

信息化与工业化 两化融合

研究与应用丛书

复杂有色冶金生产过程 智能建模、控制与优化

桂卫华 阳春华 著



科学出版社

信息化与工业化两化融合研究与应用丛书

复杂有色冶金生产过程 智能建模、控制与优化

桂卫华 阳春华 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书总结了作者多年来从事有色冶金生产过程自动化的研究工作,内容涉及解决有色冶金生产过程自动化问题的理论、方法、技术及系统实现等方面。书中给出了智能集成建模的思想,描述了智能集成建模的基本形式和结构,阐述了多种基于神经网络的智能集成建模方法;讨论了复杂有色金属生产过程的智能优化控制问题,给出了智能优化控制的结构,论述了操作模式优化问题;针对铅锌、铜、铝等主要有色金属的冶炼生产过程以及铝加工生产的重大装备,详细说明了智能集成建模、智能优化控制以及操作模式优化理论与方法在典型冶金工序和装备中的实现与应用。应用成果的介绍,始终坚持理论联系实际,从实际生产过程中提炼科学问题开展研究,然后将研究成果应用于生产实际,取得了显著应用成效,相关方法可为其他复杂生产过程的建模、优化与控制提供借鉴和参考。

本书可供研究过程优化控制的工程技术人员和科研人员阅读,也可作为有关专业本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

复杂有色冶金生产过程智能建模、控制与优化/桂卫华,阳春华著. —北京:科学出版社,2010

(信息化与工业化两化融合研究与应用丛书)

ISBN 978-7-03-030002-7

I. 复… II. ①桂…②阳… III. 有色金属冶金-过程-自动化-研究 IV. TF8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 007490 号

责任编辑:姚庆爽/责任校对:刘小梅

责任印制:赵 博/封面设计:黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 12 月 第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 12 月 第一次印刷 印张:20

印数:1—2 500 字数:381 000

定价:70.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》序

传统的工业化道路，在发展生产的同时付出了过量消耗资源的代价：产业革命 200 多年以来，占全球人口不到 15% 的英国、德国、美国等 40 多个国家相继完成了工业化，在此进程中消耗了全球已探明能源的 70% 和其他矿产资源的 60%。

发达国家是在完成工业化以后实行信息化的，而我国则是在工业化过程中就出现了信息化问题。回顾我国工业化和信息化的发展历程，从中国共产党的“十五大”提出“改造和提高传统产业，发展新兴产业和高技术产业，推进国民经济信息化”，到党的“十六大”提出“以信息化带动工业化，以工业化促进信息化”，再到党的“十七大”明确提出，坚持走中国特色新型工业化道路，大力推进信息化与工业化融合。这充分体现了我国对信息化与工业化关系的认识不断深化。

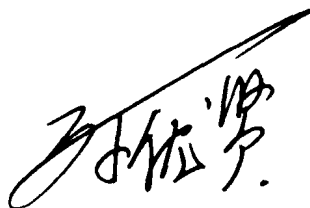
工业信息化是“两化融合”主要内容，它的主要内容包括生产设备、过程、装置、企业的信息化，产品的信息化和产品设计、制造、管理、销售等过程的信息化的，其目的是建立起资源节约型产业技术和生产体系，大幅度降低资源消耗；在保持经济高速增长和社会发展过程中，有效地解决发展与生态环境之间的矛盾，积极发展循环经济，这对我国科学技术的发展提出了十分迫切的战略需求，特别是对控制科学与工程学科提出了十分急需的殷切期望。

“两化融合”将是今后一个历史时期里，实现经济发展方式转变和产业结构优化升级的必由之路，也是中国特色新型工业化道路的一个基本特征。为此，中国自动化学会与科学出版社共同策划出版《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》，旨在展示两化融合领域的最新研究成果，促进多学科多领域的交叉融合，推动国际间的学术交流与合作，提升控制科学与工程学科的学术水平。丛书内容既可以是新的研究方向，也可以是至今仍然活跃的传统方向；既注意横向的共性技术的应用研究，又注意纵向的行业技术的应用研究；既重视“两

化融合”的软件技术，也关注相关的硬件技术；特别强调那些有助于将科学技术转化为生产力以及对国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信，有广大专家、学者的积极参与和大力支持，以及编委们的共同努力，本丛书将为繁荣我国“两化融合”的科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

