



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

# 钢铁冶金原理

(第4版)

黄希祜 编



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

## 内 容 提 要

本书是高等学校冶金工程专业开设的冶金热力学及动力学或冶金原理等技术基础课程的教材。全书共8章：冶金热力学基础，冶金动力学基础，金属熔体，冶金炉渣，化合物的形成—分解及碳、氢的燃烧反应，氧化物还原熔炼反应，氧化熔炼反应，铁水及钢液的炉外处理反应；附录有复杂公式的导出、化合物的标准生成吉布斯自由能表、习题答案等。全书注重阐述钢铁冶金的基础理论，并力求将这些基础理论应用于钢铁冶金过程反应的分析。

本书除作为钢铁冶金专业（本科生及研究生）的教材外，亦可供冶金工程技术及科研人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

钢铁冶金原理/黄希祜编. —4版. —北京：冶金工业出版社，2013.1

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5821-8

I. ①钢… II. ①黄… 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(2012)第281814号

出版人 谭学余

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 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 王 优 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 王贺兰 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5821-8

冶金工业出版社出版发行；各地新华书店经销；北京百善印刷厂印刷

1981年12月第1版，1990年11月第2版，2002年1月第3版，

2013年1月第4版，2013年1月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16；41.75印张；1011千字；651页

**82.00元**

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

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(100010) 电话：(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题，本社发行部负责退换)

# 第 1 版前言

本书是根据冶金部教材会议制订的钢铁冶金专业教学计划和《钢铁冶金原理》课程教学大纲编写的，主要讲述钢铁冶金过程物理化学的理论基础及主要反应的物理化学原理，为学习钢铁冶金工程学科奠定必要的理论基础。本书除供钢铁冶金专业教学使用之外，也可供冶金工作者学习冶金过程理论之用。

本书第三章部分内容初稿由昆明工学院李振家编写，其余各章均由重庆大学黄希祜编写。

本书初稿完成后由上海工业大学、中南矿冶学院、东北工学院、包头钢铁学院、北京钢铁学院、合肥工业大学、昆明工学院、武汉钢铁学院、鞍山钢铁学院及重庆大学等院校部分教师共同审定，在审定中提出了许多宝贵意见，特此表示衷心的感谢。编者根据这些意见作了修改。本书完稿后曾在重庆大学冶金系钢铁冶金专业两个年级试用过。参加试用的还有西安冶金建筑学院、内蒙古工学院、南京工学院、太原工学院、北京冶金机电学院等单位，以及重庆大学炼铁、炼钢和冶金原理教研室的部分教师。他们对本书的内容再次提出了修改意见，使本书的质量又得到进一步提高。但是由于编者水平有限，实践经验不足，加之成稿时间仓促，书中还会有不少缺点，甚至错误的地方，殷切希望读者提出批评与指正。

本书计量的单位未采用国际单位制，仍沿用公制。书末附有公制转换为国际单位制表，可供应用。

编 者

1980年6月

## 第 2 版前言

本书系 1981 年 12 月初版《钢铁冶金原理》的修订本。近年来，我国已将炼铁、炼钢及电冶三个专业合并为一个范围较广、适应性较强的钢铁冶金专业，有必要按照新的教学要求编写更适用的教材，因此对原书进行了大幅度的修订。

在修订本书过程中，调整了原书的章节，精选了各章的内容，舍去一些次要内容，加强了对基础内容的阐述，全面改写了本书，使修订后的教材更具系统性、完整性和先进性。并且便于读者自学。

本书包括一些加宽、加深的内容及例题，有关学校可根据本校教学要求及学时数决定取舍。

本书修订稿完成后在重庆大学召开了审稿会。东北工学院梁连科、武汉钢铁学院王弘毅、华东冶金学院陈二保、成都无缝钢管厂职工大学彭哲清、重庆大学徐宗亮、王家荫等同志参加了审稿会，并提出了很多宝贵的修改意见。重庆大学冶金原理教研室魏庆成同志审阅了全部书稿。重庆大学冶金系领导对本书的修订给予大力的支持，北京科技大学魏寿昆教授对本书的修订予以鼓励和关怀，在此一并表示衷心的感谢。

