

“十一五”国家重点图书出版规划项目

中国有色金属丛书

The Resource Recycling of Nonferrous Metal
Fundamental and Approach

郭学益 田庆华 编著



有色金属资源循环 理论与方法

 中南大学出版社

“十一五”国家重点图书出版规划项目

中国有色金属丛书

The Resource Recycling of Nonferrous Metal
Fundamental and Approach

郭学益 田庆华 编著



有色金属资源循环 理论与方法

 中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

有色金属资源循环理论与方法/郭学益编著. —长沙:

中南大学出版社, 2007. 7

ISBN 978-7-81105-570-2

I. 有... II. 郭... III. 有色金属—资源利用—研究 IV. TG146

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 102047 号

有色金属资源循环
理论与方法

郭学益 田庆华 编著

☐责任编辑 邓立荣

☐责任印制 文桂武

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

☐印 装 长沙市华中印刷厂

☐开 本 730×960 1/16 ☐印张 27.5 ☐字数 502 千字

☐版 次 2008 年 1 月第 1 版 ☐2008 年 1 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-81105-570-2

☐定 价 50.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

郭学益 1966 年生，籍贯湖南望城。工学博士，博士后，现任中南大学教授，博士生导师，日本东京大学客座教授。美国 TMS 学会、日本金属学会、资源与素材学会会员，中国有色金属学会重金属学术委员会理事，中国材料学会环境材料分会理事。研究方向为有色金属资源循环利用与环境材料制备。



主持完成包括国家“863”计划、国家高新技术产业化示范工程、国家自然科学基金等课题研究，在有色金属资源循环及先进电池材料、环境材料等方面拥有系列原创性成果。获省部级科技进步奖 4 项、2006 年度湖南十大杰出青年科技创新奖、2006 年度教育部新世纪优秀人才支持计划。



田庆华 1981 年生，籍贯四川宜宾。中南大学优秀青年教师，工学博士，曾任湖南省学联副主席。研究方向为有色金属资源循环、金属泡沫材料及功能粉体材料制备与应用研究。编著出版学术专著 1 部，参编研究生教材 1 部，内部刊物 2 部，发表高水平学术论文 20 余篇，主持或参与科研产业化项目近 10 项，曾获省级以上奖励近 10 项。

序

有色金属是我国国民经济及社会发展不可缺少的重要材料，随着经济的持续增长，我国有色金属需求将不断上升。但我国有色金属工业面临严重的资源、能源和环境问题，实现有色金属资源循环利用是解决上述问题的有力措施，是促进我国有色金属产业可持续发展的有效途径。

郭学益教授是一位思维活跃、富于创新的有作为的青年学术带头人。近年来，他带领他的学术团队积极探索，不断实践，在有色金属提取及资源循环利用和环境友好材料制备方面开展了一系列的前沿性工作，取得了卓有价值的成果，为该书的成稿及出版发行奠定了坚实的基础。

该书基于我国有色金属资源的现状及产业发展状况，阐述了有色金属资源循环的特点和意义，建立了有色金属资源循环利用的理论和实践基础，并以典型有色金属资源循环为例，介绍了我国有色金属资源循环的现状并展望了发展前景。

生命周期评价是评价产品或材料在其整个生命周期过程中行为的工具。它在有色金属提取及资源循环中的应用，对促进资源、能源利用效率的提高及环境改善具有指导作用。

物质流分析是对经济活动中物质流动过程中物质的投入和产出进行量化分析，建立物质投入和产出清单。对有色金属的物质流进行分析，可为实现有色金属的高效循环利用提供依据。

清洁生产是有色金属提取和资源循环利用可持续发展的重要措施。通过实施清洁生产，可合理利用有色金属原生资源，循环利用有色金属二次资源，并且生产过程环境友好。

在有色金属资源循环的过程中，加强环境友好材料的开发，不仅有利于提高资源的再生利用率，并且可大大降低产品及生产过程所造成的环境负荷。

生态设计是从源头解决资源、能源利用效率及环境问题的有效工具，通过有色金属的生态设计，对于节约资源、改善环境、提高经济效益和促进经济增长方式转变都具有特别重要的意义。