最后，衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对丛书的厚爱。



中国自动化学会理事长

2010年11月

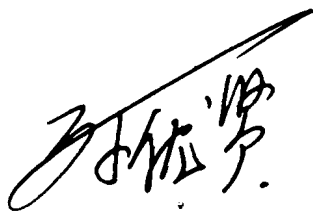
序

我国是有色金属生产和消费大国，有色金属产量自 2002 年以来连续 8 年位居世界第一位，在世界有色金属工业中具有举足轻重的地位。有色金属工业属于基础原材料工业，是我国国民经济的支柱产业。在有色金属矿产资源日益枯竭、有色金属需求量却日益增大的背景下，党中央国务院提出“以信息化带动工业化”的号召，有色金属行业信息化建设获得了飞速发展，自动化与信息化技术的应用为企业节能降耗、减少环境污染、高质量低成本等目标的实现做出了巨大贡献。

桂卫华教授领导的研究团队紧紧围绕制约我国有色金属工业可持续发展的能源、资源与环境问题，长期奋斗在有色冶金工业现场，致力于有色冶金生产过程自动化的理论、方法、技术及系统实现方面的研究工作。针对有色冶金过程建模与优化控制难题，提出了智能集成建模的思想，形成了一批适用于有色冶金生产过程的智能集成建模和智能优化控制方法及关键技术，并将这些方法与技术成功应用于有色金属冶炼生产过程及加工生产的重大装备中，节能降耗效果显著，并取得了很好的经济效益和社会效益。

《复杂有色冶金生产过程智能建模、控制与优化》一书是桂卫华教授研究团队多年科学研究成果的总结，内容不仅包含智能集成建模、智能优化控制及操作模式优化方法的详细阐述，而且按照铅锌冶炼生产过程、铜闪速冶炼过程、氧化铝生产过程以及铝合金构件制备重大装备生产四个部分系统地介绍了智能建模、优化与控制技术的应用与实现。该书倾注了著者多年来为我国有色金属工业自动化水平提升而做出的艰苦卓绝的努力，并自始至终体现着著者“理论联系实际，从实际生产过程中提炼科学问题开展研究，并将研究成果应用于实际生产”的思想，是一本优秀且不可多得的工业过程控制类的参考用书。

我非常高兴为桂卫华、阳春华教授的专著作序，也衷心希望《复杂有色冶金生产过程智能建模、控制与优化》能为从事复杂工业过程建模、控制与优化的科技工作者、高校教师和学生提供理论与实践方面的指导及参考。



2010 年 11 月于浙江大学

前 言

有色金属是我国国民经济和国防军工发展的重要基础原材料。由于有色金属品种多，矿物原料和各种金属特性差异大，因此有色金属冶炼工艺多种多样；并且，有色冶金体系属于多元多相的复杂反应体系，工艺机理复杂。这些特点，给有色冶金生产过程自动化的建模、控制与优化带来了许多困难。

20年来，我们这个团队一直致力于有色冶金生产过程自动化的理论、方法、技术及系统实现等方面的研究工作，并坚持理论联系实际，从实际生产过程中提炼科学问题开展研究，并将研究成果应用于实际生产。令人欣慰的是，我们的许多工作在实际生产中发挥了很好的作用，得到了企业的肯定，这也激励我们继续努力，为我国有色冶金自动化技术的提升奋斗不息。

本书旨在对作者多年来从事有色冶金生产过程自动化的研究工作加以总结，它涉及有色冶金生产过程智能集成建模、智能优化控制及操作模式优化等方面，重点阐述了铜、铝、铅、锌等主要有色金属生产过程及铝合金加工重大装备的自动化技术及其应用。全书共分8章，第1章由桂卫华执笔，第2章、第3章和第7章由王雅琳执笔，第4章由阳春华执笔，第5章由李勇刚执笔，第6章由胡志坤、李勇刚执笔，第8章由桂卫华、贺建军、阳春华执笔，由桂卫华、阳春华统编全稿。

