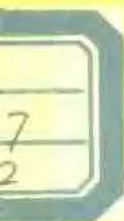


• 高等学校教学用书 •

炼钢学原理

(第二版)



冶金工业出版社

高等学校教学用书

炼钢学原理

第二版

北京科技大学 曲 英 主编

冶金工业出版社

(京)新登字 036 号

高等学校教学用书

炼钢学原理

第二版

北京科技大学 曲 英 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街高帆院北巷 39 号)

新华书店总店科技发行所发行

河北省阜城县印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 21.5 字数 510 千字

1980 年 12 月第一版 1994 年 5 月第二版

1994 年 5 月第四次印刷

印数 15601~17750 册

ISBN 7-5024-1415-0

TF·326 (课) 定价 10.00 元

第2版前言

《炼钢学原理》初版自1980年出版以来,至今已有十余年了。十多年来,我国钢铁工业有了很大的发展,连续铸钢生产规模扩大,转炉顶底复合吹炼技术日趋成熟,直流超高功率电弧炉开始研制,清洁钢冶炼和煤氧喷吹技术已正常应用,等等。同时,在冶金学科方面,如喷射冶金理论,熔渣性能和结构的研究,熔池流动和凝固传热的数学物理模拟,钒、钛、稀土及碱土金属等在钢中作用的热力学和动力学研究,也取得了可观的成绩。为了反映国内外在炼钢领域的新成就,修订《炼钢学原理》的工作势在必行。

《炼钢学原理》初版问世后,受到广大读者的关心和爱护,同时也收到许多好的建议和批评。对广大读者的鼓励和鞭策,编者表示衷心感谢。

第2版基本保留了初版的特点和体系。将初版第一章和第二章并为一章,删减了热力学基本理论的大部分,补充了冶金动力学理论的新进展。其余各章主题未作更动,但是补充了新的内容和数据。例如,金属熔体中补充了关于稀土和碱土金属的数据;熔渣方面增加了光学碱度和硫化物容量的介绍;非金属夹杂物方面补充了夹杂物形态控制等内容。由于炉外精炼的迅速发展,第六章增加了钢包内钢液的流动、混合和均匀化,钢液的加热等内容,并更名为钢液二次精炼理论。

参加修订工作的均为初版编者:第一章,曲英;第二章,张信昭;第三章,陈家祥;第四章,陈襄武;第五章,赵玉祥;第六章,马廷温和曲英;第七章,蔡开科。最后由曲英修改定稿。

魏季和、吴勉华、王炬、徐曾启、蒋国昌等同志审阅了本书初稿,提出了许多有益的修改意见。蒋国昌还惠赠了待发表的论文稿。本书编者对审稿人的辛勤劳动和良好学风,表示深切的感谢和敬佩。

期望广大读者提出批评和指正。

编 者

1992年6月

前 言

本书是根据 1978 年冶金部召开的高等院校教材会议制订的炼钢专业教学计划和十六所院校制订的炼钢原理课程教学大纲编写的。

为适应我国发展现代冶金工业的需要,本书以阐述各种炼钢过程的物理和化学规律为主,以冶金过程热力学、冶金过程动力学、冶金熔体的性质和凝固过程理论为基础,从不同角度对于炼钢和铸锭过程中的现象进行了讨论,并对于与改进钢质量有密切关系的脱氧和真空冶金理论,给予较多的注意。由于在冶金教材中应用传输理论尚属初次尝试,可能有欠妥之处,请各校根据具体情况研究试用,并提出宝贵意见。

本书由北京钢铁学院冶金系炼钢、电冶金教研室共同组织人员编写。各章执笔人如下:第一章和第五章,陈襄武;第二章,曲英;第三章,张信昭;第四章,陈家祥;第六章,赵玉祥;第七章,马廷温;第八章,蔡开科。全书主编,曲英。

1979 年 5 月由十七所院校的代表对本书初稿进行了逐章的审查和讨论,并提出许多修改意见和建议。在编写和修改的过程中,一些兄弟院校和本院有关教研室的同志提出过许多宝贵意见。北京冶金机电学院朱承平同志协助审阅了本书的修改稿。本院图书馆、绘图室等单位在资料工作等方面给予很多支持和协助。编者谨向这些同志表示衷心的感谢。

