

中国工程院重点项目

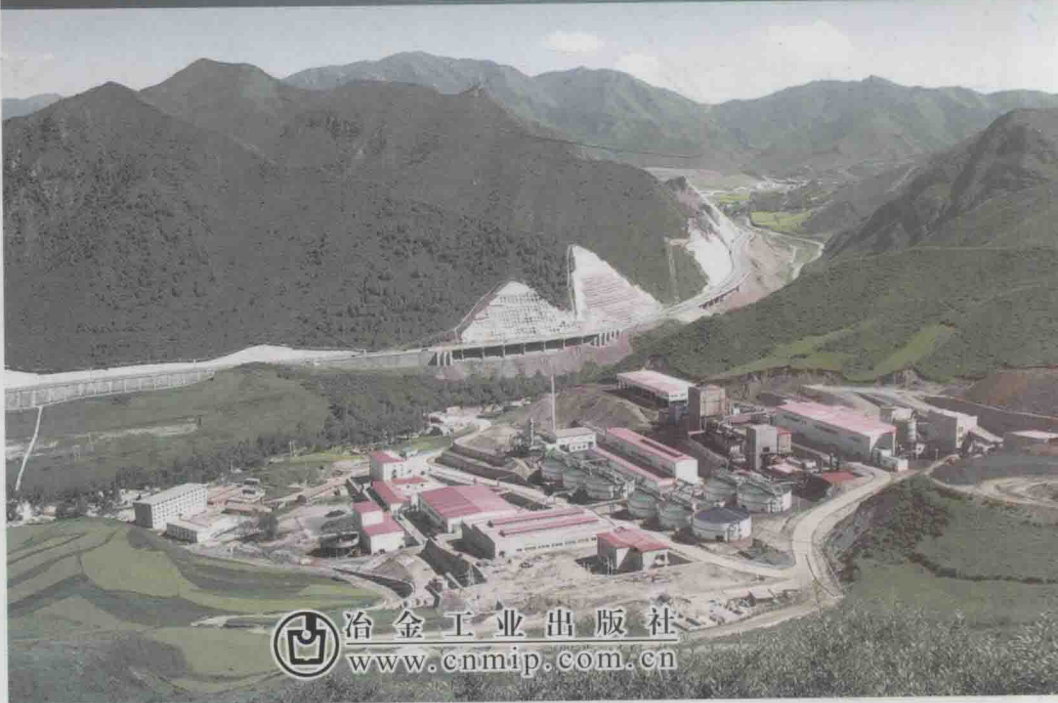
稀贵金属冶金

新进展

Progress of

Rare and Precious Metal Metallurgy

邱定蕃 王成彦 主编 ■



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

中国工程院重点项目

稀贵金属冶金 新进展

Progress of
Rare and Precious Metal Metallurgy

邱定蕃 王成彦 主编 ■

北 京

冶金工业出版社

2019

内 容 提 要

本书系统地介绍了近十年来我国在稀土、钛、钨、钼、铌、锂、铷、铯、钒、钽、铌、铍、锆、钪、镓、铟、锗、硒、碲、金、银、铂族金属、锡、镍、钴、锑、铋等稀有/稀散/难熔/稀土/贵金属等金属冶金领域所取得的研究进展,包括主要生产方法及主要技术特点、主要技术经济指标、环境、能耗,以及发展趋势等。

本书可供有色金属冶金领域广大科技人员、管理者、工程技术人员和教学人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

稀贵金属冶金新进展/邱定蕃,王成彦主编. —北京:冶金工业出版社,2019.4

ISBN 978-7-5024-8074-5

I. ①稀… II. ①邱… ②王… III. ①稀有金属—有色金属冶金 ②贵金属冶金 IV. ①TF84 ②TF83

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 064680 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 刘小峰 曾 媛 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-8074-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2019 年 4 月第 1 版,2019 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm;30 印张;585 千字;464 页

146.00 元

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

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

中国工程院重点项目

“稀贵金属及部分重金属冶金发展战略研究”