由于本次修订时间紧迫，对于本书存在的缺点及不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

1989 年 9 月

## 第3版前言

本书第1版于1981年出版，第2版于1990年出版，近20年来一直为国内大多数冶金院校所采用。第2版于1997年荣获国家级教学成果一等奖。

根据国家级重点教材的要求，本着“加强基础，突出重点，拓宽专业”的原则，本书在第2版的基础上，作了增删和改写。在体系方面，将“冶金动力学基础”移前，与原来的“冶金热力学基础”、“金属熔体”及“冶金炉渣”组成钢铁冶金物理化学基础篇；后四章则是利用这些基础理论对钢铁冶金过程中的主要反应进行热力学及动力学的分析，为钢铁冶金工程及相关课程奠定必要的理论基础。这样可使全书的体系更加合理，而且对于冶金过程反应的分析更全面、系统些。另外，为了进一步适当拓宽专业面的理论基础，增写了一些有关的内容或公认为成熟的新理论。为便于读者自学，在许多地方比上一版本更注意了文字表达，使内容更加严谨、易懂。书中编入的较多例题是为使读者对所讲理论和公式获得更深入的理解与应用，是作为学生课外自学之用的，不宜在课堂上讲授。某些较深而复杂公式的推导作为附录处理，可供读者进一步参考。此次修订后，篇幅有所增加，各院校可根据本校教学要求及学时数，决定其内容的取舍。

本书初稿完成后，采用邀请专家单独审稿方式。北京科技大学曲英教授、东北大学车荫昌教授和重庆大学魏庆成教授为本书的主要审稿人，参加审稿工作的还有重庆大学的谢兵、白晨光、唐萍、董凌燕等有关课程的授课教师。他们提出了宝贵的修改意见。重庆大学及学校教务处、材料科学与工程学院的领导对本书的修订工作给予了大力的关注与支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于受编者水平所限，本教材存在缺点和不足之处，恳请同行专家及广大读者批评、指正。

黄希祐

2000年7月于重庆大学

## 第4版前言

《钢铁冶金原理》自1980年开始编写1981年初版之后，又先后修订过3次，经历了30年之久，一直被国内大多数冶金院校用作教材，也被较多出版的相关的教材、专著及科技杂志论文列入其参考文献中，受到读者的青睐。本书第2版荣获冶金工业部第三届优秀教材一等奖及1997年国家级教学成果一等奖；第3版曾被列入普通高等教育“九五”国家级重点教材，并于2006年获中国冶金教育学会冶金优秀教材一等奖。这些殊荣都鞭策着作者有责任作第4次修订，以满足现在教学的需要。

在本次修订中，全书的章节框架没有做大的改动，一方面，是对各章节的某些内容进行了适当增删与革新（约300处）；另一方面，适当扩大、加深了本学科的相关基本知识。例如，等温方程式的应用与举例，二元相图的分析与热力学函数，钢液凝固过程的反应与动力学，固体料溶解的动力学，三元系相图的类型（补充），熔渣的离子溶液结构模型（补充），硫化物、氯化物等的形成-分解反应，氧气炼钢过程的反应，铁水预处理及钢液炉外处理反应（补充），并增删了各章的例题及习题，增写了各章的复习思考题。这是为了扩大及提高本学科基础理论的需要，特别有益于研究生及工程技术人员加深基本功之用。

本次修订后，篇幅有较大的增加，各校选作教材时仍可以其中的基本内容为主，按教学时数决定取舍，一些次要、较深内容可作为学生自由阅读、提高之用，该部分用符号“\*”标示。

