

冶金反应工程学丛书

铁合金冶金工程

戴维 舒莉 著

YEJIN FANYING
GONGCHENGXUE
CONGSHU

冶金工业出版社

国家自然科学基金资助

冶金反应工程丛书

铁合金冶金工程

戴维舒莉著

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书从冶金反应工程学的角度,侧重论述了铁合金生产工艺及相关的基础理论。作者在书中重点讨论了物料造块、焙烧、烧结、反应过程催化、固态和熔态还原、脱磷和炉外精炼等单元操作中的重要传输现象和过程的反应动力学特征。电炉是本书重点介绍的铁合金提炼设备,书中详细讨论了电炉参数和冶炼过程的关系,同时对自焙电极、真空炉、摇包和回转窑的操作和控制做了系统解析。

图书在版编目(CIP)数据

铁合金冶金工程/戴维,舒莉著. —北京:冶金工业出版社, 1999.5

ISBN 7-5024-2318-4

I. 铁… II. ①戴… ②舒… III. 铁合金(炼钢原料) - 熔炼 IV. TF6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 06544 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 赵培德 杨传福 美术编辑 王耀忠 责任校对 侯 珏 责任印制 牛晓波

北京源海印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1999 年 5 月第 1 版, 1999 年 5 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 12 印张; 307 千字; 365 页; 1-2000 册

34.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64013877

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

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

序 言

冶金学是研究人类从自然资源中提取有用金属和制造材料的科学。从人类最早使用金属到今天，已有数千年历史。在近一百多年的现代工业生产发展中，冶金工业作为一门基础材料工业，发挥了重大作用。本世纪上半叶以来，许多冶金学家应用化学热力学知识，对冶金过程中气体-熔渣-金属间的反应平衡和熔体的物理化学性质进行了大量的测定和研究，这些研究成果促进了现代冶金工艺的发展。冶金学也逐步完善为一门主要以热力学为理论基础的、独立的专业学科。

近几十年来，冶金学知识体系和结构，随着冶金技术的发展和相关学科的进步，也在发生变化。计算机技术的发展和广泛应用，使冶金学理论和工艺的研究方法、冶金生产及其控制技术发生了重大变革。由传统冶金学和传统冶金工艺学所构成的知识体系和结构，已不能完全满足现代冶金工艺发展和理论研究的需要。因此，诸如，对微观和宏观过程的认识、单元过程或现象的定量解析、反应过程的数学物理模拟、反应和生产速率的预测、反应器的仿真研究和设计、人工智能技术的应用以及反应器运行和整体生产过程的控制等等，均逐渐成为现代冶金学必须包括的内容。近二三十年中，许多冶金学学者努力学习相关学科，如现代化学

工程学、计算流体力学 (CFD)、传输理论等方面的知识, 积极利用数学解析方法和计算技术, 来定量分析和解决冶金学理论和工艺方面的问题, 并获得重要进展。日本学者鞭岩、濑川清等根据上述冶金学内容和研究方法的新进展, 于 70 年代提出冶金反应工程学概念, 并分别出版了《冶金反应工程学》和《铁冶金反应工程学》等专著。

我国在冶金学上述新兴内容的研究方面, 起步于 70 年代末。近二十多年, 国内许多冶金学者根据现代冶金学发展的趋势, 吸收国外先进经验, 注意促进多学科知识的交叉, 逐步将传输理论、反应工程学的方法以及计算技术引入冶金学的理论研究和工艺开发中, 并取得较大的进展。为及时总结冶金学近几十年的发展成果, 增进国内外学术交流, 改善专业教学、基础研究和工艺发展的条件, 中国金属学会冶金反应工程学学术委员会决定组织我国冶金领域内的专家学者, 并争取国外学者的参与或合作, 编辑出版一套《冶金反应工程学丛书》。

本套丛书可大致划分为介绍冶金反应工程学理论的著作 (一部分为高校教材或教学参考书) 和介绍冶金反应工程学知识应用成果和经验的专著两类。第一批著作于 1996 年开始出版发行。欢迎国内外冶金学者参加《冶金反应工程学丛书》书目的著述。

《冶金反应工程学丛书》的编委会, 由下列学者组成 (按姓氏笔画排列, 带 * 号者为执行小组成员):

干 勇 (冶金部钢铁研究总院)

* 曲 英 (北京大学)

任崇信 (冶金工业出版社)

仲增墉 (中国金属学会)

