

冶金流程工程学

(第2版)

Metallurgical Process Engineering

(The 2nd Edition)

殷瑞钰 著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com>

冶金流程工程学

(第2版)

Metallurgical Process Engineering

(The 2nd Edition)

殷瑞钰 著

Yin Ruiyu

北 京

冶金工业出版社

2009

图书在版编目(CIP)数据

冶金流程工程学/殷瑞钰著. —2 版. —北京: 冶金工业出版社, 2009. 3

ISBN 978-7-5024-4769-4

I. 冶… II. 殷… III. 黑色金属冶金—生产过程—最佳化—研究 IV. TF4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 204912 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 张 卫 王 楠 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4769-4

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2004 年 5 月第 1 版, 2009 年 3 月第 2 版, 2009 年 3 月第 3 次印刷

169mm×239mm; 27.75 印张; 1 彩页; 327 千字; 406 页; 4501-7500 册

65.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

物有本末 事有始终
不断探索 集成创新



徐匡迪



二〇〇四年五月

全国政协副主席、中国工程院院长徐匡迪院士题词

第二版前言

本书是作者经过 10 年左右时间的思考与准备撰写而成的。本书第一版曾获国家科学技术学术著作出版基金资助,并于 2004 年 5 月在上海宝钢举行了首发式,同时在全国发行。经过在宝山钢铁集团公司历时一年的讲授和在许多大学、科研院所、钢铁设计院、钢厂的专题学术讲座后,本书第一版第一次印刷在不到一年的时间内已销售一空;于是应出版社要求,经过若干处修改、补充,本书于 2005 年 6 月进行第二次印刷并发行。2006 年德国 Springer 出版社与冶金工业出版社计划联合出版本书的英文版,并向全球出版发行。在近两年的英文版的写作过程中,作者密切结合世界冶金工程理论与实践的不断发展,并经深入思考,在完成英文版的同时,也对本书中文版做了大量的修改和调整,有的是重新撰写的。与 2005 年重印版本相比,本书第二版总共有 400 多处修改和调整,融入了作者近年来的进一步思考与认识,因此,冶金工业出版社这次以新版(第二版)发行。

本书内容是作者对钢铁冶金总体过程(流程)领悟的概括。作者于 20 世纪 90 年代初,逐步认识到钢厂内诸多生产工序的功能已经或者正在发生解析-优化,这可

导致上游工序和下游工序之间关系的协同-优化,进而触发整个钢厂生产流程的重构-优化。这些演变和优化进而可促使钢铁制造流程动态运行机制的变化和钢厂模式的优化。而要认识并证明这些学术观点,应该采用解析-集成的方法。在本书中,作者指出,钢铁制造流程动态运行过程的物理本质是:物质流(主要是铁素流)在能量流(主要是碳素流)的驱动和作用下,按照设定的“程序”,沿着“流程网络”作动态-有序的运行。因此,钢厂的功能应拓展为:

1. 铁素流运行功能——钢铁产品制造功能;
2. 能量流运行功能——能源转换功能以及与剩余能源相关的废弃物消纳—处理;
3. 铁素流—能量流相互作用过程的功能——实现过程工艺目标以及与此相应的废弃物消纳—处理功能。

作者愿意在本书新版发行之时再次向读者说明本书具有的工程科学的性质,即:

——理论上研究的是冶金流程运行的动力源和流程运行的宏观动力学机制,落脚点是要揭示冶金制造流程整体运行的本质和运行规律,以协调钢厂生产过程中物质流、能量流、信息流的优化;

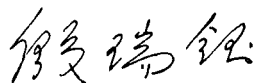
——理论上研究的是冶金制造流程的组成结构,落脚点是要通过集成创新使冶金流程的整体过程优化和整体功能优化,以构建新一代钢厂;

——理论上强调的是冶金流程的动态—有序运行,落脚点是构建准连续/连续化运行的冶金流程,以

提高钢厂运行的各项技术经济指标;

——理论上研究了冶金流程动态运行的“三要素”(即“流”、“流程网络”、“程序”),落脚点是使冶金流程运行过程的耗散“最小化”,以提高钢厂的市场竞争力和可持续发展能力。

在本书第二版即将发行之际,作者要对徐匡迪院士、师昌绪院士、张寿荣院士、陆钟武院士和曲英教授、黄务涤教授的支持和帮助表示深深的谢意。同时,也要向田乃媛教授、张春霞博士、伊炳希博士、徐安军博士等长期以来的合作和帮助表示谢意,因为本书中也凝聚了他们付出的努力。



