

有色金属

冶金、材料、再生与环保

屠海令 赵国权 郭青蔚 主编



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

有色金属冶金、材料、再生与环保

屠海令 赵国权 郭青蔚 主编

化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

·北 京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

有色金属冶金、材料、再生与环保/屠海令, 赵国权,
郭青蔚主编. —北京: 化学工业出版社, 2002.12

ISBN 7-5025-4183-7

I. 有… II. ①屠…②赵…③郭… III. ①有色金属
冶金 ②有色金属冶金-原料-制备 ③二次金属-有色金属
冶金 IV. TF8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 079735 号

有色金属冶金、材料、再生与环保

屠海令 赵国权 郭青蔚 主编

责任编辑: 丁尚林

责任校对: 陶燕华

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市管庄永胜印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 33½ 字数 837 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4183-7/TG·4

定 价: 70.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序 言

有色金属与人类社会文明史息息相关。随着人类的进步和社会发展,有色金属起着越来越重要的作用。历史学家曾用器物使用作为社会生产力发展的里程碑,如石器时代、青铜时代、铁器时代等。当今,能源、信息和材料被称为社会的三大支柱。有色金属及其合金和化合物是材料的重要组成部分。有色金属既是优良的功能材料,又是重要的结构材料,是国民经济、国防军工和科学技术发展必不可少的基础材料和重要的战略物资。飞机、导弹、火箭、卫星、核潜艇等尖端武器以及原子能、电子计算机、通讯等所需材料,几乎无一不和有色金属有关。

中国是世界上最早生产有色金属的国家之一。三千年前中国开始冶炼铜,历史上曾创造灿烂的青铜文化。明崇祯十年(1637年)出版的《天工开物》一书中比较详细的介绍了中国明代晚期金、银、铜、锡、铅、锌等有色金属矿的开采、洗选、冶炼、加工方法和中国劳动人民在冶炼技术方面的发明创造。当时,中国的金属冶炼和加工业的生产规模、产量和技术都居世界前列。由于种种历史原因,近代中国有色金属工业逐渐趋于衰落。1949年中华人民共和国成立之前总共只能生产8种有色金属,年产量1.33万吨。新中国成立后,中央人民政府十分重视发展有色金属工业,有色金属的生产被列为国家重点发展项目,到1962年研究开发了全部有色金属的生产方法。1978年中国有色金属产量达到100万吨。党的十一届三中全会后,有色金属工业加快了发展步伐,仅用了10年时间于1988年增长到204万吨,1992年再增至300万吨,提前8年完成产量翻二番的目标。自此之后,中国有色金属产量稳步上升,1994年产量达394.5万吨,1995年496.6万吨,中国进入了世界有色金属生产大国的行列。2001年产量又达到856.5万吨,仅次于美国(1151万吨)居世界第二位。现在中国是世界上能够生产包括所有稀有金属在内的全部有色金属的少数几个国家之一。一些产品在国际市场上占有重要地位,例如中国的锌(2001年产量207.8万吨)、锡(2001年9.16万吨)、镁(2001年18.6万吨)、锑(2001年13.4万吨)、钨(2000年2.34万吨)、铋(2000年1122t)和稀土等均居世界第一位,其中锡、镁、锑、铋、钨和稀土还是出口大国,在世界市场上有着巨大影响。

当前中国有色金属已不可逆转地进入了世界市场竞争。在和国际资本竞争中我们必须坚持以市场为导向,深化企业改革,加快结构调整,搞好资源优化配置。为适应形势需要,我们组织了有关专家撰写本书。目的在总结建国50余年来有色金属的形成、发展过程和完整的工业体系的建立。本书综合性地介绍了有色重金属、有色轻金属、有色稀有金属和贵金属和半导体材料的冶金原理、冶炼技术、工艺过程和制备技术,同时介绍了有关环境保护、污染治理、二次资源再生和利用等方面的技术。还探讨了有色金属的发展趋势和重大资源综合利用前景。我们过去曾出版过很多单个金属的冶炼专门著作,它们都专业性很强,读者对象较为单一。本书作为一种综合性冶金著作,可供各级领导、管理人员、商贸人员、市场分析人员等冶金和非冶金人士的参考。