中国科学院魏寿昆院士及中国工程院殷瑞钰院士对本书的再次修订给予了指导和关怀，东北大学车荫昌教授在修订中给予了襄助。在此，一并表示衷心的感谢！

编者已步入九旬之年，深感精力不足，为水平所限，书中难免有漏误及不当之处，敬请指正，是感！

黄希祐

2012年冬 于重庆大学东林村

# 目 录

绪言 .....	1
<b>1 冶金热力学基础 .....</b>	<b>4</b>
1.1 化学反应的标准吉布斯自由能变化及平衡常数 .....	4
1.1.1 理想气体的吉布斯自由能变化 .....	4
1.1.2 化学反应的等温方程式及等压方程式 .....	5
1.1.3 标准吉布斯自由能( $\Delta_r G_m^\ominus$ )的温度关系式 .....	7
1.1.4 冶金反应的 $\Delta_r G_m^\ominus$ 的求法 .....	11
1.2 溶液的热力学性质——活度及活度系数 .....	18
1.2.1 溶液组分浓度的单位及其相互转换关系 .....	19
1.2.2 溶液的基本物理化学定律 .....	20
1.2.3 活度及活度系数 .....	22
1.2.4 活度标准态的选择及转换 .....	28
1.3 溶液的热力学关系式 .....	30
1.3.1 偏摩尔量及化学势 .....	31
1.3.2 理想溶液 .....	34
1.3.3 稀溶液 .....	35
1.3.4 实际溶液 .....	36
1.3.5 正规溶液 .....	37
1.3.6 总结 .....	40
1.4 活度的测定及计算方法 .....	41
1.4.1 蒸气压法 .....	41
1.4.2 分配定律法 .....	41
1.4.3 化学平衡法 .....	43
1.4.4 电动势测定法 .....	46
1.4.5 用 G-D 方程计算组分的活度法 .....	48
1.4.6 用偏摩尔热力学函数计算活度法 .....	58
1.5 标准溶解吉布斯自由能及溶液中反应的 $\Delta_r G_m^\ominus$ 及 $\Delta_r G_m$ 的计算 .....	59
1.5.1 标准溶解吉布斯自由能 .....	59
1.5.2 铁液中元素的标准溶解吉布斯自由能的计算法 .....	60
1.5.3 有溶液参加的反应 $\Delta_r G_m^\ominus$ 及 $\Delta_r G_m$ 的计算 .....	64
1.6 化学反应等温方程式的总结及应用举例 .....	66
1.6.1 $\Delta_r G_m^\ominus$ .....	66

1.6.2	$\Delta_r G_m^\ominus$ .....	67
1.6.3	$\Delta_r G_m^\ominus = \Delta_r H_m^\ominus - T\Delta S_m^\ominus$ .....	67
1.6.4	促使反应正向进行( $\Delta_r G_m^\ominus < 0$ )的手段 .....	68
1.6.5	等温方程式的应用举例 .....	69
1.7	二元系相图的分析与热力学函数 .....	73
1.7.1	二元系相图的识别 .....	74
1.7.2	二元系溶液的摩尔吉布斯自由能-组成图 .....	77
1.7.3*	由热力学方程绘制二元系相图 .....	81
1.7.4	由相图计算热力学性质 .....	87
1.7.5*	由二元系相图计算及绘制三元系相图 .....	93
	习题 .....	96
	复习思考题 .....	100
<b>2</b>	<b>冶金动力学基础</b> .....	<b>102</b>
2.1	化学反应的速率 .....	103
2.1.1	化学反应的速率式 .....	103
2.1.2	反应级数的确定及反应速率常数式 .....	105
2.1.3	可逆反应的速率式 .....	108
2.1.4	多相化学反应的速率式 .....	109
2.2	分子扩散及对流传质 .....	110
2.2.1	分子扩散 .....	110
2.2.2	对流扩散 .....	117
2.2.3	结论 .....	129
2.3	吸附化学反应的速率 .....	130
2.3.1	朗格缪尔吸附等温式 .....	130
2.3.2	化学反应成为限制环节的速率式 .....	131
2.3.3	吸附成为限制环节的速率式 .....	132
2.4	反应过程动力学方程的建立 .....	132
2.4.1	反应过程动力学方程建立的原则 .....	132
2.4.2	液-液相反应的动力学模型——双膜理论 .....	135
2.4.3	气-固相间反应的动力学模型 .....	137
2.4.4	反应过程速率的影响因素 .....	142
2.4.5	速率限制环节的确定法 .....	144
2.5	新相形成的动力学 .....	148
2.5.1	均相形核 .....	148
2.5.2	异相形核 .....	150
2.5.3	新相核的长大及排出 .....	152
2.5.4	钢液的结晶动力学 .....	155
2.6	固体料溶解的动力学 .....	157



