

机械的可靠性

——可靠性数据资料的应用

〔英〕 J.H. 邦帕斯-史密斯 著

〔英〕 R.H.W. 布鲁克 编

张昭华 译 顾昌耀 校

图书在版编目 (CIP) 数据

钢冶金学/ (德) F. 奥特斯著; 倪瑞明等译. —北京: 冶金工业出版社, 1997. 6
(冶金反应工程学丛书)
ISBN 7-5024-1924-1

I. 钢… I. ①奥… ②倪… III. 炼钢学 N. TF701

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 20892 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

外文印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1997 年 6 月第 1 版, 1997 年 6 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 18.25 印张; 505 千字; 559 页; 1-3000 册

45.00 元

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-95-737

序 言

(中文版)

本书中文版根据《钢冶金学》英文版并参照德文版译成，内容完全忠实于原著，没有变动。在翻译过程中，北京科技大学和冶金工业部钢铁研究总院的同仁们详细审读了原著，修正了德、英文版本的一些错误。我衷心感谢他们在中文译述方面细心而周密的工作。北京科技大学教授倪瑞明先生在翻译过程中和我所进行的内容广泛的通信是富有成效的，本人也获益匪浅。

原中国金属学会常务副理事长、冶金部副部长陆达先生对本书在中国出版给了很大的帮助，我对他衷心表示感谢。德国钢铁出版社对中文版的出版也给予大力支持，对此我也谨致谢忱。本书能在中国出版，我深感欣慰。多年来存在于本人和中国学者、朋友以及在德国从事研究的中国学者之间在业务和个人方面的合作将因本书的出版而加强。

弗朗兹·奥特斯 (Franz Oeters)

1995年6月于柏林

序 言

弗朗兹·奥特斯(Franz Oeters)教授的《钢冶金学》(《Metallurgie der Stahlherstellung》)一书,是当代国际冶金界的一本著名的重要著作。

近年来,随着钢液精炼、喷射冶金、转炉复合吹炼、铁浴法熔融还原以及短流程炼钢等钢铁冶炼技术的迅速发展,对钢冶金学中反应动力学和传输现象的研究显得日益重要。奥特斯教授在这部著作中,对气泡、液滴、颗粒等构成的弥散体系的反应动力学和把反应动力学与物理过程相结合的反应工程学方法,讨论得非常深入,概括了当前冶金学科的最新成就。将这部著作译成中文出版,必将对我国冶金学科高等教育和科学研究发挥有益的作用,有助于冶金工程技术人员水平的提高。

奥特斯教授曾五次来我国讲学和进行学术交流,在这些活动中表现了他精湛的学术造诣和严谨的学风,也表达了他对我国人民的友好感情。本书的出版将使我国更多的人士得到启迪和助益。

陆 达

1995年7月于北京

译校者前言

弗朗兹·奥特斯教授是德国及国际著名的冶金学家。《钢冶金学》(Metallurgie der Stahlherstellung)一书是他长期在德国柏林工业大学钢铁研究所讲学及科研成果的总结。奥特斯教授在本书中除了论述经典的炼钢热力学外,还运用反应工程学基本原理论述了钢冶金过程的宏观动力学,特别是阐述了钢包精炼、喷射冶金、转炉复合吹炼等冶炼技术中的反应动力学及传输现象,这比以往的钢冶金学著作有很大进展。翻译这样一本动力学和反应工程学内涵丰富的学术著作,因为缺乏统一的学术名词,在译校中不得不反复推敲。例如,三传的“传”,在我国有人用传输,有人则用传递。第二届冶金动力学学术会议提出的冶金动力学词汇,建议将其区分:相当于 *transfer* 译作传递,而 *transport* 译作传输。本书德文版,用 *Übertragung* 表述传递,而用 *Transport* 表述传输。因此在本书中,对于较笼统的情况表达为“传输”,而对于较具体的情况则用“传递”来表述。二词共同使用,有所区别。又如单位时间通过单位面积传递的物质(热)量,参照英文 *flux* 一词,在中文中一般用“通量”表述,但这并不理想。本书中参照德文 *Stromdichte*,表述为流密度,而德文用 *Fluß* 处仍译为通量。其余

