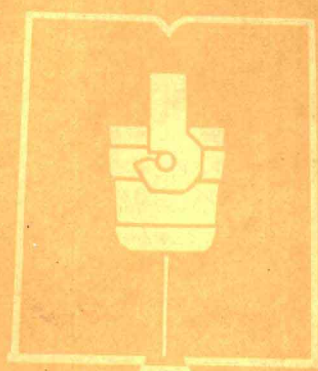


• 高等学校教学用书 •

优质钢冶炼

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

高等学校教学用书

优质钢冶炼

[苏]B.A.库德林 [捷]B.帕尔玛 著

董学经 李伟立 译

冶金工业出版社

高等学校教学用书

优质钢冶炼

(苏)B.A.库德林 (捷)B.帕尔玛 著

董学经 李伟立 译

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街莱佛士院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 10 3/4 字数 284 千字

1987年5月第一版 1987年5月第一次印刷

印数00,001~2,400册

统一书号: 15062·4586 定价2.15元

译 者 的 话

《优质钢冶炼》一书系1984年苏联〈冶金出版社〉出版。书中描述了现今世界炼钢生产的概况，详细介绍了炉外精炼新技术及新方法，论述了液态钢结构的最新概念及其对冶炼工艺及成品钢质量的影响，叙述了转炉、电弧炉以及平炉的冶炼工艺及其操作经验。

本书还论述了优质钢的生产经验，详细介绍了镇静钢、沸腾钢和半镇静钢的浇注工艺以及大型锻造钢锭的冶炼及浇注工艺。

本书第二、三章由北京钢铁研究总院李伟立翻译，绪论及其它各章由冶金部董学经翻译。

本书作为高等工科院校钢铁冶金专业参考书，也可供从事钢铁生产的工程技术人员、管理人员及科学工作者参考。

1986年5月

Abu 19/07

前 言

根据苏共二十六大决议，苏联第十一个五年计划的主要任务是平稳地逐步增长国民经济，加速科学技术发展，强化经济，更合理地挖掘生产潜力，千方百计地节约国家资源，改进工作质量，在此基础上满足人民今后增长的物质需要。国家经济实力的进一步增长，国民经济各部门稳定平衡的发展，不仅要求提高钢铁生产水平，而且要求提高产品质量及扩大品种。