杨天钧 (北京大学)

张丙怀 (重庆大学)

李尚诣 (冶金工业部科技司)

贺友多 (包头钢铁学院)

柯家骏 (中国科学院化工冶金研究所)

徐德龙 (西安建筑科技大学)

梅 焮 (中南工业大学)

* 萧泽强 (东北大学)

赫冀成 (东北大学)

* 蔡志鹏 (中国科学院化工冶金研究所)

戴永年 (昆明理工大学)

魏季和 (上海大学)

由于《冶金反应工程学丛书》内容涉及面较宽,编写工作量大,且系初次组织,经验不足,错误和不足之处在所难免,请读者批评指正。

《冶金反应工程学丛书》编委会

1996年5月

前言

冶金反应工程学是近几十年发展起来的学科。它是用数学、物理学、化学、流体力学等自然科学基础知识研究冶金过程的单元操作、反应动力学与传输现象的学科。通过对反应过程和反应器之间关系的研究，人们可以建立反应和反应器模型。这对完善和改进反应器的设计，优化操作条件和实现过程控制有着重要意义。

铁合金冶金工程是冶金工程学的一个重要分支，属提取冶金学范畴，它所涉及的反应器及单元操作有其特殊性。本书试图从冶金反应工程学的角度来认识铁合金生产过程的共同性和普遍规律以及特殊性和特殊规律。铁合金产品品种繁多，制造方法差异甚大。90%以上的铁合金产品是在电炉中冶炼的，电炉设备和炉料的电学特性对铁合金元素的提取过程有着重大影响。本书重点讨论了电冶金过程中电炉参数、特性和冶炼过程的关系，同时对自焙电极、摇包、真空炉、回转窑等单元反应器的参数和特性进行了解析。本书还讨论了粉矿成球和压块、焙烧和烧结、固态还原和熔态还原、炉外精炼等单元操作的反应动力学和传输现象，从而为铁合金工艺技术的开发和反应器的设计提供理论依据，优化铁合金生产过程。书中介绍了近年来发展的一些铁合金冶金过程和反应器的化学量模型、动力学模型、反应器的物理模型，这些

模型有助于加深人们对冶金过程和反应器的理解和认识。

本书还对还原过程降磷、冶金过程催化现象、铁合金还原剂、矿石和炉渣的冶金特性、铁合金炉衬侵蚀机理和防护以及电极的特性等专题进行了比较详细的论述。

鉴于现已出版的有关铁合金的专著已经对铁合金冶炼过程的冶金热力学和生产工艺方法分品种进行了论述，本书未对这方面的内容做重复探讨。为了反映铁合金生产工艺的最新内容，本书对预还原和直接还原技术、炉外精炼、真空和氮化工艺、空心电极、两段炉体等技术发展做了介绍。

当代铁合金生产的技术进步是众多冶金工作者共同努力的结晶。作者希望本书能够作为知识海洋的一滴水来体现这一进步。由于作者的知识和经验所限，本书的内容及其深度可能与读者的期望尚有一定距离，对所论述的专题人们也还存在不同的认识，欢迎关心铁合金工程技术的读者批评指正。

《冶金反应工程学丛书》编委会负责人萧泽强教授在1994年提出将铁合金冶金工程学列入该丛书的建议得到了当时任中国铁合金工业协会会长、吉林铁合金厂厂长的徐世彬先生的赞同。在著书和出版过程中萧泽强教授、曲英教授、蔡志鹏教授曾给予极大的支持和鼓励，并对本书的内容提出了很好的建议。承蒙徐世彬、张惠棠审阅了全书，霍乃礼审阅了第1章，在此一并表示感谢。

戴维 舒莉

1997年10月15日于吉林铁合金厂

目 录

1 铁合金生产的电冶金理论基础	1
1.1 铁合金电炉概论	1
1.1.1 铁合金电炉分类	1
1.1.2 矿热炉设备组成概述	5
1.2 矿热炉中的电弧现象	8
1.2.1 电弧生成机理	8
1.2.2 电弧性质	10
1.2.3 电弧传热过程	13
1.2.4 直流电弧	13
1.2.5 等离子弧	14
1.3 矿热炉电路分析	16
1.3.1 炉膛内部导电方式	16
1.3.2 炉内电流回路解析	17
1.3.3 电炉操作电阻	18
1.3.4 电炉电抗和谐波	21
1.3.5 电炉电流的交互作用	23
1.4 矿热炉的电气特性	26
1.4.1 电压圆图和电流圆图	26
1.4.2 特定电压级下电炉特性曲线	30

