

冶金系统工程

中国金属学会

冶金继续教育丛书

冶金工业出版社

李士琦 高俊山 王 政 著

序

中国金属学会组织编写了“冶金继续工程教育丛书”，为大家办了一件好事。积极开展继续教育，对于提高冶金科技人员水平，促进冶金工业的发展具有重要意义。希望冶金战线各级领导重视这项工作，努力创造条件，为科技人员在职学习提供方便，同时也殷切希望广大冶金科技工作者坚持学习，不断吸收新知识，学习新技术，为实现四化、振兴中华做出更大贡献。

中国继续工程教育协会理事

冶金工业部副部长

徐大铨

一九八八年十二月

前 言

本书是中国金属学会组织编写的《冶金继续工程教育丛书》之一，书的宗旨在于向从事冶金工作的工程技术人员、科研人员、教师和管理人员介绍系统工程的基本观点和方法，提倡系统的研究和处理冶金工程问题。

朴素的系统观念自古已有，在这方面我国历史上曾有许多精辟的见解和成功应用的典故，应该说系统的哲学是东方文明的特色之一。本世纪以来，系统工程结合现代科学技术的成就形成了新兴的学科，国内现已有许多专著和译著。由于系统工程发展迅速，学科间相互交叉渗透，加之写作背景不同、写作意图相异，在共识的基础上，“仁者见仁，智者见智”，目前关于系统工程的书籍和文章已呈百花争艳之势。

作者们受中国金属学会继续工程教育工作委员会的委托，根据自己的学习心得撰写了这本《冶金系统工程》。在此以前，国内外还没有正式出版过论述冶金系统工程的专著。作为一种尝试，作者在本书中提出了一些自己的观点和论点，由于学识和水平所限，难免有偏颇之处，在此诚恳地欢迎专家和读者批评指正，愿本书起到抛砖引玉的作用。

本书第一、四、六章由李士琦执笔，第三章由高俊山执笔，第五章由王政执笔，第二章由王政、李士琦、高俊山三人合写，全书最后由李士琦统编。

全书由刘铁岭、刘述临，任舜绵审阅。中国金属学会的薛凌同志，北京科技大学的赵玉祥教授都曾给予许多帮助，在此一并致谢。

编 者

1990年12月

目 录

1 总论	1
1.1 发展着的冶金学	1
1.1.1 历史的评述	1
1.1.2 钢铁工业的大发展	2
1.1.3 当代科学技术的大发展	4
1.1.4 冶金学在发展	5
1.2 冶金学家族——八个分支	7
1.2.1 化学冶金	7
1.2.2 冶金反应热力学	8
1.2.3 冶金反应动力学	8
1.2.4 传输现象	8
1.2.5 宏观反应动力学	10
1.2.6 冶金反应工程	10
1.2.7 冶金单元(操作)设计	13
1.2.8 冶金系统工程	15
1.3 冶金学观念的变迁——四条纵线	22
1.3.1 物理的渗入	22
1.3.2 数学方法的近代化	23
1.3.3 变量个数的增多	23
1.3.4 从微观走向宏观	24
1.4 化学的冶金学——回顾之一	25
1.4.1 化学反应	25
1.4.2 冶金反应热力学	26
1.4.3 冶金反应动力学	27
1.4.4 宏观冶金反应动力学	27

1.4.5	冶金反应工程	33
1.5	物理冶金学——回顾之二	40
1.5.1	传热基本微分方程	40
1.5.2	一维传导传热——传输现象	42
1.5.3	纯金属的一维凝固传热——单元操作和 单元设计	45
1.5.4	连续铸钢过程凝固传热的数学模拟—— 走向CAO/CAD	50
参考文献		59
2	系统和系统工程	61
2.1	系统和系统观念	61
2.1.1	系统	61
2.1.2	系统的主要性质与特征	62
2.1.3	系统的类型	65
2.1.4	系统观念	68
2.2	系统工程及其方法论	70
2.2.1	系统工程简介	70
2.2.2	系统工程方法论	72
2.2.3	系统思考	74
2.2.4	霍尔图	76
2.2.5	系统工程方法的技术内容	80
2.3	黑箱	82
2.3.1	引言	82
2.3.2	传递函数	83
2.3.3	系统状态方程	85
2.3.4	经验模型	87
2.3.5	黑箱原理的方法论	89
2.4	数学模型	89
2.4.1	模型的应用	89
2.4.2	常用数学模型及其类型	90
2.4.3	模化方法	92