中国工程院院士

李 林 2002年10月10日

前 言

中国已发展成为仅次于美国居世界第二位的有色金属生产大国和消费大国。自改革开放以来,经过科技攻关、技术开发和引进技术消化吸收,有色金属生产技术从地质找矿、采矿选矿、金属冶炼和加工已经有了很大发展,主要生产领域的主要工艺技术已经达到或接近国际水平。与此同时,中国从事有色金属的学者、专家出版了一系列的专著。但这些专著都是单一金属冶金,如铜冶金学、铝冶金学等,或分组金属冶金,如稀土冶金、贵金属冶金等。这些著作专业性强,读者对象主要是从事该金属冶炼的工作人员。

当前,中国正处在承前启后的关键时期,有色金属工业要顺应经济全球化和区域交替互补的发展趋势,要以世界有色金属工业体系中重要一员的身份,积极参与国际分工和合作。值此中国已经进入 WTO 之际,中国有色金属工业必须集中现有综合实力,主动进入世界有色金属市场,要以全球有色金属市场、生产经营活动的范围和背景,创造生存的环境和舞台。为适应形势的需要和总结建国 50 余年有色金属工业技术的发展,我们组织有关专家撰写了本书。书中较详细地介绍了有色重金属、有色轻金属、有色稀有金属、贵金属和半导体材料的冶金原理、冶炼技术、工艺过程和材料制备技术,既包括有传统的冶炼工艺,更涵盖现代有色金属冶炼的最新技术,同时侧重介绍了和冶炼有关的环境保护、污染治理和二次资源再生和利用技术。对有色金属的应用及其在国民经济中的地位进行了阐述。书中介绍了中国和世界有色金属发展史、元素发现发展史,概要地描述了建国 50 余年来中国有色金属工业的形成过程和完整工业体系的建立。还探讨了它的发展趋势、资源需求和综合利用前景。本书可作为各级领导、管理人员、商贸人员、市场分析人员等冶金和非冶金专业人士的参考书籍。

全书共 11 章。其中,第一、三章由赵国权教授、郭青蔚教授、王小平高级工程师、徐传华教授撰写,第二、十一章由曹异生教授撰写,第四章由贾龙光教授撰写,第五章由王福兴教授(氧化铝)、易小兵教授(电解铝)、刘云来教授(镁部分)撰写,第六章由郭青蔚教授和王小平高级工程师撰写,第七章由刘世杰教授撰写,第八章由扬英芳教授撰写,第九章由吴义千教授、肖沃辉教授、潘春玲教授撰写,第十章由肖裕民教授撰写。除第五章的审稿工作由刘绍禄教授、洪建中教授完成外,其余部分的审稿和全书的编辑和校对工作由屠海令教授、赵国权教授和郭青蔚教授完成。由于水平所限,书中错误和疏漏之处在所难免,敬请批评指正。

编著者
2002.10.10

内 容 提 要

本书较详细地介绍了有色重金属、有色轻金属、有色稀有金属、有色贵金属和半导体材料的冶金原理、冶炼方法、工艺过程和材料制备技术，既包括传统的冶炼工艺，更有现代有色金属冶炼最新技术。对三大冶金体系火法冶金、湿法冶金和电冶金进行了较深入的探讨。同时侧重介绍了和冶炼生产有关的环境保护和污染治理问题及废旧有色金属的再生技术。对有色金属的应用及其在国民经济中的地位进行阐述。并扼要地介绍了中国和世界有色金属发展历史、有色金属工业的形成过程、有色金属完整工业体系的建立。还探讨了中国和世界有色金属工业的发展趋势、有色金属资源需求问题和重大资源综合利用前景。本书可作为有色金属专业的工程技术人员、科研人员及各级领导、管理人员、市场分析人员的参考工具书。