同样重要的任务也摆到了捷克冶金工作者面前。捷共十六大指出，必须提高冶金工业的质量，切实改进冶金工业的结构，精制度旧金属，改进国民经济中金属的利用。

苏联和捷克的炼钢工作者有很多共同点：平炉炼钢占了很大的比重，近几年将大力发展炉外精炼等技术。

考虑到读者的广泛性，本书扼要地叙述了液态钢结构的最新概念及其对冶炼工艺和结晶后金属质量的影响。

本书列举了现代炉外精炼的各种方法，不同国家的各类文献对炉外精炼的各种方法称呼不一，本书第一次对这些方法进行整理归纳。

本书前言、绪论、第一至第五章由B.A.库德林（苏）教授编写，第六章至第十章由B.帕尔玛（捷）教授编写。

技术科学博士B.C.杜布对本书提出了宝贵意见并作了很好的评价，作者表示感谢。

对本书的所有意见与看法请寄苏联冶金出版社。

目 录

前言

绪论	1
----	---

第一章 炼钢过程的热力学和动力学	7
------------------	---

§1. 基本概念	8
----------	---

§2. 过程参数	9
----------	---

§3. 溶液	12
--------	----

§4. 过程的动力学	16
------------	----

§5. 新相的生成和离析	19
--------------	----

§6. 扩散	20
--------	----

§7. 表面现象	20
----------	----

§8. 渣的结构	26
----------	----

§9. 渣的氧化度和碱性	29
--------------	----

§10. 造渣	33
---------	----

§11. 渣的性质	34
-----------	----

第二章 液态金属结构及其对熔炼工艺和金属质量的影响	37
---------------------------	----

§1. 钢液的粘度	38
-----------	----

§2. 微观不平衡状态	39
-------------	----

§3. 液态金属的结构模型	41
---------------	----

§4. 液态金属结构对冶炼工艺的影响	44
--------------------	----

第三章 杂质、气体及夹杂的脱除	64
-----------------	----

§1. 炉内气氛的影响	64
-------------	----

§2. 碳的氧化	65
----------	----

§3. 磷的氧化与还原	68
-------------	----

§4. 脱硫	71
--------	----

§5. 除气	75
--------	----

§6. 脱除非金属夹杂	80
§7. 脱氧产物的形成和脱除	83
第四章 优质钢冶炼工艺特点	90
§1. 转炉底吹和复合吹炼	90
§2. 水冷炉顶电炉炼钢	99
§3. 平炉精炼期合理的温度制度	102
第五章 炉外精炼的现代工艺	114
§1. 钢水炉外精炼方法简介	115
§2. 炉外精炼的主要任务	124
§3. 金属的真空处理	127
§4. 向金属吹惰性气体	144
§5. 合成渣冶炼	153
§6. 向金属喷吹粉状物料	163
§7. 炉外精炼综合法	190
§8. 渣—金属分离方法	213
§9. 防止二次氧化	218
第六章 炉外精炼方法的选择 (捷克工厂的经验)	223
§1. 钢在钢包中的真空处理	223
§2. 钢的真空浇注	225
§3. 提升真空脱气	226
§4. 循环真空脱气	228
§5. 生产锻造钢锭时钢的二次真空处理	230
§6. 降低 CO 分压时进行的过程	231
第七章 镇静钢浇注 (钢锭模) 现代工艺	235
§1. 钢水从浇注盛钢桶流出	235
§2. 水口构造	238
§3. 浇注镇静钢的钢锭模	241
§4. 钢的结晶	249
§5. 镇静钢锭结构	257
§6. 镇静钢锭浇注工艺	263

第八章 沸腾钢浇注(钢锭模)现代工艺	265
§1. 沸腾钢锭结构.....	266
§2. 蜂窝气泡形成机理.....	268
§3. 沸腾钢锭凝固时的脱氧过程.....	272
§4. 沸腾钢锭封顶.....	277
§5. 沸腾钢锭凝固时所产生的偏析过程.....	279
§6. 沸腾钢浇注工艺.....	283
第九章 半镇静钢生产现代工艺	286
§1. 半镇静钢脱氧.....	286
§2. 半镇静钢锭结构.....	291
§3. 半镇静钢凝固时的偏析.....	296
§4. 半镇静钢生产工艺.....	299
第十章 生产大型锻造钢锭的现代冶炼及浇注工艺	306
§1. 锻造钢的生产工艺.....	307
§2. 浇注锻造钢锭的钢锭模.....	314
§3. 大型钢锭结构.....	318
§4. 浇注大型锻造钢锭工艺.....	322
§5. 用电渣重熔工艺生产锻造钢锭.....	329
参考文献	333

绪 论

当前，发展冶金工业（苏联一译者注）的特点是：强化冶炼生产，不断提高冶金设备单位的和绝对生产率，扩大冶金产品品种，提高质量，降低金属、能源及劳动力消耗，在不增加钢产量的情况下扩大冶金生产规模和金属制成品的容量。

除了减小钢材几何尺寸公差外，降低有害杂质含量，保持金属具有稳定的成分和温度是金属产品最重要指标。这些指标加上精确地调节金属的微观和宏观结构，能够提高金属的强度及可塑性能，并且能够降低金属消耗。提高金属质量可以使设计人员在设计金属制品时减少保险系数。过去金属制成品数量多用吨来计量，现在已开始根据需要（如以平方米来计量白铁皮）来确定制成品的数量单位。

结果，液态钢产量与成品钢产量之差异逐渐减小，而成品钢的数量才是决定机械制造产品及国民经济其他部门产品的规模的。

因此，必须考虑以下几点：

1) 不同的冶炼方法，金属成品率是不同的：电炉炼钢为92~93%，转炉复合吹炼时为91~92%，顶吹转炉和平炉为90%左右，双床炉和平炉氧气吹炼时为87~88%。

