



普通高等教育“十三五”规划教材

普通高等教育“13.5”规划教材

钢铁冶金学

（炼铁部分）

（第4版）

主编 吴胜利 王筱留

副主编 张建良



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

钢铁冶金学

(炼铁部分)

(第4版)

主编 吴胜利 王筱留

副主编 张建良

北 京

冶金工业出版社

2019

内 容 提 要

本书系统地阐述了炼铁基础理论、炼铁生产相关工序的工艺特点及其技术,较全面地反映了当前国内外炼铁技术的发展成果及其动向。全书共分9章,分别介绍了钢铁工业中的炼铁生产工艺概要,铁矿粉造块工艺原理及烧结、球团工艺技术,煤焦化工艺原理及炼焦技术,高炉内还原、造渣、燃料燃烧及气化的热力学和动力学原理,高炉内的传输现象及应用实例,高炉内能量利用及工艺计算原理和实例,高炉高效低碳生产工艺技术;概述了非高炉炼铁工艺及炼铁工艺智能化、信息化技术。书中各章均有本章提要、小结,以及习题和思考题,并指出了各章需要读者掌握的重点。为引导读者深入学习,各章还列出了参考文献和建议阅读书目。

本书为高等院校冶金工程专业本科生的教学用书,也可作为研究生的教学参考书,以及职业技术学院、继续工程教育、专转本函授等学员的补充教材,还可供科研院所、生产企业的科研及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢铁冶金学. 炼铁部分/吴胜利,王筱留主编. —4版.

—北京:冶金工业出版社,2019.1

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-8020-2

I. ①钢… II. ①吴… ②王… III. ①炼钢—高等学校

—教材 ②炼铁—高等学校—教材 IV. ①TF4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第023887号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 杨 敏 高 娜 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-8020-2

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
1991年4月第1版,2000年1月第2版,2013年2月第3版,2019年1月第4版,
2019年1月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 34.75印张; 840千字; 537页

65.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

第4版 前言

《钢铁冶金学（炼铁部分）》初版于1991年，1997年被评为“冶金工业部优秀教材”；2000年经过修订，作为普通高等教育“九五”国家级重点教材再版（第2版）；2013年再次经过修订，作为普通高等教育“十二五”规划教材再版（第3版）；目前是北京市精品课程“钢铁冶金学”的主干教材。

该书自出版以来，在北京科技大学作为专业课教材已被26届学生所使用；在中南大学、东北大学、重庆大学、西安建筑科技大学、内蒙古科技大学、华北理工大学、武汉科技大学、安徽工业大学、江西理工大学等20余所大学及部分职业技术学院，作为专业课教材或者教学参考书被采用，得到授课老师和学生的广泛认可；科研院所及生产企业的专业人士也对该书予以良好评价。该书此前三版已累计印刷17次，发行量近五万册。

为了实现“中国制造2025”、国家“一带一路”倡议，必须加快高端工程技术人才的培养。因此作者在多年教学、科研工作及第3版的基础上编著了本书，旨在详细介绍炼铁的基础理论和工艺技术，并融入国内外炼铁领域的科研成果及最新研究进展，力求科学严谨和系统全面。随着高炉的大型化和风口大量喷煤，焦炭质量对高炉冶炼的影响程度增大，使得炼焦工序在炼铁生产中的作用凸显，为此本次修订增加了第3章“煤焦化技术及高炉焦炭质量”。近年来，大数据、云计算等已开始应用于钢铁生产过程，钢铁生产的信息化、智能化技术得到广泛重视，炼铁“降本增效”的经济性理念高度强化，本次修订新编了第9章“炼铁工艺智能化、信息化技术”。此外，本次修订还补充了炼铁专业领域理论研究的进展以及新工艺、新技术的应用，更新了部分生产技术资料，删减了部分章节的内容。在第2章增加了“国内外烧结新工艺、新技术”“国内外球团新工艺、新技术”“高炉炉料结构优化技术”等内容；在第4章增加了“炉渣的镁铝比控制”“碳饱和度对铁水的影响”等内容；在第6章增加了“高反应性焦炭实例”内容；第7章增加了“高炉接受高煤比条件”“氧

