很方便地添加合金元素, 可以满足种类繁多的产品大纲的需要。工艺过程进一步达到自动化, 并且由计算机进行过程控制(图11, 略)。设备装备有自动取样装置、直接测温、测电动势仪表及定氢仪表。

借助电动势测量来确定溶解氧, 从而可以有目的地把钢中的铝含量控制得很低, 例如某

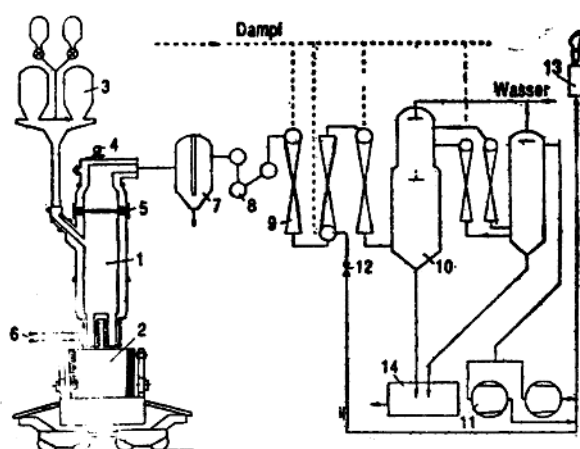


图10 贝克韦特钢厂的RH设备示意图

1—RH真空室；2—钢包；3—合金添加器；4—TV摄像机；5—加热棒；6—提升气体；
7—气体冷却；8—旋转接合；9—蒸汽泵；10—冷凝器；11—真空水环泵；12—气体回流阀；13—CO—燃烧；14—排水

表2 贝克韦特钢厂RH设备的技术数据

投产日期	1987年
钢水量, t	260
真空室高度, mm	10800
真空室内径, mm	2030
浸入管内径, mm	500
输送气体流量, L/min	500~2500
输送气体喷嘴数, 个	10
循环流量, t/min	85
泵的能力, kg/h (0.67mbar)	500
合金料仓的数目, 个	33
真空室加热	石墨棒
设备型号	
产品目录	超低碳钢, 厚板, 热轧带钢, 硅钢

些钢种的铝含量可以低于0.010%以及 $\leq 0.005\%$ 。

操作结果

在要求成品有高纯净度的同时, 为了达到最低碳含量, 在RH脱碳处理之前, 碳含量必须达到300ppm。图12举例示出含铁的无间隙钢液在真空处理期间碳含量的降低情况。在20 min之内, 碳含量达到20ppm以下, 此时所得到的低氧含量(300ppm)只需要少量的铝来脱氧。因此, 可节省铝并提高钢的纯净度。图13示出超低碳钢真空处理的各种可能性以及真空深脱碳的各种工艺途径。通过补充添加合金以及在中间包加保护渣, 可以控制连铸钢带的碳含量低于30ppm。在特别有利于深脱碳的处理条件下进行RH处理, 通过碳含量的进一步降低可以使连铸坯的碳含量达到20ppm左右。

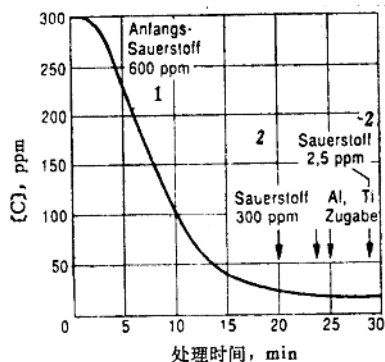


图12 添加钛的超低碳钢液的RH脱碳曲线

1—起始氧含量；2—氧含量

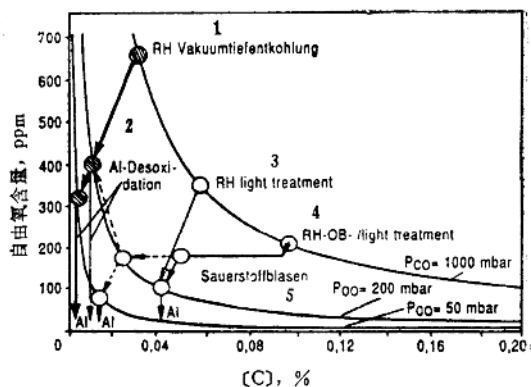


图13 钢液脱碳和脱氧的可能性

1—RH真空深脱碳；2—Al脱氧；3—RH轻处理；
4—RH—OB/轻处理；5.吹氧

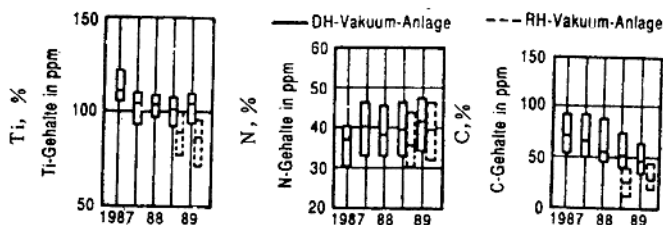


图14 采用RH工艺时，钢中N、C和Ti含量的降低

—DH真空处理；---RH真空处理

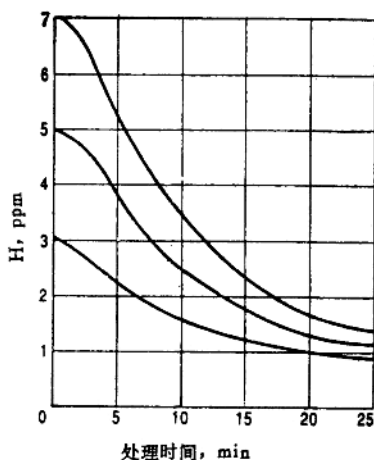


图15 在RH处理期间氢的降低

高的费用采用慢速冷却和补充退火处理的方法来制造。RH 真空处理工艺可在短时间内将氢含量降低到远远低于白点敏感极限以下的数值。图15示出在RH 处理过程中氢含量的降低。

由于RH设备里的分压降低，可以在一定限度内降低氮含量。铝镇静钢在真空处理前具有较高的氮含量（60ppm）。利用合适的输送气体流量可将氮含量降到40ppm。在生产低碳薄钢板时，为了保证低的氮含量，从转炉直到浇铸，必须采用特殊的工艺，例如改变出钢脱氧方式等。

在熔炼含Ti无间隙钢时，由于采用了RH工艺，降低了碳含量并且取得较低的氮含量，其结果是减少了为降低C和N而需要的Ti含量，图14通过对比钢中这些元素的含量而说明了这一点。

如果没有真空处理，对氢敏感的钢种，尤其是用连铸和模铸法生产的厚板只能以较