项目组成员

高级顾问：张国成 何季麟 陈 景 黄小卫

项目组长：邱定蕃

副组长：王成彦

稀土组

组长：黄小卫 徐志峰

执笔：张永奇 焦云芬 王春梅 肖燕飞 杨宏博 徐 旻

参加：冯宗玉 聂华平 王志强 杨幼明 王良士 王 猛

赵龙胜 孙 旭 彭新林 龙志奇

钨钼铼组

组长：赵中伟

执笔：赵中伟 刘旭恒

参加：刘旭恒 杨金洪 杨晓明 王正娟 刘 萌 刘沛源

张 鹏

钛组

组长：王向东 阎守义

执笔：王向东 阎守义

参加：郝 斌 黄 敏 杨 峰 侯盛东 姜宝伟 曲银化

刘正红

锆铪组

组长：车小奎

执笔：王力军 吴延科

参加：张建东

钽铌铍组

组长：陈 林

执笔：顾维平 白掌军 李军义 李仲香 鲁 东

审稿：王 莉 李 峰

锂铷铯组

组长：林如海 王中奎 徐爱华

执笔：李冰心

参加：罗宁川 郭 宁

镍钴钒组

组长：林如海 王中奎 徐爱华

执笔：徐爱东

参加：高海亮 范润泽 刘 磊

铜硒碲组

组长：杨 斌

执笔：杨 斌 蒋文龙 邓 勇

参加：查国正 黄大鑫 张丁川 陈思峰

镓锗组

组长：陈少纯

执笔：陈少纯

参加：曹洪杨 金明亚

金组

组长：韦华南 刘江天 郑 晔

执笔：郝福来 张世镖

参加：霍明春 付文姜 陈明军

银组

组长：杨 斌

执笔：杨 斌 李一夫

参加：张 环

铂族金属组

组长：崔 宁

执笔：崔 宁

参加：张昆华

锡组

组长：杨 斌

执笔：杨 斌 李一夫

参加：徐俊杰

锑组

组长：王成彦

执笔：王成彦

参加：陈永强 马保中

综合组

组长：王成彦 陈永强

参加：马保中 姚志超 揭晓武 张永禄

前 言

有色金属包括 64 种元素，冶金技术十分复杂。改革开放以来，中国从发达国家引进了不少先进技术，经过消化、吸收和再创新，许多工艺技术已达到国际先进水平。近年来，在国家对技术创新的高度重视和大力支持下，中国产生了大量具有自主知识产权的新工艺和新装备，冶金技术取得了巨大进步。为了总结有色冶金技术成果，推动今后的可持续发展，2013 年，邱定蕃、张国成、何季麟三位院士向中国工程院建议立项“有色冶金（Cu、Al、Pb、Zn、Mg）节能减排技术及潜力研究”，项目得到了工程院的高度重视并列为工程院重点项目（编号 2012-XZ-19）。由于有色金属品种多，流程复杂各异，在有限时间内，我们只能针对占有有色金属产量 95% 的五大金属开展研究，作为我们的第一阶段研究任务。并计划在完成该项目研究之后，再继续申请立项研究其他有色金属，特别是具有重要战略意义的稀贵金属，作为第二阶段研究任务。经过多位院士和专家的努力工作，“有色冶金（Cu、Al、Pb、Zn、Mg）节能减排技术及潜力研究”项目在 2015 年顺利结题，并向工程院、工信部等部委提交了咨询报告，同时在项目研究的基础上编辑出版了 47 万字的《有色冶金与环境保护》一书。

在第一阶段的研究过程中，大家始终坚持“高效、节约”的精神，项目经费节省了一半。三位院士经过商议，决定不再向中国工程院申报新的研究经费，而是用第一阶段剩余的费用继续完成其他有色金属，特别是稀贵金属的战略研究。2017 年，在征得工程院有关领导的同意并批准之后，我们开展了“中国稀贵金属及部分重金属冶金发展战略研究”。由于涉及 42 种有色金属，特邀请了国内有关企业集团、高校

及研究所的 50 多位专家一起工作。经过一年的企业实地调查,参阅了大量文献资料,并进行了深入论证研究之后,向工程院提交了《中国稀贵金属及部分重金属冶金发展战略研究报告》,完成了第二阶段的研究任务。

以上两项战略研究涉及 47 个元素,比较全面和完整地反映了中国有色金属冶金的全貌及近十多年来的发展过程、趋势和存在问题,提出了一些建议供有关部门参考,以便进一步制订有色金属冶金的可持续发展战略。