气高炉”“低硅冶炼技术”“高炉长寿技术”等相关内容；第8章增加了“非高炉炼铁工艺的发展”等内容。

参加本次修订和新编工作的有北京科技大学王筱留、吴胜利、张建良、高斌、杨世山、刘征建、祁成林、寇明银、王广伟、焦克新、周恒、李克江等。本书第1章、第2章由刘征建、吴胜利负责修订，第3章由王广伟、张建良负责新编，第4章由王广伟、吴胜利负责修订，第5章由寇明银、吴胜利负责修订，第6章由杨世山、祁成林负责修订，第7章由焦克新、张建良负责修订，第8章由焦克新、高斌负责修订，第9章由寇明银、吴胜利负责新编。本书的审定工作由王筱留负责，校对工作由周恒负责。

全书由吴胜利、王筱留担任主编，张建良为副主编。

在本书出版之际，作者要特别表达如下感谢之意：

(1) 本书采纳了兄弟院校炼铁专业、炼铁科研和生产单位的教授、专家学者、授课老师以及广大读者提出的宝贵意见，参考或应用了近年来炼铁同行发表的研究成果以及专著、论文的有关资料和图表，在此向相关人员及出版社表示感谢！

(2) 本书作为北京科技大学“十三五”规划教材建设的重点项目而得到资助，北京科技大学教务处、冶金与生态工程学院对本书的编写和修订给予了热情鼓励和大力支持，在此一并感谢！

(3) 北京科技大学的研究生苏博、张亚鹏、王来信、王海洋、李洋、杜斌斌、范筱玥、陆亚男等同学参与了资料收集和书稿编辑校核等工作，在此专致谢忱！

(4) 冶金工业出版社的领导和编辑为本书的出版付出了大量心血，特此一并表示诚挚的感谢！

由于水平、时间所限，书中难免有不妥之处，恳请专家、学者、老师和广大读者予以指正，以使本书更臻完善。

吴胜利 谨识

2018年12月

第3版 前 言

《钢铁冶金学（炼铁部分）》初版于1991年，1997年被评为“冶金工业部优秀教材”；2000年经过修订，作为普通高等教育“九五”国家级重点教材再版；目前是北京市精品课程“钢铁冶金学”的主干教材。

本书自出版以来，在北京科技大学作为专业课教材已被20届学生所使用；在中南大学、重庆大学、西安建筑科技大学、内蒙古科技大学、河北联合大学、武汉科技大学、安徽工业大学、江西理工大学等20余所大学及部分职业技术学院，作为专业课教材或者教学参考书被采用，得到授课老师和学生的认可；科研院所和生产企业的专业人士也对本书予以良好评价。本书此前两版已累计印刷14次，发行量达到四万余册。

为了更好地反映现代炼铁理论和技术的发展，本次修订删去了一些现代炼铁生产已淘汰了的工艺技术，补充了近年来炼铁专业领域理论研究的进展以及新工艺、新技术的应用，更新了部分生产技术资料；随着无钟炉顶替代双钟炉顶，改写了第6章高炉炼铁工艺的部分内容；由于近年来，高炉冶炼的数学模型和炼铁专家系统取得很大发展，直接还原中的转底炉工艺和熔融还原中的Corex C-3000在中国的实践取得进展，第7章高炉冶炼过程数学模型概述以及第8章非高炉炼铁的篇幅有所增加；为满足后续课程设计讲课（20~24学时）的需要，增加了第9章高炉炼铁工艺设备与设计；此外，还在附录中添加了烧结配料联合计算法实例及高炉冶炼物料平衡、热平衡计算程序。此次修订后，总的篇幅增加了，选用本书的院校可根据教学大纲和学时数，酌情调整课堂教学内容。