不一一列举。对于中文名词的这类表述方式，希望读者提出意见和建议。

奥特斯教授自1980年起先后5次访问我国。在北京科技大学作过长期的学术交流及讲课，他严谨的治学态度及科研作风在我国冶金工作者中留下了深刻的印象，这在本书内容中也得到了充分的印证。在翻译过程中我们曾多次通过信件与他进行讨论，教授详细地回答了我们提出的问题，对我们正确理解本书内容起了很大的作用。本书得以在我国出版，是与奥特斯教授本人的支持、推动分不开的。本书的出版还得到了德国钢铁出版社以及我国冶金工业部科技司的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

本书是根据德国钢铁出版社（Verlag Stahleisen mbH）1994年英文版《Metallurgy of Steelmaking》翻译的。译校时参考了德文版。其中第1、2、8章由张圣弼翻译，第3章由项长祥翻译，第4、5、6、7章由倪瑞明翻译。全书译完后由钢铁研究总院仲增墉、赵先存校对，最后由北京科技大学曲英全面审校。

译著中肯定有不足之处，期待读者批评指正。

倪瑞明

曲 英

1995年7月于北京

序 言

(德文版)

近 20 年以来,在炼钢方面关于描述和判断冶金反应过程的理论取得了显著的进步。特别是钢包冶金的发展和对过程效率日益提高的要求促成了这些进步。在本书中除了讲述经典的炼钢热力学外,还尝试论述有关的冶金反应工程学基本原理。借助这些原理,可以在某种程度上超越经验描述的局限,更合理地解析和理解反应过程,从而为从事设计、制造的工程师及冶金生产技术人员在设计及管理工作中提供一个更有效的基础。

本书内容以作者长期在柏林工业大学钢铁冶金研究所讲课的讲义和为德国钢铁工程师协会有关钢铁冶金继续工程教育所著的文章为蓝本,此外还包括若干研讨会的成果。本书内容以炼钢中冶金学的基本理论为界限,不讨论车间设备技术和实际生产方法。这样能够在材料编排上不受生产过程顺序的限制。因为化学冶金过程与熔池运动、弥散和混合现象等物理过程是紧密结合的,对这些物理过程的讨论与对热力学和传质过程规律的讨论同样给予足够的重视。这些方面的总合就确定了冶金反应过程,这也是构成本书的各章节间相互关系的依据。本书从论述热力学基本原理开始,然后研究传质过程的有关方面,讨论各种物理现象,最后

详细分析过程的完整顺序。热力学一章只限于与炼钢有关的重要反应和状态图,因为已有很多好的冶金热力学的教科书,所以假定读者对冶金热力学的基础已经掌握。然而还没有适合于冶金工作者的有关传质过程和物理现象的专著,至少没有德文的书,所以需要它们详细讲述。第6、7、8章讨论冶金反应工程学的基础,其目的是将炼钢生产的完整过程顺序分解成各种单一的进程,并且定量地描述它们。在第7章以脱磷、喷吹粉剂脱硫和脱碳三种过程为例来作这种论述。第8章对熔化过程动力学结合工业炉中传热理论进行了分析。这方面的理论正在发展和形成之中,近年来建立的新观点取代了过时的概念。界面现象和它们在炼钢冶金中的作用没有单独作为一章,只是在有关内容中分散提及。另外,在选择全书所用的材料时,事先考虑到能将它们组合成完整的理论求解的体系,以便读者清楚理解冶金反应工程学所用的方法和观点。这样能够使研究人员和工程师们对在本书中未详细讨论的流行问题,如二次氧化、水口“堵塞”现象和钢液从转炉流出等,进行定量的探讨。当然内容和材料选择也带有主观性,如钢液凝固问题原则上也属于钢冶金学,由于钢的凝固方式强烈地影响其性能,凝固过程中钢的液态和固态必须始终同时观察。由于这个原因且又考虑到篇幅问题,所以本书没有纳入凝固冶金理论。