2008年11月6日于北京

序

自 19 世纪中叶现代炼钢技术问世之后,钢铁一直是各国国民经济和社会发展的重要基础材料,钢铁成为一些国家国力的重要标志。为此,新中国成立不久,便确定“以钢为纲”的发展战略。为了加快钢铁生产,1958 年曾发动过“大办钢铁”运动,虽然付出了很大代价,但收效甚微,已成为历史。自从 20 世纪 80 年代中国实施改革开放政策以后,由于国内制造、建筑等行业大发展,对钢铁需求量剧增,特别是发展战略正确,技术不断进步,使我国钢铁工业步入了健康发展阶段。20 世纪 90 年代中国钢铁工业崛起,1996 年中国粗钢产量逾亿吨,跃居世界第一;并且实现了 1990~2000 年钢产量增加接近一倍,1996~2003 年钢产量又翻了一番有余,2003 年中国粗钢产量超过 2.2 亿 t;与此同时,吨钢能耗却大幅降低,这在国际钢铁界认为是一个奇迹。本书作者长期在基层钢铁企业、科研单位和国家产业部门从事生产技术、科学研究和科技管理工作,经历了不同层面上的许多重大技术开发、工程实践、发展决策过程,积累了丰富的实践经验,不断进行理论上的探索与思考,形成了钢铁企业冶金制造流程层级上的理论框架,并在我国钢铁工业技术进步、技术改造的

过程中不断应用、推广,指出主要发展方向,收到成效。

作者根据十多年来的实践过程及深入研究,创造性地提出钢铁制造流程中的工程科学问题。提出了在冶金制造过程中存在着不同时-空尺度上的科学问题,即基础科学、技术科学、工程科学等问题。并指出冶金工业是典型的流程制造业,制造流程是这些工业的“立业之本”,制造流程在流程工业中具有广泛的关联度和渗透性。制造流程直接关联到钢厂的质量/品种、成本/价格、投入/产出、效率/效益等市场竞争力因素;又关联到资源、能源的可供性和过程排放、环境-生态、循环经济等可持续发展因素。钢铁制造流程是在对单元化学反应过程、形变过程、相变过程等基础科学知识的研究和单元工序、装备设计、开发的技术科学知识的基础上逐步构筑起来的。现在,从科学认识的角度看,人们对钢铁制造过程中的原子/分子尺度上的基础科学方面的知识是研究得相当深入的,对工序、装置尺度上技术科学方面的知识,却只能说是略知,而对生产制造流程尺度(层面)上的工程科学方面知识的认识,正处在进入角色的过程中。然而,全球钢铁工业都面临着市场竞争力和可持续发展的双重挑战,应对这样复杂、深刻的挑战,重要的对策之一是以工程科学的知识推动钢厂的结构调整和优化,因此,也可以认为,时代呼唤着工程科学的发展与创新。

作者在近年来的科研工作中,对钢铁制造“流程”的本质、属性、内涵作了深入的探索,指出:冶金制造流程是由“流”、“流程网络”和“程序”三要素构成的,制造

流程的属性是耗散结构,并对冶金流程工程的理论框架及其内涵作了较为详细的阐述,其中包括钢铁制造流程的解析-集成、钢铁制造流程的多因子物质流控制等。同时,作者特别强调制造流程中的时间问题,钢厂生产流程中的运行动力学问题以及生产流程中的“界面技术”等,最后归结到钢铁企业的结构优化和模式创新。

作为一个现代化企业,必须考虑可持续发展及发展为循环经济的可能性。作者提出了钢厂的绿色制造方向和钢铁制造流程的功能拓展为循环经济的前景。作者在书中对钢铁制造流程物理模型的描述,将有利于引导信息技术高度集成地进入钢铁制造流程的整体调控和智能化。

基于对国内外钢铁企业的深入了解,结合现代工程科学的发展,作者写出了这本《冶金流程工程学》,无疑对指导我国钢铁工业沿着更健康的道路发展有着重要意义。21世纪钢铁仍然是最重要的基础材料,在国民经济中占有十分重要的位置。本书的问世将对大专院校教师、研究生、钢铁研究工作者与钢铁厂设计工程师、企业家及管理专家有重要参考价值。

师昌绪

2004年2月

第一版前言

20 世纪是冶金从技艺走向工程科学的世纪。20 世纪的最后 30 年特别是进入 21 世纪以后,国际钢铁工业包括中国钢铁工业面临着新的挑战和发展机遇。这主要是时代的发展、科学技术的进步和地球生态-环境的变化提出了新的命题。就钢铁工业的发展而言,已不仅是提出一些类似质量、品种等单一性的课题就能解决,而更具重要性、前瞻性的命题是:要求综合地解决包括产品成本、物耗、能耗、质量、生产效率、投资效益等市场综合竞争力和包括资源-能源可供性、环境-生态和谐性在内的可持续发展等重大集成性命题。新世纪钢铁工业的时代性命题,已经不能主要依靠基础科学(例如化学反应热力学、动力学等)和技术科学(例如“三传一反”等)来解决,而需要进一步通过研究钢铁冶金制造流程的功能、结构、效率等流程工程学方面的学问从整体上来解决。