2) 镇静钢的切头率为15~20%，而半镇静钢或沸腾钢的成材率可提高5~10%，但在连续铸锭时半镇静钢和沸腾钢的这种优点消失了。现在连续铸锭成材率高达95~98%。

3) 当今世界钢生产总容量变化不大，每年约7亿到7.5亿吨，而优质钢数量不断增长（一方面是由于合金钢比例增加，另一方面也是炉外精炼规模扩大的结果），在钢产量不增加的情况下保证机械工业产品的数量与规模不断增长。例如，在1970~1979年十年间，西欧钢产量未增加，而每年合金钢增长了5%。

现阶段冶金工业的发展必须注意如下一些因素。

炉料组成：尽管铁的直接还原技术有了很大的发展，而主要炼钢原料仍然是生铁和废钢，金属化的产品比例却很小。美国“Union Carbide”商行报导，1980年全世界共熔炼了3.44亿吨废金属，而金属化产品只占2.2%（760万吨）。“Midex”商行报导，1981年全世界金属化制品生产规模共1630万吨而只生产了800万吨，其中美国只有三台装置生产（530000吨/年），西德2台（480000吨/年），日本、英国、法国、意大利无一台生产，加拿大（100万吨/年），墨西哥四台（193万吨/年），委内瑞拉三台（160万吨/年），而巴西二台（225000吨/年），等等。

当前，铁的直接还原主要在缺乏废旧金属而富产石油及天然气的国家（委内瑞拉、印度尼西亚、伊朗、墨西哥、卡塔尔、沙特阿拉伯等）中盛行。工业发达国家则将注意力放在直接还原铁的成本上。例如1980年美国每吨金属化制品为135~140美元，比废钢（束捆）贵20美元。此外，金属化制品能源消耗大，渣量大，等等。

小型工厂：小型工厂给炼钢设备及工艺带来了很大的影响（首先是对电弧炉炼钢及连铸机）。截至1980年底，世界资本主义国家和发达国家共有363家年产3万吨至125万吨钢的小型工厂，其中日本64家，意大利62，美国48，西班牙25，泰国23，墨西哥和巴西各41家，加拿大和英国各7家，西德6家，等等。

很多新的小型工厂已装上了现代化的高效率设备，使其具有竞争能力。1980年美国小型工厂“Raritan River Steel Corp”投产，设计年产60万吨钢材（盘条直径为5.5~13.1毫米），每年需要60万吨废钢，使用150吨电弧炼钢炉，变压器为93000千伏安，采用五槽连铸机，配备电磁搅拌器，连铸坯尺寸为130×130×1600毫米，冶炼过程由电子计算机控制，并显示金属试样光谱自动分析结果，连铸坯由双线轧机轧制（不带翻钢机的流程），该轧机具有7道初轧机架、4道中轧机架、4道半精轧机架和10道精轧机架。

小型工厂生产率由很多因素决定。例如，1982年澳大利亚墨尔本一家工厂投产，该厂有一座炉壳直径为4.5米的电弧炼钢炉，年生产能力为20万吨，由于夜间用电便宜，炉子仅在夜班工作。

国外，近年来小型工厂的主要问题是：废旧金属质量降低，电极和电能涨价，环境保护费用增加。小型工厂主要靠改进设备及工艺来加强自身的竞争能力。专门生产特殊钢可能是小型工厂今后的发展方向。

转炉生产：当前转炉的发展首先是完善复合吹炼（顶吹加底吹）。到1980年底，仅发达的资本主义国家就有80座转炉进行复合吹炼，其中西德27座，日本27座，法国13座，美国7座，卢森堡4座，等等。复合吹炼法主要的特点是如何进行底吹，有以下几种不同的操作法：1）用多孔砖传送氩气或氮气；2）用单管喷嘴吹氩或氮气；3）在氮气环流圈内吹空气；4）在二氧化碳气流环圈内吹氧气；5）在碳氢化合物环流圈内吹氧氮混合气；6）吹含石灰粉的气体；7）从底部吹氧气和气态燃料，如重油、细粒焦炭或煤；8）从转炉侧面的圆锥体吹部分氧气，等等。

