



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12.5" GUIHUA JIAOCAI

# 重金属冶金学

翟秀静 主编



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

# 重 金 属 冶 金 学

翟秀静 主编

北 京

冶金工业出版社

2011

## 内 容 提 要

本书共分7章,重点介绍了铜、铅、锌、镍、锡和钴的冶金原理、工艺流程、设备性能和技术发展趋势,体现了上述六种重金属冶金领域在国内外的最新科技进展。

本书可作为高等院校有色金属冶金专业本科生的教学用书,也可供有色金属冶金相关企事业单位的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

重金属冶金学/翟秀静主编. —北京:冶金工业出版社, 2011. 8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5587-3

I. ①重… II. ①翟… III. ①重有色金属—有色金属冶金—高等学校—教材 IV. ①TF81

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第154673号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 王 优 宋 良 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 王贺兰 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5587-3

北京印刷一厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2011年8月第1版,2011年8月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 23.75印张; 572千字; 366页

49.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

# 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有金属的回收方法。

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 重金属的发展史略 .....	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
复习思考题 .....	5
2 铜冶金 .....	6
2.1 概述 .....	6
2.1.1 铜及其化合物的性质 .....	6
2.1.2 铜的应用 .....	7
2.1.3 铜的资源 .....	8
2.1.4 铜的生产 .....	8
2.2 铜的造钼熔炼 .....	10
2.2.1 铜造钼熔炼的理论基础 .....	11
2.2.2 铜的闪速熔炼 .....	20
2.2.3 铜的熔池熔炼 .....	35
2.3 铜钼的吹炼 .....	47
2.3.1 铜钼吹炼过程的物理化学 .....	48
2.3.2 侧吹卧式转炉吹炼 .....	53
2.3.3 闪速吹炼 .....	58
2.3.4 其他吹炼方法 .....	60
2.4 粗铜的火法精炼 .....	61
2.4.1 粗铜火法精炼的工艺流程 .....	62
2.4.2 粗铜火法精炼的基本原理 .....	62
2.4.3 粗铜火法精炼的设备及工艺 .....	64
2.4.4 火法精炼的主要技术经济指标 .....	67
2.5 铜的电解精炼 .....	68
2.5.1 铜电解精炼的基本原理 .....	68
2.5.2 铜电解精炼的工艺流程 .....	69

2.5.3	铜电解精炼的生产实践	70
2.5.4	电解液的净化	73
2.6	铜的湿法冶金	74
2.6.1	焙烧-浸出-电积法	74
2.6.2	浸出-萃取-电积法	81
2.6.3	氨浸-萃取-电积法	83
2.6.4	高压氨浸法	84
2.7	铜阳极泥中有价金属的回收	84
2.7.1	铜阳极泥的组成及性质	85
2.7.2	铜阳极泥处理工艺	86
2.7.3	铜阳极泥处理新技术	88
2.8	铜的二次资源利用	97
2.8.1	铜二次资源的种类及特点	97
2.8.2	铜二次资源再生利用前的预处理	99
2.8.3	杂铜生产铜合金和铜线锭	100
2.8.4	火法熔炼生产再生铜	102
2.8.5	再生铜的湿法冶炼	103
	复习思考题	105
3	铅冶金	106
3.1	概述	106
3.1.1	铅及其化合物的性质	106
3.1.2	铅的应用	107
3.1.3	铅的资源	108
3.1.4	铅的生产	108
3.2	硫化铅精矿的烧结焙烧	109
3.2.1	硫化铅精矿烧结焙烧的理论基础	110
3.2.2	烧结焙烧时硫化铅精矿各组分的行为	113
3.2.3	烧结焙烧前的炉料准备	114
3.2.4	带式烧结机的构造及操作	116
3.3	铅烧结矿的鼓风炉还原熔炼	121
3.3.1	铅烧结矿鼓风炉还原熔炼的理论基础	122
3.3.2	还原熔炼时铅烧结矿各组分的行为	125
3.3.3	燃料燃烧的完全程度及鼓风炉的还原能力	126
3.3.4	铅鼓风炉的构造及操作	128
3.3.5	铅鼓风炉的熔炼产物	130
3.3.6	铅鼓风炉渣的烟化处理	133
3.4	铅的直接熔炼	136
3.4.1	铅直接熔炼的理论基础	137

