



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

 废物资源综合利用技术丛书

YOUSEJINSHU GONGYE FEIWU ZONGHE LIYONG

有色金属工业废物 综合利用

周连碧 祝怡斌 邵立南 等编著



化学工业出版社



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

❖ 废物资源综合利用技术丛书

YOUSEJINSHU GONGYE FEIWU ZONGHE LIYONG

有色金属工业废物 综合利用

周连碧 祝怡斌 邵立南 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书分四篇共 26 章。第一篇主要介绍有色金属工业种类、生产工艺、“三废”特征、“三废”处理与利用、“三废”处理利用相关管理要求；第二篇主要介绍有色金属工业固体废物特征与综合利用状况、综合利用原则与方法、采选固体废物利用技术、冶炼固体废物综合利用技术；第三篇主要介绍有色金属工业废气来源、特征、综合利用现状及发展趋势，综合利用技术方法，采选废气（粉尘）综合利用技术，冶炼废气综合利用技术；第四篇主要介绍有色金属工业废水特征与综合利用状况、废水综合利用技术方法、采选废水综合利用技术、冶炼废水处理与综合利用技术。

本书内容较为全面丰富，可参考性强，可供从事金属工业环境工程、能源工程及金属矿产等领域的工程技术人员、科研人员和管理人员参考，也可供高等学校环境科学与工程、资源循环科学与工程及相关专业师生参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

有色金属工业废物综合利用/周连碧等编著. —北京: 化学工业出版社, 2017.11

(废物资源综合利用技术丛书)

ISBN 978-7-122-30567-1

I. ①有… II. ①周… III. ①有色金属冶金-工业废物-废物综合利用 IV. ①X758

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 216908 号

责任编辑: 刘兴春 刘 婧

装帧设计: 王晓宇

责任校对: 宋 玮

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 42 $\frac{3}{4}$ 字数 1075 千字 2018 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 168.00 元

版权所有 违者必究

《废弃物资源综合利用技术丛书》

编委会

主任：岑可法

副主任：刘明华 陈冠益 汪 苹

编委成员（以汉语拼音排序）：

程洁红 冯旭东 高华林 龚林林 郭利杰 黄建辉

蒋自力 金宜英 梁文俊 廖永红 刘 佳 刘以凡

潘 荔 宋 云 王 纯 王志轩 肖 春 杨 帆

杨小聪 张长森 张殿印 张 辉 赵由才 周连碧

周全法 祝怡斌

《有色金属工业废物综合利用》

编著人员

编著者：周连碧 祝怡斌 邵立南 李 莉 楚敬龙 孟 磊

宋 爽 霍汉鑫 朱亦珺 李 青 苏文湫 陈 斌

谭海伟 陈玉福 苗 雨 李 韧 范书凯 陈 谦

胡建龙 郑 曦 陈国强

随着我国经济的高速发展,城市化进程不断加快,人民生活水平不断提高,“废水”“废气”“固体废物”排放到环境中,不仅会对环境产生污染,而且也是一种资源浪费,已经引起了全社会的关注。“三废”的处理处置原则是“减量化、资源化、无害化”。因此,“三废”的处理对实现循环经济具有重要意义,开展“三废”综合治理利用是防治工业“三废”污染、搞好环境保护的重要途径之一。有色金属工业是国民经济重要行业之一,产生的“三废”受到了国家和行业部门的高度重视,因此,编著者依据多年科研和工程实践中积累的经验 and 知识,在相关高等学校、科研单位的热情支持和协作参与下编著了本书。

本书共分四篇。第一篇主要介绍有色金属工业种类、生产工艺、“三废”特征、“三废”处理与利用、“三废”处理利用相关管理要求;第二篇主要介绍有色金属工业固体废物特征与综合利用状况、综合利用原则与方法、采选固体废物利用技术、冶炼固体废物综合利用技术,重点介绍了废石、尾矿、炉渣、赤泥、浸出渣、烟尘、阳极泥等固体废物的来源、成分、特性、典型有色金属生产的固体废物利用技术以及工程实例;第三篇主要介绍有色金属工业废气来源、特征、综合利用现状及发展趋势,综合利用技术方法,采选废气(粉尘)综合利用技术,冶炼废气综合利用技术,重点介绍了炉窑烟气、烟粉尘、二氧化硫烟气等废气的来源、余热、成分、特性,烟气中余热、二氧化硫、尘粒等的回收利用,典型有色金属生产的废气利用技术以及工程实例;第四篇主要介绍有色金属工业废水特征与综合利用状况、废水综合利用技术方法、采选废水综合利用技术、冶炼废水处理与综合利用技术,重点介绍了井下涌水、矿坑涌水、选矿废水、尾矿库溢流水、烟气净化废水、冲洗废水、污酸、酸性废水、初期雨水等废水的来源、水质特性、典型有色金属生产的废水处理利用技术以及工程实例。本书内容较为全面丰富,可参考性强,可供环境科学与工程、能源工程、金属矿产等领域的工程技术人员、科研人员和管理人员使用,也可供高等学校相关专业师生参考。