目 录

第一章 概述	1
第一节 金属定义	1
一、元素周期表中金属元素	2
二、元素周期表的结构	2
第二节 有色金属的分类	6
第三节 有色金属的基本性质	7
第四节 有色金属发展史略	9
一、世界有色金属发展史略	9
二、古代中国冶金对世界冶金的贡献	13
三、有色金属元素发现和生产发展史略	13
第五节 世界有色金属工业	14
一、世界铜工业	14
二、世界铝工业	19
三、世界铅、锌工业	20
四、世界镍、钴工业	25
五、其他有色金属	30
第六节 中国有色金属工业概况	36
一、有色金属工业的建立	36
二、中国有色金属工业体系	37
三、有色金属生产概况	41
第二章 有色金属的应用与市场	58
第一节 铜的应用及市场	59
一、铜的应用	59
二、铜的市场	60
第二节 铝的应用及市场	61
一、铝的应用	61
二、铝的市场	63
第三节 铅的应用及市场	64
一、铅的应用	64
二、铅的市场	65
第四节 锌的应用及市场	66
一、锌的应用	66
二、锌的市场	67
第五节 镍的应用及市场	68
一、镍的应用	68

二、镍的市场	68
第六节 锡的应用及市场	69
一、锡的应用	69
二、锡的市场	70
第七节 铋的应用及市场	71
第八节 镁的应用及市场	72
一、镁的应用	72
二、镁的市场	73
第九节 钨的应用及市场	74
一、钨的应用	74
二、钨的市场	74
第十节 钼的应用及市场	75
一、钼的应用	75
二、钼的市场	75
第十一节 稀土金属的应用及市场	76
第三章 有色金属冶炼工艺	78
第一节 火法冶金	78
一、原料准备	79
二、焙烧	81
三、熔炼	82
四、精炼	85
第二节 湿法冶金	87
一、浸出	87
二、固液分离	89
三、溶液净化	90
四、从溶液中提取金属	97
第三节 电冶金	100
一、电化冶金	100
二、电热冶金	105
第四节 高纯金属制备技术	108
一、化学提纯	109
二、物理提纯	110
第四章 有色重金属冶金	114
第一节 铜冶金	114
一、火法炼铜	115
二、湿法炼铜	126
第二节 铅冶金	131
一、火法炼铅	131
二、粗铅精炼	134
第三节 锌冶金	136

一、火法炼锌·····	136
二、湿法炼锌·····	140
第四节 镍冶金·····	142
一、硫化镍矿闪速熔炼·····	143
二、硫化镍精矿电炉熔炼·····	144
三、硫化镍精矿鼓风炉熔炼·····	144
四、低镍钨转炉吹炼·····	144
五、高镍钨转炉吹炼·····	146
六、硫化镍电解精炼·····	146
七、高镍钨湿法精炼·····	147
第五节 钴冶金·····	148
一、砷钴矿提钴·····	149
二、含钴黄铁矿提钴·····	149
三、含钴铜镍硫化矿提钴·····	149
四、转炉渣提钴·····	150
五、镍电解净液钴渣提钴·····	152
第六节 锡冶金·····	152
一、还原熔炼-硫化挥发法·····	153
二、锡精矿连续反射炉熔炼·····	155
三、富锡炉渣烟化炉硫化挥发·····	155
第七节 锑冶金·····	155
一、锑矿石直井炉挥发焙烧·····	156
二、锑矿鼓风炉挥发熔炼·····	156
三、氧化锑反射炉还原熔炼·····	157
四、湿法炼锑·····	158
第八节 汞冶金·····	159
一、汞精矿电热回转窑焙烧·····	159
二、高炉炼汞·····	160
三、沸腾炉炼汞·····	160
第九节 铋冶金·····	160
一、含铋物料的混合熔炼·····	161
二、矿浆电解法提取铋·····	162
第十节 镉冶金·····	162
一、电解沉积法提取镉·····	163
二、从含镉烟尘中提取镉·····	163
第五章 有色轻金属冶金·····	165
第一节 铝工业·····	165
一、氧化铝生产·····	167
二、电解铝工业·····	180
第二节 镁工业·····	193