多年来，常常使我们引以为豪的是团队很好的团结合作精神，没有这种共同的努力，我们无法获得今天这样的成果，本书也难以完成。为此，要深深感谢为本书的撰写做出巨大贡献和给予大力支持的团队其他老师，他们是喻寿益、刘明、谢永芳、唐朝晖、陈宁、粟梅、彭涛、朱红求、蒋朝辉、王晓丽、陈晓方、郭宇骞、叶华文、徐德刚、胡扬等。同时，本书是团队多年科学研究工作的总结，参加这些科研工作的有许多博士和硕士研究生，他们是黄泰松、彭晓波、王凌云、周璇、蒋少华、宋海鹰、孔玲爽、段小刚、柴琴琴、李瑞娟、陶杰、张定华、陶顺红、莫志勋、黄佳、鄢峰、孙鑫红、杨旭坤、卢宏燕、张毅、颜青君、赵长平、赵学起等。他们勤勤恳恳、任劳任怨、勇于创新，为本书的完成提供了基本素材并奠定了基础，衷心感谢他们对本书所做的贡献。长期以来的科学研究，使我们与许多有色冶金生产企业建立了深厚的友情，我们研究工作的每一步进展，都离不开他们的热心帮助和支持。在本书完成之际，向他们表示崇高的敬意。

本书的基础研究工作还得到了国家自然科学基金重点项目“面向节能降耗的

有色冶金过程控制若干理论与方法研究”（60634020）、国家杰出青年科学基金项目“复杂工业过程建模、控制与优化”（61025015）以及“数据驱动的多相交互冶金过程能耗优化方法研究及应用”（60874069）、“检测大时滞有色冶金配料过程不确定实时优化方法研究”（60804037）、“有色金属闪速熔炼过程操作模式提取与优化方法研究”（60904077）等的支持，在此，对国家自然科学基金委员会表示深深的谢意。

由于水平有限、时间仓促，书中所述难免存在疏漏之处，恳请读者和同仁多多批评指正。

桂卫华 阳春华

2010年9月

于中南大学控制工程研究所

目 录

《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》序

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 我国有色金属工业的发展	1
1.2 有色金属冶炼生产的特点	2
1.2.1 有色金属冶炼生产工艺简介	2
1.2.2 有色金属冶炼生产的特点	4
1.3 有色金属生产过程自动化技术的发展	5
1.4 本书的主要内容	6
参考文献	6
第 2 章 智能集成建模	8
2.1 智能集成建模的提出	8
2.2 智能集成建模的基本框架	10
2.2.1 基本概念	10
2.2.2 智能集成建模的形式和结构	10
2.2.3 智能集成建模的形式化描述	13
2.3 智能集成建模的工程实现	13
2.4 小结	14
参考文献	15
第 3 章 基于神经网络的智能集成建模方法	16
3.1 神经网络发展	16
3.2 多层前向神经网络的结构、算法	17
3.3 多神经网络的集成建模方法	19
3.3.1 自适应监督式分布神经网络的提出	20
3.3.2 ASDNN 的总体结构	21
3.3.3 ASDNN 样本空间的监督式聚类	22
3.3.4 ASDNN 网络的自适应学习	24
3.4 神经网络与传统建模方法的集成	26
3.4.1 两类建模方法集成的必要性与可行性	26

3.4.2 两类建模方法的集成形式·····	27
3.5 神经网络与其他智能方法集成建模·····	30
3.5.1 NN和FS集成建模的可行性·····	31
3.5.2 NN与FS的集成形式·····	32
3.5.3 用模糊逻辑增强的神经网络·····	34
3.5.4 模糊系统的网络化集成建模方法·····	38
3.6 小结·····	48
参考文献·····	48
第4章 复杂有色冶金生产过程智能优化控制 ·····	50
4.1 智能优化控制问题·····	50
4.2 智能集成优化控制结构·····	51
4.3 有色冶金过程操作模式优化·····	53
4.3.1 操作模式优化的提出·····	53
4.3.2 操作模式定义·····	54
4.3.3 基于数据驱动的操作模式优化框架·····	55
4.4 工程智能优化算法·····	57
4.4.1 工程优化算法分类·····	57
4.4.2 模拟退火算法基本思想及特点·····	58
4.4.3 遗传算法基本思想及特点·····	59
4.4.4 微粒群算法基本思想及特点·····	61
4.5 小结·····	63
参考文献·····	63
第5章 铅锌冶炼生产过程的优化控制 ·····	65
5.1 基于成本最小的铅锌冶炼企业原料供应优化·····	65
5.1.1 铅锌冶炼企业原料供应系统的特点·····	65
5.1.2 原料采购优化决策·····	66
5.1.3 原料库存的智能综合优化控制·····	70
5.1.4 原料量价实时预警·····	73
5.2 锌湿法冶炼净化过程优化控制·····	76
5.2.1 锌湿法冶炼净化过程生产工艺·····	77
5.2.2 净化过程中钴离子浓度在线检测·····	80
5.2.3 净化过程的优化控制·····	83
5.3 大型锌湿法电解生产综合优化控制·····	89
5.3.1 大型锌湿法电解生产工艺·····	90
5.3.2 大型锌湿法电解生产综合优化控制总体框架·····	91

