



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属 理论与技术前沿丛书
SERIES OF THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL FRONTIERS OF
NONFERROUS METALS

铂族金属冶金学

METALLURGY OF PLATINUM GROUP METALS

刘时杰 编著
Liu ShiJie



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团



国家出版基金项目

NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属理论与技术前沿丛书

铂族金属冶金学

METALLURGY OF PLATINUM GROUP METALS

刘时杰 编 著

Liu Shijie



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团

图书在版编目(CIP)数据

铂族金属冶金学/刘时杰编著. —长沙:中南大学出版社,2013.6
ISBN 978-7-5487-0871-1

I. 铂... II. 刘... III. 铂族金属—贵金属冶金
IV. TF83

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 097694 号

铂族金属冶金学

刘时杰 编著

☐责任编辑 史海燕

☐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:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙市宏发印刷有限公司

☐开 本 720 × 1000 B5 ☐印张 35 ☐字数 678 千字

☐版 次 2013 年 6 月第 1 版 ☐2013 年 6 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-0871-1

☐定 价 150.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换



内容简介

Introduction

铂族金属包括铂、钯、铑、铱、钌、锇 6 种金属,属稀有贵金属。因探明的矿产资源稀少并集中在少数国家且矿石中含量很低,所以金属价格十分昂贵,国家储备和民间收藏具有金融功能。因具有许多独特和优良的性质,在现代工业及高新科技领域有广泛、不能被其他金属或材料取代的特殊应用,被誉为“第一高技术金属”。本书共 12 章。其中 3 章介绍铂族金属的性质、资源及应用等基本知识。其余 9 章结合重有色金属冶金、无机化学、有机化学等交叉学科知识,系统全面地介绍了从矿产资源及二次资源中富集提取铂族金属,贵贱金属分离,贵金属相互分离、精炼及再生循环利用等方面的冶金专业知识和最新的技术发展信息,以及相应的劳动安全和环境保护知识。

本书可供从事该科技领域的科技人员和管理人员参考,也可供高校相关专业的师生作教学参考书。

作者简介

About the Author

刘时杰，研究员，研究生及博士后流动站进站课题研究指导教师。1961年毕业于昆明工学院(昆明理工大学)冶金系，在昆明贵金属研究所连续工作50年。一直从事从我国贵金属矿产资源、有色金属冶炼厂含贵金属中间产品及二次资源中提取贵金属的新技术、新工艺研究开发。先后承担国家“六五”至“九五”各个五年计划的重点科技(攻关)任务。解决了我国铂族金属冶金工程中许多重大科学技术问题，是该科技领域的创业者和学术、技术带头人之一，并为其发展和创新，为我国第一个“矿产铂族金属提炼中心”及“金川镍都”建设做出了突出贡献。获国家级科技进步奖特等奖、一等奖和部省级奖等十余次。独立编著或参编学术专著十部。1987年云南省人民政府授予“云南省首批有突出贡献的优秀专业技术人才称号”(一等奖)。1991年起享受国务院政府特殊津贴。2010年生平及业绩入编中国科协主编的《中国科学技术专家传略》-工程技术编-有色冶金卷3。

曾任原中国有色金属工业系统科技成果奖励评审委员、“跨世纪人才”及高级工程师和教授级高级工程师职称评审委员、云南省有色金属学会理事、云南省学位委员会硕士学位授权点及省教委高校重点学科评议组组员，国际贵金属学会(IPMI)会员、中国有色金属学会贵金属学术委员会委员、云南省专家协会会员、国家“九五”科技攻关项目首席专家。

学术委员会

Academic Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

王淀佐 中国科学院院士 中国工程院院士

委 员 (按姓氏笔画排序)