本书取材于国内外公开出版的各种书刊,以及本院炼钢、电冶金、物化、冶金炉等教研室的一些内部资料。限于条件,不能将文献一一刊出。谨在此对诸位原作者致以深切的谢意。

编 者

1980 年 1 月

符 号 表

本表列出全书通用符号和上、下角标,其余符号在书中有关地方补充说明。

通用符号

a_i	活度	s	距离
C	浓度、容量	T	温度
C_p	热容、恒压热容	t	时间
D	扩散系数	t_c	循环时间
d	直径	t_M	混合时间
E	活化能	t_v	停留时间
e_i	活度相互作用系数	U	内能
F	面积	V	体积
f_i	活度系数	u, v	流动速度
f	分率	v_m	循环流量
G	吉布斯自由能	W	质量
g	重力加速度	x, y, z	直角坐标
H	焓	z	原子价、离子价
H	高度	α	导温系数
h	对流传热系数	β	膨胀系数
J	物质流	ν	动粘度、运动粘度
K	平衡系数	ρ	密度
k	速率常数	σ	表面或界面张力
k_M	传质系数	τ	切应力、动量流
L	元素分配系数	Φ	热流
L_f	熔化潜热	μ	化学位
l	长度		上角标
M	分子量	$*$	平衡态
N_0	亚佛加德罗常数	$^{\circ}$	标准态
N	摩尔分数	i	边界值、边界状态
n	摩尔数	∞	流体内部状态
P	压力、压强	γ_i	活度系数
Q	流量	δ	边界层厚度
R	通用气体常数	e_i	活度相互作用系数
r	半径	$\dot{\epsilon}$	单位搅拌功率
r	反应速率	η	粘度、动力粘度
S	熵		

λ 导热系数

s 渣、固态

l 液态

g 气态

下角标

0 原始值、初态

m 金属

目 录

绪 论	1
第一章 冶金过程热力学和动力学基础	6
第一节 热力学函数	6
一、热力学函数的相互关系	6
二、标准态和热力学函数规定值	7
第二节 氧位图及化合物的稳定性	10
第三节 冶金反应有关的速率现象	17
一、动力学方法和热力学方法的比较	17
二、化学反应动力学	18
三、多相反应的速率	20
第四节 扩散和传质	22
一、菲克定律	22
二、流体流动和传质	25
三、传输系数	27
四、边界层概念和传质系数	28
第五节 几个冶金过程的动力学模型	33
一、气固相反应动力学(未反应核模型)	33
二、气液相反应动力学(表面更新理论)	36
三、液液相反应动力学(双膜理论)	37
四、表面活性物质对传质速率的影响	40
第二章 熔铁和熔融铁合金的物理化学性质	44
第一节 熔铁的结构	44
第二节 熔铁和熔融铁合金的物理性质	46
一、密度	46
二、粘度	48
三、扩散系数	50
四、熔点	52
五、表面张力	54
六、电阻率	58
第三节 各种元素在熔铁中的溶解度和相互作用	60
一、理想溶液和实际溶液	60
二、各种元素在熔铁中的溶解度和溶解过程的标准吉布斯自由能变化	64
三、熔铁中各种元素的相互作用和相互作用系数	68
第四节 Fe-i 系熔体中 i 的溶解度和活度	74
一、Fe-Mn、Fe-Ni、Fe-Cr 和 Fe-Co 系	74
二、Fe-C、Fe-Si 系	74
三、Fe-P 系	77