与此同时,对于冶金学、金属材料学而言,如果只是停留在基础科学的领域内,或是局限在技术科学的层次上,恐怕很难协同地解决钢厂生产、建设中存在的许多复杂的实际问题,甚至也将影响到信息技术高效地贯通在整个钢铁生产流程中。要解决上述集成性、复杂性命题,应该研究、探索制造流程层面上的属于工

程科学范围的学问。

科学是人类的认识活动,是以“范畴、定理、定律形式反映现实世界多种现象的本质和运动规律的知识体系”。在科学的发展过程中,既要把事物、现象的本质归纳为理论并确立一系列应遵循的原理、原则;然而,也应该注意到人们在认识过程中存在不可避免的局限性。因此,在必须重视已归纳出理论、原则的同时,又不能走入只从已有理论认识出发而不从实际出发的误区。如把已有的理论、原则当作衡量一切的认识准则,那将导致科学及其学科的僵化与狭隘化,甚至导致把科学已取得的成就变成限制科学发展的锁链。这是因为:物质世界是复杂的,即使在有限的时空范围内,也具有无限的多样性、层次性或可能性,这就决定了科学学说自然而然会产生众多的学派和风格;即使在同一学科内,也会产生不同的知识体系,而且会随着时代的发展产生新的学科分支。

作为支撑冶金工业发展的主要学科,冶金学科、金属材料学科实际上也面临着学科的发展、拓宽和创新问题。长期以来,研究冶金学科、金属材料学科的方法论主要是植根于还原论的。必须承认,还原论方法在近代科学和现代科学的发展过程中发挥着重要作用,一直影响至今。冶金学、金属材料学在 20 世纪内从技艺走向科学,就是用还原论方法来着手解决的。例如化学反应热力学、动力学理论、晶体学和相变理论等。然而,工业生产、建设中往往存在着许多重大的、复杂的问题,这些问题不可能只依靠上述基础性科学理论

来解决。必须注意到的是这些重大的、复杂的命题随着时代的发展又是层出不穷的。因此,导致了“三传一反”、“控轧控冷”等技术科学范畴学问的出现。进入 20 世纪末特别是 21 世纪,现代化的钢铁企业在发展进程中又提出了要在基础科学、技术科学的基础上发展解决综合集成性命题的工程科学命题,以期解决更大尺度、更高层次的复杂性、集成性问题,而这些复杂性、集成性问题对企业、对社会的发展恰是极其重要的。由此需要研究宏观层次的工程科学——冶金流程工程学(Metallurgical Process Engineering)。

冶金流程工程学属于宏观层次上工程科学的范畴,主要研究冶金制造(生产)流程的物理本质、结构和整体行为。旨在弄清楚冶金制造流程过程中相关的物质(和能量)流动(与储存)的驱动力;涉及从资源的获得开始直到产品的产出、使用、消费、回收的循环过程。研究制造流程中所涉及的有关功能-结构-效率问题,即空间和平面布置、时间和时序安排与控制、流程过程中排放和消纳(或再循环)的控制和优化等一系列知识。

诺贝尔奖金获得者 Gell-Mann 指出:“对于复杂的、高度非线性的系统,系统的整体性行为并不是简单地与其部分的行为相联系,要求有勇气广泛地从各方面关注整体的情况,而不是注意个别方面的细节”。从方法论的角度来看,这段话表明了世人已经注意到只用还原论方法处理不了复杂性、集成性的工程科学范畴内的问题。当然,在研究工程科学中的复杂性、集成性问题时,并不否定还原论方法,而且在某些方面还要

吸取还原论的长处,具体体现在工程科学的复杂性问题研究中也要对问题进行解析。但必须指出:这是在整体考虑下的解析,在解析研究的基础上,再综合集成到整体。因此,工程科学的研究方法,更需要的是学会灵活、巧妙地使整体论和还原论相结合。

时至今日,冶金学、金属材料学在基础科学层面的认识可以认为是基本清楚的;在技术科学层面的认识,只能说是处在基本清楚与大概清楚之间的状态;而在工程科学层面的认识,却只是处在引起重视和进入总体思考的过程中。因此,可以说社会的进步、工业的发展、学科的拓展以及人才的培养,亟待冶金、金属材料科学开展工程科学层面上学问的探索与研究。