从底部向熔池吹入含碳的氩、氮或氧，有助于得到含氢量低的金属，通过多孔塞可以中断底部送风。以碳氢化合物作为保护层从底部吹氧气可以扩大热的来源，但可能增加钢中含氢量。从底部吹氮气（为传送和冷却氧化剂）会提高钢中氮含量。当从底部吹含细粉的石灰时，将显著加快造渣过程。

在所有情况下，复合吹炼都有利于脱碳反应的进行，降低熔池氧化性，从而提高钢的产出率，降低铁合金和熔剂耗量，使更多的CO在炉子熔池上面燃烧，因而可增加废钢加入数量。

部分气体从转炉底部吹入，使在转炉内加入100%的废钢成为可能，但这将降低转炉生产率。这种转炉吹炼废钢新方法比电炉（具有大功率变压器）或普通平炉冶炼废钢具有竞争力的结论，还为时太早。

电炉炼钢生产：过去的十年，电炉炼钢生产以每年约5.3%

的速度增长，自六十年代出现的建设大功率炉子的趋势以来，现在又有了广泛的发展。这些炉子主要用来生产碳素钢。一些专家认为，电炉炼钢与其他方法炼钢相比能源消耗最少、灵活、资金消耗少，而且能生产品种广泛的各种钢，能够有效地利用各种复杂的炉料。

出现了经过炉底出钢的电弧炼钢炉。现在还不知道这种实践的广泛性如何，但已经制订了新的特殊的工艺过程：使用不同含碳量的及金属化程度达到75~96%的炉料，这决定了炉渣具有很高的短渣性；连续加料；有很厚的泡沫渣层；用专门的出渣口以保持一定的渣层厚度；使用低碱度炉渣；炉墙及炉顶用管式冷却系统；以炉渣自身作为耐火炉衬；冶炼标准成分的半成品，然后通过炉外精炼使金属达到成品钢。用上述工艺可以从低品位铁矿石以劣质煤（未经焦化含硫高的煤）制得海绵铁；可冶炼某些直接还原产品；能够有效地将含有钒和钛的金属化原料加工成含钒含钛钢；等等。

现在对感应炉也给予足够的重视，把它当做现代电炉炼钢车间的一个主要设备。已有63吨的大型感应炉投入生产，为炉外精炼制取半成品。

感应炉坩埚耐火炉衬的寿命短，妨碍了它获得广泛的发展。在这个问题已经解决。感应炉与电弧炼钢炉相比有以下优点：不需要昂贵的石墨电极，钢水产出率高，灰尘少，噪音小，适应各种不同纯度的和某些贵重的炉料，能够采用不同的温度，并易于控制金属成分。

炉外精炼：当前用炉外精炼的方法生产着成亿吨钢。炉外精炼装置已用于所有优质钢厂。不仅是电弧炉，而且转炉和平炉钢都可利用炉外精炼。炉外精炼已成为提高优质钢质量的主要手段。炉外精炼可以有效地去除氮、氢、氧等气体以及硫和非金属夹杂物。

近年来很重视降低钢中硫的含量，因为硫化物及硫的氧化物等非金属夹杂物对优质钢的影响很大，在热轧（热变形）过程中

硫化物夹杂会导致裂纹，这些夹杂物的软化温度很低，处于低温区的金属的可塑性很小，当轧制变形较大时，硫化物夹杂沿轧制方向拉伸，产生显著的各相异性。

必须考虑到夹杂物拉伸（辗压）程度对金属特性的影响。可以用“形状系数”，即夹杂物长与宽之比来决定其拉伸程度。为了减少各相异性，必须使夹杂物的形状系数最小，因此除了应减少钢中硫含量外，还应使残留在钢中的硫与夹杂物成化合状态（失去游离性）。为此，最简单的方法是使硫与碱土金属结成化合物，主要可通过炉外精炼的方法来实现。

如果用一般的冶炼工艺，用铝脱氧，钢中 $[Al]^2 \cdot [O]^3$ 的积为 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ ，则在碱性盛钢桶内吹入氩气时，其乘积减到 10^{-11} 。而在电渣重熔或真空感应熔炼时，这一值减小到接近于平衡的值 10^{-14} 。