一、概述	193
二、熔盐电解法炼镁	196
三、热还原法炼镁	203
四、镁精炼	207
五、国内外镁工业	209
第六章 稀有金属冶金	213
第一节 稀有高熔点金属	214
一、钨冶金	215
二、钼冶金	222
三、钛冶金	229
四、锆和铪冶金	238
五、钒冶金	247
六、铌冶金	252
七、钽冶金	258
八、铼冶金	266
第二节 稀有轻金属	270
一、锂冶金	270
二、铷和铯冶金	273
三、铍冶金	278
第三节 稀土金属冶金	283
一、稀土精矿分解	288
二、稀土元素分离提纯	291
三、稀土金属的制取	295
四、稀土金属的提纯	297
第四节 稀散金属冶金	298
一、镓冶金	298
二、铟冶金	303
三、锗冶金	305
四、铊冶金	309
五、硒和碲冶金	312
第五节 放射性金属冶金	317
一、铀冶金	317
二、钍冶金	324
第七章 贵金属冶金与再生回收	330
第一节 性质、应用和资源	330
一、主要物理、化学和生化性质	331
二、主要化合物和配合物	333
三、应用	337
四、资源	339
第二节 金矿冶金	341

一、砂金矿冶金	341
二、岩金矿冶金	341
三、伴生金矿提金	348
第三节 银矿冶金	348
一、矿石冶金	348
二、银的提取方法	349
第四节 铂矿冶金	351
一、砂铂矿冶金	351
二、原生铂矿选冶	352
第五节 共生资源综合利用	355
一、铜电解阳极泥处理	355
二、铅电解阳极泥提取金银	358
三、炼锌渣中提取银	359
四、从镍铜共生硫化矿中综合回收贵金属	359
第六节 二次资源的再生回收	366
一、来源、分类及特点	366
二、金银二次资源的再生回收	367
三、铂族金属二次资源的再生	368
第七节 贵金属的分离和精炼	370
一、贵金属的相互分离	370
二、贵金属精炼	382
第八章 半导体材料	392
第一节 概述	392
一、半导体材料的性质	392
二、半导体材料的分类	397
三、半导体材料的发展史	398
第二节 半导体中的杂质与晶格缺陷	399
一、半导体的纯度与本征导电性	399
二、半导体的能带结构	401
三、载流子浓度和半导体的导电机理	402
四、半导体的晶体结构	402
五、载流子迁移率	404
六、半导体材料及其重要参数一览	405
第三节 半导体材料制备技术	406
一、体单晶生长技术	406
二、薄膜生长技术	409
三、晶片制备技术	416
第四节 半导体材料各论	420
一、锗	420
二、硅	420

三、砷化镓·····	427
四、其他Ⅲ-V族化合物半导体材料·····	431
五、Ⅱ-VI族化合物半导体材料·····	437
六、宽能隙半导体材料·····	438
七、稀土掺杂半导体材料·····	439
第五节 半导体材料的测试技术·····	439
一、半导体基本参数测量·····	440
二、杂质浓度及缺陷测量·····	443
三、深能级测量·····	446
四、外延层的测量·····	446
五、各种谱仪测量技术·····	447
第九章 有色金属工业环境保护 ·····	449
第一节 概述·····	449
一、有色金属工业主要环境保护方针、政策、规定和取得的成果·····	449
二、有色金属工业环境保护科技的进步·····	450
第二节 烟气治理技术·····	453
一、烟道气的监测·····	453
二、烟气治理技术·····	453
第三节 有色金属工业废水治理技术·····	459
一、概述·····	459
二、废水监测·····	459
三、废水治理技术·····	460
四、废水处理构筑物和设备·····	461
第四节 固体废弃物治理和综合利用·····	464
一、固体废弃物有害特性监测·····	464
二、综合利用的途径和工程实例·····	465
三、固体废弃物治理和安全填埋技术·····	466
四、矿山复垦技术·····	466
第五节 工业噪声控制技术·····	467
一、定义及分类·····	467
二、工业、企业噪声的监测·····	467
三、噪声控制方法·····	468
第六节 环境影响评价·····	469
一、基本概念·····	469
二、环境影响评价方法·····	470
第七节 清洁生产技术·····	471
一、清洁生产定义及内容·····	471
二、清洁生产审计·····	471
第十章 有色金属再生 ·····	473
第一节 再生有色金属的原料来源及预处理·····	474