四、Fe-O、Fe-S 系	78
五、Fe-Al 系	82
六、Fe-V、Fe-Ti、Fe-Nb 系	83
七、熔铁中的钙和镁	84
八、Fe-RE 系	85
第三章 熔渣的物理化学性质	89
第一节 熔渣的结构	90
一、离子半径和离子间的吸引力	90
二、化合物中离子结合的分度	93
三、离子晶体结构	94
四、熔渣的结构	97
第二节 熔渣的物理性质	98
一、熔渣的粘度	98
二、熔渣的密度	101
三、熔渣的热容和导热性	102
四、熔渣的导电性	104
五、熔渣的表面张力和界面张力	105
六、熔渣中组元的扩散	109
第三节 熔渣的热力学模型	109
一、熔渣的分子模型	110
二、熔渣的各种离子模型	111
三、熔渣的分子离子共存模型	117
第四节 熔渣的化学性质	119
一、熔渣的碱度	119
二、熔渣的氧化性	122
三、熔渣的还原性	123
四、渣的物质容量	124
五、保护渣—不均匀渣系	125
第五节 熔渣相图	126
一、二元系相图	126
二、三元系相图	128
第四章 炼钢基本反应	135
第一节 铁的氧化和杂质的氧化方式	135
一、铁的氧化和还原	135
二、氧在渣和钢间的传递	136
三、杂质的氧化方式—直接氧化和间接氧化	137
第二节 脱碳反应	138
一、脱碳反应的热力学	138
二、脱碳反应动力学分析	142
三、实际炼钢过程的脱碳速率	143
第三节 硅、锰的氧化反应	148
一、硅的氧化反应	148

二、 锰的氧化	149
第四节 脱磷反应	152
一、 炼钢脱磷反应	152
二、 脱磷反应的热力学分析	155
三、 脱磷反应动力学	158
四、 冶炼低磷钢的炼钢技术	159
五、 铁水预处理脱磷	161
六、 还原脱磷	162
第五节 脱硫反应	163
一、 碱性氧化渣与金属间的脱硫反应	163
二、 脱硫反应动力学	167
三、 气相在脱硫中的作用	169
四、 铁水预脱硫以及铁水同时脱磷和脱硫	171
第六节 铬、钒、铌的氧化反应	174
一、 铬的氧化反应	174
二、 钒的氧化反应	175
三、 铌的氧化反应	176
第七节 钢中气体	177
一、 氢的反应	178
二、 氮的反应	180
三、 钢液的脱气和吸气反应的动力学	182
第五章 脱氧和非金属夹杂物	188
第一节 钢中非金属夹杂物的种类及其形态	188
一、 按夹杂物的化学成分分类	188
二、 按夹杂物的形态分类	190
三、 按夹杂物的来源分类	192
四、 按夹杂物尺寸分类	193
第二节 夹杂物对钢的性能的影响	193
一、 夹杂物和裂纹的形成及应力集中	194
二、 夹杂物对钢的塑性和韧性的影响	194
三、 夹杂物对钢的疲劳性能的影响	198
四、 夹杂物对钢的加工性能的影响	201
五、 夹杂物对钢的物理化学性能的影响	202
第三节 脱氧反应的热力学	202
一、 氧在铁中的行为	202
二、 脱氧的任务和脱氧能力的测定	203
三、 单独元素的脱氧	204
四、 复合脱氧剂的脱氧	206
五、 脱氧元素与钢中氮的反应	209
六、 熔渣脱氧	209
第四节 脱氧的动力学	210
一、 脱氧剂的溶解和均匀化	210

二、脱氧产物的生核	211
三、脱氧产物的长大	213
四、脱氧产物的去除	214
第五节 夹杂物形态控制	220
一、硫化物形态控制	220
二、氧化物形态控制	223
第六节 脱氧与合金化	227
第六章 钢液的二次精炼原理	232
第一节 真空冶金的一般规律——压力对化学平衡的影响	233
第二节 金属的真空脱氧	235
一、真空条件下碳的脱氧能力	235
二、影响真空碳脱氧反应的动力学因素	237
三、真空碳脱氧的实际效果	240
四、真空下金属元素的脱氧能力	241
第三节 钢液的真空脱气	242
第四节 真空熔炼过程中元素的挥发	244
一、真空下元素挥发的热力学	244
二、真空下元素挥发的动力学	247
第五节 真空下合金元素与耐火材料的相互作用	250
一、高纯氧化物的热力学性质	250
二、真空下耐火材料和金属液的相互作用	251
三、耐火材料和熔体反应的动力学	253
第六节 二次精炼的熔渣控制及喷粉冶金	255
第七节 钢液的加热	259
第八节 钢液的搅拌和混合	260
一、气体搅拌和电磁搅拌	260
二、钢液的流动和混合	263
第七章 凝固理论	267
第一节 钢液结晶与凝固结构	267
一、钢液的结晶	267
二、晶体长大	270
三、凝固结构	275
四、凝固结构控制	278
第二节 凝固过程传热	281
一、钢液凝固过程热平衡	281
二、钢液凝固过程传热机构	281
三、影响钢液凝固传热因素	286
四、传热与凝固定律	287
第三节 凝固传热数学模型	289
一、钢锭凝固热传导方程的数学解	290
二、连铸坯凝固传热数学模型	294
第四节 凝固收缩	299