2.6.1	固体物在熔体中溶解的动力学方程	157
2.6.2	石灰在熔渣中溶解的动力学	159
2.6.3*	废钢块的溶解动力学	159
2.6.4*	熔渣对耐火材料炉衬的侵蚀	162
	习题	163
	复习思考题	165
<b>3</b>	<b>金属熔体</b>	<b>167</b>
3.1	熔铁及其合金的结构	167
3.1.1	金属晶体的结构	167
3.1.2	金属熔体的结构	168
3.1.3	金属熔体的结构模型	170
3.1.4*	液体金属结构敏感性质计算的方程	172
3.2	铁液中组分活度的相互作用系数	174
3.2.1	相互作用系数	174
3.2.2	相互作用系数的特性及其转换关系	175
3.2.3	相互作用系数的测定法	176
3.2.4	相互作用系数的温度关系及二级相互作用系数	182
3.3	铁液中元素的溶解及存在形式	184
3.4	熔铁及其合金的物理性质	194
3.4.1	熔点	194
3.4.2	密度	195
3.4.3	黏度	196
3.4.4	表面张力	199
3.4.5	扩散	205
3.4.6*	电阻率	206
3.4.7*	热导率	206
	习题	206
	复习思考题	208
<b>4</b>	<b>冶金炉渣</b>	<b>210</b>
4.1	钢铁冶金的主要二元渣系相图	212
4.1.1	CaO - SiO <sub>2</sub> 系相图	212
4.1.2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SiO <sub>2</sub> 系相图	214
4.1.3	CaO - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 系相图	215
4.1.4	FeO - SiO <sub>2</sub> 系相图	215
4.1.5	CaO - FeO 系相图	216
4.1.6	CaO - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 系相图	216
4.1.7*	其他几个二元渣系相图	216

4.2 三元系相图的基本知识及基本类型 .....	217
4.2.1 三元系相图的基本知识 .....	217
4.2.2 三元系相图的基本类型 .....	223
4.2.3 三元系相图中相界线和无变量点的确定法(总结) .....	232
4.3 三元渣系的相图 .....	233
4.3.1 实际三元系相图的分析方法 .....	233
4.3.2 $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 渣系相图 .....	234
4.3.3 $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{FeO}$ 渣系相图 .....	239
4.3.4* $\text{Cu} - \text{Fe} - \text{S}$ 系相图 .....	243
4.4 熔渣的结构理论 .....	244
4.4.1 分子结构假说 .....	245
4.4.2 离子结构理论 .....	248
4.5 金属液与熔渣的电化学反应原理 .....	256
4.5.1 电化学的离子反应式 .....	256
4.5.2* 电化学反应的热力学方程 .....	258
4.5.3 电化学反应的动力学方程 .....	259
4.6 熔渣的离子溶液结构模型 .....	261
4.6.1 完全离子溶液模型 .....	261
4.6.2 正规离子溶液模型 .....	265
4.6.3 离子聚合反应模型——马松模型 .....	268
4.6.4* 作为凝聚电子相的熔渣组分活度模型 .....	270
4.6.5 离子反应平衡商模型 .....	273
4.6.6 准化学平衡模型及修正准化学平衡模型 .....	278
4.6.7* 离子-分子共存理论模型 .....	283
4.6.8* 林和佩尔顿(Lin and Pelton)模型 .....	285
4.6.9 总结 .....	288
4.7 熔渣的活度曲线图 .....	288
4.7.1 二元硅酸盐渣系组分的活度 .....	289
4.7.2 $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 渣系组分的活度 .....	289
4.7.3 $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{FeO}$ 渣系组分的活度 .....	291
4.7.4 含 $\text{MnO}$ 渣系 $\text{MnO}$ 的活度 .....	294
4.8 熔渣的化学性质 .....	295
4.8.1 酸-碱性 .....	295
4.8.2 氧化-还原性 .....	300
4.8.3 熔渣吸收有害物质的能力(渣容量) .....	302
4.9 熔渣的物理性质 .....	314
4.9.1 熔点 .....	314
4.9.2 密度 .....	315
4.9.3 黏度 .....	316