该书内容翔实，层次清楚，是一部系统阐述有色金属资源循环理论与方法的专著，不但具有很高的学术价值，而且对实际过程具有指导作用。该书的出版对加强我国有色金属资源循环研究和实践、促进有色金属产业可持续发展具有积极的作用。

中国科协副主席

中国工程院院士

中南大学校长

董伯云

2007 年 8 月

前 言

人类 21 世纪的奋斗目标是建立一个可持续性的与自然和谐发展的社会，但是由于一直以来追求经济的增长及物质生活的丰富，导致产业活动不断扩张、资源过度开采、能源不断消耗、环境负荷持续加重。只有重新审视我们的经济模式、生产和生活方式，发展循环经济，构建循环型社会，才能促使我们的经济社会朝可持续性方向发展。

有色金属是人类赖以生存和发展的基础，它的应用已深入到国民经济和人们生活的各个领域，有色金属的生产量和消费量标志着一个国家和地区的综合实力和经济发展水平。随着经济的不断增长，有色金属的需求量日益增长。巨大的市场需求刺激了我国有色金属产业的发展，现在我国有色金属产业规模迅速跃居世界第一位。如 2006 年我国十种常用有色金属总产量超过了 1900 万 t，其中铜、电解铝、铅、锌、镍、锡、锑、镁、钛等均达到历史最高产量。

显然，我国有色金属产业在规模不断扩张的同时，面临的问题和矛盾也日益突出。特别是资源、能源、环境问题，已经对可持续性发展构成了严重威胁。资源方面，我国有色金属一次原生矿产资源经过历年的开采，矿石品位下降，资源日趋枯竭，许多有色金属资源开采的动态保证年限已非常有限。现在我国有色金属生产产能与自给资源供应的矛盾相当突出，生产的正常进行只能依靠国外原料进口。能源方面，我国有色金属工业一直是高能耗行业，单位能耗较国外先进水平高出数倍，同时非洁净能源的使用又导致了严重的环境问题。环境方面，由于矿石品位下降，导致开采过程产生大量的尾矿废石，对环境造成严重负荷。在有色金属选矿、冶炼及加工过程中，产生数量巨大的废渣、废气和废水以及温室效应气体二氧化碳，所有这些都是导致环境恶化的根本之源。

实现有色金属资源循环是构筑我国循环经济的重要内容，是促进有色金属产业可持续发展的有力措施和有效途径。现在数以亿吨的有色金属已经进入人们的

生活领域,每年大量加工和大量废弃可为有色金属产业提供充足的可循环利用的物料。有色金属性质稳定,虽历经生命周期而可保持元素性质稳定,只要经过必要的物理化学过程都可以还原为金属或相关产品,这些都是实现有色金属资源循环的前提和基础。当然有色金属资源循环物料组成和性质显然不同于一次原生矿产资源,有其独特之处。循环利用的关键问题还有待深入研究,高效、经济、环境友好工艺开发应用也是目前工作重点。我们有理由相信:只要充分利用有色金属二次资源,实现资源循环利用,不但可以有效解决我国有色金属工业资源匮乏问题,降低对一次原生矿产资源的依赖,而且可以大幅度降低能源消耗,并且资源循环过程环境友好,从而促进我国有色金属产业的可持续发展。

笔者及其课题组一直从事有色金属冶金教学、科研和实践工作,对有色金属提取和资源循环利用有着深刻的认识和深切的体会。作为从事有色金属行业的科技工作者,深感有责任和义务为我国有色事业的可持续发展做出努力。基于这样的出发点,笔者带领研究室课题组成员,针对我国有色金属产业现状,结合学科发展及科技前沿以及自己多年的研究成果和体会,撰写了此书,旨在介绍有色金属资源循环的理论及方法,为有色金属资源循环实践提供指导和帮助。

