



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

重金属冶金学

(第2版)

翟秀静 谢 锋 主编



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

重 金 属 冶 金 学

(第2版)

翟秀静 谢 锋 主编

常州大学图书馆
藏书章

北 京
冶金工业出版社
2019

内 容 提 要

本书重点介绍了六种重金属冶金的原理、工艺技术、设备和发展趋势,体现了该领域国内外的最新进展。全书共7章,包括绪论、铜冶金、铅冶金、锌冶金、镍冶金、钴冶金和锡冶金。

本书为高等院校冶金工程专业的本科生教材,也可供有色金属冶金相关领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

重金属冶金学/翟秀静,谢锋主编. —2版. —北京:冶金工业出版社,2019.6

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-8105-6

I. ①重… II. ①翟… ②谢… III. ①重金属冶金—高等学校—教材 IV. ①TF81

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第093273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 yjcb@cnmp. com. cn

责任编辑 赵亚敏 宋 良 美术编辑 彭子赫 版式设计 禹 蕊

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-8105-6

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2011年8月第1版,2019年6月第2版,2019年6月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;24.5印张;590千字;378页

55.00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 yjgcb. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

第2版前言

《重金属冶金学》(第2版)是根据有色金属冶金专业(本科)的冶金工程课程教学大纲的新要求而编写的。东北大学(原东北工学院)自1950年设立有色金属专业以来,在教学、科研和技改等方面,为我国的有色金属工业做出了重要贡献。

陈国发教授主编的《重金属冶金学》是深受欢迎的有色金属专业本科生教材,自1992年出版以来多次再版和重印,为许多院校选用。

随着改革开放和我国有色金属冶金工业迅速发展,我国重金属冶金跃上了世界先进水平的行列。根据形势的变化,按照有色金属冶金专业教学计划的要求,笔者于2011年编写了《重金属冶金学》第1版。

第1版反映了我国在重金属冶金领域的重大变化,重点叙述重金属提取冶金过程的基本理论和目前处于成熟的冶金先进工艺,同时介绍国内外重金属冶金领域的科技发展,并对铜冶金、铅冶金、锌冶金、镍钴冶金和锡冶金的传统冶炼技术仅作一般介绍。

第2版《重金属冶金学》针对国内外的情况,更新了铜、铅、锌、钴、镍和锡在火法冶金领域的发展内容,重点介绍了铜、锌和铅等湿法冶金、有色金属的二次资源的利用及生态环保领域的新进展。对于铜、铅、锌、镍、钴和锡的资源、应用和物化性质给出了最新数据。

本书共分7章,第1章绪论和第7章锡冶金由翟秀静(东北大学)编写;第2章铜冶金由佟志芳(江西理工大学)和谢锋(东北大学)编写;第3章铅冶金由畅永锋(东北大学)编写;第4章锌冶金由畅永锋(东北大学)和谢锋(东北大学)编写;第5章镍冶金由翟秀静(东北大学)和李忠国(兰州大学)编写;第6章钴冶金由李斌川(东北大学)编写。本书编写过程中,关

于湿法炼铅的工艺研究进展和工业实践相关内容得到了云南省祥云飞龙有限公司舒毓章总工的热情帮助，编者深表感谢。

本书内容所涉及研究获得了国家自然科学基金委的大力支持（国家自然科学基金重点项目 51434001 和面上项目 51574072），在此谨表感谢。由于水平所限，书中难免有缺点和错误，恳请读者批评指正。

编 者

2019 年 1 月

第1版前言

本书根据有色金属冶金专业教学计划的要求以及有色金属冶金专业（本科）“重金属冶金学”课程教学大纲的要求而编写，着重于叙述铜、铅、锌、镍、锡和钴六种重金属提取冶金过程的基本理论、目前成熟的冶金先进工艺以及国内外重金属冶金领域的科技发展，同时介绍了与上述六种重金属共生的贵金属和稀散金属的回收方法。