本书的对象是学完技术基础课程的最高年级的大学本科,有关理论冶金、普通冶金学和炼钢工艺学的课程对理解本书均是有意义的。各章也可以单独学习,对前面章节所讨论的内容都已作出了必要的概括和注释。本书除了作为工科大学生的教科书外,对工厂的冶金工作者、设备开发和设计工程师以及从事科研的学者均是有意义的。

一般说来,本书全采用SI单位制。然而选自文献中的某些图和数据还保留一些旧的单位,例如用atm而未用bar或 10^{-1} MPa,用kcal而未用kJ,这些单位没有换算。

文献一直摘录到1985年,部分至1987年。选择文献难免不

完整，作者非常感谢本专业同事对该有关文献的补充的信息。

本书献给纽派尔 (Helmut Knüppel) 教授 (1910—1989) 作为纪念，由于他的毕生努力，使炼钢冶金学有了巨大的进展。

作者在撰写书稿时得到了德国钢铁工程师协会的大力支持。作者对勃罗其开尔 (W. Pluschkell) 博士教授、许惠特番戈 (K. Schwerdtfeger) 博士教授和斯太芬 (R. Steffen) 博士的评议和审阅以及他们提出的许多建议表示感谢。大部分的图是由钢铁出版社绘制完成的。柏林工业大学冶金研究所的同事们在完成书稿过程中给予了各种形式的帮助。作者要特别感谢法格诺 (Ch. Wagner) 女士和舒马赫 (D. Schumacher) 工程师先生的帮助。施普林格 (Springer) 出版社和钢铁出版社以它们高标准的工作水平成功地出版了本书，在此对他们的合作和工作效率表示感谢。最后还要感谢我的妻子盖尔达 (Gerda) 在撰写书稿过程中给予我的关心和支持。

弗朗兹·奥特斯 (Franz Oeters)

1989年9月于柏林

序 言

(英文版)

本书英文版基本按照 1989 年德文版原文译出,对德文版中的某些错误作了校正。为了便于读者理解,对某些段落的叙述方法予以重写,同时增补了少量图表。承蒙一些同仁和专家提出这些修改的建议,作者谨致以衷心感谢。某些术语和公式符号按照英语国家的习惯作了修改,但有些方面如化学反应方程式的写法仍保留了德国的习惯。在某些图中用逗号(,)表示小数点的方法未能更改。

作者对保罗·奈顿(Paul Knighton)先生所作的睿智而周到的翻译工作深表感谢。作者同时感谢德国钢铁出版社(Verlag Stahleisen)在出版本书方面所给予的无微不至的通力合作。

弗朗兹·奥特斯(Franz Oeters)

1994 年 8 月于柏林

目 录

1 概论——钢的定义——炼钢的宗旨	(1)
2 热力学基础	(4)
2.1 最重要精炼反应概述	(4)
2.2 金属多元系中的活度	(7)
2.3 炉渣结构.....	(11)
2.4 气体平衡.....	(17)
2.5 氧化平衡.....	(23)
2.5.1 铁—氧系	(23)
2.5.2 用于氧化精炼的二元渣系	(28)
2.5.3 $\text{CaO-FeO}_x\text{-SiO}_2$ 三元系及相关的金属 一渣平衡	(44)
2.5.4 $\text{CaO-FeO}_x\text{-P}_2\text{O}_5$ 系和脱磷平衡	(54)
2.6 脱氧平衡.....	(64)
2.6.1 简单的脱氧平衡	(64)
2.6.2 复合氧化物的生成	(73)
2.7 脱硫平衡.....	(85)
2.7.1 硫化物的溶解度积	(88)
2.7.2 用固体脱硫剂脱硫	(91)
2.7.3 含氧化钙碱性渣脱硫	(96)