于润沧	中国工程院院士	古德生	中国工程院院士
左铁镛	中国工程院院士	刘业翔	中国工程院院士
刘宝琛	中国工程院院士	孙传尧	中国工程院院士
李东英	中国工程院院士	邱定蕃	中国工程院院士
何季麟	中国工程院院士	何继善	中国工程院院士
余永富	中国工程院院士	汪旭光	中国工程院院士
张文海	中国工程院院士	张国成	中国工程院院士
张 懿	中国工程院院士	陈 景	中国工程院院士
金展鹏	中国科学院院士	周克崧	中国工程院院士
周 廉	中国工程院院士	钟 掘	中国工程院院士
黄伯云	中国工程院院士	黄培云	中国工程院院士
屠海令	中国工程院院士	曾苏民	中国工程院院士
戴永年	中国工程院院士		

编辑出版委员会

Editorial and Publishing Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

罗 涛(教授级高工 中国有色矿业集团有限公司总经理)

副主任

邱冠周(教授 国家“973”项目首席科学家)

田红旗(教授 中南大学副校长)

尹飞舟(编审 湖南省新闻出版局副局长)

张 麟(教授级高工 大冶有色金属集团控股有限公司董事长)

执行副主任

王海东(教授 中南大学出版社社长)

委 员

苏仁进 文援朝 李昌佳 彭超群 陈灿华

胡业民 刘 辉 谭 平 张 曦 周 颖

汪宜晔 易建国 李海亮

总序

Preface

当今有色金属已成为决定一个国家经济、科学技术、国防建设等发展的重要物质基础，是提升国家综合实力和保障国家安全的关键性战略资源。作为有色金属生产第一大国，我国在有色金属研究领域，特别是在复杂低品位有色金属资源的开发与利用上取得了长足进展。

我国有色金属工业近 30 年来发展迅速，产量连年来居世界首位，有色金属科技在国民经济建设和现代化国防建设中发挥着越来越重要的作用。与此同时，有色金属资源短缺与国民经济发展需求之间的矛盾也日益突出，对国外资源的依赖程度逐年增加，严重影响我国国民经济的健康发展。

随着经济的发展，已探明的优质矿产资源接近枯竭，不仅使我国面临有色金属材料总量供应严重短缺的危机，而且因为“难探、难采、难选、难冶”的复杂低品位矿石资源或二次资源逐步成为主体原料后，对传统的地质、采矿、选矿、冶金、材料、加工、环境等科学技术提出了巨大挑战。资源的低质化将会使我国有色金属工业及相关产业面临生存竞争的危机。我国有色金属工业的发展迫切需要适应我国资源特点的新理论、新技术。系统完整、水平领先和相互融合有色金属科技图书的出版，对于提高我国有色金属工业的自主创新能力，促进高效、低耗、无污染、综合利用有色金属资源的新理论与新技术的应用，确保我国有色金属产业的可持续发展，具有重大的推动作用。

作为国家出版基金资助的国家重大出版项目，《有色金属理论与技术前沿丛书》计划出版 100 种图书，涵盖材料、冶金、矿业、地学和机电等学科。丛书的作者荟萃了有色金属研究领域的院士、国家重大科研计划项目的首席科学家、长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、全国优秀博士论文奖获得者、国家重大人才计划入选者、有色金属大型研究院所及骨干企

业的顶尖专家。

国家出版基金由国家设立，用于鼓励和支持优秀公益性出版项目，代表我国学术出版的最高水平。《有色金属理论与技术前沿丛书》瞄准有色金属研究发展前沿，把握国内外有色金属学科的最新动态，全面、及时、准确地反映有色金属科学与工程方面的新理论、新技术和新应用，发掘与采集极富价值的研究成果，具有很高的学术价值。

中南大学出版社长期倾力服务有色金属的图书出版，在《有色金属理论与技术前沿丛书》的策划与出版过程中做了大量极富成效的工作，大力推动了我国有色金属行业优秀科技著作的出版，对高等院校、研究院所及大中型企业的有色金属学科人才培养具有直接而重大的促进作用。

王淀佐

2010年12月

前言

Foreword

铂族金属，即铂(Pt)、钯(Pd)、锇(Os)、铱(Ir)、钌(Ru)、铑(Rh) 6种金属，是一组具有复杂共生组合特点的天然元素，与金、银一起统称为贵金属。因储量及产量比金、银少得多，又被称为“稀有贵金属”。