3.4.2 铅的直接熔炼技术 .....	138
3.5 粗铅的精炼 .....	152
3.5.1 粗铅的火法精炼 .....	153
3.5.2 粗铅的电解精炼 .....	160
3.6 铅的湿法冶金 .....	163
3.6.1 氯化物浸出法 .....	163
3.6.2 碱浸出法 .....	164
3.6.3 胺浸出法 .....	164
3.6.4 氨性硫酸铵浸出法 .....	164
3.6.5 加压浸出法 .....	165
3.6.6 硫酸铁浸出法 .....	165
3.6.7 硝酸浸出法 .....	165
3.6.8 直接电解浸出法 .....	165
3.7 铅冶炼过程中有价金属的回收 .....	166
3.7.1 金、银等贵金属的回收 .....	166
3.7.2 其他有价金属的提取 .....	167
3.8 铅的二次资源利用 .....	168
3.8.1 铅产业与环境保护 .....	168
3.8.2 我国铅的消费现状 .....	168
3.8.3 再生铅的回收及冶炼发展趋势 .....	168
3.8.4 再生铅的冶炼工艺 .....	169
复习思考题 .....	172
<b>4 锌冶金 .....</b>	<b>173</b>
4.1 概述 .....	173
4.1.1 锌及其化合物的性质 .....	173
4.1.2 锌的应用 .....	174
4.1.3 锌的资源 .....	175
4.1.4 锌的生产 .....	176
4.2 硫化锌精矿的焙烧 .....	177
4.2.1 硫化锌精矿焙烧的理论基础 .....	178
4.2.2 焙烧时硫化锌精矿各组分的行为 .....	182
4.2.3 硫化锌精矿的沸腾焙烧 .....	183
4.2.4 硫化锌精矿的烧结焙烧 .....	187
4.3 湿法炼锌的浸出 .....	188
4.3.1 浸出方法 .....	188
4.3.2 锌焙烧矿的浸出 .....	189
4.3.3 硫化锌精矿的氧压浸出 .....	202
4.3.4 氧化锌矿的浸出 .....	206



4.3.5	浸出、浓缩及过滤设备 .....	207
4.4	硫酸锌浸出液的净化 .....	208
4.4.1	净化的目的及方法 .....	208
4.4.2	锌粉置换除铜、镉 .....	209
4.4.3	净化除钴、镍 .....	211
4.4.4	其他杂质的净化 .....	212
4.4.5	净化过程主要设备 .....	213
4.5	硫酸锌溶液的电解沉积 .....	213
4.5.1	锌电积的工艺简介 .....	213
4.5.2	锌电积的理论基础 .....	214
4.5.3	锌电积的电流效率及其影响因素 .....	217
4.5.4	锌电积的槽电压、电能效率及电能消耗 .....	219
4.5.5	电锌质量控制 .....	220
4.5.6	锌电积车间的主要设备 .....	222
4.5.7	阴极锌熔铸 .....	223
4.6	湿法炼锌新技术 .....	223
4.6.1	氧化锌矿的浸出-萃取-电积工艺 .....	223
4.6.2	硫化锌精矿的富氧常压浸出工艺 .....	224
4.7	锌的火法冶金 .....	225
4.7.1	蒸馏炼锌的理论基础 .....	225
4.7.2	密闭鼓风炉炼锌 .....	228
4.7.3	粗锌的火法精炼 .....	231
4.7.4	烟化法处理含锌浸出渣 .....	234
4.7.5	火法炼锌新技术 .....	235
4.8	锌冶炼过程中有价金属的回收 .....	235
4.8.1	各伴生元素在冶炼过程中的分布情况 .....	236
4.8.2	部分湿法冶炼渣的回收方法 .....	236
4.9	锌的二次资源利用 .....	237
4.9.1	再生锌简介 .....	237
4.9.2	再生锌的原料与组成 .....	237
4.9.3	再生锌的冶炼方法与产品 .....	237
	复习思考题 .....	238
5	镍冶金 .....	240
5.1	概述 .....	240
5.1.1	镍及其化合物的性质 .....	240
5.1.2	镍的应用 .....	242
5.1.3	镍的资源 .....	243
5.1.4	镍的生产 .....	244