一、凝固冷却过程的收缩现象	299
二、缩孔和疏松的形成	300
三、收缩与裂纹	302
第五节 凝固偏析	303
一、平衡凝固	303
二、显微偏析	303
三、宏观偏析	308
四、偏析控制	312
第六节 凝固过程的非金属夹杂物	313
一、凝固过程新相生成	313
二、钢锭中夹杂物分布	314
三、连铸坯中夹杂物	317
四、非金属夹杂与钢的显微结构	317
第七节 凝固过程的气体	317
一、镇静钢凝固过程中溶解气体的析出	317
二、凝固过程中 CO 的析出	320
附录一 卡/焦换算表	326
附录二 无因次规范数表	327
附录三 中外人名对照表	329

绪 论

人类为了与自然界斗争,必须不断改进自己的劳动工具。制造工具需要材料。随着工具的改进和发展,对材料的需求也就日益扩大和逐步提高。

最早人类所使用的制造工具的材料是天然的石块,那是在漫长的石器时代。以后人类学会利用金属,进入了青铜器时代和铁器时代。现代人类所掌握和利用的材料有金属材料、无机材料和高分子材料三大类。金属材料的品种极多,但是数量最大、应用最广的仍然是钢铁。

铁在地壳中有相当大的比例,多作为集中的铁矿床存在。地壳中的几种主要金属元素的平均含量:铝为 8.80%,铁为 5.10%,钙为 3.60%,镁为 2.10%。铝、镁、钙大都是分散存在的,它们和氧的结合力比铁强,把它们还原出来很困难。而铁多形成巨大的铁矿,容易开采,铁矿石的还原也不困难,因此铁的成本比其它金属低。此外,铁和碳等许多元素形成合金,具有各种优良性能,能满足现代机械制造、建筑等行业的多种要求。因此,钢铁工业仍然是重要的基础工业。