本书共分6章。第1章介绍了有色金属资源循环与利用的基本情况。第2章着重阐述了生命周期评价及其在有色金属提取及资源循环领域的应用。第3章为有色金属物质流分析。旨在建立重要有色金属的物质流向图,可为实现有色金属的高效循环利用提供依据。第4章内容为清洁生产,是有色金属提取和资源循环利用可持续发展的重要措施。第5章为环境材料,力图通过有色金属提取及资源循环利用促进环境友好先进材料的开发应用。第6章重点阐述了生态设计的方法及在有色金属领域中的应用。通过采用生态设计方法,从源头解决有色金属提取及资源循环过程资源、能源利用效率及环境问题。

本书是笔者及其研究室集体智慧的结晶。在本书的写作过程中,宋瑜、段炼、徐刚、刘海涵、卿波、李平、冯宁川等参与了本书的撰写,为本书的出版贡献了聪明才智,付出了辛勤劳动。

感谢日本东京大学的山本良一教授,正是由于他拯救地球的决心和推动绿色革命的雄心,促使了笔者对我国有色金属事业可持续发展的思考和实践资源循环的行动。感谢黄伯云院士、左铁镞院士、刘业翔院士、邱定番院士和张传福教授、

张多默教授、王天民教授、肖定全教授，他们的教诲、鼓励和支持，是笔者及其研究组成员从事资源循环事业的力量源泉。感谢中南大学冶金学院的领导、老师和同事们，正是由于他们的支持和帮助，使笔者具备了深厚的冶金专门知识以及对行业的深刻认识；感谢湖南开天新材料有限公司及其有远见的领导，他们为有色金属资源循环利用的实际行动给本书的成稿提供了有力的支持。

卓越和完美一直是笔者学习和工作的执着追求。笔者力图在向读者提供一部比较完善和全面的专门性著作，本书虽历经数年，数易其稿，笔者也为此付出了艰辛和努力，但仍深感其中的不足，恳请读者给予批评与指正。

编著者

2007 年 8 月

目 录

第一章 有色金属资源循环与利用	(1)
1.1 有色金属矿产资源	(2)
1.1.1 全球有色金属矿产资源概况	(2)
1.1.2 中国有色金属矿产资源现状	(4)
1.1.3 中国有色金属矿产资源特点	(4)
1.1.4 中国主要有色金属矿产资源	(11)
1.1.5 中国有色金属资源未来需求预测及资源保证	(15)
1.2 资源循环的科学界定	(16)
1.2.1 资源循环的基本概念	(17)
1.2.2 资源循环的核心内涵	(20)
1.2.3 资源循环的重要性和必然性	(22)
1.3 有色金属资源循环的理论基础	(23)
1.3.1 有色金属资源循环的特点	(23)
1.3.2 有色金属资源循环的目标原则	(24)
1.3.3 有色金属资源循环的基本理论	(25)
1.3.4 有色金属资源循环的学科基础及关联学科	(27)
1.3.5 有色金属资源循环的关键科学问题	(29)
1.3.6 有色金属资源循环的研究内容	(30)
1.3.7 有色金属资源循环的基本方法	(31)
1.4 国内外有色金属资源循环现状及发展	(33)
1.4.1 发达国家资源循环发展现状和趋势	(33)
1.4.2 我国主要有色金属循环利用现状	(35)
1.4.3 我国主要有色金属循环利用现状分析	(42)
1.4.4 资源循环是有色金属工业可持续发展的有效途径	(46)

1.5 有色金属资源循环实践	(47)
1.5.1 从工业废渣中循环利用有色金属	(47)
1.5.2 含锌烟尘循环利用有色金属	(51)
1.5.3 废旧电池循环利用有色金属	(54)
1.5.4 有色金属铜二次资源循环利用	(59)
1.5.5 从含钒固体废弃物中回收金属钒	(62)
1.6 结束语	(68)
参考文献	(69)

第2章 生命周期评价及其在冶金中的应用 (71)