2.4.4 建模与仿真的一般过程	95
参考文献	99
3 冶金过程系统	101
3.1 冶金过程系统的构成	101
3.1.1 过程系统	101
3.1.2 单元特点	104
3.1.3 系统结构	106
3.2 冶金过程系统模型	109
3.2.1 模型的定义与分类	109
3.2.2 结构模型	111
3.2.3 单元模型	116
3.3 冶金过程系统的评价与优化	117
3.3.1 系统优化	117
3.3.2 评价与评价指标	120
3.3.3 优化的数学方法	122
3.3.4 动态规划	123
3.3.5 多目标规划	127
3.4 冶金过程系统运行管理	132
3.4.1 系统运行管理与活动系统	132
3.4.2 管理活动的特点	134
3.4.3 系统中人的因素	136
3.4.4 管理信息系统	136
参考文献	140
4 多变量系统统计分析的应用和理解	141
4.1 多变量综合考查的必要性	142
4.2 实验设计	148
4.2.1 提倡合理的设计实验	149
4.2.2 交互作用	152
4.2.3 正交实验	155
4.2.4 回归设计	158
4.2.5 调优试验	158

4.3	逐步回归分析	168
4.4	主成分分析	173
4.4.1	概述	173
4.4.2	基本原理	174
4.4.3	计算过程	175
4.4.4	举例	177
4.5	聚类分析	179
4.5.1	概述	180
4.5.2	简单的应用例子	181
4.5.3	模糊聚类	182
4.5.4	聚类分析与模式识别	187
4.6	统计模型的综合评选	188
参考文献		198
5	数学规划的应用及理解	199
5.1	数学规划概述	199
5.1.1	引言	199
5.1.2	建立线性规划模型的步骤	200
5.1.3	线性规划的基本概念	204
5.1.4	整数线性规划与非线性规划	215
5.2	线性规划问题的类型及其应用	217
5.2.1	产品组合问题	218
5.2.2	覆盖、职员雇用和下料问题	224
5.2.3	混合及配料问题	228
5.2.4	多阶段计划问题	228
5.2.5	多级纵向组合和投入产出系统	236
5.2.6	网络、指派和PERT/CPM	240
参考文献		245
6	应用举例	247
6.1	VOD过程的系统分析与模化	247
6.1.1	工程背景	247
6.1.2	目的和方法	249

6.1.3	变量	251
6.1.4	数据	252
6.1.5	软件	253
6.1.6	追加变量	253
6.1.7	基本统计量	254
6.1.8	相关矩阵	263
6.1.9	逐步回归分析	263
6.1.10	经验模型	264
6.2	粗钢生产系统的最优决策	271
6.2.1	系统分析	273
6.2.2	单元模化	275
6.2.3	系统模化	285
6.2.4	系统模拟	289
参考文献		294

1.1 发展着的冶金学

1.1.1 历史的评述

冶金是一项古老的技艺，关于金属材料的使用和金属工艺的应用都可以追溯到人类文明的早期，无论在神话传说中还是在科学的历史发展研究中，都以金属材料或金属工具的使用作为早期人类社会发展的标志，这充分说明了冶金对人类文明的贡献。

随着人类历史的发展，冶金技艺也在不断进步。人类对金属材料、冶金过程的认识和理解的日积月累，汇入了中世纪以后的化学发展的先河。当化学形成一门科学之后，冶金自然而然地成为化学家族中的一名成员，至今仍常将冶炼工艺及其原理的学问称之为“化学冶金”。这反映出了冶金学的科学历史渊源及其学科的特征。

一般认为，现代的冶金学诞生于本世纪二十年代，当时以申克和启普曼等人为代表的学者将物理化学的概念和方法引用来解释和讨论冶金过程。为了说明冶金学诞生的科学技术的历史根源，下面简单介绍有关物理化学理论基础及钢铁冶金技术产生的年代：

(a) 物理化学理论基础产生的年代:

1789年 热力学第一定律 (能量守恒定律)

1824年 热力学第二定律

19世纪下半叶 物理化学的主要定律和原理

1904年 热力学第三定律

(b) 工业生产规模的钢铁冶金技术产生的年代:

18世纪末至19世纪初 高炉炼铁

1855年 酸性转炉 (贝斯麦) 炼钢

1860年 平炉 (西门子和马丁) 炼钢

1876年 碱性转炉 (托马斯) 炼钢

1899年 电弧炉 (皮埃尔) 炼钢

同一切科学技术的发展规律一样,科学的冶金学之诞生和发展也必须具有生产和理论两方面的基础,到了本世纪初,这些条件已经具备:①大规模的钢铁冶金工业化生产已经形成,为理论认识提供了必要的实践经验和紧迫的要求;②整个科学理论的发展,为冶金工程问题的理解和定量描述提供了可能。这样,冶金学科的出现已是历史的必然。

1.1.2 钢铁工业的大发展

在冶金学诞生的年代里,即本世纪二、三十年代,世界钢铁产量每年约为500—700万t,到七十年代,世界钢铁年产量超过了7亿t,50年间增长了10倍以上,如图1-1所示。

钢铁工业的大发展应该说是冶金学成就的客观例证,说明理论认识的飞跃会对工业生产的发展产生巨大的推动力。同时也应看到,生产的大发展又会对冶金学的充实、更新和发展提供不尽的源流和推动力。

半个多世纪钢铁冶金工业的发展可归纳为以下几个方面:

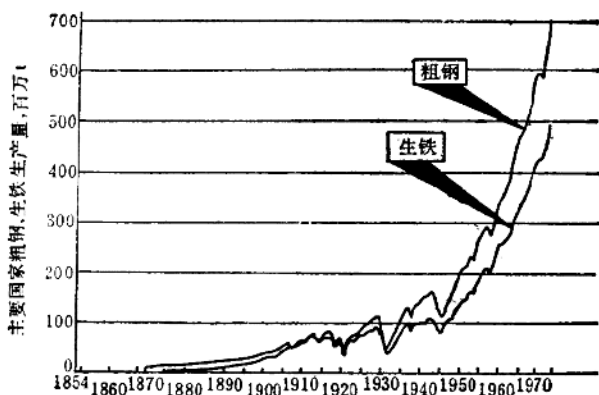


图 1-1 近百年来世界生铁和粗钢生产量的发展概况

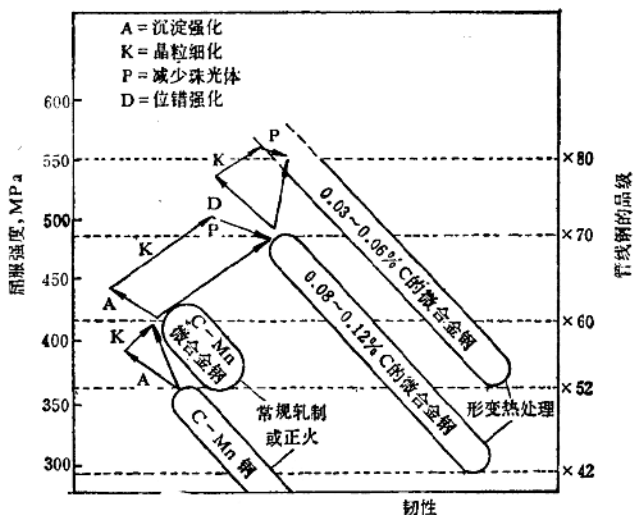


图 1-2 管线钢的进展

- ①生产规模迅速扩大;
- ②冶炼设备的大型化;

- ③冶炼过程的高速化、高效率化；
- ④生产过程的经济化（降耗、节能）；
- ⑤生产品种的多样化；
- ⑥生产过程的清洁化；
- ⑦生产过程控制的精确化。包括为满足用户对钢铁产品质量的要求，对产品的化学成分、性能和尺寸控制的精确化等（如图1-2和图1-3所示）。