一、钢铁生产的发展历史

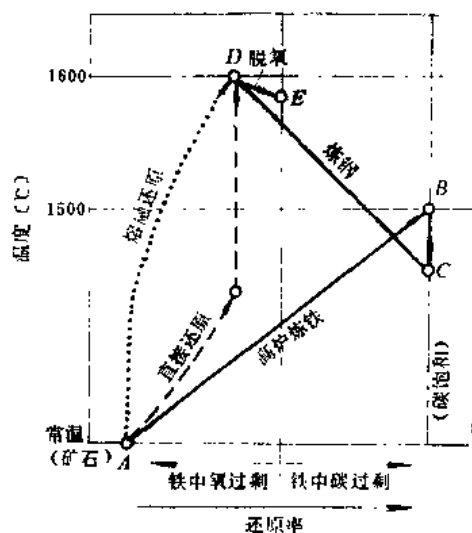


图1 一步法和二步法

人类最先使用的铁是陨铁,例如埃及金字塔中发现的铁,以及我国出土的商代铜钹铁刃,都是陨铁。它们是公元前 1400~1500 年以前的遗物。人类第一个炼铁方法称为块炼法,它没有固定的炉子,在土坑中用木炭在较低温度($\sim 1000^{\circ}\text{C}$)下把矿石中的铁还原出来。由于温度低,产品几乎不含碳、硅、锰、磷等元素,而且金属结构疏松多孔,孔隙中有大量脉石和渣子形成的夹杂物。块炼铁柔软可锻。我国出土的铁器证明,在春秋末期(公元前 400~500 年),块炼法在我国已相当发展。块炼法虽粗糙简陋,但它属于一步冶炼法。现代的钢铁冶炼,则属于二步冶炼法。首先,在高炉中,将铁矿石中的氧去掉后,铁又继续吸收过剩的碳成为生铁;而在炼钢炉(平炉或转炉)中,又把铁中过剩的碳氧化除去而炼成钢,如图 1 所示。可以看出,二步法是一个先增碳后脱碳的流程。现在,高炉—转炉二步法流程已经发展到很大的规模,可以成功地建设年产几百万吨到千万吨级的工厂。然而,二步法中先要增碳并非必要的过程,所以,在现代技术基础上实现一步法冶炼——矿石直接还原炼铁,一直是很受重视的研究开发领域。直接还原使用气体燃料作还原剂,产品为海绵铁,是电炉炼钢的优质原料。为了不使用气体燃料和焦炭,近年来对熔融还原的研究十分活跃。图 1 所示的熔融还原是理想的过程,十年来的研究表

明,有可能找到既不用焦炭又不需烧结或球团造块的新炼铁流程,但其产品是增碳的液态生铁,本质上仍属于二步法。

在古代,一步法的块炼炉,随着炉身增大和鼓风的利用,炉温升高,所以被还原出来的铁在炉子下部吸收了过剩的碳,达到共晶成分。生铁熔点低,但凝固后性脆,不能锻造。在西方,人们曾把脆的生铁作为废物扔掉。我国古代青铜铸造技术水平很高,所以很早(战国初期)就能用生铁铸造农具。铸铁和块炼铁同时广泛应用,是我国古代冶铁技术发展的一大特点^[1]。

为了使铁重新具有可锻性,需用氧化去除过剩碳,亦即还原熔炼和氧化精炼开始分工。第一步还原熔炼,由古代的竖炉发展到现代的巨型高炉,燃料由最初的木炭或煤发展到现在的焦炭。冶炼过程的基本原理变化不大,这是因为竖炉是热效率很高的设备,所以有强大的生命力。第二步氧化熔炼,则经历了许多变化。最初是把生铁、矿石和燃料一同放到简单的炉灶中,鼓风燃烧使生铁熔化成小液滴,下落过程中与矿石或空气中的氧起作用,同时工匠用力搅拌,使生铁中的碳尽量氧化,成为可锻的熟铁。这种方法称为炒熟铁或炒钢。我国古代还独创了在炒铁过程中反复多次锻打的百炼钢工艺,生铁和熟铁按一定比例配合起来冶炼的灌钢工艺,以及铸铁固态脱碳成钢的工艺^[1]。所有这些方法都是在固态或半固态状态下冶炼,劳动强度大,不可能发展成大规模生产,现在已经失传了。在西欧,炒铁法曾发展到相当大的规模,用火焰反射炉在氧化铁材料的炉底上炒炼熟铁,称为普德林法。1882年,普德林熟铁产量曾达到840万吨。当时大量的铁轨是普德林铁制造的。但普德林法仍然是半固态冶炼,有着半固态冶炼的根本弱点:劳动强度大,生产率低,产品质量差。19世纪中叶,许多冶金工作者努力追求的目标就是如何能在液态下把生铁炼成钢。事实上只要把温度再提高200~300℃,就可以使反应速率和生产效率提高100倍以上。液态钢冶炼方法的实现,使炼钢由古代冶炼转化为现代生产。

二、现代炼钢法的发展

1855年,亨利·贝塞麦发明了酸性底吹转炉炼钢法,第一次解决了大规模生产液态钢的问题。贝塞麦炼钢法的出现,标志着现代炼钢法的开始。和当时的一般预料相反,将冷空气吹入铁水后不但没有降温,反而加热到炼钢所必需的温度。由于吹炼时氧化剂和铁水之间充分乳化,有很大接触面积,冶金反应速率极高。