改革开放以来，我国有色金属冶金行业迅速发展，新技术、新工艺已成为主体。进入新世纪以来，节能降耗、清洁生产在我国有色金属冶金行业内已形成主流。自20世纪80年代江西铜业集团引进闪速熔炼技术以后，铜陵金隆铜业、金川有色公司、山东阳谷铜业和云南锡业等企业，相继引进并自主创新了闪速熔炼技术和装备、瓦纽柯夫熔炼技术和装备、澳斯麦特熔炼技术和装备以及闪速吹炼技术和装备。目前，我国重金属冶金的技术水平已迈入世界先进行列。

本书全面反映了这一变化。铜冶金一章重点讲述了铜的闪速熔炼和闪速吹炼技术，同时介绍了铜氧气顶吹熔池熔炼和澳斯麦特吹炼；铅冶金一章讲述了铅的氧气底吹熔炼和氧气顶吹熔炼技术；锌冶金一章讲述了硫化锌精矿的氧压浸出技术；镍冶金一章讲述了镍的闪速熔炼和富氧顶吹熔池熔炼技术；锡冶金一章讲述了锡的澳斯麦特还原熔炼技术；钴冶金一章讲述了伴生矿提钴技术进展。本书对于铜、铅、锌、镍、锡和钴的传统冶炼技术，则只作一般介绍。

本书由东北大学翟秀静担任主编。具体编写分工为：第1、6章由翟秀静编写，第2章由佟志芳（江西理工大学）编写，第3章由黄兴远（河南科技大学）编写，第4章由畅永锋（东北大学）编写，第5章由李忠国（兰州大学）和翟秀静共同编写，第7章由李斌川（东北大学）编写。东北大学陈国发教授1992年主编的《重金属冶金学》一书是本书的坚实基础。东北大学重金属冶

金学科的陈国发、叶国瑞、肖碧君、贺家齐、宋庆双、单维林、林茂森、李凤廉、蓝为君、赵延昌、徐家振、王德全和郎晓珍等教授多年来在重金属冶金领域潜心耕耘，他们的心血和成就是本书的灵魂。在此向各位前辈致以崇高敬意和衷心感谢。在编写过程中，还参阅了重金属冶金方面的相关文献，在此向有关作者、出版社一并表示诚挚的谢意。

由于水平所限，书中不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2011年5月

目 录

1 绪论	1
1.1 重金属冶金的发展史	1
1.2 重金属的定义	2
1.3 重金属的应用	2
1.4 重金属的资源	3
1.5 重金属的冶炼方法	4
1.6 重金属冶金的发展方向	4
参考文献	5
2 铜冶金	6
2.1 概述	6
2.1.1 铜的资源	7
2.1.2 铜的应用	8
2.1.3 铜的性质	9
2.1.4 铜的合金及主要化合物	10
2.1.5 铜的提取技术	12
2.2 铜的造钼熔炼	13
2.2.1 概述	13
2.2.2 铜造钼熔炼的理论基础	14
2.2.3 铜的闪速熔炼	24
2.2.4 铜的熔池熔炼	38
2.3 铜钼的吹炼	50
2.3.1 概述	50
2.3.2 铜钼吹炼过程的物理化学	51
2.3.3 侧吹卧式 (P-S) 转炉吹炼	56
2.3.4 闪速吹炼	61
2.3.5 其他吹炼方法	63
2.4 粗铜的火法精炼	64
2.4.1 概述	64
2.4.2 粗铜火法精炼的工艺流程和基本原理	64
2.4.3 粗铜火法精炼的设备及工艺	67
2.4.4 火法精炼的主要经济技术指标	70