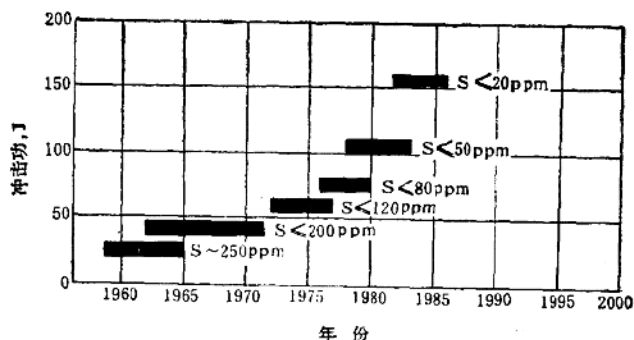


图 1-3 钢的韧性和硫含量的变化

1.1.3 当代科学技术的大发展

二十世纪科学技术的大发展超过了以往任何一个世纪。直到五十年代，现代科技界似乎还缺乏足够的自信，许多人仍沉醉在对上一个世纪成就的赞美和崇拜之中；六十年代以来，人们开始意识到：在我们生活的这个世纪里，科学技术的进步不仅可以与十九世纪相媲美，而且似乎更大一些。于是有人提出了当代“知识大爆炸”等惊人之语。这些评述形象地反映了当今世界科学技术发展的迅猛势头。

当代科学技术的大发展难以尽述，这里仅列举几项与本

书主题关系密切的成就：

- ①当代数学的成就；
- ②控制论的出现与发展；
- ③系统工程的出现与发展；
- ④计算机技术的出现、发展和普及；
- ⑤材料科学的长足进步。

当代科学技术发展的另一特色是学科领域之间的相互渗透和融合，学科间的壁垒在淡化甚至消溶。例如系统工程就是一门“没有国界”的学科，后文将说明系统工程甚至没有自己的固定技术内容，而是一门综合的学科，非常容易与其他学科相融合；又如，计算机技术出现只有短短的四十年，但至今它几乎已无处不有，它渗透到各学科中，并引起了巨大而深刻的变化。

不仅仅新兴的学科间在相互渗透和融合，传统的工业和科学也在共享这些成果，像机械加工、轻纺，以及化工和冶金等在工程上、在学科领域内都在不断地吸收新的营养，发展自身，并为整个科技进步作出贡献。例如，钢铁冶金中复杂的分布参数系统的识别和控制也被认为是自动控制理论的前沿课题之一。

环顾当代的科技界，不存在孤立而封闭的学科，冶金学也在这后浪推前浪的时代长河中共进。

1.1.4 冶金学在发展

如同现代冶金学的诞生一样，近百年来冶金生产的飞速发展，整个科学技术的长足进步，都必然使冶金学得到不断的充实、发展和更新，因此在承认经典的冶金学的贡献和成就的同时，也应注意冶金学观念的变迁。

譬如炼钢技术，二战前后平炉炼钢处于鼎盛时期，可以

说这是经典的冶金学成就的顶峰。物理化学的理论直接指导了碳的氧化、硫磷等有害元素的去除，许多生产技术问题和质量问题获得了满意的解释和解决。在这样的理论的指导下有些国家大力发展平炉炼钢，500t的平炉、以至900t的大平炉应运而生，而这些大平炉现在已成了低效率的历史见证。

重视变革的冶金学家和工程师注意到炼钢生产中的物理现象，开创了氧气顶吹转炉炼钢的新局面，使炼钢生产效率得到了大的提高，而后又开发了顶底复吹转炉炼钢技术。于是有人评论说：纵观炼钢技术进步的历史，就是“搅拌”充

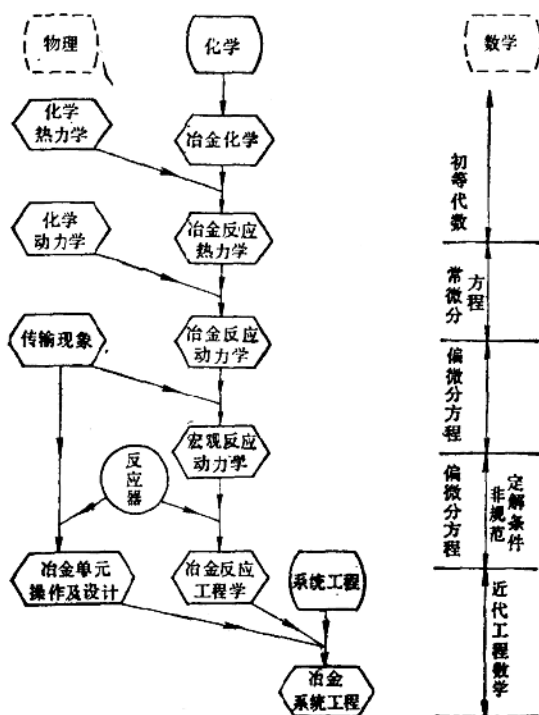


图 1-4 冶金学观念的变迁

分应用的历史。这种说法虽有些失之偏颇，但确实突出强调了传输现象在冶金工程中的应用价值。

近代冶金学不仅仅需要物理化学的指导，同样也需要对传输现象的理解和认识。这样，就开辟了冶金反应工程和冶金单元（操作）设计等工程学科的广阔领域。近三十年来这些领域中的理论和实践成就与冶金工程技术的进步同在，是难以枚举的。