5.3.3	锌电解过程能耗模型	92
5.3.4	锌电解沉积过程电力负荷优化调度	95
5.3.5	锌电解沉积过程工艺条件优化控制	98
5.3.6	锌电解整流机组智能优化运行	101
5.3.7	大型锌湿法电解生产综合优化控制系统	102
5.4	铅锌熔炼过程智能优化控制	104
5.4.1	铅锌熔炼过程工艺机理分析	104
5.4.2	铅锌熔炼产量预测模型	105
5.4.3	铅锌熔炼过程炉况评判及炉况优化	108
5.5	铅锌生产过程密闭鼓风炉智能故障诊断	113
5.5.1	密闭鼓风炉铅锌熔炼过程故障分析	113
5.5.2	密闭鼓风炉铅锌熔炼过程透气性预报模型	115
5.5.3	密闭鼓风炉结瘤故障智能诊断	117
5.5.4	密闭鼓风炉智能故障诊断系统	120
5.6	小结	122
	参考文献	123
第6章	铜闪速熔炼生产过程优化控制	124
6.1	铜精矿配料过程优化	124
6.1.1	铜精矿配料优化建模	125
6.1.2	基于软约束调整的优化计算	126
6.1.3	工业实例计算	128
6.1.4	配料优化系统设计	130
6.2	铜精矿气流干燥过程优化控制	131
6.2.1	铜精矿干燥工艺过程	131
6.2.2	精矿干燥过程机理建模	132
6.2.3	精矿干燥水分软测量的智能集成建模	135
6.2.4	干燥混合气的智能优化控制	139
6.2.5	干燥过程优化系统设计	144
6.3	闪速炉炉况评判与操作优化	145
6.3.1	闪速炉简介	145
6.3.2	闪速炉物料平衡和热平衡计算模型	146
6.3.3	闪速炉工艺指标的智能集成预测模型	151
6.3.4	闪速炉炉况操作模式优化	158
6.3.5	闪速炉炉况综合优化控制系统设计与实现	162
6.4	PS转炉优化控制	162

6.4.1	铜铈吹炼过程	162
6.4.2	铜铈吹炼的氧量平衡计算模型	163
6.4.3	吹炼终点在线预报	168
6.4.4	冷料添加操作优化	173
6.4.5	PS转炉优化控制系统设计与应用	180
6.5	小结	181
	参考文献	182
第7章	氧化铝生产过程优化控制	183
7.1	氧化铝生产流程概述	183
7.2	烧结法氧化铝配料过程的优化控制	184
7.2.1	配料过程工艺分析	185
7.2.2	优化控制总体方案	186
7.2.3	生料浆质量预测智能集成模型	188
7.2.4	生料浆配比优化计算	192
7.2.5	生料浆智能倒槽	194
7.2.6	生料浆优化配料系统工业应用	203
7.3	高压溶出过程质量指标的软测量	205
7.3.1	高压溶出过程工艺分析与机理建模	205
7.3.2	苛性比值与溶出率的智能集成建模方法	210
7.3.3	预测模型的在线校正	222
7.3.4	软测量模型的工业应用	228
7.4	氧化铝蒸发过程优化控制	230
7.4.1	氧化铝蒸发工艺流程与优化控制总体架构	230
7.4.2	蒸发过程出料浓度预测模型	233
7.4.3	蒸发过程能耗分析模型	245
7.4.4	基于焓评价指标的蒸发过程节能优化	252
7.5	连续碳酸化分解过程智能控制	257
7.5.1	连续碳酸化分解过程机理分析	257
7.5.2	优化控制总体方案	261
7.5.3	首槽进料量软测量与稳定控制	261
7.5.4	末槽分解率在线预测与优化控制	266
7.5.5	系统实现与工业应用	270
7.6	小结	271
	参考文献	271