4.9.4 电导率(比电导) .....	321
4.9.5 表面性质 .....	323
4.9.6 扩散 .....	332
4.9.7* 熔渣的比热容和导热性 .....	332
习题 .....	333
复习思考题 .....	336
<b>5 化合物的形成 - 分解及碳、氢的燃烧反应 .....</b>	<b>338</b>
5.1 化合物形成 - 分解反应的热力学原理 .....	338
5.1.1 分解压及其热力学方程 .....	338
5.1.2 分解反应的热力学参数状态图 .....	339
5.1.3 分解压的影响因素 .....	341
5.2 碳酸盐的分解反应 .....	344
5.2.1 碳酸盐分解的热力学 .....	344
5.2.2 碳酸盐分解的机理及动力学 .....	346
5.3 氧化物的形成 - 分解反应 .....	349
5.3.1 氧势: $\pi_{\text{O}} = RT \ln p_{\text{O}_2}$ .....	349
5.3.2 氧势图 .....	353
5.3.3 氧势图的应用 .....	354
5.3.4 氧化物形成 - 分解的热力学原理 .....	359
5.3.5 氧化铁分解的优势区图 .....	362
5.3.6 Fe - O 状态图 .....	363
5.4 金属(铁)氧化的动力学 .....	365
5.4.1 晶体结构的缺陷 .....	366
5.4.2 金属氧化过程的组成环节及电化学性质 .....	369
5.4.3 氧化物膜(层)的结构及形成 .....	370
5.4.4 金属氧化的速率 .....	373
5.5 硫化物的形成 - 分解反应 .....	375
5.5.1 硫化物的硫势与硫化物、硫酸盐的形成 .....	375
5.5.2* 硫化物氧化焙烧的热力学(平衡图) .....	378
5.5.3* 硫化物氧化焙烧的动力学 .....	380
5.5.4* 造钽熔炼及吹炼 .....	380
5.6 氯化物的形成 - 分解反应 .....	381
5.6.1 氯化物的氯势及氯势图 .....	381
5.6.2* 氯化焙烧的热力学 .....	382
5.6.3 硫酸渣的氯化焙烧 .....	385
5.7* 化学迁移反应 .....	385
5.7.1 化学迁移反应及其热力学分析 .....	385
5.7.2 化学迁移反应的类型 .....	386

5.8 可燃气体的燃烧反应 .....	388
5.8.1 可燃气体物和氧反应的热力学 .....	389
5.8.2 $H_2$ 和 $CO$ 燃烧反应的机理 .....	393
5.8.3* 超高温气体物质的结构 .....	394
5.9 固体碳的燃烧反应 .....	397
5.9.1 固体碳的性质及结构 .....	397
5.9.2 固体碳燃烧反应的热力学 .....	397
5.9.3 固体碳燃烧的机理及动力学 .....	400
5.10 燃烧反应体系气相平衡成分的计算 .....	407
习题 .....	410
复习思考题 .....	412
<b>6 氧化物还原熔炼反应 .....</b>	<b>413</b>
6.1 氧化物还原的热力学条件 .....	413
6.2 氧化物的间接还原反应 .....	415
6.2.1 $CO$ 及 $H_2$ 还原氧化物的热力学 .....	415
6.2.2 间接还原反应的机理 .....	422
6.2.3 铁矿石还原的数学模型 .....	424
6.2.4 影响还原速率的因素 .....	431
6.3 氧化物的直接还原反应 .....	433
6.3.1 固体碳还原氧化物的热力学原理 .....	433
6.3.2 固体碳还原氧化铁的平衡图 .....	436
6.3.3 复杂氧化物的还原 .....	438
6.3.4 铁以外的其他金属氧化物的还原 .....	438
6.3.5 固体氧化物直接还原反应的动力学 .....	440
6.3.6 高炉中氧化物的还原 .....	442
6.4 金属热还原反应 .....	444
6.5 铁的渗碳及碳含量 .....	447
6.5.1 碳化物及碳势 .....	447
6.5.2 碳在固体 $Fe-C$ 系中的存在状态 .....	449
6.5.3 $CO + CO_2$ 气体对铁的渗碳反应 .....	449
6.5.4 $CH_4$ 对铁的渗碳反应 .....	452
6.5.5 高炉内铁的渗碳过程及生铁的碳含量 .....	452
6.6 熔渣中氧化物的还原反应 .....	454
6.6.1 还原反应的分配系数及其影响因素 .....	454
6.6.2 $SiO_2$ 的还原 .....	455
6.6.3 $MnO$ 的还原 .....	458
6.6.4 $TiO_2$ 的还原 .....	460
6.6.5 其他氧化物的还原 .....	461