1.4.3	特性曲线组和恒电阻曲线	32
1.5	三相电炉各相功率不平衡现象	33
1.5.1	各相电极功率不平衡对冶炼操作的影响	33
1.5.2	影响电炉功率平衡的因素	35
1.5.3	电极功率不平衡的监测和预防	39
1.6	电炉的经济运行	40
1.6.1	变压器的经济运行	40
1.6.2	电炉运行条件的改进	42
1.6.3	铁合金电炉的经济负荷运行	42
	参考文献	45
2	矿热炉的参数和模型	48
2.1	电炉的熔炼特性	48
2.1.1	反应区模型	48
2.1.2	电炉功率分布模型	50
2.1.3	电极插入深度	52
2.1.4	炉膛温度和炉膛功率密度	54
2.1.5	电炉的热稳定性	56
2.2	电极的载流能力	57
2.3	矿热炉参数的数学关系	60
2.3.1	安德列公式和凯里法	61
2.3.2	珀森公式	63
2.3.3	威斯特里方法	64
2.3.4	几种方法的比较	65
2.3.5	炉膛内部各部位的电压梯度	66
2.3.6	相似方法	67
2.4	埋弧电炉的数学模型	71
2.4.1	莫克拉姆模型	71
2.4.2	电导池常数模型	73
2.4.3	海斯模型	75
2.4.4	有渣法电炉炉料内电流分布模型	76
	参考文献	78
3	原料的冶金性能和预处理工艺	80

3.1	碳质还原剂的冶金性能	80
3.1.1	碳质还原剂的石墨化性能	81
3.1.2	碳质还原剂的导电性	82
3.1.3	碳质还原剂的反应性	83
3.1.4	铁合金生产专用还原剂	86
3.2	矿石和炉料的冶金性能	87
3.2.1	炉料的导电性	87
3.2.2	炉料的透气性	89
3.2.3	铬矿石的矿物结构和冶金性能的评价	92
3.2.4	锰矿的冶金特性	97
3.2.5	硅石的热稳定性	100
3.3	粉矿成球工艺	101
3.3.1	冷压块和碳酸化球团工艺	102
3.3.2	蒸汽养生球团	103
3.3.3	热压块工艺	104
3.3.4	成型机理和常用粘结剂	105
3.3.5	球团的性能和测试方法	108
3.3.6	影响球团性能的主要因素	111
3.3.7	使用球团矿对冶炼工艺的影响	112
3.4	焙烧工艺过程	113
3.4.1	焙烧过程的单元操作	114
3.4.2	焙烧过程的传质和传热	114
3.5	烧结工艺	117
3.5.1	矿石烧结机理	118
3.5.2	锰矿烧结	120
3.5.3	铬矿烧结	121
3.5.4	竖炉烧结球团工艺	122
3.6	回转窑的工程原理	123
3.6.1	回转窑内物料的停留和运动	124
3.6.2	回转窑的工作特性	124
3.6.3	回转窑的基本操作	127
3.7	固态还原工艺	128

3.7.1	铬矿球团预还原工艺和机理	128
3.7.2	炉膛旋转炉 (RHF) 直接还原工艺	133
3.7.3	铬矿直接还原工艺	134
3.7.4	镍铁直接还原工艺	135
参考文献		136
4	碳热还原过程	139
4.1	硅和硅铁的冶金过程及其模型	139
4.1.1	Si-O-C 三元系	139
4.1.2	无渣法电炉炉膛结构	141
4.1.3	硅还原过程的传质和传热	142
4.1.4	硅还原过程动力学	144
4.1.5	硅的生产过程的化学量模型	146
4.1.6	硅和硅铁电炉的动态模型	147
4.1.7	硅铁电炉两段炉体技术	150
4.2	固态和熔态还原过程	151
4.2.1	固态还原的基本原理	151
4.2.2	铬矿的固态还原	153
4.2.3	铁和硅的熔态还原动力学	159
4.2.4	锰还原的动力学	160
4.3	埋弧电炉有渣法冶炼机理	163
4.3.1	有渣法电炉的炉膛结构	164
4.3.2	焦炭层	165
4.3.3	炉渣性质对埋弧电炉运行的影响	169
4.3.4	合金元素和杂质元素含量的控制	173
4.3.5	一步法硅铬合金冶炼	175
4.4	硅钙合金熔炼过程	177
4.4.1	Si-Ca-C-O 四元系的相关系	178
4.4.2	CaC ₂ 生成机理	181
4.4.3	硅钙合金生成机理	182
4.5	冶金过程的催化作用	184
4.5.1	冶金反应的催化现象	185
4.5.2	还原过程的催化反应机制	191