2.1 LCA的发展及定义	(71)
2.1.1 LCA的发展	(71)
2.1.2 LCA的概念	(76)
2.1.3 LCA的评价对象	(77)
2.1.4 LCA的意义	(78)
2.2 LCA的基本原则及方法	(79)
2.2.1 LCA方法的基本原则	(79)
2.2.2 LCA方法的主要思路	(79)
2.2.3 LCA的理论框架	(80)
2.2.4 LCA的局限性	(90)
2.2.5 材料LCA的方法	(91)
2.3 LCA的数据库及应用软件	(92)
2.3.1 LCA的数据库	(92)
2.3.2 LCA的应用软件	(95)
2.4 LCA的应用	(97)
2.4.1 固体废弃物资源化方面的应用	(99)
2.4.2 清洁生产领域的应用	(101)
2.4.3 LCA在可持续环境管理中的应用	(103)
2.5 LCA在有色金属领域的应用	(104)
2.5.1 在矿产和金属产业中的应用	(105)
2.5.2 黄金提取方法的环境负荷评价	(113)
2.5.3 韶冶ISP铅锌生产过程环境负荷评价及改进措施	(115)

2.5.4 再生铜的生命周期评价	(127)
2.5.5 我国电解铝工业综合生命周期评价	(131)
2.6 结束语	(137)
参考文献	(138)

第3章 有色金属物质流分析

(140)

3.1 物质流的概念及其发展	(140)
3.1.1 物质流的概念	(140)
3.1.2 物质流分析的发展	(140)
3.1.3 我国的物质流分析研究进展	(141)
3.2 物质流分析的理论方法	(142)
3.2.1 物质流分析的模型	(142)
3.2.2 物质流管理的内容和特点	(144)
3.2.3 以物质流分析为基础的指标体系	(145)
3.3 物质流分析与循环经济的关系	(148)
3.4 物质流分析对我国政策制定的影响	(149)
3.4.1 资源利用效率及其政策意义	(149)
3.4.2 物质循环效率与静脉产业的发展政策	(150)
3.5 物质流分析方法的应用	(150)
3.5.1 在我国水泥制造业中的应用	(150)
3.5.2 在我国磷物质循环中的应用	(152)
3.6 物质流分析方法在有色金属工业中的应用	(157)
3.6.1 有色金属物质流分析方法的提出	(157)
3.6.2 有色金属物质流分析方法的研究	(158)
3.7 有色金属物质流分析方法的应用实例	(161)
3.7.1 欧洲铜物质流分析	(162)
3.7.2 我国铜物质流分析	(168)
3.7.3 瑞典的镉物质流分析	(178)
3.7.4 我国台湾地区镉资源的物质流分析	(187)
3.7.5 我国铅锌业物质流分析	(202)
3.8 结束语	(206)
参考文献	(207)

第 4 章 有色金属清洁生产	(210)
4.1 清洁生产概述	(210)
4.1.1 清洁生产的定义	(210)
4.1.2 清洁生产的原则	(211)
4.1.3 清洁生产的目的	(212)
4.1.4 清洁生产的内容	(213)
4.1.5 清洁生产的意义	(217)
4.2 清洁生产的方法学原理	(222)
4.2.1 清洁生产方法学的理论基础	(222)
4.2.2 末端治理与全过程控制理论	(223)
4.2.3 推进清洁生产的相关理论	(224)
4.3 国内外清洁生产现状及发展	(243)
4.3.1 国外清洁生产情况	(243)
4.3.2 国内清洁生产情况	(246)
4.4 有色金属清洁冶金生产实例	(254)
4.4.1 铜冶金的清洁生产	(254)
4.4.2 铝冶金的清洁生产	(264)
4.4.3 锌冶金的清洁生产	(269)
4.4.4 铅的清洁冶金	(275)
4.5 结束语	(287)
参考文献	(288)
第 5 章 环境材料	(290)
5.1 环境材料概论	(290)
5.1.1 引 言	(290)
5.1.2 环境与材料	(290)
5.1.3 环境材料的研究历史	(295)
5.1.4 环境材料的概念	(296)
5.1.5 环境材料的特征	(300)
5.1.6 环境材料的分类	(301)
5.1.7 环境材料研究应注意的问题	(309)