6.6.6 结论 .....	464
6.7 高炉冶炼的脱硫反应 .....	464
6.7.1 气-固相的脱硫反应 .....	464
6.7.2 熔渣-铁液间的脱硫反应 .....	465
6.7.3 熔渣脱硫的动力学 .....	467
6.8* 铁浴熔融还原反应 .....	468
6.8.1 过程概述 .....	468
6.8.2 还原反应的动力学 .....	469
习题 .....	471
复习思考题 .....	473
<b>7 氧化熔炼反应 .....</b>	<b>474</b>
7.1 氧化熔炼反应的物理化学原理 .....	474
7.1.1 熔池中氧化剂的种类及传递、反应的方式 .....	474
7.1.2 溶解元素氧化反应的 $\Delta_r G_m^\ominus$ 及氧势图 .....	475
7.1.3 元素氧化的分配系数 .....	478
7.1.4 元素氧化反应的动力学 .....	481
7.2 锰、硅、铬、钒、铌、钨的氧化反应 .....	484
7.2.1 锰 .....	484
7.2.2 硅 .....	490
7.2.3 铬 .....	491
7.2.4 钒 .....	495
7.2.5 铌 .....	496
7.2.6 钨 .....	497
7.3 脱碳反应 .....	497
7.3.1 碳氧化反应的热力学 .....	497
7.3.2 脱碳反应过程的机理 .....	501
7.3.3 脱碳反应的速率 .....	506
7.4 脱磷反应 .....	513
7.4.1 脱磷反应的热力学 .....	513
7.4.2 磷和碳、铬的选择性氧化 .....	521
7.4.3 熔渣中磷酸盐的还原 .....	522
7.4.4 还原脱磷 .....	522
7.4.5 脱磷反应的动力学 .....	523
7.5 脱硫反应 .....	524
7.5.1 炼钢脱硫反应的热力学 .....	524
7.5.2 炼钢的气化脱硫 .....	530
7.5.3 脱硫反应的动力学 .....	530
7.6 吸气及脱气反应 .....	532

7.6.1	钢液的吸收气体	532
7.6.2	钢液中溶解气体的排出	534
7.6.3	钢液脱碳过程中溶解气体的排出	535
7.7*	氧气转炉炼钢过程的反应	537
7.7.1	氧气转炉炼钢法的类型	537
7.7.2	转炉吹炼过程熔渣成分的变化	538
7.7.3	吹炼过程中钢水成分的变化	539
7.7.4	吹氧炼钢过程反应的热力学特征	541
7.7.5	总结	541
7.8	脱氧反应	541
7.8.1	脱氧反应的热力学原理	542
7.8.2	脱氧反应的动力学	546
7.8.3	锰、硅、铝等的脱氧反应	549
7.8.4	复合脱氧反应	551
7.8.5	脱氧剂用量的计算	556
7.8.6	扩散脱氧	559
7.8.7*	钢液的合金化	559
7.9	钢液凝固过程的反应	560
7.9.1	钢坯的结构	560
7.9.2	钢液凝固的偏析	561
7.9.3*	钢液凝固过程中的凝固收缩	568
7.9.4*	凝固过程的气体	569
7.9.5*	凝固过程的夹杂物	570
	习题	570
	复习思考题	573
<b>8</b>	<b>铁水及钢液的炉外处理反应</b>	<b>575</b>
8.1	铁水的预处理	576
8.1.1	铁水的预脱硅处理	576
8.1.2	铁水的预脱磷处理	578
8.1.3	铁水的预脱硫处理	579
8.1.4	铁水的同时脱磷、脱硫	583
8.2	钢液的真空处理	584
8.2.1	挥发性杂质的去除	584
8.2.2	真空脱气	588
8.2.3	真空脱碳(氧)	592
8.2.4	真空处理时钢液和耐火材料的反应	593
8.3	吹氩处理	594
8.3.1	吹氩脱气	594