4.6	碳热还原工艺新技术	194
4.6.1	空心电极技术	194
4.6.2	等离子炉和直流电炉	196
4.6.3	熔态还原工艺	201
	参考文献	202
5	铁合金的精炼技术	207
5.1	电硅热法精炼技术的进步	207
5.1.1	中低碳锰铁精炼和纯净锰铁生产	207
5.1.2	热兑法(波伦法)生产微碳铬铁	211
5.2	铁合金的氧气吹炼	217
5.2.1	氧气吹炼基本原理	217
5.2.2	氧气吹炼工艺参数	220
5.2.3	中低碳锰铁的吹炼工艺	223
5.3	铁合金的炉外精炼	225
5.3.1	渣洗精炼法	225
5.3.2	氧化精炼技术	226
5.3.3	炉外降碳	230
5.4	铁合金降磷	232
5.4.1	氧化脱磷	232
5.4.2	固相脱磷	234
5.4.3	还原脱磷	234
5.4.4	影响降磷率的因素	237
5.5	摇包反应器解析	241
5.5.1	摇包内液体的运动状态	242
5.5.2	摇包运动对传质作用的影响	247
5.5.3	摇包参数的确定	247
	参考文献	249
6	真空冶金和氮化冶金	252
6.1	真空还原过程	252
6.1.1	氧化铬的真空还原机理	252
6.1.2	铬的真空冶炼	254
6.1.3	真空冶炼的供热原理	257

6.1.4	真空系统的设计	259
6.2	真空精炼	262
6.2.1	铁合金中的气体	262
6.2.2	液态铁水的真空精炼	265
6.2.3	固态铁合金的真空精炼	266
6.3	铁合金的氮化	269
6.3.1	氮化物的稳定性和渗氮工艺	269
6.3.2	氮化过程动力学	270
6.3.3	铬铁的氮化	273
6.3.4	硅和硅铁的氮化	276
6.3.5	锰铁和其它铁合金的氮化	276
	参考文献	277
7	电极	279
7.1	碳素材料的基本性能	279
7.1.1	密度	279
7.1.2	强度	280
7.1.3	碳素材料的质量热容、热导率和线膨胀系数	281
7.1.4	碳素材料的弹性模量	281
7.1.5	抗热震性	282
7.1.6	电阻率	283
7.2	电极的分类	283
7.2.1	石墨电极和碳电极	283
7.2.2	自焙电极	285
7.3	自焙电极的烧结	295
7.3.1	自焙电极的烧结过程	295
7.3.2	自焙电极的烧结热量	296
7.3.3	自焙电极烧结特性	296
7.4	自焙电极内部的温度分布, 应力分布和数学模型	299
7.4.1	自焙电极内部的温度分布	299
7.4.2	自焙电极内部的应力分布	300
7.4.3	自焙电极的数学模型	300

7.5	电极的维护使用	305
7.5.1	电极消耗	305
7.5.2	降低石墨电极消耗的措施	307
7.5.3	自焙电极的接长和下放	308
7.5.4	电极事故及处理	311
7.6	埋弧电炉的开炉	313
7.6.1	新开炉电极焙烧	313
7.6.2	开炉过程的加料	316
7.6.3	出铁时间的确定	318
7.6.4	合金成分的控制	319
	参考文献	320
8	铁合金炉炉衬及耐火材料	323
8.1	常用耐火材料的性质	324
8.1.1	耐火材料的分类及结构	324
8.1.2	常用耐火材料的技术要求	328
8.1.3	常用耐火材料的主要性质	331
8.2	铁合金生产中耐火材料的侵蚀机理	336
8.2.1	镁质炉衬侵蚀机理	338
8.2.2	碳质炉衬的损毁机理	342
8.3	铁合金电炉炉衬设计	343
8.3.1	炉衬设计	344
8.3.2	炉衬的热传递	345
8.3.3	炉衬的冷却技术	247
8.4	炉衬的砌筑和维护	351
8.4.1	炉衬砌筑	351
8.4.2	炉衬的使用和维护	352
8.4.3	金属炉衬的形成及维护	354
8.4.4	炉衬损毁的监测	356
	参考文献	357
	术语索引	359
	中外文名称对照	365