铂族金属具有许多独特、优越的物理化学性质，不仅能作为金融财富储备，而且作为一种战略资源，在现代工业、军工及高新技术产业中有重要而不能被其他金属或材料取代的特殊应用，先后被誉为“现代工业维生素”和“第一高技术金属”。

冶金学是从矿产资源和二次资源中，经济、高效、环保地提取出金属或化合物产品，满足国民经济建设和社会发展需求的科学，是通俗易懂的应用科学，是在实践中去伪存真、逐步完善、不断深化而总结出的普遍规律和学术共识。冶金理论能密切联系实际并指导实践，冶金技术能转化为现实生产力并能促进社会的文明进步。冶金科技发展还有一个重要特点，就是工艺或技术的研究制定以冶金原料的成分和性质为依据，而不同的技术又依据不同的冶金原理。同样的技术处理不同的原料或不同的技术处理相同的原料，会产生不同的结果。科技工作者首先需系统、全面地传承前人积累的知识，通过认真地融会和贯通、不断地比较和“消化”、科学地鉴别和取舍、勇敢地探索和实践，才会有所发现、有所发明、有所创造，才能锻炼出更强的实际工作能力。

自20世纪60年代开始，中国勘查和开发了铂族金属资源，自力更生创建和发展了从矿产资源和二次资源中提取铂族金属的科技和产业，积累了丰富的科技知识，目前整体科技水平已跻身于世界先进行列。这些成就凝聚了两代人的心血，是该领域专家、广大冶金科技工作者辛勤劳动的结晶。作者从1961年参与

该科技领域的创业开始,连续学习及实践了 50 多年。在矿产资源综合利用及二次资源再生回收冶金工艺技术研究等方面,主持并与团队共同完成了国家“六五”至“九五”各个五年计划的重点科技(攻关)任务,同时指导硕士、博士研究生论文及博士后流动站进站课题研究,形成了多项研究成果,其中多数实现了产业化应用,先后获十多项国家及部、省级科技进步奖励。作者曾独著或参编了多部专著,发表了多篇论文。为了系统、全面地向读者介绍铂族金属冶金学的基础理论和技术知识,本书在编写时参考了近十年来国内外专家的三百多篇科技论文、专利,尽力体现面向 21 世纪的时代要求。

全书共分 12 章。第 1 章是概述性的科普知识。第 2 章介绍的物理化学性质方面的知识是冶金学的基础。第 3 章介绍的共生矿产资源和二次资源是冶金学的对象,都是必须学习和掌握的基础知识。第 4 章选矿-熔炼富集和第 5 章贵贱金属分离提取铂族金属精矿,是从铂族、镍、铜共生矿资源中富集提取铂族金属的基本过程,从一个侧面看属于铂族金属冶金的知识范畴;从另一个侧面看属于镍、铜冶金的知识范畴,即镍铜硫化矿选矿及火法熔炼技术,是富集铂族金属的载体技术,再从镍、铜选冶中间产品中提取出铂族金属精矿。这个过程充分体现了铂族金属冶金和重有色金属冶金两个学科领域的交叉和融合。其余 7 章从各个侧面融合其他相关学科知识,全面介绍富集、分离、精炼铂族金属的专业理论和技术工艺,包括铂族金属的溶解及低浓度溶液的二次富集,传统的选择性沉淀分离,高效的溶剂萃取分离及固-液萃取分离,二次资源再生回收,纯金属或纯功能化合物制备,及相应的劳动安全和冶金环保等内容。

在我国社会经济和科技发展的进程中,不同的阶段有不同的侧重点。20 世纪中后期,从矿产资源中提取铂族金属,解决有无问题,满足国民经济建设急需,是该科技领域发展的重点。进入 21 世纪后,面临中国铂族金属矿产资源贫乏但已成为铂族金属使用大国的客观形势,及顺应绿色、循环经济及可持续发展的时代要求,二次资源再生回收已上升为保障供需的战略地位。因此铂族金属冶金科技工作者的工作重心已发生转变,将矿产资源提取冶金的理论和成熟的工艺技术移植应用于二次资源再生循环利用,拓展产业规模,在实际应用中不断完善和发展,已成为该科