8.3.2 吹氩脱氧 .....	596
8.3.3 氩-氧混合气体脱碳(AOD法) .....	598
8.4 合成渣处理 .....	599
8.4.1 钢液-渣间反应的动力学 .....	599
8.4.2 合成渣系及其性能 .....	600
8.4.3 合成渣脱氧 .....	600
8.4.4 合成渣脱硫 .....	601
8.5 喷吹粉料处理 .....	604
8.5.1 喷吹粉料过程的组成环节 .....	605
8.5.2* 喷吹反应的动力学方程 .....	605
8.5.3 钢液内杂质排出的总速率式 .....	607
8.6 钢中夹杂物的变形处理 .....	610
8.6.1 夹杂物的性能及其对钢性能的影响 .....	610
8.6.2 硫化物夹杂的变形处理 .....	611
8.6.3 $Al_2O_3$ 夹杂物的变形处理 .....	613
8.7 总结 .....	614
习题 .....	615
复习思考题 .....	616
附录 .....	617
附录1 本书中某些公式的导出 .....	617
附录2 化合物的标准生成吉布斯自由能( $\Delta_f G_m^\ominus(B) = A + BT, J/mol$ ) .....	630
附录3 一些物质的熔点、熔化焓、沸点、蒸发焓、转变点、转变焓 .....	635
附录4 某些物质的基本热力学函数 .....	637
附录5 常用物理化学常数表 .....	638
附录6 物理量的单位及两种单位制的转换关系 .....	639
附录7 本书采用的部分符号说明 .....	639
习题答案 .....	641
参考文献 .....	649
编后记 .....	651

# 绪 言

人类社会的发展史是和冶金技术的发展密切相关的。人们从事生产活动及生活中都离不开金属材料。人类早在远古时代就开始利用金属，不过那时仅利用了自然状态存在的少数几种金属，如金、银、铜及陨石铁，后来才逐渐发现从矿石中提取金属的方法。首先得到的是铜及其合金——青铜，日后又冶炼出了铁。人类利用的金属种类日渐增多，到了19世纪末叶，可利用的金属已达到了50多种。而在20世纪初叶及中叶，冶金技术获得了特别迅速的发展。现在元素周期表中有92种是金属元素，而具有工业意义的元素有75种。对于这些金属元素，各国有不同的分类方法，有的分为铁金属和非铁金属两大类，前者是指铁及其合金，后者则是指除了铁及其合金以外的金属元素；有的分为黑色金属和有色金属两大类，而有色金属则是指除铁、铬、锰3种金属以外的所有金属。

铁及其合金的生产规模和利用数量在金属中占主导地位，它们的产量占全世界金属产量的90%以上。铁及其合金广泛应用于国民经济的各个部门，不仅是因为铁的资源丰富，钢铁材料的价格比较低廉，而且由于其具有作为工程材料的良好加工性能及力学性能。在人类社会的发展史上，曾经出现了广泛使用铁制品的“铁器时代”，标志着生产力的大发展。时至今日，虽然出现了种类繁多的材料，但生铁和钢仍是用途最广、生产量最多的材料。所以，人们长期以来把钢和钢材的产量、品种、质量作为衡量一个国家工业、农业、国防和科学现代化水平的重要标志之一。

金属是从矿石中提取的。作为提取金属的矿石主要成分是金属的氧化物及硫化物（少数卤化物）。从矿石提取金属及金属化合物的生产过程称为提取冶金（extractive metallurgy），在这类物质的生产过程中离不开化学反应，所以又称为化学冶金（chemical metallurgy）。按提取金属工艺过程的不同，区分为火法冶金（pyrometallurgy）、湿法冶金（hydrometallurgy）及电冶金，后者包括电炉冶炼、熔盐及水溶液的电解。

从理论方面来说，火法冶金过程是物理化学原理在高温化学反应中的应用，湿法冶金则是水溶液化学及电化学原理的应用。虽然冶金过程大体分为火法和湿法，但火法是主要的。大多数的金属主要是通过高温冶金反应取得的。即使在某些采用湿法的有色金属提取中，也仍然要经过某些火法冶炼过程，如焙烧，作为原料的初步处理。这是因为火法冶金生产率高、流程短、设备简单及投资省，但其却不利于处理成分结构复杂矿或贫矿。

矿石在进入冶炼过程之前要经过矿石的处理，包括分级、均分、破碎、选矿、球团、烧结等。其中一些属于物理-机械的处理，另一些则是物理化学的处理。在冶炼中主要是通过还原熔炼获得粗金属，而后再通过氧化熔炼，以除去粗金属中的有害杂质，同时要求能取得所谓无废物的工艺，以保证物质的有效利用，提取矿石中的有价金属及充分利用生产中伴生的废物。

因此，火法冶金过程包括焙烧、熔炼、精炼、蒸馏、离析等过程，其内进行的化学反



应则有热分解、还原、氧化、硫化、卤化、蒸馏等。

钢铁冶金多采用火法过程，一般分为三个工序：

(1) 炼铁。从矿石或精矿中提取粗金属，主要是用焦炭作燃料及还原剂，在高炉内的还原条件下，矿石被还原得到粗金属——生铁，其中溶解有来自还原剂中的碳（4% ~ 5%）及矿石、脉石中的杂质，如硅、锰、硫、磷等元素。