2.8	与含碱金属渣的平衡	(105)
2.9	钙冶金	(115)
3	传质	(121)
3.1	提取冶金反应的各种形式	(121)
3.1.1	引言和基本概念	(121)
3.1.2	反应类型	(125)
3.2	传输过程	(138)
3.2.1	引言和基本概念	(138)
3.2.2	边界层	(140)
3.2.3	无摩擦流中的传质	(142)
3.2.4	有摩擦层流中的流动和传质	(148)
3.2.5	应用剖面积分法进行边界层方程的近似计算	(159)
3.2.6	有摩擦湍流的流动和传质	(170)
3.2.7	自由表面上湍流的动量传递和物质传递	(177)
3.2.8	界面活性物质对传质的影响	(182)
3.2.9	相界处有沉淀反应的传质	(186)
4	冶金反应动力学	(189)
4.1	引言	(189)
4.2	金属—气体反应	(189)
4.2.1	铁液和氮之间的反应	(189)
4.2.2	铁液和氢之间的反应	(201)
4.2.3	铁液中的碳—氧反应	(202)
4.3	金属—熔渣反应	(216)
4.3.1	不涉及碳的反应	(217)
4.3.2	有碳参加的反应	(222)
4.4	固体物质的溶解	(234)
4.4.1	致密物质的溶解	(234)
4.4.2	多孔物质的溶解	(238)
4.4.3	石灰在硅酸盐渣中的溶解	(244)

5 多相系统中固体颗粒、液滴和气泡的运动规律	(246)
5.1 引言	(246)
5.2 固体颗粒的运动	(246)
5.3 气泡的运动	(251)
5.3.1 气泡的生成	(251)
5.3.2 气泡阻力的规律	(258)
5.3.3 气泡的分裂	(265)
5.4 液滴的运动	(266)
5.5 颗粒悬浮系和气泡群的运动规律	(267)
5.5.1 有限厚度的颗粒云团的运动	(268)
5.5.2 气泡柱	(273)
5.6 携带固体粉粒的气体流股的行为	(296)
5.6.1 气力输送状态图	(296)
5.6.2 携带固体物料的气体流股的流体动力学特性	(297)
5.6.3 颗粒穿越界面进入熔体	(309)
5.7 乳化现象	(316)
5.7.1 液滴形成的条件	(317)
5.7.2 熔渣—金属界面速度	(319)
5.7.3 乳化生成液滴的数量	(326)
6 冶金系统中的传质	(329)
6.1 引言	(329)
6.2 耐火材料的侵蚀过程	(330)
6.3 气泡搅动的界面	(335)
6.3.1 模型假说	(335)
6.3.2 实验结果	(337)
6.4 颗粒、液滴和气泡传质的基本原理	(342)
6.5 熔体中小颗粒的长大和溶解	(343)
6.6 颗粒和界面间的相互作用, 颗粒凝并和颗粒析出	(351)

6.7	搅拌状态下的颗粒析出	(355)
6.8	高雷诺数条件下固体颗粒附近的传质	(361)
6.9	考虑颗粒内部扩散时的颗粒传质	(364)
6.10	熔体与液滴之间的传质	(371)
6.11	气泡和熔体之间的传质	(376)
7	反应器理论	(380)
7.1	反应器理论概念	(380)
7.2	均相系统的宏观动力学	(382)
7.2.1	引言	(382)
7.2.2	非乳化系统的宏观动力学	(384)
7.2.3	乳化系统的宏观动力学	(387)
7.2.4	结论	(395)
7.3	弥散系统的物质转化	(397)
7.3.1	确定颗粒、液滴和气泡上物质转化的规则	(397)
7.3.2	氧气转炉中的金属—熔渣反应	(401)
7.3.3	喷吹石灰或碳化钙进行铁水脱硫	(418)
7.4	脱碳反应	(424)
7.5	混合	(436)
7.5.1	引言	(436)
7.5.2	混合模型	(439)
7.5.3	转炉中的混合	(457)
8	熔化动力学	(462)
8.1	热由热源直接向固体炉料传热的熔化过程	(462)
8.1.1	引言	(462)
8.1.2	预热期	(466)
8.1.3	熔化期	(472)
8.2	固体料在自身熔体中的熔化	(479)
8.2.1	前言	(479)
8.2.2	不考虑固体内热传导的熔化	(483)
8.2.3	考虑固体料内部热传导的熔化	(491)

8.2.4 实验结果	(498)
8.3 纯铁在铁—碳合金熔体中的熔化	(500)
8.4 熔化的过程模型	(504)
内容索引	(506)
参考文献	(529)
主要符号表	(556)