本次修订采纳了兄弟院校炼铁专业、炼铁科研和生产单位教授、专家学者、授课老师以及广大读者提出的宝贵意见，应用了近年来炼铁同行发表的研究成果以及新专著、新论文的资料和图表，在此向相关人员及出版社表示感

谢。北京科技大学教务处、冶金与生态工程学院对本次修订给予了热情鼓励 and 大力支持, 研究生白俊丽、李峰光、焦克新、孙静、孙颖、邢相栋、闫炳基、张哲铠等参加了资料收集和校核等工作, 祁成林博士和苏东学为本书书稿的完成付出了辛勤劳动, 冶金工业出版社的领导和编辑为本书的再版付出了大量心血, 特此一并致谢!

参加本书修订工作的有北京科技大学王筱留、吴胜利、张建良、吴铿、高斌、左海滨、国宏伟、张丽华、刘征建等, 全书由王筱留担任主编, 吴胜利为副主编。

受水平、时间所限, 书中难免有不妥之处, 恳请专家、学者、老师和广大读者予以指正, 以使本书更臻完善。

编 者

2012年8月

第2版 前言

《钢铁冶金学（炼铁部分）》初版于1991年。该书出版以来，在北京科技大学和包头钢铁学院、河北理工学院等兄弟院校作为本科以及函授、夜大本科的专业课教材已达7~8届，得到专业教师和学生的认可，反映良好，在1997年被评为“冶金工业部优秀教材”。

本书初版至今，钢铁生产技术有了较大的提高和发展。这次有机会修订再版，编者补充了近年来关于炼铁及铁前系统生产上获得成功的部分新技术和新工艺，改写了第6章的“高炉操作制度”一节，删去了一些生产上不用的工艺技术，补上了初版中的遗漏（例如第3章的后几节）并改正了一些错误，更新了部分生产技术资料。

在本书使用和修改、评审中那树人教授、顾飞教授等专家、学者、老师以及广大读者提出了许多宝贵意见，修订中应用了刘云彩教授、鞍钢炼铁厂等的资料，在此向他们表示衷心的感谢。在修订再版工作中得到了北京科技大学冶金学院和炼铁研究所、教务处和教材科的领导和工作人员的鼓励 and 大力支持，在此向他们表示谢意。

参加本书修订工作的有王筱留、吴胜利、高征铠、齐宝铭等，全书仍由王筱留主编。

本书在修订中，尽管编者付出了较大努力，但限于水平和时间关系，书中难免有不妥之处，恳请专家、学者、老师和广大读者指正。

编 者
1999年4月

第1版 前言

本书系钢铁冶金专业《钢铁冶金学（炼铁部分）》课程的教学用书。

自一九七九年开始，将炼铁、炼钢和电冶金专业合并为钢铁冶金专业。作者编写的《钢铁冶金学（炼铁部分）》初稿，曾在北京钢铁学院和包头钢铁学院的部分年级试用。一九八七年在包头钢铁学院召开了全国高等院校钢铁冶金专业教学研讨会，为提高本课程教学质量，参加研讨会的11所院校的代表共同拟订了统一的《钢铁冶金学》教学大纲。本书系在原试用教材的基础上，根据会议制订的教学大纲重新编写的。

按照钢铁冶金专业教学计划和本门课程教学大纲的要求，本书重点阐述炼铁过程的基本理论和工艺，主要内容包括含铁原料的造块、炼铁原理、工艺操作及高炉作业的能量利用分析，并结合钢铁工业的最新发展，对数学模型、高炉过程自动控制及非高炉法炼铁（包括直接还原及熔融还原）作了简要介绍。

由于授课时间的限制，凡物理化学、冶金过程热力学和动力学（钢铁冶金原理）和传输原理等内容已在有关课程中讲授，不再重复，只着重于这些内容在炼铁中的应用；炼铁设备结构和工艺操作的内容在有关课程（如冶金单元设计、钢铁厂设计原理、钢铁冶金实验技术等）和生产实习中讲述。为提高学生的运算能力和适应炼铁技术的发展，作者较多地应用数学计算来讲述冶金过程化学反应、能量利用和工艺过程。