第 8 章 大型高强度铝合金构件制备重大装备智能控制	273
8.1 大型模锻水压机智能控制技术	273
8.1.1 大型模锻水压机和模锻工艺分析	273
8.1.2 大型模锻水压机欠压量在线智能检测方法	275
8.1.3 多关联位置电液比例伺服系统高精度快速定位智能控制技术	278
8.1.4 模锻水压机批量生产自学习控制技术	282
8.1.5 基于压力原则的模锻过程压力智能优化控制技术	285
8.1.6 智能控制系统设计与实现	287
8.2 大型立式淬火炉智能控制技术	288
8.2.1 大型立式淬火炉工作原理及控制要求	288
8.2.2 炉内锻件温度智能测量方法	289
8.2.3 基于信息矩阵的传感器最佳位置配置方法	292
8.2.4 多区段高精度、高均匀性温度智能控制技术	295
8.2.5 基于操作模式的大型立式淬火炉温度优化控制技术	298
8.2.6 大型立式淬火炉智能控制系统实现与应用	299
8.3 小结	301
参考文献	301

第 1 章 绪 论

有色金属作为我国国民经济和国防军工发展的重要基础原材料，已广泛应用于机械、电子、化工、建材、航天、航空、国防军工等各个行业，是支撑国家安全和国家重大战略工程的关键材料，在国民经济发展中占有十分重要的地位。有色金属工业是以开发利用有色金属矿产资源为主的资源性行业，是国民经济和国防建设的基础产业，也是国家参与新世纪国际竞争的支柱产业^[1]，有色金属工业的发展水平被认为是一国国力的体现之一，也已成为衡量一个国家社会进步的重要标志。

1.1 我国有色金属工业的发展

我国是全球最大的有色金属生产和消费国，1995 年以来，有色金属的总产量持续增长。1995 年铜、铝、铅、锌、镍、锡、锑、镁、钛、汞 10 种常用有色金属产量为 496 万 t；2002 年总产量达到 1020 万 t，跃居世界第一位；2005 年总产量达到 1639 万 t；2008 年面对全球金融危机，全国 10 种有色金属总产量 2551 万 t，总消费量 2567 万 t；2009 年达到 2605 万 t，总消费量 2665 万 t，其中铜、铝、铅、锌总产量分别占全球产量的 22.43%、35.45%、42.02%、38.65%，总消费量分别占全球消费量的 31.66%、37.07%、41.67%、40.17%，铜、铝、铅、锌等主要有色金属生产和消费量均居世界第一位。

我国有色金属工业通过自主创新、集成创新和引进技术消化吸收再创新，技术装备水平取得了明显提高。铜、铝、铅、锌等主要有色金属的冶炼工艺和生产装备已达到国际先进水平^[2]。在铜冶炼生产方面，先后引进了奥托昆普闪速熔炼技术、诺兰达熔池熔炼技术、奥斯迈特冶炼技术、艾萨冶炼技术，通过改造创新国外闪速熔炼、闪速吹炼铜冶炼技术，大大提升了我国铜冶炼技术装备水平；在铝冶炼生产方面，针对我国一水硬铝石型铝土矿的特点，自主创新了完整的一水硬铝石型铝土矿生产氧化铝的工艺技术与装备，自主研究了选矿-拜耳法氧化铝生产工艺，自主开发的大型预焙槽电解铝生产技术达到世界先进水平，在国内得到广泛应用，自主创新研发成功世界上槽容量最大的 400kA 以上铝电解槽，这标志着我国铝电解技术已走在世界前列；在铅冶炼生产方面，我国拥有自主知识产权的氧气底吹-鼓风炉炼铅技术（SKS）获得成功，标志着在富氧熔池炼铅工艺方面取得了突破性的进展，引进的艾萨炉-鼓风炉炼铅技术得到很好的运用，

液态高铅渣直接还原新工艺的试产成功标志着我国铅冶炼技术又上了一个新高度；在锌冶炼生产方面，我国骨干锌冶炼企业通过技术升级，先进的锌冶炼技术得到更多的采用，绝大部分采用先进的电解炼锌法生产，世界先进的常压富氧直接浸出炼锌工艺也于 2008 年顺利投产。