向金属中喷吹钙或其他化合物和使用相应的脱氧剂可以使钢中硫含量降到 $<0.020\%$ ，使钢的塑性增加，减少沿钢材的纵向及横向的各相异性。对加快结晶过程速度（如连续铸锭）也起好的作用。

在盛钢桶进行精炼时，预热盛钢桶内金属不仅影响金属质量，而且影响车间生产工艺。

铸锭方法：有三种铸锭方法，上铸、下铸、连续铸锭。

下铸法劳动强度大，钢的损耗大（铸口及汤道损耗），其优点是钢锭表面质量好。

上铸法简单，但表面质量差一些，轧制前其表面要经过热清理，使钢的损耗增加 $3 \sim 4\%$ 。

连铸法具有最广泛的前途。1980年全世界有2.1亿吨钢用连铸法浇注，只占全部钢产量的30%，而在九十年代末约50%的钢将采用连铸。大型连铸机的优点如下：电磁搅拌铸坯中心液态金属；能连续浇注大量金属；在浇注过程中连续改变扁坯宽度；浇注过程自动化；在交替浇注扁坯和不同横截面的钢坯时，重新调整连铸机的时间短；生产率高，等等。

经验指出，连铸之所以具有很高的生产率，不仅是因为浇注的准备时间短，浇注速度快，而且在组织技术措施上也有很多优点：1）能够一炉接一炉的浇注钢水，并停止某一炉钢水的浇注；2）能调整炼钢炉（如转炉）的工作制度，使盛钢桶按严格的时间送到连铸机浇注（例如在上一炉钢水浇注完之前5~15分钟）；3）遥控改变结晶器宽度；4）铸坯宽度标准化，尽可能扩大这些尺寸，直到纵向切割铸坯，浇注双扁坯，连炉浇注不同品种的钢。

经验还证明，只有当浇注坯表面质量高和内部结构好时，连铸才具有很高的生产率。铸坯质量在很大程度上取决于钢的洁净度，可采取一系列措施来提高钢的洁净程度：炉外精炼；正确选择浇注钢包和中间盛钢桶的耐火材料；合理设计中间盛钢桶；在盛钢桶与结晶器间保护钢流；选择合适的水口结构；提高结晶器振动频率；均匀冷却铸坯，准确调正浇注中心线，减少支承辊间距以限制铸坯壳凸起肿胀（用分段托辊），用电磁搅拌减小树枝状结晶，等等。

为了提高钢的洁净度，在更换浇注盛钢桶时应保持稳定的浇注速度，中间盛钢桶的容量扩大到60吨或更高。

近年来，炼钢生产所发生的一些变化将在书中详细叙述。

总之，现阶段苏联冶金的主要任务就是保证不断地提高钢质量，降低钢中有害杂质含量，提高钢的洁净程度，获得高质量的制品。

第一章 炼钢过程的热力学和动力学

炼钢生产过程是在高温下的一系列综合复杂的物理化学变化。在这些变化中同时有很多处于不同聚集态下的组成部分参加：固态（熔炼设备的耐火砖、添加物及其他）；液态（金属、渣）；气态（炉子空间、吹入的空气、氧或惰性气体等等）。为了满足对金属质量不断提高的要求以及这种或那种工艺过程技术经济指标的要求，常常要对炼钢的物理化学过程进行深入的研究。由于许多监测手段不断改进，允许获得更多的有关炼钢参数的客观报导（反应元素的浓度、压力、温度等等）。根据这些报导可以利用物理化学规律做出下述判断：

- 1) 过程、反应进行的方向；过程进行的结果，生成哪些产品；
- 2) 系统最终状态特性；过程进行的极限，过程结束时系统的状态；
- 3) 过程进行速度，以及与各因素的关系。

前两项任务由热力学方法确定，后者由过程的动力学研究确定。

通常，被用来解决实际问题的过程主要参数是在实验室得到的，这种确定参数的方法：

- 1) 可以保持所有其他参数不变（除去所研究的参数）；
- 2) 可以使系统达到平衡，并得到为计算平衡常数、热效应、活度系数等参数的数据；
- 3) 研究过程动力学，改变外部作用参数（压力、温度、搅拌强度等等）；
- 4) 研究金属与渣的特性（粘度、密度、表面张力、扩散速度等等）。