铁合金生产的电冶金理论基础

1.1 铁合金电炉概论

占铁合金总产量 90% 以上的硅铁、铬铁、锰铁等铁合金主导产品及钨铁、钒铁等特殊铁合金产品都是用电炉冶炼的。电炉冶炼具有以下特点：

(1) 电炉使用电这种最清洁的能源。其他能源如煤、焦炭、原油、天然气等都不可避免地将伴生的杂质元素带入冶金过程。只有采用电炉才能生产最清洁的合金。

(2) 电是唯一能获得任意高温条件的能源。

(3) 电炉中容易实现还原、精炼、氮化等各种冶金反应要求的氧分压、氮分压等热力学条件。

1.1.1 铁合金电炉分类

电炉通常是按其加热方式来分类的。在实际应用中也常按照其结构、用途、电源特点、加热元件等特点来命名。下面将分别介绍几种电炉。

矿热炉是从矿石中提取有用元素的电炉。矿热炉的热能来自于电弧、炉料和炉渣的电阻热以及化学反应放出的热量。按照其结构形式矿热炉可以分为敞口炉、矮烟罩电炉、封闭炉和半封闭炉等。按照冶炼工艺方法矿热炉又可分成埋弧电炉和精炼电炉。

电阻炉是以电阻热直接加热或间接加热炉料的电炉。如冶炼真空铬铁的电阻炉以石墨棒为加热元件，热能通过辐射作用传递给炉料。

感应炉是利用感应电流在金属炉料中产生的电阻热来加热熔化金属的。氮化铁合金和许多复合合金是在感应炉中熔炼的。

直流电炉、等离子电炉、低频交流电炉是近 20 年发展起来的新型电炉，具有功率密度高、电极消耗少、冶炼电耗低、功率因数高等优点。使用中空电极加料的直流等离子电炉可以利用廉价的粉矿来生产铁合金，使元素回收率得到提高。

1.1.1.1 埋弧电炉

埋弧电炉是电弧炉的一种。其特点是在正常的熔炼过程中电弧始终埋在炉料之中。埋弧电炉的构造见图 1-1。表 1-1 列出了国内外一些埋弧电炉的主要参数^[1~9]。

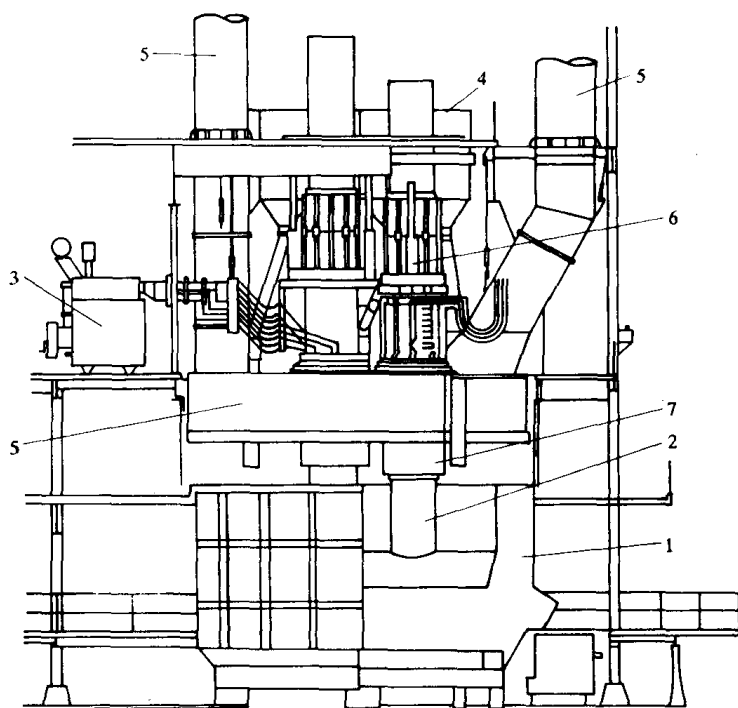


图 1-1 矮烟罩埋弧电炉构造示意图

- 1—炉体；2—电极；3—变压器；4—加料系统；5—烟罩和排管路；
6—电极压放装置；7—电极把持器