随着技术装备水平的提升，有色金属产品质量明显提高。目前，我国有色金属冶炼产品的质量已居世界先进水平。铜、铝、铅、锌、锡、镍、银、钴、特种铝、铝合金 10 种产品的 64 个品牌已先后在伦敦金属交易所和伦敦金银市场注册；在国家开展的历次质量抽查中，合格率始终保持在较高水平；早期出现较多的产品质量一致性差、表面质量差、包装质量差的老问题，已得到很大程度改善。

总之，自改革开放以来，特别是近 10 年，我国有色金属工业在自主研究、消化吸收和不断改造创新的基础上，获得了一大批重要科技成果，并成功应用于生产实际，在技术进步、改善品种质量方面取得明显成效，实现了有色金属产业结构的优化升级，增强了我国有色金属行业的国际竞争力，并保持着持续快速发展的势头。

1.2 有色金属冶炼生产的特点

1.2.1 有色金属冶炼生产工艺简介

有色金属包括除铁、锰、铬以外的 70 多种金属。按照金属的密度、化学特性、自然界中的分布情况等，有色金属分为四类：轻金属、重金属、稀有金属和贵金属。其中，轻金属包括铝、镁、铍、钛、钾、钠、锂、钙、锶、钽等，相对密度均小于 5.0，且具有很强的化学活性；重金属包括铜、镍、钴、铅、镉、铋、锌、锡、锑、汞等，它们的相对密度大于 5.0，化学性质一般不如轻金属活泼^[3]；稀有金属包括钨、钼、钨、铌、钽、稀土金属等，因制取和使用很少而得名；贵金属包括金、银、铂族金属等，因其价格比一般常用金属高昂而得名，其化学性质最稳定，一般不与氧直接起反应，又称为惰性金属。

我国各类有色金属自然资源分布状况不一，根据矿物原料和各金属本身的特性不同，冶金提取方法也多种多样，但总体上可归结为以下三种方法^[4]。

(1) 火法冶金。它是指在高温下矿石或精矿经熔炼与精炼反应及熔化作业，使其中的金属与脉石和杂质分开，获得较纯金属的过程。整个过程一般包括原料准备、熔炼和精炼三个工序。该过程所需能源主要靠燃料燃烧供给，也有依靠该过程中的化学反应热来提供的。

(2) 湿法冶金。它是在常温（低于 100℃）常压或高温（100~300℃）高压下，用溶剂处理矿石或精矿，使所要提取的金属溶解于溶液中，而其他杂质不溶

解, 然后再从溶液中将金属提取和分离出来的过程。由于绝大部分溶剂为水溶液, 故也称为水法冶金。该方法主要包括浸出、分离、富集和提取等工序。

(3) 电冶金。它是利用电能提取和精炼金属的方法。按电能利用形式可分为两类: 电热冶金, 即利用电能转变成热能, 在高温下提炼金属, 本质上与火法冶金相同; 电化学冶金, 即用电化学反应使金属从含金属的盐类水溶液或熔体中析出。前者称为水溶液电解, 如铜的电解精炼和锌的电解沉积, 可归入湿法冶金; 后者称为熔盐电解, 如电解铝, 可列入火法冶金。

有色冶金工艺过程, 包括许多单元操作和单元过程。典型单元冶金过程包括以下内容。

(1) 焙烧: 指将矿石或精矿置于适当的气氛下, 加热至低于它们的熔点温度, 发生氧化、还原或其他化学变化的过程。其目的是改变原料中提取对象的化学组成, 满足熔炼或浸出的要求。

(2) 煅烧: 指将碳酸盐或氢氧化物的矿物原料在空气中加热分解, 除去二氧化碳或水分, 变成氧化物的过程。煅烧也称为焙解, 如氢氧化铝煅烧成氧化铝, 作为电解铝原料。

(3) 烧结和球团: 将粉矿或精矿经加热焙烧, 固结成多孔状或球状的物料, 以适应下一工序熔炼的要求。例如, 烧结、焙烧是处理铅锌硫化精矿使其脱硫并结块的鼓风炉熔炼前的原料准备过程。

(4) 熔炼: 将处理好的矿石、精矿或其他原料, 在高温下通过氧化还原反应, 使矿物原料中金属组分与脉石和杂质分离为两个液相层即金属(或金属硫)液和熔渣的过程, 它也称为冶炼。熔炼按作业条件可分为还原熔炼、造钼熔炼和氧化吹炼等。