一、原料来源及特点·····	474
二、废杂金属的预处理·····	474
第二节 铜再生·····	475
一、直接利用·····	475
二、间接利用·····	477
第三节 铝再生·····	479
一、废杂铝料生产再生铝和铝合金·····	480
二、再生铝合金的精炼·····	481
三、废杂铝灰料再生利用·····	483
四、其他方面的回收利用·····	483
第四节 铅再生·····	484
一、反射炉熔炼·····	485
二、鼓风炉熔炼·····	485
三、短回转窑熔炼·····	485
四、废杂铅与矿铅搭配熔炼·····	486
五、废杂铅的综合处理流程·····	486
六、废杂铅生产再生铅合金·····	487
第五节 锌再生·····	487
一、废杂锌料生产再生锌·····	487
二、废杂锌料再生利用·····	489
三、废锌锰干电池的回收利用·····	491
四、热镀锌渣的回收利用·····	491
第六节 锡再生·····	492
一、马口铁废料生产再生锡·····	492
二、含锡合金废料生产再生锡及其他锡产品·····	493
三、热镀锌残渣生产再生锡·····	494
第七节 镍钴再生·····	496
一、合金钢废料生产电解镍·····	496
二、合金钢废料生产电解钴·····	497
第十一章 有色金属发展趋势·····	499
第一节 世界有色金属进展及发展趋势·····	499
第二节 中国有色金属进展及发展趋势·····	500
第三节 国内外有色金属需求量预测·····	502
一、世界有色金属需求量预测·····	502
二、国内有色金属需求量预测·····	503
第四节 21 世纪有色金属工业面临的形势·····	503
一、市场前景·····	503
二、资源状况·····	504
三、科技进步·····	504
四、中国有色金属工业的形势·····	505

第五节 有色金属工业发展方向·····	506
一、中国有色金属工业发展方向·····	506
二、发展中国有色金属工业需要采取的措施·····	506
三、发展中国有色金属工业政策建议·····	509
第六节 中国有色金属工业今后技术发展方向·····	510
一、地质勘探·····	510
二、采矿·····	510
三、选矿·····	510
四、铝工业·····	511
五、有色重金属冶金·····	511
六、钛·····	511
七、稀土金属·····	511
八、加工·····	511
第七节 有色金属行业优先发展的技术领域·····	511
一、隐伏矿找矿技术·····	511
二、地下矿山采掘设备无轨化技术·····	512
三、铝工业节能降耗技术·····	512
四、低品位和难处理铜矿湿法提取技术·····	512
五、金属硫化矿无污染强化冶炼技术·····	512
六、多金属复杂共生矿分离提取技术·····	512
七、突破西部地区新资源的开发技术·····	512
八、有色金属现代连铸连轧技术·····	512
九、重视高新技术材料制备技术·····	513
第八节 世界有色金属资源需求·····	513
一、铝矿资源·····	513
二、铜矿资源·····	514
三、铅锌资源·····	515
四、镍矿资源·····	516
五、钨矿资源·····	517
六、锡矿资源·····	517
七、钼矿资源·····	517
八、锑矿资源·····	518
九、钴矿资源·····	518
十、稀土金属资源·····	519
参考文献·····	521

第一章 概述

有色金属与人类社会的文明史息息相关。历史发展证明，材料是社会进步的物质基础和先导。金属的使用和冶金技术的进步和人类社会关系密切。历史学家曾用器物的使用作为社会生产力发展的里程碑，如青铜时代、铁器时代等。

能源、信息技术和材料被称为现代社会的三大支柱。当今，信息技术、生物技术、新材料技术和新能源技术已构成一个前所未有的科学群。有色金属及其合金、化合物是现代材料的重要组成部分，物质世界已发现的 112 种元素中，有色金属占三分之二以上（95 种），他们与能源技术、生物技术、信息技术关系十分密切。其应用遍及第一、第二、第三产业和现代高新技术的各个领域，在国民经济中占有重要地位。有色金属已成为国民经济和国防所必需的材料，许多有色金属特别是稀有金属是国家重要的战略金属。一个国家的有色金属的消费量和生产量是衡量国家综合实力和强盛的重要标志之一。