(2) 炼钢。将生铁中过多的元素（C、Si、Mn）及杂质（S、P）通过氧化作用及熔渣参与的化学反应去除，达到无害于钢种性能的限度，同时还要除去钢液中溶解的气体（H、N）及由氧化作用引入钢液中的氧（脱氧），并调整钢液的成分，最后把成分合格的钢液浇注成钢锭或钢坯，便于轧制成材。

(3) 二次精炼。为了提高一般炼钢方法的生产率及钢液的质量（进一步降低杂质和气体的含量），而将炼钢过程的某些精炼工序转移到炉外盛钢桶或特殊反应炉中继续完成或深度完成。

近年来，将高炉的出炉铁水进行所谓的“三脱”（脱硅、脱磷、脱硫）处理后，供给转炉炼钢，以减轻转炉除去这些元素的过重造渣负担及补偿转炉氧化渣脱硫能力的不足，实现少渣量、高生产率的吹炼工艺。因此，出现了两种主要的炼钢工序，一种是高炉场—高炉—铁水预处理—转炉—二次精炼（见图 0-1 中①），另一种是原料（废钢）—电弧炉—二次精炼（见图 0-1 中②）。由此获得杂质元素 P、S、O、H、N 含量低及含有一定 C 量或某些合金元素成分的合格钢水，而后进入连铸机浇注成铸坯半成品，再经过加热、热轧、酸洗、冷轧、热处理、退火及表面加工，成为最后的钢材产品。图 0-1 示出了近代钢铁生产的流程。

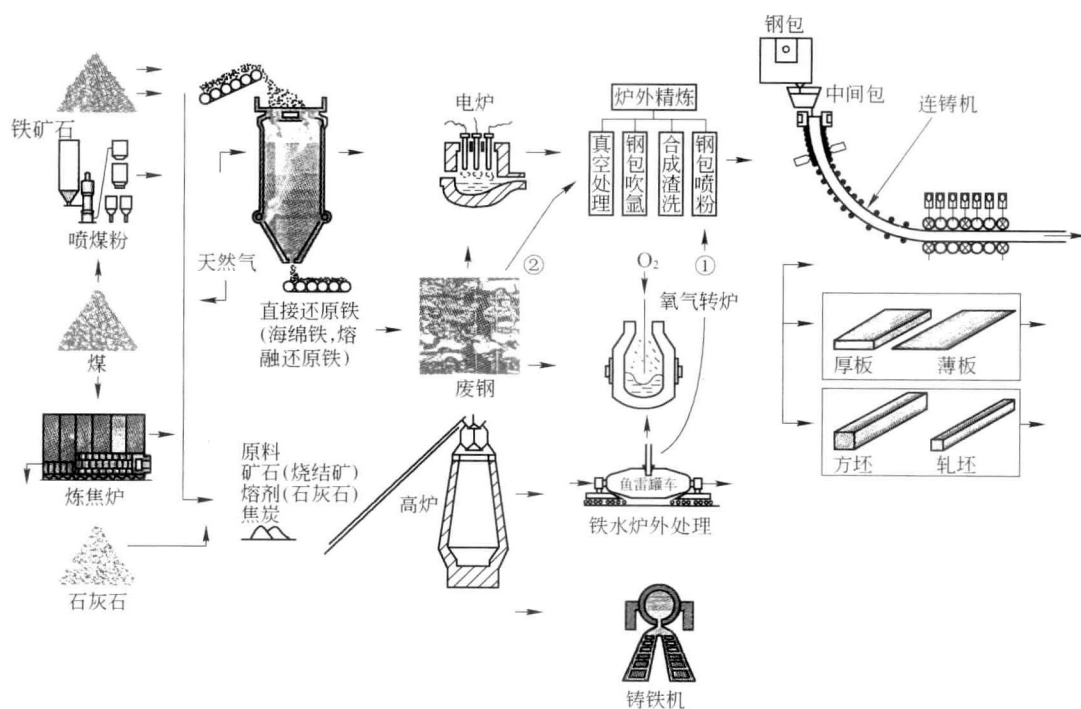


图 0-1 近代钢铁生产流程图