5.2 环境材料的研究内容	(311)
5.2.1 材料的循环再生设计	(311)
5.2.2 材料的评价理论	(313)
5.2.3 材料的生产模式	(317)
5.3 环境材料研究中的几个基本关系	(320)
5.3.1 环境材料与传统材料和新材料的关系	(320)
5.3.2 环境材料与发展的关系	(320)
5.3.3 环境材料与环境协调产品的关系	(320)
5.3.4 环境材料与材料的生命周期评价	(322)
5.4 有色金属环境材料的生态设计	(323)
5.4.1 努力降低温室效应气体排放量	(323)
5.4.2 促进持续的循环利用	(324)
5.4.3 限制使用有害物质和实施循环管理环境保护	(326)
5.4.4 金属制造过程与其他产业废弃物处理过程的融合	(327)
5.5 环境材料研究开发进展	(327)
5.5.1 不含有毒物质的材料	(327)
5.5.2 绿色环境化	(328)
5.5.3 可循环材料	(330)
5.5.4 更高的材料效率	(332)
5.5.5 可设计的材料	(332)
5.6 典型有色金属环境材料	(333)
5.6.1 无铅焊料	(333)
5.6.2 光触媒	(339)
5.6.3 储氢合金	(344)
5.6.4 无汞锌粉	(349)
5.7 结束语	(353)
参考文献	(354)

第6章 有色冶金生态设计

(356)

6.1 生态设计概述	(356)
6.1.1 生态设计的基本概念	(356)
6.1.2 生态设计的历史及发展	(358)

6.1.3	生态设计的普及	(365)
6.2	生态设计方法	(371)
6.2.1	生态设计的原则及战略	(371)
6.2.2	生态设计方法	(374)
6.2.3	生态设计过程	(377)
6.2.4	模块化设计	(378)
6.2.5	生态设计数据库和知识库	(382)
6.3	生态设计的应用	(383)
6.3.1	在金属材料领域中的应用	(383)
6.3.2	在无机非金属材料领域中的应用	(386)
6.3.3	在复合材料领域中的应用	(388)
6.3.4	机电产品生态设计	(392)
6.3.5	汽车轻量化设计	(397)
6.4	有色金属工业生态设计	(399)
6.4.1	生态设计对有色金属工业的意义	(399)
6.4.2	有色金属工业生态设计	(408)
6.4.3	生态设计在有色金属工业中的应用与实践	(413)
6.5	结束语	(422)
	参考文献	(423)

第1章 有色金属资源循环与利用

在人类社会发展的历史进程中,材料起着举足轻重的作用,成为推动人类文明进步和经济发展的车轮,是社会发展的标志之一。从历史发展的角度看,材料是人类文明进步的标志。人类社会早期就依据所用材料的不同,被分为石器时代、青铜器时代、铁器时代等,在当今社会,材料更是成为国民经济和社会发展的基础和先导,它与能源、信息并行,被视为现代高科技的三大支柱。纵观人类数千年的发展史,我们可以发现,社会的发展与进步,都与材料的发展密不可分,可以这样说,人类的文明进程在某种程度上是由材料所决定的,当人类文明进展面临瓶颈时,新材料的发明就带动了文明的又一次突破。

在为数众多的材料中,金属材料特别是有色金属材料以其为人类使用的时间最长、物化性能优异等优势占据着至关重要的地位。金属矿产的冶炼、加工和金属工具的制造、使用,对人类社会文明的发展起了极其重要的作用,也是人类社会由蒙昧转向文明的转折点之一。铜矿是最早被人类利用的有色金属矿产,早在距今 6000 多年前的新石器时代末期,人类在烧制陶器的过程中就冶炼出了铜和锡,创造了铜的冶炼技术,使人类社会进入了青铜器时代。随后,冶金技术的发展提供了铁、铅等金属及各种合金材料,用这些材料能制造性能更优异的生产工具、生活器具和武器,从而提高了社会生产力,推动了社会的进步。