中国是世界上最早生产有色金属的国家之一。3000 年前中国已开始冶炼铜，历史上曾创造过灿烂的青铜文化。但由于种种历史原因，近代中国有色金属工业逐渐趋于衰落。到 1949 年中国只能生产 8 种有色金属，总产量仅 1.33 万吨，中华人民共和国成立后，政府十分重视发展有色金属工业，有色金属生产被列为国家重点发展的项目之一。1978 年全国有色金属产量突破 100 万吨，改革开放以后，中国有色金属工业迅速发展，1988 年达到 200 万吨，1992 年创 300 万吨纪录，1994 年破 400 万吨纪录（达 410 万吨），1995 年产量达 523 万吨，1998 年创 618 万吨，1999 年达到 650 万吨高峰。现在，中国已成为世界上有色金属的生产大国，能够生产包括所有稀有金属在内的全部有色金属以及国防和尖端科学所需的各种有色金属新型材料。中国有色金属总产量仅次于美国，居世界第二位，中国国内铜、铝消费量分别达到 200 万吨和 300 万吨，成为世界上仅次于美国的第二大铜消费国和仅次于美国和日本的第三大铝消费国。此外，中国锌（1998 年产量 148 万吨）、锡（1998 年产量 7.93 万吨）、锑（1998 年产量 82 000 t）、钨（1998 年产 24 069 t）均居世界第一。中国是世界最大的稀土生产国和出口国，1998 年中国稀土矿产品产量达 65 000 t，加工品产量 52 000 t，出口量 44 700 t，和镁锑以及钽丝（世界市场占有率约 40%）和铋等产品，在世界市场上占有举足轻重的地位。

第一节 金属定义

金属是黑色金属和有色金属的总称。金属最突出的特性是它们的容易失去电子的倾向。因此，从化学角度看，金属是指在溶液中容易生成正离子的化学元素，其氧化物与水结合形成氢氧化物而不形成相应的酸。金属之间在化学上的差别主要表现在电子序方面，许多化学反应，特别是氧化还原反应，决定于其电极电位的正负及其数值大小。

从物理角度看，由于金属的原子的外层结构中都含有游离的或易激化的电子，因而具有一系列的金属特性（金属性）。金属的良导电性：在外电场的影响下，金属通过其内部的电子运动而传导电流；金属的导电性一般比典型的非金属大几个数量级，金、银、铜、铝是最好的金属导体；汞是较差的导体，但也被应用在许多必须应用液态导体的电器装置中。金属的良导热性：在固体中，金属无疑都是最佳的导热体，铜、银、金、铝也都是导热性最好的

金属。金属光泽：磨光的金属表面具有反射光线的性能，大多数金属能反射所有波长的光线，因而呈银白色，铜和金吸收光谱中蓝色区域的某些光线，因而呈黄色和红色。金属的延展性：大多数金属都有延性（能被拉长成丝）和展性（能被捶打成薄片）。金属的非挥发性：除汞外，所有金属在 25℃ 时都是固体，金属的熔点范围很宽，熔点低的接近室温，如 Cs 为 29℃，Ga 30℃，而钨达 3380℃。金属不溶于水和有机溶剂：没有金属能“真正溶解”于水和有机溶剂，只有液态汞能溶解某些金属生成汞齐。金属在失去电子后容易生成金属键，金属键的强度直接与占据晶格位置的正离子的电荷有关。

一、元素周期表中金属元素

在元素周期表中被认为是金属的元素如下（见表 1-1）：

- 所有 2A 和 2A 族元素；
- 3A 族（Al、Ga、In、Tl）、4A 族（Sn、Pb）和 5A（Bi）中的较重元素；
- 所有过渡金属（B 副族）；
- 所有镧系和锕系元素。