2.5 铜的电解精炼	70
2.5.1 概述	70
2.5.2 铜电解精炼的基本原理	70
2.5.3 铜电解精炼的工艺流程	72
2.5.4 铜电解的生产实践	72
2.5.5 电解液的净化	76
2.6 湿法炼铜	77
2.6.1 概述	77
2.6.2 焙烧—酸浸—电积法	77
2.6.3 常压酸浸—萃取—电积法	84
2.6.4 加压浸出	87
2.6.5 氯化浸出	90
2.6.6 氨浸法	90
2.7 铜阳极泥中有价金属的回收	91
2.7.1 概述	91
2.7.2 铜阳极泥的组成与性质	92
2.7.3 铜阳极泥处理工艺	93
2.7.4 铜阳极泥处理新技术	95
2.8 二次铜资源的利用	104
2.8.1 概述	104
2.8.2 二次铜资源的种类与特点	104
2.8.3 二次铜资源再生利用前的预处理	106
2.8.4 杂铜生产合金和铜线锭	107
2.8.5 火法熔炼生产再生铜	108
2.8.6 再生铜的湿法冶炼	110
2.8.7 国内外再生铜工厂	111
习题	112
参考文献	113
3 铅冶金	115
3.1 概述	115
3.1.1 铅的资源	115
3.1.2 铅的应用	117
3.1.3 铅的性质	117
3.1.4 铅的主要化合物	119
3.1.5 铅的主要提取方法	120
3.2 硫化铅精矿的火法冶炼基本原理	122
3.2.1 硫化铅精矿氧化过程原理	122
3.2.2 铅的还原熔炼过程原理	129

3.3 硫化铅精矿的烧结焙烧—鼓风炉还原熔炼工艺	134
3.3.1 硫化铅精矿的烧结焙烧	135
3.3.2 烧结块的鼓风炉还原熔炼	137
3.4 铅的直接熔炼工艺	140
3.4.1 硫化铅精矿的直接熔炼概述	140
3.4.2 基夫赛特直接炼铅 (Kivcet) 法	144
3.4.3 QSL 直接炼铅法	148
3.4.4 富氧底吹炼铅法	150
3.4.5 富氧侧吹炼铅法	154
3.4.6 Ausmelt/Isa 顶吹直接炼铅法	158
3.4.7 Kaldo 直接炼铅法	159
3.5 粗铅的精炼	161
3.5.1 粗铅精炼概述	161
3.5.2 粗铅的火法精炼	162
3.5.3 粗铅的电解精炼	167
3.6 再生铅的处理	170
3.6.1 再生铅处理概述	170
3.6.2 以废铅酸蓄电池为代表再生铅冶炼工艺	171
3.7 铅的湿法冶金	172
3.7.1 铅的湿法冶金概述	172
3.7.2 祥云飞龙湿法炼铅工艺	174
3.8 炼铅过程三废治理	177
3.8.1 冶炼过程烟气的处理	177
3.8.2 冶炼过程废渣的处理	177
3.8.3 冶炼过程废水的处理	178
习题	178
参考文献	179
4 锌冶金	181
4.1 概述	181
4.1.1 锌资源	181
4.1.2 锌的用途	183
4.1.3 锌的性质	185
4.1.4 锌的化合物	187
4.1.5 锌的生产方法	188
4.2 硫化锌精矿的焙烧与烧结	189
4.2.1 硫化锌精矿焙烧的基本原理	190
4.2.2 硫化锌精矿的沸腾焙烧	195
4.2.3 硫化锌精矿的烧结焙烧	199

4.3 湿法炼锌的浸出过程	200
4.3.1 浸出方法	200
4.3.2 锌焙烧矿的浸出	201
4.3.3 硫化锌精矿的氧压浸出	214
4.3.4 氧化锌矿的浸出	218
4.3.5 浸出、浓缩、过滤设备	219
4.4 硫酸锌浸出液的净化	220
4.4.1 净化的目的与方法	220
4.4.2 锌粉置换除铜、镉	222
4.4.3 净化除钴、镍	223
4.4.4 其他杂质的净化	225
4.4.5 净化过程主要设备	226
4.5 硫酸锌溶液的电解沉积	226
4.5.1 锌电积的工艺简介	226
4.5.2 锌电积的基本原理	227
4.5.3 锌电积的电流效率及其影响因素	230
4.5.4 锌电积的槽电压、电能效率与电能消耗	232
4.5.5 电锌质量控制	233
4.5.6 锌电积车间的主要设备	234
4.5.7 阴极锌熔铸	236
4.6 湿法炼锌新方法	236
4.6.1 氧化锌矿的浸出—萃取—电积工艺	236
4.6.2 硫化锌精矿的富氧常压浸出工艺	237
4.7 火法炼锌	238
4.7.1 蒸馏炼锌的理论基础	238
4.7.2 密闭鼓风炉炼锌	241
4.7.3 粗锌火法精炼	244
4.7.4 火法处理含锌浸出渣	246
4.8 锌的二次资源利用	252
4.8.1 再生锌简介	252
4.8.2 再生锌的原料与组成	252
4.8.3 再生锌的冶炼方法与产品	252
习题	253
参考文献	254
5 镍冶金	255
5.1 概述	255
5.1.1 镍的资源	255
5.1.2 镍的应用	257