在现场条件下不可能或者很难得到这些参数。然而从实验室得到的这些数据（如小熔池、小钢锭等）常与生产结果不符。此外在工厂常常有众多的因素混杂在一起起作用，而在实验室是不容易做到模拟现场的各种条件的。为此，要得到可靠的数据宜用三种方法相互配合：计算法（在公认的定律与数据的基础上），实验方法（在实验室条件下）和经验方法（工厂条件下）。

物理化学是研究物质结构及其性质（在不同的结构状态下）、化学热力学、平衡理论、熔液、化学反应动力学的科学。将物理化学主要原理应用到研究炼钢上来，必须考虑冶金生产的特点。

§1. 基本概念

引用以下概念来描述炼钢过程。

体系——群（一组）处于相互作用的物体，可以物理地与周围介质分开，例如：金属—渣；炉衬—金属，等等。实际上，系统复杂得多。如：内衬—金属—渣—结构气氛，内衬—金属—渣—结构气氛—内衬。研究复杂的体系是很困难的，因此为了获得发生在这些体系过程的完整的概念，一般是在纯体系之内研究这些过程，然后，再试图在所发生的整个体系内表述过程的完整概念。

用这种方法不是能经常达到目的的。因为，实际上在部分体系中的一些过程是同时进行的，并且始终是相互影响的。例如金属吹氧时，气体始终同时与金属及渣相接触，金属始终与渣相接触，而渣又始终与炉衬接触，等等。因此，将在局部体系中研究过程所得到的结果应用于整个体系时应非常慎重，在很多情况下这是完全不可能做到的。

至于说到体系中的“金属”、“渣”、“气氛”，通常认为它们是均质的，而实际上，大多数情况下并非如此。在金属中含有非金属夹杂和气泡，在渣中含有未熔融的成分、金属珠滴、气泡，在气氛中含有渣的微粒（熔融灰渣），有时甚至金属微粒。

体系也分均质的或不均质的。在体系的所有部分都有相同的组分（化学均匀）和性质（物理均质）的叫均匀体系。在实际炼钢过程中，无论是化学成分还是体系某些部分的性质都很不均匀。假如在某一瞬间对炉子垂直方向做一假想的截面，则可看到以下差别：*a*）炉床、金属熔池（按深度）、渣（按厚度）、拱顶（按耐火砖厚度）和气氛（按高度）的化学成分不同；*b*）按炉床厚度的、熔池深度的、渣层的、炉内气氛的以及炉顶厚度的温度（以及相应的物理性质）不同。甚至在转炉，虽然那里的搅拌强烈，但其体系的所有部分仍然是不均匀的。

相一体系中均质部分的集合体，它具有相同的组分及性质，由界面将它与体系中的其他部分分开。在冶金条件下有以下各相：金属、渣、气氛、金属液中非金属夹杂的分散悬浮物，等等。习惯上，称系统的某一部分为相（金属、渣，等等），它没有考虑到，例如所谓金属相实际上是包含了数个相：液态金属、固体悬浮物、非金属物质（炉衬，非金属夹杂），液态非金属夹杂的悬浮物、气泡。

从上述看出，使用的物理化学术语只是近似的。

§ 2. 过程参数

在研究这个和那个过程（或反应）的热力学时要考虑到：

状态参数—表明体系状态特征的量（压力、容积、浓度、温度等等）；

过程参数—表明过程特征的量，即与状态参数改变有关的体系变化的值。

炼钢过程通常是在压力接近于不变（ $p = \text{const}$ ）的情况下，即等压下进行的。因此，热力学计算时使用等压—等温势能的变化值 ΔG 、热函（焓）变化值 ΔH 、热效应值 Q_p （注意：当衡压时 $Q_p = -\Delta H$ ；在体积不变时的热效应 Q_v 与 Q_p 有如下关系： $Q_p = Q_v - \Delta(pV)$ ；如果在反应中没有气态物质出现，在 Q_p 与 Q_v 之间的差别可忽略不计）。到现在为止还不能制定出确定焓 H 绝对