在新世纪里,国际钢铁工业特别是中国、印度、巴西等发展中国家的钢铁工业处在发展的机遇期,这是协调钢厂与环境和谐的机遇期,是协调产品结构、资源、能源结构的机遇期,是提升钢厂技术结构的机遇期,同时也是进一步调整国际钢铁工业布局的机遇期。在这种机遇与挑战并存的时代里,要求钢铁工业特别是钢铁企业在整体结构上进行综合优化和创新。对于后发投资者来讲尤其如此。

作者在钢铁企业、钢铁工业部门长期从事科技工作,回顾中国钢铁工业于 20 世纪 90 年代迅速崛起过程中的诸多事例,对这一崛起过程的认识有所感悟,在理性认识上也有所收获;结合访问世界各国主要钢厂并与国际上诸多著名专家、学者交换看法和心得,使作者从工程科学的层面上认识到,钢铁工业作为典型的

流程制造业,其制造流程(工艺流程)有着广泛的关联度和渗透性。因此,研究冶金制造流程的本质、结构及其运动规律具有重要意义。要探索、研究制造流程的功能、结构、效率必须从理论上认识制造流程是什么?现在已经初步认识到制造流程包括了三个要素:即“流”、“流程网络”和“程序”。制造流程就是“一种多因子‘流’,在一个由不同性质的工序及工序之间连接器组成的复杂网络结构(流程网络框架)中,按一定的‘程序’,动态有序地运行,从而实现某些目标群”。

本书的撰写是按照以下的思路展开的:

- 流程制造业与流程工程;
- 什么是冶金流程工程学;
- 钢铁制造流程的解析和集成;
- 钢铁制造流程中的多因子物质流控制;
- 制造流程中的时间因素;
- 钢厂生产流程中的运行动力学;
- 钢厂的结构与模式;
- 钢厂与环境。

撰写本书的目的是为了向钢厂的领导层、科技人员,有关高等院校的教师、研究生,有关设计院、研究院的科研人员和某些管理部门的高级管理人员提供一本参考书。考虑到某些读者可能由于时间有限,只对书中的某些章节有兴趣,为了方便这些读者阅读,某些章节必须保持其完整性和相对独立性;因此,各章之间某些内容的叙述不免可能有些重复。由于不是一般教科书,少量的重复也许是允许的或是必要的。

本书在撰写过程中也曾遇到很多困难。首先是很难找到相似的专门参考书;其次是资料的收集、处理很费时日;其实更难的是概念的凝聚和模型的抽象与构建。因此,撰写本书大约准备了十年的时间,实际上也是在理论认识上逐步进入“角色”的过程,至今也不能说有很完整的认识,不当或错误之处也许很难避免,诚望各方面专家、学者指正。

本书的撰写,得到了师昌绪院士、邵象华院士、柯俊院士、徐匡迪院士、王淀佐院士、张寿荣院士、陆钟武院士、曲英教授的鼓励和支持。师昌绪、张寿荣两位院士共同推荐争取国家重点支持出版科技图书的资金支持,并获得批准。回想 1994 年,我当选为中国工程院院士之际,师昌绪先生就建议我写一本书来表述我对钢铁冶金的认识和思路,对此提示,始终铭记在心。近十年来,不敢懈怠。在学习、工作和指导研究生的过程中,总是注意凝炼充实工程科学层面的理论构思。当然,也必须说,从工程科学层面上来认识冶金学方面的综合集成性的问题,只是处在初步进入“角色”的过程中,许多方面的课题,特别是与信息技术、环境科学的结合更有待进一步研究、探索,并在实际应用中不断深化。

在本书的具体撰写过程中,我逐章逐节,几经易稿,独立完成。曲英教授对本书进行了审校,给予了具体和细致的帮助。曲英先生是 50 年前我大学时代的老师,四十多年来长期保持联系,交流学术上的看法,受益匪浅。此次他以年逾七旬的高龄,逐字逐句进行

审校,并提出不少修改意见,有助于本书的成稿。十多年来,田乃媛教授始终支持我的工作,协助指导博士研究生的课题研究,丰富了本书的理论和实践内容。我也必须提到一群年轻伙伴,他们是伊炳希博士、徐安军博士、王英群博士、吴晓东博士、崔健博士、刘茂林博士、唐洪华博士、彭其春博士、刘青博士和邱剑、毛新平博士等,我和他们一起研究、讨论的过程也是对本书的理论框架不断充实丰富的过程。本书的某些章节还得到张寿荣院士的审校、指正。王泰昌先生、余志祥先生、傅杰先生、崔健先生、王中丙先生等为本书提供了某些资料。此外,还必须提及张春霞博士,自1998年开始进入共同研究课题后,她就为本书的筹划做了大量工作,包括整理、编列、校对、修改等。张旭孝先生近年来作为我的工作助手,文字整理、打印编排等工作均由他承担。在此对上面提到的人士一并致以深深的谢意。

殷瑞钰

2004年3月于钢铁研究总院