本书赞成从历史的观点、发展的观点来看待冶金学。基础的冶金学原理经过岁月的磨练更加纯真，同时也在历史的进程中不断吸收新的理论、观点和方法，使冶金学的内容更加丰富。为此，作者们认为，可以绘成一张冶金学科系统图——图1-4。这张图强调的是发展的观点，进化的观点，因此也许和一些文献和书籍中划分的情况不尽相同，较详细的说明将在后文中陆续叙述。

1.2 冶金学家族——八个分支

图1-4列出了冶金学科体系的各个分支，现简要说明如下。

1.2.1 化学冶金

申克以前的冶金学，可称为是化学冶金或冶金化学，其中尚未引入物理化学原理。

化学所揭示的原理是冶金学的基本信条。人们认为冶金过程是一类特殊的化学工程，这种观点在于强调冶金与化工之间的共性。从特殊性的角度来讨论，冶金与化工之间又有着明确的不同。首先，冶金生产特别是钢铁冶金已形成了巨大的生产规模，足可以和整个化学工业的规模相比较；其

次，以钢铁冶金为代表的冶金过程中火法冶金占了主导地位，反应温度高达 $1000\sim 1800^{\circ}\text{C}$ ，远远高于一般化工过程；第三，钢铁冶金生产中已形成了一些独特的、有很高生产效率的冶炼工序或设备，如高炉、氧气转炉等，这些设备明显地有别于化工装置，而形成了特有的冶金单元；第四，用户对钢铁材料的要求，以及钢铁材料的加工、制品等都形成了不同于化工产品的独特的体系。凡此种种都足以说明冶金与化工之间的巨大差异。

1.2.2 冶金反应热力学

这里讲的是将物理化学中的化学热力学原理用来讨论冶金过程，也可以说是狭义的冶金过程热力学，是冶金学中最成熟的部分，应用也最广泛，这方面已有许多专著，本书不再重复。

1.2.3 冶金反应动力学

这里讲的是将物理化学中的化学反应动力学原理用来讨论冶金过程，也可说是狭义的冶金过程动力学，也是冶金学中多年来经常讨论的内容。但因在工程应用中较少遇到纯粹的化学反应速度占绝对统治地位的冶金问题，故单独应用较少，后发展而形成宏观动力学和反应工程学。

1.2.4 传输现象

传输现象指的是动量、热量和质量的传输，又称为三传。关于对传输现象的认识和描述的理论称之为传输原理，传输原理现在已是冶金学的重要基础。概括而言，可归纳为以下几个基本点：

①传输原理所讨论的对象是物理现象，或是以物理过程

为主导的现象；

②传输原理所讨论的变量是物理量，一般来说是空间和时间上分布的场函数；

③描述传输现象的偏微分方程可写成如下的统一形式：

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \Phi) + \text{div}(\rho \vec{u} \Phi) = \text{div}(\Gamma_{\varphi} \text{grad} \Phi) + S_{\varphi}$$

(I) (I) (II) (IV)

(1-1)

式中 Φ ——所讨论的物理量、场函数；

τ ——时间坐标；

ρ ——质量密度；

$\vec{u}$ ——介质流动的速度（矢量）场；

Γ_{φ} ——广义的（动量、热量或质量的）扩散系数，可以是 φ 的函数或为常数；

S_{φ} ——广义的（动量、热量或质量的）源或耗散，可以是 φ 的函数或为常数和零；

(I)项——与时间有关的积累项或不稳定项；

(I)项——与流场（ $\vec{u}$ ）有关的平流项；

(II)项——扩散项；

(IV)项——源（或耗散）项。

当场函数 Φ 是矢量时，式（1-1）有张量的形式。

④传输原理所讨论的问题一般都具有较简单的定解条件，即几何条件规范，或无限边界；并具有规范的物理条件。

⑤大多数问题有解析解，部分问题需数值求解，对于更困难的问题给出工程图表或用相似模拟的方法。