贝塞麦炼钢法的成功是和锰的使用分不开的。用锰(锰铁或锰铁)对炼成的钢水脱氧,使钢的质量有了保证,并且可能得到不同成分和硬度的钢。

贝塞麦法成功后,很快取代了普德林法。但由于它用酸性炉衬,不能造碱性渣,因而无法去除钢中的磷和硫。1877年,托马斯用石灰(后改用白云石)作碱性炉衬,试验成功碱性炼钢法,解决了高磷生铁炼钢时的脱磷问题。西欧洛林地区有巨大的高磷铁矿床,直到不久以前,托马斯法仍是西欧诸国重要的炼钢法。

继转炉炼钢法之后,另一个现代炼钢法是平炉炼钢。最早的平炉也用酸性炉衬。酸性平炉同样不能去除硫和磷。托马斯发明碱性法后,平炉也改用碱性炉衬。碱性平炉能适应各种原料,生铁和废钢的比可在很宽范围内变化,炼出的钢品种多、质量好。因此,碱性平炉很快或为世界上最主要的炼钢法,其地位保持了半个多世纪,绝对产量达到每年2.7亿吨,相对产量达到82%。图2是几种炼钢方法的消长情况。

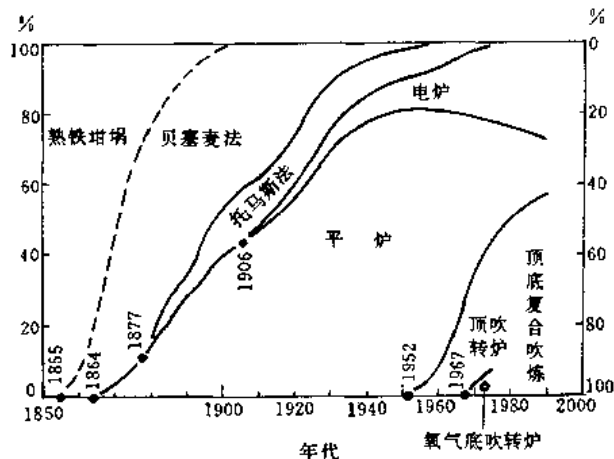


图2 不同炼钢法相对产量的演变历史

另一件应注意的事情,就是1952年发明的氧气顶吹转炉炼钢法。贝塞麦曾经想到过用氧气吹炼,但只是本世纪50年代大型空气分离工业出现后,吹氧炼钢才成为可能。由于氧气顶吹转炉具有反应速率快、热效率高的优点,又克服了空气吹炼法钢质量差、品种少的缺点,还可以使用和平炉炼钢相近的废钢(~30%),成为技术史上少有的发展迅速的新工艺。在短短的二十余年里,氧气转炉钢绝对产量由零增加到每年3亿吨以上(设备能力超过5亿吨),相对产量超过50%。

1967年发明的氧气底吹转炉炼钢法,进一步丰富了氧气吹炼法的内容。在氧气炼钢试验初期,1936~1939年有人曾做过底吹氧的试验,因炉底寿命低而未成功。新的底吹氧喷嘴应用开口冷却(碳化氢喷入钢液裂解吸热而降温)的原理,使底吹氧喷嘴寿命提高。底吹对熔池有强大的搅拌力,熔池成分和温度均匀,冶金反应平稳,金属收得率高。但底吹不利于石灰的熔化。氧气顶底复吹转炉包括了两种吹炼方法的优点,是当前和今后氧气炼钢的主要设备。

电炉炼钢是以废钢为主要原料的炼钢法。由于电炉内可以形成还原性气氛,长期来把电炉炼钢作为熔炼特殊钢和高合金钢的方法,生产量不高。而由于超高功率电炉和炉外精炼技术的成功,近年电炉炼钢的面貌有了很大变化,也成为大规模生产碳钢的炼钢方法。随着铁矿石直接还原技术的发展,矿石—直接还原—电炉生产流程和矿石—高炉—转炉生产流程已成为两种主要的钢铁生产流程。高炉—转炉流程生产效率高,能够适应宽板带钢生产的需要,现在是炼钢生产的主力。电炉生产灵活性强,在结构钢和工具钢等生产方面,电炉优于转炉。从吨钢能耗来比较:高炉—转炉为15.372MJ/t,电炉为5.372MJ/t,直接还原—电炉为20.066MJ/t。