在已发现的 112 种元素，上述金属共占 90 种。

位于周期表对角线上的几种元素，其性质介于金属和非金属之间，被称为半金属、准金属或类金属，它们主要是硅、锗、砷、硒、碲、铋，也有人将硼、碳、砷、钋划入半金属，所有半金属元素都呈现金属光泽。在化学反应中，都不能形成正离子，它们的电离能都在 800 kJ/mol（左右），而电负性接近于 2.0。半金属大都有几种同素异构体，其中有些呈金属性，有些呈非金属性质。例如，呈石墨形态的碳呈半金属性质，而呈金刚石结构的碳是非金属性质，硅和锗仅有一种呈金刚石结构的半金属形态。普通形态的锗和铋具有相当好的导电性，但至少有一种非金属同质异构体。固态硒大约有二种同素异构体为半金属，两种为非金属，碲是半金属，也是无定形态。

许多半金属是典型的半导体，其最具代表性的独特性质是它们的导电性对温度的依从关系。与金属相反，半导体性质的半金属的导电性随温度升高而增强。

原子的电子构型是元素物理性质和化学性质的基础，元素周期表（表 1-1）充分体现了原子构型的变化和元素性质（特别是化学性质）间的关系。该表按原子系数排列，同时原子核的核电子和外层电子也逐一增加，组成在元素物理化学性质上有一定规律性变化，共分为 7 个周期和 18 列。在周期表中已发现的 112 种元素中，金属占绝大多数，达 90 种，此外尚有 6 种半金属。因此，了解有色金属在周期表中的位置，认识元素的周期性变化规律，掌握金属元素的性质及其和相邻元素间和相似性、差异性，对于选择提取冶金方法，特别是主金属和矿物中伴生元素的分离，具有重要意义。

二、元素周期表的结构

（一）元素周期表和横与竖的关系

从表 1-1 可看出，所包含的 7 个横排周期，除第一个周期外，其余 6 个周期都有有色金属：属于第 2 周期的 8 个元素中，有色金属有 2 个（Li 和 Be），属于第 3 周期的 8 个元素中，有色金属有 3 个（Na、Mg、Al），属于第 4 周期 18 个元素中，有色金属占 14 种（由 K 至 Ge），第 5 周期中的 18 个元素中，有色金属占 15 个（Rb 至 Sb），第 6 周期是一个特别长的周期，共有 32 个元素，其中有色金属占 30 个（由原子序数为 55 的 Cs 到原子序数为 84 的 Po），它们中另有 14 个元素因镧系收缩（即在 f 能级上逐个填入电子）而另有 14 个稀土元素（从原子序数 58 的铈到原子序数为 71 的镧）被提出来放在周期表主体的下面。第 7 周