在第二阶段的研究过程中,专家们提供了大量宝贵的文献资料和实地调研结果,在几次研讨会上发表了许多有价值的学术观点。为了保存这些珍贵的资料供大家参考,我们编写了《稀贵金属冶金新进展》,稀贵金属占了本书的大部分内容,但也包含了镍钴锡锑铋等重有色金属。实际上,本书是 2015 年出版的《有色冶金与环境保护》的姐妹篇。本书是数十位专家学者辛勤工作的结果,相信对广大的科技人员、大专院校师生和有关管理部门,了解近十多年来中国有色冶金的现状和今后的发展趋势具有重要的参考价值。

因编者水平所限,书中难免有不足之处,敬请谅解。

编 者

2018 年 10 月于赣州丫山

目 录

稀 土 篇

1 中国稀土冶金概况	3
1.1 稀土的应用和需求	3
1.2 中国稀土资源情况	11
1.3 中国稀土产业现状	18
1.4 中国稀土科技与产业发展历程	21
2 稀土冶金的主要方法	29
2.1 离子吸附型稀土矿冶金	29
2.2 包头混合型稀土精矿冶金	39
2.3 氟碳铈矿冶金	46
2.4 独居石和磷钇矿冶金	49
2.5 稀土化合物分离提纯	51
2.6 稀土二次资源回收	56
2.7 稀土火法冶金	62
2.8 稀土行业环保指标分析	70
2.9 存在的问题	71
3 国内外稀土冶金方法的比较	72
3.1 国外稀土冶金方法	72
3.2 国内稀土矿物冶金方法	74
3.3 稀土火法冶金	74
4 稀土冶金的发展趋势	76
4.1 国外稀土冶金发展趋势	76
4.2 国内稀土冶金发展趋势	77

参考文献	82
------------	----

钨 钼 篇

5 钨钼冶金概述	93
5.1 钨的性质、应用和资源	93
5.2 钼的性质、应用和资源	95
5.3 钨、钼产业现状	96
6 钨钼冶金	101
6.1 钨冶炼主要方法	101
6.2 钼冶炼主要方法	108
6.3 钨钼冶金的环境保护	116
6.4 钨钼冶炼存在的主要问题	118
参考文献	121

钛 锆 钨 篇

7 钛冶金	127
7.1 钛冶金概况	127
7.2 钛冶金主要方法	132
7.3 钛冶金发展趋势	138
8 锆钨冶金	139
8.1 锆钨冶金概况	139
8.2 锆钨冶金主要方法	146
8.3 锆钨冶金发展趋势	160
参考文献	161

钽 铌 铍 篇

9 钽铌冶金	173
9.1 钽铌冶金概况	173

9.2 钽铌冶金主要方法	180
9.3 国内外钽铌冶金方法比较	185
9.4 钽铌冶金与新材料发展趋势	186
10 铍冶金	190
10.1 铍冶金概况	190
10.2 铍冶金工艺与装备	201
10.3 国内相关产品技术的现状及差距	213
10.4 铍冶金、加工技术与产品发展方向	213
参考文献	216

锂铷铯篇

11 锂冶金	227
11.1 锂冶金概况	227
11.2 锂冶金主要方法	232
11.3 国内外冶金方法的比较	235
11.4 锂冶金发展趋势	236
12 铷铯冶金	238
12.1 中国铷铯冶金概况	238
12.2 铷铯生产主要方法	242
12.3 铷铯冶金发展趋势	248
参考文献	250

稀散金属篇

13 镓冶金	257
13.1 中国镓冶金概况	257
13.2 镓冶金主要方法	260
13.3 国内外镓冶金方法比较	266
13.4 镓冶金的发展趋势	266

14 锗冶金	268
14.1 锗冶金概况	268
14.2 锗冶金主要方法	271
14.3 国内外锗冶金方法比较	276
14.4 锗冶金发展趋势	276
15 铟冶金	277
15.1 铟冶金概况	277
15.2 铟冶金主要方法	280
16 硒碲冶金	285
16.1 硒、碲冶金概况	285
16.2 硒碲冶金主要方法	288
16.3 国内外硒碲冶金方法比较	294
16.4 硒碲冶金发展趋势	296
17 铋冶金	297
17.1 铋冶金概述	297
17.2 铋冶金主要方法	299
17.3 铋冶金发展趋势	302
参考文献	304