本书初稿完成后，其主要章节曾在北京科技大学钢铁冶金专业和武钢、宝钢、湘钢的继续工程教育中试用。本书定稿前于一九八八年三月开过审稿会，有重庆大学裴鹤年、华东冶金学院糜克勤、唐山工程技术学院（原河北矿冶学院）全泰铉等同志参加，他们对本书提出了许多宝贵意见。在编写过程中，得到北京科技大学冶金系和炼铁教研室的同志们的大力支持，书中应用了他们的一些科研成果，也应用了我国兄弟院校和炼铁界同行们的成果，编者在此表示

衷心的感谢。

本书第一章由齐宝铭编写，第二、五章由王筱留编写，第三、四、六章由齐宝铭、王筱留编写，第七章由齐宝铭和秦民生编写，第八章由杨乃伏编写，全书由王筱留主编。

本书作为钢铁冶金专业四年制本科生教材，也可供继续工程教育、函授、夜大、职大、大专师生以及有关工程技术人员和科学工作者参考。

限于作者水平，书中难免有不妥或错误之处，恳请读者批评指正。

编者

1990年6月

目 录

1 概论	1
1.1 钢铁工业在国民经济中的地位	1
1.2 中国钢铁工业的概况	2
1.3 钢铁联合企业中的炼铁生产	4
1.4 高炉冶炼过程概述	6
1.4.1 高炉炼铁工艺流程及炉内主要过程	7
1.4.2 含铁原料及其他辅助原料	10
1.4.3 高炉燃料	18
1.4.4 耐火材料	21
1.4.5 高炉产品	27
1.4.6 高炉冶炼的主要技术经济指标	31
1.5 小结	38
参考文献和建议阅读书目	38
习题和思考题	38
2 铁矿粉造块	39
2.1 粉矿造块的意义和作用	39
2.2 造块的基础理论	40
2.3 烧结过程	41
2.3.1 一般工艺过程	41
2.3.2 烧结过程的主要反应	42
2.3.3 烧结过程中的固结	47
2.3.4 烧结过程中的传输现象	56
2.3.5 铁矿粉自身特性及其对烧结过程的影响	61
2.3.6 烧结工艺	69
2.3.7 国内外烧结新工艺、新技术	84
2.4 球团过程	92
2.4.1 生球成型	93
2.4.2 生球干燥	97
2.4.3 球团矿的焙烧固结	99
2.4.4 球团工艺	103
2.4.5 国内外球团新工艺、新技术	107

X	
2.5	烧结矿和球团矿的质量检验 109
2.5.1	冷态物理力学性能 109
2.5.2	热态及还原条件下的物理力学性能 110
2.5.3	冶金性能 112
2.6	小结 114
	参考文献和建议阅读书目 115
	习题和思考题 116
3	煤焦化技术及高炉焦炭质量 118
3.1	焦炭的性质及对高炉冶炼的作用 118
3.2	煤成焦基本原理 120
3.3	焦化过程 121
3.3.1	炼焦配煤 122
3.3.2	结焦过程 124
3.3.3	炼焦生产 126
3.3.4	炼焦技术发展方向 129
3.4	焦炭质量与检测 132
3.4.1	焦炭的工业分析 132
3.4.2	焦炭元素分析 132
3.4.3	焦炭的粒度 133
3.4.4	焦炭的冷态强度 133
3.4.5	焦炭的热态性能 135
3.5	焦炭在高炉内的行为 138
3.5.1	焦炭在高炉内的主要反应历程 138
3.5.2	焦炭在高炉内的劣化因素 141
3.6	小结 144
	参考文献和建议阅读书目 145
	习题和思考题 145
4	高炉冶炼过程的物理化学 146
4.1	蒸发、分解与气化 146
4.1.1	蒸发 146
4.1.2	结晶水分解 146
4.1.3	碳酸盐分解 146
4.1.4	析碳反应 147
4.1.5	气化 148
4.2	还原过程 148
4.2.1	铁的氧化物及其特性 148
4.2.2	铁氧化物还原的热力学 149