众所周知,所有材料都必须以资源为依托,有色金属材料也不例外,必须有丰富的有色金属矿产作为资源储备和来源。刚刚过去的 20 世纪是人类大量消耗资源、快速积累财富、高速发展经济的世纪,科技的进步和发展使人类焕发出前所未有的创造力。在短短 100 多年间,全球 GDP 增长了 18 倍,人类所创造的财富超过了以往历史时期的总和。与此同时,地球资源消耗的速度和数量也随着科技的进步和经济的发展而迅猛增长,钢、铜、铝的年消费量,由 1900 年的 2 780 万 t、49.5 万 t 和 6 800 t 增加到 2006 年的 11.21 亿 t、2 540 多万 t 和 3 400 万 t,分别增长了 40 倍、51 倍和 5 000 倍……世界经济的高速发展和人口的飞速增长、工业化、城市化、庞大的人口数量和不断提高的生活水平极大地消耗着地球资源。

为了更有效地利用资源,世界各国都将可持续发展作为 21 世纪的发展战略。可持续发展是指,既可以满足当代人的需要,又不损害后代人需求的发展,就是说,经济建设与人口、资源和环境要协调发展,既要达到发展经济的目的,又要保护人类赖以生存的自然资源和环境,使人类能够连续不断地发展。有色金属产业

要实现可持续发展,就必须走资源循环之路,实现人与自然和谐、健康发展。本书将立足有色金属学科最前沿,从生命周期评价、物质流分析、清洁冶金、环境材料、生态设计等方面入手,全面阐述有色金属资源循环的最新理论与实践动态。

1.1 有色金属矿产资源

中国金属矿产特别是有色金属资源总量比较丰富,是配套程度较高的少数国家之一。截至2004年底,我国已发现173种矿产,矿产地(点)近20万处,已探明储量的矿种达155种。但我国人均矿产资源占有量不到世界平均水平的一半,到2010年,45种主要金属资源中可以保证需求的只有23种,到2020年将只有6种。金属矿产资源的分布相对不集中和高强度消耗,以及开发过程中造成的生态环境破坏,是中国资源发展日益突出的问题。全面转向可持续发展战略对于中国金属资源来说是非常必要和及时的。这意味着要加强《矿产资源法》执法力度,淘汰落后生产工艺,加快利用海外金属资源,提高有色金属的循环利用率。

1.1.1 全球有色金属矿产资源概况

有色金属矿产资源泛指由地质作用形成于地壳中以一定形态存在,具有重要经济价值的有色金属自然资源。它包括铜、铅、锌、钴、镍等常用有色金属矿产,金、银、铂、钯等贵金属矿产,铀、镭、钍等放射性金属矿产,铌、钽、镧、铈等稀有、稀土金属矿产等。目前,全球已经发现的有色金属矿产资源近200种,这些有色金属矿产资源广泛用于工农业生产、高新技术和国防建设等领域,囊括能源、交通、电力、冶金、钢铁、机械、制造、航天、化工、建筑、运输、医药卫生、计算机、电子、通讯、新材料等各行各业,贯穿于人类生活始终并与国家安全密切相关。

20世纪人类消耗的自然资源总量超过了以往历史中消耗的总和。特别是二次世界大战以后,全球经济发展较快,矿产资源的产量与消耗量增长加快,近20年来,每年投入世界经济中的矿物原料数量为90~120亿t(包括石油、天然气),如果包括建材,这个数量将超过250亿t。毫不夸张地说,没有金属矿产资源就没有今天的世界文明,就谈不上人类社会的发展。

先期工业化国家的发展经验表明,工业化过程经济的快速增长与矿产资源的大量消耗密切相关,经济增长与人均矿产资源的消耗呈“S”形曲线。每个国家的工业化过程因其发展历史及国情不同,S形曲线的波长或工业化过程经历的时间长短互有差异,但从加速工业化开始到完成工业化的过程中,人均资源消费量成数倍或十多倍增长的规律却是共有的。