5.1.3 镍的性质	258
5.1.4 镍的化合物	259
5.1.5 镍的生产方法	260
5.2 硫化镍的提取冶金	261
5.2.1 硫化镍矿的火法冶金	261
5.2.2 硫化镍的湿法冶金	280
5.3 氧化镍的提取冶金	283
5.3.1 氧化镍的火法提取冶金	283
5.3.2 氧化镍的湿法提取冶金	284
5.4 镍的气化冶金	289
5.4.1 羰基法的基本原理	289
5.4.2 高压羰基镍生产工艺	289
5.4.3 羰化合成时的化学反应	290
5.4.4 粗羰基镍的精馏	291
5.4.5 羰化镍的分解	291
5.5 贵金属的综合回收	293
5.5.1 贵金属的富集过程	293
5.5.2 贵金属的分离提纯	294
5.6 镍的二次资源利用	295
习题	296
参考文献	296
6 钴冶金	298
6.1 概述	298
6.1.1 钴的资源	298
6.1.2 钴的应用	300
6.1.3 钴的性质	301
6.1.4 钴的化合物	302
6.1.5 钴的生产方法	304
6.2 钴的火法冶金	306
6.2.1 钴火法冶炼的原料	306
6.2.2 火法冶炼过程中钴的走向	307
6.2.3 含钴转炉渣的电炉贫化	314
6.3 钴的湿法冶金	315
6.3.1 钴合金的硫酸加压浸出	315
6.3.2 含钴矿物的氨浸	315
6.3.3 含镍、钴氧化物物料的酸浸出	316
6.3.4 高铜镍硫的酸浸处理	317
6.3.5 铜镍硫化矿常压氯气浸出	318

6.3.6 含钴中间物料的浸出	319
6.4 含钴溶液的净化	320
6.4.1 化学沉淀法	321
6.4.2 溶剂萃取法	323
6.5 钴的电解	328
6.5.1 电沉积制备电解钴	328
6.5.2 电解精炼制备金属钴	332
习题.....	338
参考文献.....	338
7 锡冶金	339
7.1 概述	339
7.1.1 锡的资源	339
7.1.2 锡的用途	340
7.1.3 锡的性质	341
7.1.4 锡的生产	344
7.2 熔炼前的锡矿处理	345
7.2.1 锡精矿的精选处理	345
7.2.2 锡精矿的焙烧	345
7.3 锡精矿的还原熔炼	347
7.3.1 还原熔炼的基本原理	348
7.3.2 锡精矿的电炉熔炼	354
7.3.3 奥斯麦特法熔炼锡	356
7.4 粗锡的精炼	361
7.4.1 粗锡的火法精炼	361
7.4.2 锡的电解精炼	368
7.5 锡冶炼过程中有价金属的回收	374
习题.....	375
参考文献.....	376

1 绪 论

在人类社会发展的历史长河中，冶金技术承载着划时代的重任，青铜器时代、铁器时代标志着社会的文明和时代的进步。经过近代工业革命和科学技术的发展，冶金已从一项技艺逐渐演变为一门系统化、大型化、连续化、高效化和自动化的现代应用技术。