4.2.3 铁氧化物气-固相还原反应的动力学	156
4.2.4 其他元素的还原	164
4.2.5 炉缸中液态渣铁间的氧化还原反应——耦合反应	174
4.3 炉渣	179
4.3.1 炉渣在高炉冶炼过程中的作用	179
4.3.2 造渣过程简述	180
4.3.3 终渣的主要理化性能	180
4.3.4 炉渣脱硫	190
4.3.5 炉渣排碱	198
4.3.6 炉渣的镁铝比控制	201
4.4 碳的气化反应	202
4.4.1 固体碳气化的一般规律	202
4.4.2 风口前碳的燃烧	203
4.4.3 燃烧带以外碳的气化	208
4.5 生铁的形成	211
4.5.1 渗碳反应	211
4.5.2 碳饱和度对铁水的影响	213
4.5.3 其他少量元素的溶入	214
4.6 小结	214
参考文献和建议阅读书目	215
习题和思考题	215
5 高炉冶炼过程的传输现象	217
5.1 高炉中的动量传输	218
5.1.1 煤气流经固体散料层的一般规律	218
5.1.2 逆流运动中散料的有效质量	222
5.1.3 散料的流态化	223
5.1.4 充液散料层的流体力学现象	224
5.1.5 高炉过程中的炉料下降	225
5.2 高炉内的热量传输	226
5.2.1 传热方程	227
5.2.2 水当量	228
5.2.3 高炉上下部热交换	229
5.2.4 高炉条件下的传热方式和给热系数	229
5.3 传输现象在高炉冶炼中的应用实例	232
5.3.1 流体力学现象在高炉冶炼中的应用	232
5.3.2 热量传输在高炉冶炼中的应用	238
5.4 小结	241
参考文献和建议阅读书目	241

习题和思考题	242
6 高炉冶炼过程能量利用	243
6.1 高炉冶炼过程能量利用概述	243
6.1.1 高炉冶炼过程的能量来源	243
6.1.2 高炉冶炼过程的能量利用指标	244
6.1.3 能量利用分析方法	247
6.2 高炉冶炼过程能量利用计算分析	247
6.2.1 计算分析内容	248
6.2.2 生产高炉的计算	248
6.2.3 设计高炉的计算	285
6.2.4 理论焦比计算	312
6.3 高炉冶炼过程能量利用图解分析	324
6.3.1 铁的直接还原度与碳消耗 (r_d -C) 图解	324
6.3.2 里斯特 (Rist) 操作线图解	327
6.3.3 理查特 (Reichardt) 区域热平衡图解分析	343
6.4 小结	345
参考文献和建议阅读书目	346
习题和思考题	346
7 高炉炼铁工艺	347
7.1 高炉炼铁生产的原则	347
7.2 高炉操作制度	350
7.2.1 装料制度	350
7.2.2 送风制度	358
7.2.3 造渣制度	359
7.2.4 热制度	360
7.2.5 炉况判断及制度调控	361
7.3 高炉低碳、高效冶炼的技术措施	365
7.3.1 精料技术	366
7.3.2 高压操作	373
7.3.3 高风温操作	376
7.3.4 喷吹补充燃料	382
7.3.5 富氧和综合鼓风操作	389
7.3.6 低硅冶炼技术	393
7.3.7 高炉长寿技术	395
7.4 小结	397