期都是放射性金属，它们中也有 14 个元素（锕系）被提出来放在周期表主体的下面。

表 1-1 元素周期表

周期	IA	化学元素周期表																0	电子层	族		
																		2 He		0 族		
1	1H 氢 1.0079																	4.00260	K	2		
	IIA																					
2	3 Li 锂 6.941	4 Be 铍 9.01218																				
3	11 Na 钠 22.98977	12 Mg 镁 24.305																				
			III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII B			IB	II B										
4	19 K 钾 39.0983	20 Ca 钙 40.08	21 Sc 钪 44.9559	22 Ti 钛 47.90	23 V 钒 50.9415	24 Cr 铬 51.996	25 Mn 锰 54.9380	26 Fe 铁 55.847	27 Co 钴 58.9332	28 Ni 镍 58.70	29 Cu 铜 63.546	30 Zn 锌 65.38	31 Ga 镓 69.72	32 Ge 锗 72.59	33 As 砷 74.9216	34 Se 硒 78.96	35 Br 溴 79.904	36 Kr 氩 83.80				
5	37 Rb 铷 85.4678	38 Sr 锶 87.62	39 Y 钇 88.9059	40 Zr 锆 91.22	41 Nb 铌 92.9064	42 Mo 钼 95.94	43 Tc 锝 95.94	44 Ru 钌 101.07	45 Rh 铑 102.9055	46 Pd 钯 106.4	47 Ag 银 107.868	48 Cd 镉 112.41	49 In 铟 114.82	50 Sn 锡 118.69	51 Sb 锑 121.75	52 Te 碲 127.60	53 I 碘 126.9045	54 Xe 氙 131.30				
6	55 Cs 铯 132.9054	56 Ba 钡 137.33	57-71 La-Lu 镧系	72 Hf 铪 178.49	73 Ta 钽 180.9479	74 W 钨 183.85	75 Re 铼 186.207	76 Os 锇 190.2	77 Ir 铱 192.22	78 Pt 铂 195.09	79 Au 金 196.9665	80 Hg 汞 200.59	81 Tl 铊 204.3	82 Pb 铅 207.2	83 Bi 铋 208.9804	84 Po 钋 (209)	85 At 砹 (210)	86 Rn 氡 (222)				
7	87 Fr 钫 (223)	88 Ra 镭 226.0254	89-103 Ac-Lr 锕系	104 Rf 𨭈 (261)	105 Hs 𨭉 (262)	106 𨭊 (263)	107 𨭋 (262)	108 𨭌 (265)	109 𨭍 (266)													
	镧系	57 La 镧 138.9055	58 Ce 铈 140.12	59 Pr 镨 140.9077	60 Nd 钕 144.24	61 Pm 钷 (147)	62 Sm 钐 150.4	63 Eu 铕 151.96	64 Gd 钆 157.25	65 Tb 铽 158.9254	66 Dy 镝 162.50	67 Ho 钬 164.9304	68 Er 铒 167.26	69 Tm 铥 168.9342	70 Yb 镱 173.04	71 Lu 镥 174.953						
	锕系	89 Ac 锕 227.0278	90 Th 钍 232.0381	91 Pa 镤 231.0359	92 U 铀 238.0289	93 Np 镎 237.0482	94 Pu 钚 (244)	95 Am 镅 (243)	96 Cm 锔 (247)	97 Bk 锫 (247)	98 Cf 锿 (251)	99 Es 镄 (254)	100 Fm 镆 (257)	101 Md 镎 (258)	102 No 钅 (259)	103 Lr 铹 (260)						

在周期表中，金属性由上至下逐渐增强，而同族元素由于原子的外层电子构型相同而在性质上具有相似性。以碱金属为例，从表 1-2 电子构型可看出，每一种金属的原子在其最外层的能级上都含有一个单独的 s 电子，因此 IA 族金属（Li、Na、K、Rb、Cs）间具有很大的化学相似性，当他们参加化学反应时，都失去最外层的 s 电子而形成 +1 价离子（Li⁺、Na⁺、K⁺、Rb⁺、Cs⁺）。同时它们都是质柔软（要以用刀切割）、银白色、极其活泼的金属，通常须贮存在油中以防止与空气中的氧发生反应。化学上，这些金属都多和硫和水激烈反应，生成通式为 MCl 的氯化物、通式为 M₂S 的硫化物或放出氢气。此外，铈（4d⁴5s¹）和钽（5d⁴6s¹）、锆（4d²5s²）和钆（5d²6s²）、稀土金属（外层电子均为 s²）（只是在影响较小的 f 层能级和 d 层能级变化）都是极为相似的元素，冶金上难以分离。

表 1-2 碱金属的电子构型

Li	1s ² 2s ¹	[He]2s ¹
Na	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ¹	[Ne]3s ¹
K	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁶ 4s ¹	[Ar]4s ¹
Rb	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁶ 4s ² 3d ¹⁰ 4p ⁶ 5s ¹	[Kr]5s ¹
Cs	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁶ 4s ² 3d ¹⁰ 4p ⁶ 5s ¹ 4d ¹⁰ 5p ⁶ 6s ¹	[Xe]6s ¹

周期表中，同一周期的元素，从左到右随着核电荷的增加，原子半径由大变小（见图 1-1），这是由于原子核对各电子层的作用增强，使原子半径减小的缘故。又同一族元素中从上到下，由于电子层增多，使原子半径由小变大。从表中可看出，所有元素中铯原子半径最大，因