1.1 重金属冶金的发展史

(1) 铜的发展史。铜是人类最早发现和使用的有色金属之一。约在公元前 4000 年，伊朗（古波斯）就已掌握了炼铜术。公元前 3000 年，埃及、印度等地区已出现较高水平的炼铜业。欧洲在公元前 2000 年采用硫化铜炼铜。我国在新石器时代晚期开始使用铜，夏代即进入青铜器时代。在商周时期（公元前 16 世纪以后），青铜的冶炼和铸造技术已经很发达。在湖北省大冶县境内发现的铜绿山矿冶遗址始于西周末年，是我国目前发现的规模最大、保存最完整的古代铜矿冶炼遗址。

(2) 铅的发展史。铅冶炼技术和铜冶炼技术大致始于同一历史时期。埃及在公元前 3000 年即有铅制品问世，英国伦敦博物馆现陈列的铅像是公元前 3800 年的产物，罗马在公元前已开始炼铅并制造出铅管、铅皮和铅币。我国在夏代（公元前 21~公元前 16 世纪）已用铅造币，世称“玄贝”；商代中期，青铜器铸造已较多用铅，即铅青铜；安阳殷墟铅器有出土，西周的铅戈含铅量达 99.75%。宋应星在《天工开物》中记载了铅矿物的种类和炼铅方法。明代陆容的《菽园杂记》记载了含银硫化铅矿的冶炼方法。欧洲在 17 世纪有了工业规模生产铅的记载。19 世纪中叶，人类发现铅具有抗酸、抗碱、防潮、密度大、能吸收放射性射线的性质，并能制造各种合金和蓄电池的用途之后，炼铅工业才获得重大发展。

(3) 锌的发展史。含锌的铜合金早已被使用，但分离出单质锌却较晚。欧洲人在公元前 5 世纪得到了小块的锌，但不能识别。我国是最早掌握炼锌技术的国家，在明代的《天工开物》中称锌为“倭铅”。从出土文物的化学分析和史籍记载看，可能在北宋末年（12 世纪初）即已使用金属锌。约在 16 世纪，我国的锌已向欧洲出口。到了明朝，炼锌技术已达较高水平，此时主要在山西太行、湖南荆衡一带炼锌。炼锌在英国始于 1738 年，德国始于 1746 年。至 19 世纪，法国和比利时的平罐炼锌才有较大的发展。

(4) 镍的发展史。古代埃及和巴比伦人都曾用含镍量很高的陨铁制作器物。我国在汉代就掌握了冶炼白铜（Cu 52%~80%，Ni 5%~35%，Zn 10%~35%）的技术，在欧洲曾称白铜为“中国银”。1751 年，瑞典矿物学家 A. F. Cronstedt 发现元素镍，到 1850 年才分离出金属镍。故称镍为既古老又年轻的金属。

(5) 钴的发展史。钴在公元前 2250 年就出现在伊朗（古代称波斯）的蓝色玻璃珠内。我国从唐代起已经在陶瓷生产中广泛使用钴化合物作为着色剂。1735 年，瑞典化学

家 G. Brandt 首次将钴分离出来,但直到 1780 年, T. Bergman 才确定钴为一种元素。

(6) 锡的发展史。公元前 3000 年,苏美尔人已能冶炼含锡较高的青铜,用来制造斧和镞等工具。锡石炼锡始于公元前 2000 年。我国安阳殷商遗址出土的锡块、锡戈及虎面铜盔上的镀锡层,足以证明我国最迟在公元前 12 世纪已掌握炼锡技术。战国时期的著作《周礼·考工记》详述了各种用途的青铜中铜和锡的配比;《天工开物·五金篇》中记载:锡矿中有“山锡”和“水锡”。欧洲古代产锡地主要是康沃尔、波希米亚和萨克森等。最初是在熔炼自然铜和锡矿石或在处理铜锡矿石的混合物时偶然获得铜锡合金(锡青铜),这构成了人类古代文明的一个重要时期——青铜器时代。

1.2 重金属的定义

有色金属是指铁、铬、锰和钒以外的金属。有色金属又分轻金属、重金属、贵金属和稀有金属四大类。重金属是指铜、铅、锌、镍、钴、锡、锑、汞、镉和铋等金属,它们的共同点是密度均在 $6\text{g}/\text{cm}^3$ 以上。重金属元素及其共伴生元素在元素周期表中的位置见图 1-1。