参考文献和建议阅读书目	398
习题和思考题	398
8 非高炉炼铁	400
8.1 直接还原	400
8.1.1 直接还原概况	400
8.1.2 气基直接还原法	404
8.1.3 煤基直接还原法	410
8.1.4 煤制气技术	422
8.2 熔融还原	427
8.2.1 熔融还原概况	427
8.2.2 一步法熔融还原	427
8.2.3 二步法熔融还原	434
8.3 非高炉炼铁产品的性质与应用	445
8.3.1 直接还原铁的性质	445
8.3.2 直接还原铁的使用	447
8.3.3 Corex 法液态生铁的特点	449
8.4 非高炉炼铁工艺的发展	450
8.4.1 我国非高炉炼铁技术发展现状	450
8.4.2 我国非高炉炼铁技术发展前景与展望	451
8.5 小结	451
参考文献和建议阅读书目	452
习题和思考题	452
9 炼铁工艺智能化、信息化技术	453
9.1 炼铁工艺基础自动化	453
9.1.1 高炉专用检测仪表	453
9.1.2 高炉检测与仿真技术应用	456
9.2 炼铁工艺智能控制	457
9.2.1 料场分堆智能控制	458
9.2.2 原料生产过程的智能控制	459
9.2.3 高炉冶炼过程的智能控制	466
9.2.4 非高炉炼铁过程的智能控制	473
9.3 炼铁工艺信息化	485
9.3.1 钢铁企业信息化功能框架	485
9.3.2 大数据与云计算概述	486
9.3.3 大数据与云计算在钢铁企业的应用	488

9.4 炼铁工艺智能化、信息化发展展望	491
9.5 小结	492
参考文献和建议阅读书目	493
习题和思考题	493
附录 高炉冶炼物料平衡、热平衡计算程序	495
主要符号表	532

[本章提要]

本章概括地介绍了钢铁工业发展历史、我国钢铁工业发展概况、高炉炼铁工艺过程、高炉炼铁及非高炉炼铁的工艺对比、高炉冶炼对炼铁原、燃料和耐火材料等的要求、高炉产品的性能以及高炉冶炼的主要技术经济指标等。

1.1 钢铁工业在国民经济中的地位

评判现代任何国家是否发达的主要标志是其工业化及生产自动化的水平，即工业生产在国民经济中所占的比重及工业的机械化、自动化程度。而劳动生产率是衡量工业化水平极为重要的标志之一。为达到较高的劳动生产率需要大量的机械设备。钢铁工业为制造各种机械设备提供最基本的材料，属于基础材料工业的范畴。钢铁还可以直接为人们的日常生活服务，如为运输业、建筑业及民用品提供基本材料。故在一定意义上来讲，一个国家钢铁工业的发展状况在一定程度上也反映了其国民经济发达的程度。

衡量钢铁工业的水平应考察其产量（人均年占有钢的数量）、质量、品种、经济效益及劳动生产率等各方面。纵观当今世界各国，所有发达国家都具有相当发达的钢铁工业。

钢铁工业的发展需要多方面的条件，如稳定可靠的原材料资源，包括铁矿石、煤炭及某些辅助原材料（如锰矿、石灰石及耐火材料等）；稳定的动力资源，如电力、水等。此外，由于钢铁企业生产规模大，每天原材料及产品的吞吐量，需要庞大的运输设施为其服务，一般要有铁路或水运干线经过钢铁厂。对于大型钢铁企业来说，还必须有重型机械的制造及电子工业为其服务。此外，建设钢铁企业需要的投资大，建设周期长，而回收效益慢，故雄厚的资金是发展钢铁企业的重要前提。

钢铁之所以成为各种机械装备及建筑、民用等各部门的基本材料，是因为它具备以下优越性能：

- (1) 有较高的强度及韧性。
- (2) 容易用铸、锻、切削及焊接等多种方式进行加工，以得到任何结构的工部件。
- (3) 所需资源（铁矿、煤炭等）储量丰富，可供长期大量采用，成本低廉。
- (4) 人类自进入铁器时代以来，积累了数千年生产和加工钢铁材料的丰富经验，已具有成熟的生产技术。自古至今，与其他工业相比，钢铁工业相对生产规模大、效率高、质量好和成本低。

到目前为止，还看不出有任何其他材料在可预见的将来能代替钢铁现有的地位。