5.2 硫化镍矿的提取冶金 .....	245
5.2.1 硫化镍矿的火法冶金 .....	245
5.2.2 硫化镍矿的湿法冶金 .....	268
5.3 氧化镍矿的提取冶金 .....	270
5.3.1 氧化镍矿的火法冶金 .....	270
5.3.2 氧化镍矿的湿法冶金 .....	272
5.4 镍的气化冶金 .....	276
5.4.1 羰基法的基本原理 .....	276
5.4.2 高压羰基镍的生产工艺 .....	277
5.4.3 羰基合成时的化学反应 .....	277
5.4.4 粗羰基镍的精馏 .....	278
5.4.5 羰化镍的分解 .....	279
5.5 贵金属的综合回收 .....	280
5.5.1 贵金属的富集过程 .....	280
5.5.2 贵金属的分离提纯 .....	281
5.6 镍的二次资源利用 .....	282
复习思考题 .....	283
<b>6 锡冶金 .....</b>	<b>284</b>
6.1 概述 .....	284
6.1.1 锡及其化合物的性质 .....	284
6.1.2 锡的应用 .....	286
6.1.3 锡的资源 .....	287
6.1.4 锡的生产 .....	287
6.2 熔炼前的锡矿处理 .....	287
6.2.1 锡精矿的精选 .....	288
6.2.2 锡精矿的焙烧 .....	288
6.3 锡精矿的还原熔炼 .....	290
6.3.1 锡精矿还原熔炼的理论基础 .....	291
6.3.2 锡精矿的电炉熔炼 .....	296
6.3.3 锡精矿的奥斯麦特法熔炼 .....	298
6.4 粗锡的精炼 .....	303
6.4.1 粗锡的火法精炼 .....	304
6.4.2 粗锡的电解精炼 .....	311
6.5 锡冶炼过程中有价金属的回收 .....	317
复习思考题 .....	319
<b>7 钴冶金 .....</b>	<b>320</b>
7.1 概述 .....	320

7.1.1 钴及其化合物的性质 .....	320
7.1.2 钴的应用 .....	324
7.1.3 钴的资源 .....	325
7.1.4 钴的生产 .....	328
7.2 钴的火法冶金 .....	331
7.2.1 钴的火法冶炼工艺概述 .....	331
7.2.2 火法冶炼过程中钴的走向 .....	333
7.2.3 含钴转炉渣的电炉贫化 .....	338
7.3 钴的湿法冶金 .....	339
7.3.1 钴合金的硫酸加压浸出 .....	339
7.3.2 含钴矿物的氨浸出 .....	340
7.3.3 含镍、钴氧化物料的酸浸出 .....	341
7.3.4 高镍硫的硫酸浸出或盐酸浸出 .....	342
7.3.5 铜镍硫化矿的常压氯气浸出 .....	343
7.3.6 含钴中间物料的浸出 .....	344
7.4 含钴溶液的净化 .....	345
7.4.1 化学沉淀法 .....	345
7.4.2 溶剂萃取法 .....	348
7.5 钴的电解 .....	352
7.5.1 钴的电解沉积 .....	352
7.5.2 钴的电解精炼 .....	356
复习思考题 .....	362
参考文献 .....	363

# 1 绪 论

在人类社会发展的历史长河中，冶金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 重金属的发展史略

(1) 铜的发展史略。铜是人类最早发现和使用的有色金属之一。大约在公元前 4000 年，波斯人就已掌握了炼铜技术。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），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。铜冶炼技术的发展是一个漫长的过程，铜的冶炼至今仍以火法为主，其产量占世界铜产量的 85%。