IA																	
H	IIA																He
Li	Be																
Na	Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII	IB	II B	Al	Si	P	S	Cl	Ar		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	<u>Co</u>	<u>Ni</u>	<u>Cu</u>	<u>Zn</u>	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	<u>Cd</u>	In	<u>Sn</u>	<u>Sb</u>	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	<u>Hg</u>	Tl	<u>Pb</u>	<u>Bi</u>	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac-Lr															

图 1-1 重金属元素及其共伴生元素在元素周期表中的位置

图 1-1 中,黑线框内画底线的为重金属,其余均为它们的共伴生元素。可见,与重金属共伴生的金属主要是贵金属和分散金属。

1.3 重金属的应用

在统计有色金属工业产量的时候,一般仅统计十种有色金属,即铜、铅、锌、钴、镍、锑、锡、镁、铝和钛。这十种有色金属中,有七种为重金属。重金属对于国民经济、国防军工、科学技术和日常生活均具有举足轻重的作用。

(1) 铜的应用。铜的用途非常广泛,主要应用于电气设备(包括输电线、导电棒、

发电机、电动机和变压器)和通信设备。铜也是轻工、交通、运输、电子、邮电、军工和机械制造等领域的重要原材料。铜能与锌、锡、铝、镍和铍等形成多种重要合金,广泛应用于制造业。铜的化合物是电镀、原电池、农药、染料和催化剂等行业的重要原料。

(2) 铅的应用。铅主要用作蓄电池的原材料,约占70%。铅的第二个用途是汽油的添加剂(四乙铅)。铅还用作X-射线、核辐射的屏蔽材料。铅合金用于轴承合金、低熔合金和长寿电池材料等。

(3) 锌的应用。锌在电化序中位置较高,不容易被腐蚀,故广泛将锌镀在铁件上以防止铁生锈。镀锌消耗的锌量约占总耗锌量的40%以上,用于生产合金的耗锌量约占35%。锌及化合物还广泛用于航天、汽车、船舶、机械、建筑、电子及日用品工业等领域。

(4) 镍的应用。镍主要用于制备各种合金,其中不锈钢占镍消费量的50%以上。不锈钢、镍基合金和耐高温合金通常含镍8%以上,常用于耐蚀部件。目前含镍合金已达3000种以上,广泛用于宇航、火箭、航空、航海、原子能和石油化工等领域。镍及化合物还用于电镀、催化剂和电池等行业。

(5) 钴的应用。钴主要用作耐热及耐腐蚀材料、切削刀具、高强度材料、永磁材料和电池材料等,其次是作为工具钢、模具钢和硬质合金的添加元素,还广泛用于化学工业中的添加剂。

(6) 锡的应用。在近代科技领域,如电子工业、原子能工业、超导材料以及宇宙飞船等都需要高纯锡及其特种合金,如锡铅合金用作原子能工业的包装材料,锡钛合金用于喷气飞机、火箭、原子能、造船、化学和医疗器械等领域。

1.4 重金属的资源

地壳由硅酸盐组成,在目前发现的全部元素中,O、Si、Al、Fe、Ca、Na、K、Mg、Ti、H十种元素占总量的99.5%。相比之下,重金属在地壳中的丰度显得相当低,均在 10^{-6} 数量级。铜的丰度为 50×10^{-6} ,铅的丰度为 10×10^{-6} ,锌的丰度为 80×10^{-6} ,镍的丰度为 75×10^{-6} ,钴的丰度为 25×10^{-6} ,锡的丰度为 2×10^{-6} 。

(1) 铜的资源。世界铜矿资源丰富,截止到2018年,统计结果(S&P Global Asia Pacific LLC SNL数据库,2018),世界铜储量为8.47亿吨。铜储量大的国家分别是智利、秘鲁、美国、墨西哥、中国、俄罗斯、印度尼西亚、赞比亚和秘鲁等。截至2018年,我国铜矿储量为4964万吨,主要分布在安徽、江西、云南和内蒙古等省区。