概论—钢的定义—炼钢的宗旨

通常钢是指在固态可以变形的各种铁基合金。对于铁—碳合金则限于含碳低于 2.1% 的部分才列入钢的范畴。把此界限推广，所有含碳低于 2.1% 的铁基合金称之为钢。按此定义，有一部分在固态可以变形的铁基合金如球墨铸铁由于它含碳高于 2.1%，不属于钢的范畴，而列入铸造生铁类。

钢包括大量不同用途的品种，不同用途对性能有不同要求。考虑到不同的用途，根据钢的性能和外形尺寸，对绝大部分钢种制订了跨地区的或工厂内部的标准。各种钢的性能由它的化学成分、热处理工艺和变形加工工艺所决定。化学成分必须在钢液凝固前调整好，凝固以后成分就很难再改变。因此炼钢生产的第一步，就是冶炼出指定成分的粗钢；然后第二步再将粗钢加工变形和热处理制成成品钢。狭义的炼钢就是指第一步。它的冶金学问题将是本书探讨的内容。

炼钢的原料是生铁、废钢和海绵铁。这些物质的性质在冶炼过程中经很大改变，此外还要去除夹杂物和一些溶解元素。所有这些工作概括起来称为“精炼”，然后再对钢液进行合金化。精炼和合金化都在熔融态进行。通常，生铁大部分是以熔融状态（称为铁水）加入炉内；而废钢和海绵铁则以固态入炉，因此需使它们熔化。熔化所需热量可以由精炼过程铁水中元素氧化放热来提供，也可由外界供给。液态钢在熔炼后紧接着就浇铸并凝固。

根据以上对钢生产过程的简要介绍，可见钢冶金学问题不仅包括精炼和合金化操作中的化学和反应工程学问题；还包括熔化和凝固的启动和控制中的过程工程学问题。由于精炼过程中化学反应的多样性，以及不同钢种化学成分的多样性，描述这些过程

将涉及相当广泛的内容。精炼过程涉及的化学反应有：氧化、造渣、脱气、脱氧和去除夹杂等。化学的和热力学的规律控制着这些操作和过程。同样凝固过程中钢组织的形成也受热力学规律的制约。甚至熔化和凝固相变过程中的热交换也服从热力学规律。因此热力学定律在钢冶金学问题中占有重要地位。

精炼过程不仅要求反应物之间化学反应要进行完全，而且要求反应物和产物以必要的速率进入和迁出反应区。化学反应本身也必须以适当速率进行。同样，在熔化和凝固过程中出现的热量也须在一定时间内完成转变或迁移，故必须掌握物质转移和热交换过程随时间变化的规律，而这些过程在多数情况下均受传输现象控制。这里，物质的传递是指冶金反应器内气体、炉渣和金属相中的传质；热的传递是指向炉料传入热量和从炉料传出热量，以及炉料内部的传热等。

传递过程的速率与进行该过程的交换面积密切相关。因此在弥散系中进行的传递过程通常远比在稠密系中快得多，因为弥散系中交换面积大，可以有更多的物质越过这些界面顺利地转移到体系内部。冶金生产充分利用了这一原理，以便使过程实现高效率，为了控制弥散系中的传输现象和物质及热的转换，工程师必须掌握弥散系内物料运动和物质及热的转换的物理基础。这些原理连同物质及热的传输原理，构成了钢冶金学问题中继热力学之后的第二个重点。

热力学规律、传质及传热规律和物料运动规律等的本身虽然和反应器的结构无关，但是都是在反应器内起作用，也只能在反应器内加以考察。事实上，各种过程通常都是在一个具体的反应器内进行，而且许多单一过程耦合成复杂体系。要描述这些体系需要反应器理论知识。反应器理论把传质和传热方程及其几何条件，与弥散系中物料衡算及热量衡算结合在一起；对于非均相反应器，除上述方程外还需加上描述混合过程的方程。反应器理论在冶金中应用才刚刚开始，仍在不断发展中。反应器理论是钢冶金学中的第三个重点。