为了寻求不用焦煤的钢铁生产方法,现在世界上正积极进行熔融还原的研究。最初的设想是在高于氧化铁和铁的熔化温度下,用碳把氧化铁液快速还原成金属铁,使在钢铁生产流程中省去炼焦、烧结和球团等工序。但实践表明,理想的熔融还原很难实现,而把研究的重点改为以煤作为炼铁的主要能源。生产的铁水仍然要在氧气转炉中炼成钢。图3为现代钢铁生产的主要流程。

三、钢铁冶金科学的发展

在古代,冶金是一项技艺而不是科学。古人曾经制造出质量优越的兵器和农具,但是冶炼技术缺乏理论的说明和指导,全靠工匠的经验和技巧。不仅劳动生产率极低,而且技术难以传授,大多现已失传,成为冶金史研究的对象。直到贝塞麦时代,这种状况仍然没有根本的变化。

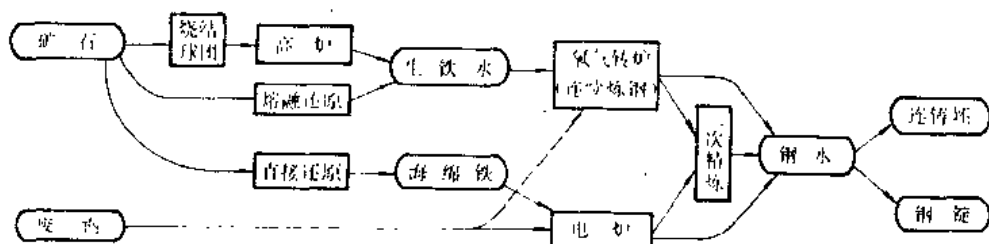


图3 现代钢铁生产的流程

冶金从技艺发展成为科学,是从本世纪30年代德国申克^[2]、美国启普曼^[3]等把化学热力学应用于冶金领域开始的。半个世纪以来,国外学者对气相—熔渣—金属各相内和相间反应的平衡常数进行了大量的测定工作,积累了丰富的数据。炼钢中常涉及的反应,都有了较可靠的平衡值。由于热力学函数有可加和性,还可以估计一些待定反应的热力学函数。直到现在,热力学仍然是冶金科学的基本内容和主要方法。炼钢反应大多数是在熔渣—金属液之间进行的反应。液相和气相、固相不同,气相内任何组元的活度正比于它的分压,亦即可以直接由浓度计算组元的活度;固相可按纯物质考虑,取活度等于1。而金属液和熔渣中组元的活度,则需经过实验测定。只有确定了各相中组元的活度,才能计算哪些冶金反应能够进行,需要怎样的条件(浓度、压力、温度等)及可进行到的程度。对于铁基溶液中组元活度,瓦格纳^[4]提出了溶液中原子间相互作用系数的理论,使计算多元系的组元活度有了一个系统的方法。半个世纪以来,人们对铁基溶液的热力学性质进行过大量的研究。近来,埃利奥特指出^[5],周期表中与钢铁冶金有密切关系的41个元素之间的相互作用系数一共应有861个,已测定的182个,占21%;即使只考虑最重要的9个元素(C、Mn、H、N、O、Si、Ni、P、S)与该41个元素之间的相互作用,在全部可能的333个相互作用系数中,有资料的也只有150个,占45%。与冶炼高合金钢和铁合金有关的高浓度合金的热力学性质,实验数据更不充分。熔渣中组元活度的实验测定和计算方法,其系统性和完整性比金属液更差。近年来,我国学者对中国矿产资源有关的系统如含铌、稀土等溶液的热力学,进行了相当完整的测定和研究^[6,7],扩充了该领域的基础数据。