(2) 铅的发展史略。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，英国伦敦博物馆现今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）已使用铅造币，世称“玄贝”；商代中期，青铜器铸造已较多用铅，即铅青铜；安阳殷墟有铅器出土，西周的铅戈铅含量达 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，人们发现铅具有抗酸、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) 锌的发展史略。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来看，可能在北宋末年（12 世纪初）即已使用金属锌。约 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，在德国始于 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) 镍的发展史略。古代埃及和巴比伦人都曾用镍含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) 钴的发展史略。钴在公元前 2250 年就出现在古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) 锡的发展史略。公元前 3000 年，苏美尔人已能冶炼含锡较高的青铜，用来制造斧和铤等工具。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；明代《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

有色金属是指除铁、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、镉、汞、镉和铋等金属，它们的共同点是密度均在  $6\text{g}/\text{cm}^3$  左右。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。

I <sub>A</sub>																			0
H	II <sub>A</sub>								III <sub>A</sub>	IV <sub>A</sub>	V <sub>A</sub>	VI <sub>A</sub>	VII <sub>A</sub>	He					
Li	Be								B	C	N	O	F	Ne					
Na	Mg	III <sub>B</sub>	IV <sub>B</sub>	V <sub>B</sub>	VI <sub>B</sub>	VII <sub>B</sub>	VIII	I <sub>B</sub>	II <sub>B</sub>	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-Lu	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，黑线框内画底线的元素为重金属元素，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

在统计有色金属产量时，往往仅统计十种有色金属，即铜、铅、锌、钴、镍、镉、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）和通讯设备。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%；铅的第二个用途是作为汽油的添加剂（四乙铅）；铅还用于 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，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，如锡锆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  $50 \times 10^{-6}$ ，铅的丰度为  $10 \times 10^{-6}$ ，锌的丰度为  $80 \times 10^{-6}$ ，镍的丰度为  $75 \times 10^{-6}$ ，钴的丰度为  $25 \times 10^{-6}$ ，锡的丰度为  $2 \times 10^{-6}$ 。

(1) 铜的资源。据统计，铜的总储量约为 2300Mt，其中陆地总储量约为 1600Mt，海底结核约为 700Mt。铜储量大的国家分别是美国、智利、加拿大、俄罗斯、赞比亚和秘鲁等，这些国家的铜储量约占世界总量的 1/2。

(2) 铅的资源。据统计，铅的总储量约为 290Mt。铅储量最多的国家是美国，其次是澳大利亚、加拿大、墨西哥、俄罗斯、秘鲁和南非。我国也属于铅储量丰富的国家，铅矿主要分布在河南、云南和内蒙古等地区。

(3) 锌的资源。据统计，锌的总储量约为 325Mt。锌资源丰富的国家有加拿大、俄罗斯、美国、澳大利亚和秘鲁等。我国是锌储量丰富的国家，锌矿主要分布在云南、内蒙古、甘肃、广西和湖南等地区。我国锌资源的特点是硫化矿占绝大多数，90% 的储量为原生硫化矿矿石。

(4) 镍的资源。陆地上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资源是含镍锰结核。据美国地质调查局公布的 2010 年世界镍储量报告，全球陆地镍资源为 130Mt，其中 72.2% 为氧化物矿（红土矿），平均品位为 1.28%，硫化镍矿占 27.8%，平均品位为 0.58%。镍资源主要分布在古巴、加拿大、俄罗斯、新喀里多尼亚、

印度尼西亚、南非、澳大利亚、中国、巴西、哥伦比亚、多米尼加、希腊和菲律宾等国家。我国镍储量为 3.6Mt，在世界上居第八位。其中，硫化镍矿占总储量的 87%，氧化镍矿占 13%，主要分布在甘肃、四川、云南、青海、新疆和陕西等地区。

(5) 钴的资源。钴主要产于铜或铜镍矿床中，是一种副产金属。已探明的钴储量为 5Mt，而赋存于深海底部的锰结核中的钴高达 220Mt。刚果金和赞比亚的铜矿床是钴的主要来源，钴量约占全世界总量的 60% 以上。镍红土矿也是重要的钴资源。

(6) 锡的资源。锡储量大的国家主要在亚洲，包括中国、马来西亚、印度尼西亚、泰国和缅甸等，锡量约占全部储量的 60%。我国的锡资源很丰富，主要集中在云南南部、广西西北部和东北部，其次是湖南、江西、四川、广东和内蒙古等地区。