技领域的重点。作者在各章内容安排方面尽力体现这一特点。

50 年来作者在铂族金属提取冶金发展和创新过程中,在资源综合利用、科技攻关研究和产业化实施中,先后得到了昆明贵金属研究所、贵研铂业公司赵怀志、何纯孝、朱绍武、汪云曙、普乐、钱琳、侯树谦、陈家林、胡昌义、云锡集团公司高文翔总经理、研究设计院王炜院长等各届、各级领导的支持和鼓励。同时得到数十位同行以及其他科研、设计和生产单位很多人的支持和帮助。本书编写过程中,金川集团公司原副经理何焕华教授,北京恩菲工程技术有限公司赵玉福教授,昆明贵金属研究所及贵研铂业的王永录教授、董海刚博士、李勇博士、范兴祥博士、汪云华博士、韩守礼教授、吴晓峰高工、陈伏生高工,分别提供了信息、资料。一些领导和专家从不同角度提出了宝贵的修改意见。作者一并向他们致以诚挚的感谢。作者铭记我的夫人袁素焕几十年来在生活及工作各方面给予的全力支持和帮助。

该书可作为大专院校贵金属冶金专业的教科书,也能作为矿冶院校地质矿产、重有色金属冶金专业教学的参考书。由于内容涉及的学科范围广,作者的知识结构和水平有限,书中错误与疏漏在所难免,热情欢迎阅读本书的专家和读者批评指正。

目录

Contents

第 1 章 名副其实的现代工业维生素	1
1.1 金属中的贵族	1
1.2 世界矿产资源分布极不均衡	3
1.3 “第一高技术金属”	6
1.4 矿产资源冶金技术的特点及原则	9
1.5 二次资源提取冶金的战略地位	13
1.6 中国在该科技领域已跻身于世界先进行列	16
参考文献	17
第 2 章 物化性质、化合物及生化性质	18
2.1 铂族元素的原子结构及特点	18
2.2 物理性质	19
2.3 主要化学性质	20
2.4 无机化合物	22
2.5 无机配合物	29
2.6 氰化物	37
2.7 有机配合物	37
2.8 铂族金属的生化性质	40
参考文献	46
第 3 章 铂族金属矿产资源和二次资源	47
3.1 矿产资源	48
3.2 铂族金属二次资源	75
3.3 核裂变乏燃料中的铂族金属	81
参考文献	83

第4章 铂矿资源的选矿-熔炼富集 85

4.1 选冶富集工艺的原则框架流程	85
4.2 共生矿的浮选	87
4.3 原生铂矿的选矿	102
4.4 砂铂矿的重选	122
4.5 尼尔森(Knelson)离心选矿机重选	126
4.6 浮选精矿的造钼熔炼富集	128
4.7 南非原生铂矿浮选精矿的火法熔炼	137
4.8 金川共生矿浮选精矿的火法冶炼	139
4.9 金宝山铂钯矿浮选精矿的火法熔炼富集	142
4.10 云南元谋低品位铂矿石熔炼钙镁磷肥富集	143
参考文献	145

第5章 分离贵贱金属及提取铂族金属精矿 148

5.1 分层熔炼	149
5.2 氧压硫酸浸出	151
5.3 自变介质性质氧压浸出	156
5.4 金属化铜镍高钼的常压-加压浸出	158
5.5 铂族金属在加压浸出过程中的行为	163
5.6 高钼细磨-浮选-磁选分离	165
5.7 金川铜镍合金二次硫化	167
5.8 选择性氯化浸出富集贵金属	168
5.9 火法氯化分离贵贱金属	186
5.10 电解	190
5.11 羰基法精炼镍及富集铂族金属	198
5.12 硫酸浸煮及焙烧	202
5.13 元素硫的分离	205
参考文献	208