(2) 铅的资源。据美国地质调查局2015年的数据显示:世界铅资源量为20多亿吨,铅储量为8700万吨。铅储量多的国家分别是澳大利亚、中国、俄罗斯、秘鲁及墨西哥等国。我国铅储量丰富,储量为1400万吨,主要分布在河南、云南和内蒙古等地区。

(3) 锌的资源。美国地质调查局统计数据,截止到2015年,全球已查明锌资源量为2亿吨(金属量)。锌资源储量分布较为集中,储量较大的国家分别为澳大利亚、中国和秘鲁。我国是锌储量丰富的国家,主要在云南、内蒙古、甘肃、广西和湖南等省区。

(4) 镍的资源。地壳中镍的矿物资源主要有硫化镍矿和氧化镍矿,储存于深海底部的镍的资源是含镍锰结核。根据2017年美国地质调查局(USGS)发布的数据显示,全球

探明镍（按镍矿中镍含量折算）基础储量约 7383 万吨，资源总量 1.30 亿吨。

我国镍矿储量约为 300 万吨，主要分布在甘肃、四川、云南、青海、新疆和陕西等地。

（5）钴的资源。钴主要产于铜或铜镍矿床中，是一种副产金属。据美国地质调查局（USGS）统计数据，2017 年全球陆地钴探明储量约 700 万吨。根据美国地质调查局公布的全球 2017 年钴储量分布，中国的钴储量为 8 万吨，占全球总量的 1% 左右。

（6）锡的资源。世界锡矿的分布相对集中，截止到 2017 年，锡矿资源总量为 470 万吨。我国的锡资源丰富，储量为 143 万吨，主要集中在云南南部、广西西北部和东北部。

1.5 重金属的冶炼方法

目前，铜、铅、锌、镍、钴和锡从原料到成品都已形成各自独立的工业生产体系。重金属的矿床大多是多金属共生矿，伴生有多种稀散金属和贵金属，重金属冶金企业往往是稀散金属和贵金属的冶炼工厂。除锡以外，其他重金属均以硫化矿的形态存在，从重金属矿物原料中回收硫是重金属冶金工业的一项重要任务。据统计，我国冶炼制酸的硫酸产量占全国硫酸总产量的 25%，新建的大型铜冶炼企业的硫利用率达到 95% 以上。表 1-1 列出了主要六种重金属的冶炼方法及可综合回收的元素。

表 1-1 重金属的冶炼方法及可综合回收的元素

金属	原料	预 处 理	金属生产	精炼	综合回收的元素
铜	硫化矿 氧化矿	造钼熔炼 浸出—萃取	转炉吹炼 电积	电解	S、Au、Se、Te、Bi、Ni、Co、 Pb、Zn、Ag
铅	硫化矿	烧结	碳还原	电解 火法精炼	S、Ag、Bi、Tl、Sn、Sb、Se、 Te、Cu、Zn、Au
锌	硫化矿	烧结 焙烧—浸出—净化	碳还原电积	精馏	S、Cd、In、Ge、Ga、Co、 Cu、Pb、Ag、Hg
钴	铜镍矿伴生	硫酸化焙烧—浸出	还原—电解	—	—
镍	硫化矿 氧化矿 混合矿	造钼熔炼—吹炼 造钼熔炼、焙烧 加压氨浸	磨浮还原 加压氢还原	电解	Co、S、Cu、Au、Ag、Se
锡	氧化矿	精选—浸出—焙烧	碳还原	电解 火法精炼	Cu、Bi、Au、Pb、Ag、As、 W、Ta、Nb

重金属冶金工艺的特点是，最大限度地回收各种伴生元素的有价成分，达到有效地利用矿产资源、取得最佳的技术经济效果的目的。

1.6 重金属冶金的发展方向

我国有色重金属资源丰富、品种齐全，资源特点是复合矿、低品位矿和共生矿多。因此，矿物资源的综合利用既可充分回收有价组分，又能避免环境污染，是一个至关重要的课题。