## 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。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	生产	精炼	可综合回收的元素
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	电 解	Cu、Au、Ag、Se
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

有色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，达到有效利用矿产资源的目，取得最佳的技术经济指标。

## 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值组分，又能避免环境污染，是一个至关重要的课题。

在新世纪里，重金属冶金面临两大任务：

(1) 最大限度地减少冶金过程中资源与能源的消耗，减少环境污染，实现可持续发展；

(2) 把冶金的传统产业与高新技术相结合，开发新一代的金属材料及新的冶金技术。

### 复习思考题

- 1-1 重金属包括哪些元素？确认它们在元素周期表中的位置。
- 1-2 叙述重金属的主要用途。
- 1-3 叙述我国重金属资源的储量与分布。
- 1-4 叙述重金属的主要冶炼方法。
- 1-5 在环境保护论述中常提及的“重金属离子污染”主要包括哪些离子？
- 1-6 在 10 种主要有色金属中，重金属有几种？



## 2 铜冶金

### 2.1 概 述

#### 2.1.1 铜及其化合物的性质

##### 2.1.1.1 铜的物理性质

铜是一种比较柔软的金属，它的可锻性非常好，强度和塑性的比值范围大。退火铜的抗拉强度为 215 ~ 245MPa，铜的纯度越高，强度值越低。当温度升高时，铜的强度降低，塑性却增加。纯铜能拉成很细的铜丝和压成 0.0026mm 厚的铜箔。

良好的导电性是铜最有价值的特性，铜的导电性在所有金属中仅次于银。与其他纯金属一样，铜的电阻随温度升高而增加。少量杂质元素或少量合金化元素进入铜中，也会降低其电导率。铜的传热性能也很好，仅次于金和银。当在固溶体中加入少量其他元素后，铜的热导率会有较大程度的降低。

铜在熔点时的蒸气压仅为 1.5996Pa，因此在冶炼温度下，铜几乎不挥发。熔融铜能溶解很多气体，如 H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、CO 和水蒸气等。

组织致密的铜磨光时呈红色，有金属光泽，液态的铜表面呈油绿色。铜合金颜色更多，可呈红黄色、金黄色、淡黄色和白色。

##### 2.1.1.2 铜的化学性质

铜在元素周期表中是第 29 号元素，价电子层结构为 3d<sup>10</sup>4s<sup>1</sup>。主要化合价为 0、+1、+2，这三种化合价态的相对稳定性受介质的影响很大。铜有 11 种同位素，其中<sup>63</sup>Cu 和<sup>65</sup>Cu 无放射性，天然丰度分别为 69.09% 和 30.91%。

铜在干燥的空气中不起变化，但在含有 CO<sub>2</sub> 的潮湿空气中发生反应 2Cu + O<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O → CuCO<sub>3</sub> · Cu(OH)<sub>2</sub>，表面会产生碱式碳酸铜 (CuCO<sub>3</sub> · Cu(OH)<sub>2</sub>) 的膜层，俗称铜绿。这层膜能阻止铜被进一步腐蚀，但铜绿有毒。

铜在空气中加热至 185℃ 以上时便开始氧化，表面产生一层暗红色的铜氧化物；当温度高于 350℃ 时，铜的颜色逐渐由玫瑰色变为黄铜色，最后变成黑色 CuO 外层，中间层为 Cu<sub>2</sub>O，内层则仍是金属铜。

由于铜的电位比氢的电位正，属于正电性元素，不能从酸中置换出氢；若无氧化剂或适宜的配位剂存在，则铜不溶于非氧化性酸，如盐酸、稀硫酸等。铜可溶于硝酸、热浓硫酸、氰化物溶液、氯化铜溶液以及高铁离子的氯化物和硫酸盐溶液中。

铜能与氧、硫、卤素等元素直接化合生成铜的化合物，硫化橡胶可使铜变黑。

##### 2.1.1.3 铜的主要化合物及其性质

(1) 氧化亚铜 (Cu<sub>2</sub>O)。氧化亚铜在自然界中以赤铜矿的形态存在。Cu<sub>2</sub>O 是反磁性化合