第6章 铂族矿产物料的湿法冶金及生态环保 211

6.1 高品位浮选精矿直接浸出提取贵金属	212
6.2 $\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ 介质氧压浸出含铂族矿物原料	214
6.3 金宝山浮选精矿高压酸浸-高压氰化	226

6.4 金宝山浮选精矿的氯化浸出	234
6.5 金宝山浮选精矿熔炼低铊 - 湿法浸出	236
6.6 工艺比较及特点	247
6.7 湿法冶金的环境污染隐患	249
参考文献	254
第 7 章 铂族金属的选择性沉淀分离技术	257
7.1 传统的选择性沉淀分离工艺	257
7.2 优先蒸馏钨钼 - 选择性沉淀分离工艺	264
7.3 俄罗斯的分离精炼工艺	267
7.4 砂铂精矿的铂、钨、铼分离	271
7.5 选择性沉淀分离工艺的评价	275
参考文献	276
第 8 章 铂族金属的溶解和低浓度溶液的二次富集	277
8.1 氯化溶解	278
8.2 预处理活化	281
8.3 高压氯化溶解纯铑粉	291
8.4 电化溶解	293
8.5 微波加热技术的应用	295
8.6 低浓度贵金属溶液、废液的二次富集	296
参考文献	316
第 9 章 铂族金属的液 - 液溶剂萃取分离	319
9.1 溶剂萃取分离贵金属的理化基础	320
9.2 萃取分离金	330
9.3 萃取分离钨	341
9.4 萃取铂	351
9.5 共萃铂钨	355
9.6 萃取铼	356
9.7 萃取铑	362
9.8 吡啶衍生物萃取钨	365
9.9 贱金属的萃取分离	366
9.10 国外研究的全萃取分离工艺流程	368

9.11 中国矿产资源的全萃取分离工艺	371
9.12 二次资源的萃取分离工艺	379
9.13 液-液盐析萃取	381
9.14 液膜分离	383
9.15 液-液萃取技术的展望	384
9.16 液-液萃取技术中的生态环境问题	385
参考文献	388

第10章 离子交换及固-液萃取 393

10.1 普通离子交换树脂	394
10.2 萃淋树脂吸附-淋洗分离贵金属	404
10.3 固-液萃取	409
参考文献	421

第11章 二次资源的再生循环复用 424

11.1 二次资源再生回收的原则工艺	425
11.2 从汽车尾气净化废催化剂中回收铂、钯、铑	426
11.3 从电子废料中回收贵金属	443
11.4 从各类载体废催化剂及其他废渣中回收铂、钯	444
11.5 从碳载体废催化剂中回收铂、钯	451
11.6 从玻纤工业废耐火砖及玻璃碴中回收铂铑	454
11.7 从硝酸工业氨氧化塔炉灰、酸泥、锈垢中回收铂、铑、钯	456
11.8 从有机催化剂中回收铑	458
11.9 含铂、银废渣再生回收	461
11.10 从靶材废料中回收铂族金属	462
11.11 从各种含钨废料中回收钨	464
11.12 从生产双氧水的阳极泥中回收铂	465
11.13 从含有机物的废料中回收钯	466
11.14 从燃料电池催化剂中回收铂	466
11.15 从钛阳极上剥离涂镀的铂族金属	467
11.16 铂族金属合金废料的再生回收	468
11.17 废电镀液的回收	476
11.18 从核废料中回收钨、铑、钯	477
参考文献	480

第 12 章 纯金属及化合物产品制备	490
12.1 金精炼	490
12.2 银精炼	493
12.3 铂精炼	497
12.4 钯精炼	501
12.5 铑精炼	504
12.6 铱精炼	510
12.7 钨精炼	513
12.8 钼精炼	515
12.9 纳米贵金属材料	517
12.10 贵金属精炼过程中的劳动安全和环境保护	521
参考文献	531