金银铂族篇

18 金冶金	313
18.1 金冶金概况	313
18.2 黄金冶金主要方法	318
18.3 国内外冶金方法比较	334
18.4 黄金冶金的发展趋势	335
19 银冶金	338
19.1 银冶金概况	338
19.2 银冶金主要方法	340
19.3 国内外冶金方法比较	345

19.4 银冶金发展趋势	346
20 铂族金属	347
20.1 铂族金属冶金发展概况	347
20.2 铂族金属冶金主要工艺及装备	363
20.3 铂族金属冶金技术发展趋势	375
参考文献	377

镍钴钒锡锑铋篇

21 镍冶金	385
21.1 中国镍冶金概况	385
21.2 镍冶金主要方法	389
21.3 国内外镍冶金方法比较	398
21.4 镍冶金发展趋势	398
22 钴冶金	399
22.1 钴冶金概况	399
22.2 钴冶金工艺	402
22.3 国内外钴冶金方法比较	404
22.4 钴冶金发展趋势	404
23 钒冶金	405
23.1 中国钒冶金概况	405
23.2 钒冶金主要方法	409
23.3 国内外钒冶金方法比较	411
23.4 钒冶金发展趋势	413
24 锡冶金	414
24.1 锡冶金概况	414
24.2 锡冶金主要方法	416
24.3 国内外锡冶金方法比较	422
24.4 锡冶金发展趋势	423
25 锑冶金	424
25.1 中国锑冶金概况	424

25.2	铈冶金主要方法	430
25.3	铈冶金环境保护及能耗	438
25.4	铈冶金发展趋势	440
26	铈冶金	441
26.1	铈冶金概况	441
26.2	铈冶金主要方法	447
26.3	铈冶金发展趋势	454
参考文献		455

稀 土 篇

1 中国稀土冶金概况

1.1 稀土的应用和需求

稀土 (Rare Earth) 是化学元素周期表中 15 个镧系元素——镧 (La)、铈 (Ce)、镨 (Pr)、钕 (Nd)、钷 (Pm)、钐 (Sm)、铕 (Eu)、钆 (Gd)、铽 (Tb)、镝 (Dy)、钬 (Ho)、铒 (Er)、铥 (Tm)、镱 (Yb)、镱 (Lu), 以及与镧系同族的两个元素——钪 (Sc) 和钇 (Y), 共 17 种元素的总称 (RE)^[1]。

稀土是全球公认的重要战略资源, 被誉为“现代工业维生素”和“21 世纪新材料宝库”, 广泛应用于航空航天、国防军工、电子信息、智能装备、新能源、现代交通、节能环保等战略性新兴产业和国家重大工程, 对发展现代高新技术和国防尖端技术、改造提升传统产业等都发挥着不可替代的关键作用。世界各国对稀土资源的战略保障、稳定供应和高效应用均给予了高度重视。美国能源部的“关键材料战略”、日本文部科学省的“元素战略计划”都将稀土列为战略元素, 欧盟发布的《欧盟危急原材料》《用于国防技术的原材料: 欧盟供应链的关键》《欧盟关键原材料报告》等, 也将稀土列为对欧洲军事防务、经济发展至关重要的材料。我国《国务院关于促进稀土行业持续健康发展的若干意见》明确提出稀土是不可再生的重要战略资源, 《国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006—2020)》中, 也将稀土材料列入制造业领域优先发展的重点基础原材料^[2]。

60 多年来, 我国开发了一系列先进的稀土采选冶工艺技术, 建立了较完整的稀土工业体系, 成为世界稀土生产、出口和消费大国, 在世界上具有举足轻重的地位。我国稀土磁性材料、发光材料、催化材料及储氢材料等稀土功能材料的开发与应用研究不断取得重大突破, 稀土新材料科学技术取得长足的进步, 部分技术已达到或超过世界先进水平, 有力地推动了下游应用行业或产业的发展。

1.1.1 稀土的应用

稀土材料的应用遍及国民经济中冶金、机械、玻璃、陶瓷、石油、化工、电子、光学、磁学、医学、生物、航空航天、原子能工业等领域的 40 多个行业, 主要产品包括稀土盐类、稀土氧化物、稀土金属、稀土合金、稀土新材料 (稀土永磁材料、稀土储氢材料和稀土发光材料) 等。稀土应用分为传统领域 (冶金/