(5) 火法精炼: 在高温下进一步处理熔炼、吹炼所得含有少量杂质的粗金属, 以提高其纯度。例如, 火法炼锌得到粗锌, 再经蒸馏精炼成纯锌。火法精炼的种类很多, 如氧化精炼、硫化精炼、氯化精炼、熔析精炼、碱性精炼、区域精炼、真空冶金、蒸馏等。

(6) 浸出: 用适当的浸出剂(如酸、碱、盐等水溶液)选择性地与矿石、精矿、焙砂等矿物原料中金属组分发生化学作用, 并使之溶解而与其他不溶组分初步分离的过程。目前, 世界上大约 15% 的铜、80% 以上的锌、几乎全部的铝、钨、钼都是通过浸出, 与矿物原料中的其他组分初步分离。

(7) 液、固分离: 该过程是将矿物原料经过酸、碱等溶液处理后的残渣与浸出液组成的悬浮液分离成液相与固相的湿法冶金单元过程。在该过程的固、液之间一般很少再有化学反应发生, 主要是用物理方法和机械方法进行分离, 如重力沉降、离心分离、过滤等。

(8) 溶液净化: 指将矿物原料中与欲提取的金属一道溶解进入浸出液的杂质

金属除去的湿法冶金单元过程。净化的目的是使杂质不至于危害下一工序对主金属的提取。其方法多种多样，主要有结晶、蒸馏、沉淀、置换、溶剂萃取、离子交换、电渗析和膜分离等。

(9) 水溶液电解：指利用电能转化的化学能使溶液中的金属离子还原为金属而析出，或使粗金属阳极经由溶液精炼沉积于阴极。前者从浸出净化液中提取金属，故又称为电解提取或电解沉积（简称电积），也称为不溶阳极电解，如铜电积、锌电积；后者以粗金属为原料进行精炼，常称为电解精炼或可溶阳极电解，如粗铜、粗铅的电解精炼。

(10) 熔盐电解：即利用电热维持熔盐所要求的高温，又利用直流电转换的化学能自熔盐中还原金属，如铝、镁、钠、钽、铌的熔盐电解生产。

1.2.2 有色金属冶炼生产的特点

有色金属品种多、冶炼工艺多样，其冶炼生产过程与一般工业过程相比，具有其特殊性。

(1) 生产流程长。有色金属矿石的冶炼，由于其矿石或精矿的矿物成分极其复杂，含有多种金属矿物，不仅要提取或提纯某种金属，还要考虑综合回收各种有价金属，以充分利用矿物资源和降低生产费用，造成生产工艺流程长。例如，锌湿法冶金生产过程需通过原料制备、氧化焙烧、浸出、净化、电解沉积、熔铸等多道生产工序。由于重金属的矿床大多是多金属共生矿，并多以硫化矿的形态存在，除了主流程冶金生产过程外，还有其他伴生金属的回收、制酸、烟尘与废渣处理等多个生产工序。对于铜冶金生产过程，主流程首先是原料精矿的制备与处理过程；其次是闪速熔炼生产铜锍工序；再次是吹炼生产粗铜工序；然后通过火法精炼进一步提纯，生产阳极板；最后通过电解工序获得电铜，并通过熔铸工艺后获得铜锭产品。轻金属中，氧化铝的生产最具代表性，氧化铝的主要生产方法是拜耳法，它经铝土矿的破碎、磨矿、配料、溶出、分解、蒸发以及火煅烧等多道工序后获得氧化铝产品。针对我国一水硬铝石型的铝土矿，许多氧化铝企业采用了与烧结法相结合的混联法生产氧化铝，还创造出了我国独特的选矿-拜耳法生产氧化铝。

(2) 工艺机理复杂。有色冶金生产是利用电能、热能、化学能等多种不同形式能量相互传递与转换，完成物理与化学反应和相变反应以提取有价金属的过程^[5]。有色冶金体系则属于多元多相的复杂体系，体系中往往是气、液、固三相共存，在流场、温度场、浓度场，以及应力场或/和电场、磁场等多物理场交互作用下，同时存在着复杂的物理和化学反应过程。这个过程不仅有复杂的宏观热平衡和物料平衡问题，还存在着微观的冶金热力学、冶金反应动力学、冶金物理化学以及物质结构等复杂的关系。整个生产常常处于一个非平衡（冶金生产过程