冶金科学的另一方面是金属液和熔渣的物理性质和结构。熔体的物理性质有很强的实用性,关于这方面的实验测定工作国内外近年发展很快。由于炉外精炼、特殊冶炼以及铸造工艺的需要,使用了不同性能和成分的渣系,而且还在继续扩充。因此对熔渣性能的测定必将进一步发展,而且需要将实验数据加以整理总结。日本钢铁协会整理出版了熔铁和熔渣的物理性质数据手册^[8],德国钢铁工程师协会出版了渣图集^[9],积累了大量的资料。然而利用已有资料进行理论预测尚有不少问题。近十年来每四年举办一次国际熔渣和熔剂会议表明本领域是十分活跃的^[10]。就物质三态而言,固体结构是带有缺陷的晶体,气体是自由运动的分子,能用统计规律处理。只有液态结构最复杂。现在已知熔点附近的金属液是近程有序排列,而熔渣比金属更复杂。前苏联叶新学派^[11]在阐明液态渣的离子结构方面作了较出色的工作。但在复杂的氧化物熔体中,不仅有离子键,也有共价键。渣中各种键的相对数量及键合能量特征的变化规律,有待更深入地研究。

冶金科学的另一环节是过程动力学和反应工程学。热力学是严谨的科学。但它只讨论

过程的始态和终态。而反应过程是如何变化的,则属于动力学的研究范围。冶金过程在高温下进行,其速率和流动及传质有密切关系。由于冶金过程中不一定达到平衡,因而反应进行过程中的浓度变化对于工程问题是更重要的。通过实验测定判断冶金反应的控制环节,了解有关组元的传递方式,建立描述反应速率的方程,这是微观动力学的范围。而依据物质守恒原理,通过物质总衡算了解系统的全部传递过程,则称为宏观动力学。对于冶金反应容器内流动、混合、传热、传质以及它们对反应动力学的影响,则属于反应工程学的研究内容。实际上,动力学和反应工程学的研究往往是密切不可分的。由于它们有很大的实用性,近年发展很迅速^[12]。

凝固是炼钢生产的一个重要环节。钢水铸成钢锭或连铸坯才能进一步加工及应用。在凝固时同时发生金属结晶、流动、传热、成分偏析、收缩和异相析出等过程,是极为复杂的。早期对此只能定性研究,总结改善钢锭结构的经验。而现在应用传输理论已经可以定量计算其中的许多过程,这对于连铸生产的发展有重要意义。与此有关,对于从熔点到1300℃范围的钢和合金的高温物理性能和热力学性质,也需要更多的实验测定。

由于冶金过程的复杂性,有些信息难以用数值方法进行处理。这时模糊逻辑表现出很大的优点。近三年来日本钢铁生产中人工智能专家系统发展^[13]迅速。可以期望,这将会使人们更深入和完善的认识和控制冶金过程。

参 考 文 献

1. 北京钢铁学院冶金史研究室. 中国冶金简史, 北京: 科学出版社, 1978: 41~65
2. Schenck H. Physikalische Chemie der Eisenhiitten prozesse, Berlin; Bd. 1, 1932; Bd. 2, 1934
Physical Chemistry of Steelmaking, BISRA, 1945 (英译本)
3. Steelmaking: The Chipman Conference, Proceedings, Cambridge: The MIT Press, 1965
4. Wagner C W. Thermodynamics of Alloys, Cambridge: Addison-Wesley Press, 1952
5. 物理化学和炼钢: 第七届钢铁冶炼物理化学国际会议论文集, 北京: 冶金工业出版社, 1984: 1~13
6. Han Qiyong. Proc. 6th Intl Iron steel Congress, Nagoya, 1990: 166~176
7. 王龙妹. 博士学位论文(导师杜挺), 钢铁研究总院, 1988
8. 日本铁钢协会. 溶铁溶滓の物性値便覧, 东京: 日本铁钢协会, 1972
9. 德国钢铁工程师协会. 渣图集, 北京: 冶金工业出版社, 1989
10. Proc. 3rd Intl Conference on Molten slags and Fluxes, Glasgow, 1988
11. 易新, 格尔德. 火法冶金过程的物理化学, 第二卷, 北京: 高等教育出版社, 1956
12. Oeters F, Görl E. 钢铁, 1991: No. 2, 70~78; No. 3, 59~67
13. Argyropoulos SA. ISIJ International, 1990, vol. 30: 83~89