本书主要由周连碧、祝怡斌、邵立南等编著,具体分工如下:第一篇中,第1章由孟磊、周连碧编著,第2章由宋爽、祝怡斌编著,第3章由霍汉鑫、周连碧编著,第4章由朱亦琨、李青编著,第5章由孟磊、李青编著;第二篇中,第1章由朱亦琨、苏文湫编著,第2章由孟磊、祝怡斌编著;第3章由苏文湫、李青编著,第4章由李青、周连碧编著,第5章由陈斌、祝怡斌编著,第6章由霍汉鑫、周连碧编著,第7章由朱亦琨、李青编著;第三篇中,第1章、第6章、第7章由楚敬龙编著,第2章由谭海伟编著,第3章由陈玉福、苗雨编著,第4章由谭海伟编著,第5章由李韧、李莉、范书凯、陈谦编著;第四篇中,第1章、第2章、第3章由邵立南编著,第4章由胡建龙编著,第5章由郑曦编著,第6章、第

7 章由陈国强编著。全书最后由周连碧、祝怡斌统稿、定稿。

本书得到了杨晓松、宗子就等专家的大力支持，在此一并表示感谢。我们谨向所有关心并支持本书出版的同志们致以衷心的感谢。

限于编著者水平和编著时间，书中不妥和疏漏之处在所难免，敬希广大读者批评指正。

编著者
2017 年 3 月

第一篇 有色金属工业概论

第1章 有色金属工业种类

1.1 重有色金属工业	002
1.2 轻有色金属工业	005
1.3 贵金属工业	006
1.4 稀有稀散金属工业	007
1.5 稀土工业	008
参考文献	008

第2章 有色金属工业生产工艺

2.1 采矿工艺	009
2.2 选矿工艺	014
2.3 冶炼工艺	021
参考文献	044

第3章 有色金属工业“三废”特征

3.1 “三废”产生来源及特征	045
3.2 环境危害特征	049
3.3 资源价值特征	056
参考文献	060

第4章 有色金属工业“三废”处理与利用

4.1 废气处理与利用	061
4.2 废水处理利用	062
4.3 固体废物处置利用	065
4.4 “三废”综合利用模式	066
参考文献	067

第5章 有色金属行业“三废”处理利用相关管理要求

5.1 行业规范(准入) 条件要求	068
5.2 行业清洁生产要求	078
5.3 行业污染防治技术政策要求	097
5.4 行业污染防治最佳可行技术指南要求	102

第二篇 有色金属工业固体废物综合利用技术

第1章 有色金属工业固体废物特征与综合利用状况

1.1 有色金属工业固体废物来源与分类	144
1.2 有色金属工业固体废物属性	148
1.3 有色金属工业固体废物特征	150
1.4 有色金属工业固体废物管理	153
1.5 有色金属工业固体废物综合利用现状与问题	161
1.6 有色金属工业固体废物综合利用发展趋势	165
参考文献	167

第2章 有色金属工业固体废物综合利用原则与方法

2.1 有价金属回收	168
2.2 作建筑材料	179
2.3 充填采空区	182
2.4 土壤改良剂	183
2.5 功能材料	184
参考文献	184

第3章 有色金属采选固体废物综合利用技术

3.1 有色金属采选固体废物来源与资源特征	185
3.2 有色金属采选固体废物综合利用	194
3.3 有色金属采选固体废物工程实例	200
参考文献	235

第4章 重有色金属冶炼固体废物综合利用技术

4.1 重有色金属冶炼固体废物来源	236
4.2 重有色金属冶炼固体废物组成成分及资源特征	240
4.3 重有色金属冶炼固体废物综合利用	253
4.4 重有色金属冶炼固体废物工程实例	290
参考文献	305

第5章 轻有色金属冶炼固体废物综合利用技术

5.1 轻有色金属冶炼固体废物来源	306
5.2 轻有色金属冶炼固体废物组成成分及资源特征	310
5.3 轻有色金属冶炼固体废物综合利用	313
5.4 轻有色金属冶炼固体废物综合利用工程实例	325

参考文献	328
------	-----

第6章 贵金属冶炼固体废物综合利用技术

6.1 贵金属冶炼固体废物来源	329
6.2 贵金属冶炼固体废物组成成分及资源特征	333
6.3 黄金冶炼固体废物综合利用	335
参考文献	341

第7章 稀有稀散金属冶炼固体废物综合利用技术

7.1 稀有稀散金属冶炼固体废物来源	342
7.2 稀有稀散金属冶炼固体废物组成成分及资源特征	345
7.3 稀有稀散冶炼固体废物综合利用	345
参考文献	347

第三篇 有色金属工业废气综合利用技术

第1章 有色金属工业废气综合利用概述

1.1 有色金属工业废气来源	350
1.2 有色金属工业废气资源特征	351
1.3 有色金属工业废气综合利用现状	360
1.4 有色金属工业废气综合利用发展趋势	364
参考文献	365

第2章 有色金属工业废气综合利用技术方法

2.1 废气余热回收	366
2.2 二氧化硫回收	368
2.3 烟粉尘回收	369

第3章 有色金属采选废气(粉尘)综合利用技术

3.1 有色金属采选废气(粉尘)来源	374
3.2 有色金属采选废气(粉尘)组成成分及资源特征	377
3.3 采选粉尘综合利用	377
3.4 有色金属采选废气(粉尘)工程实例	385
参考文献	391

第4章 重有色金属冶炼废气综合利用技术

4.1 重有色金属冶炼废气来源	392
4.2 重有色金属冶炼废气组成成分及资源特征	424
4.3 铜冶炼废气综合利用	433

4.4	铅冶炼废气综合利用	455
4.5	锌冶炼废气综合利用	461
4.6	镍冶炼废气综合利用	466
4.7	锡、锑冶炼废气综合利用	467
4.8	重有色金属冶炼废气工程实例	475
	参考文献	502

第5章 轻金属冶炼废气综合利用技术

5.1	轻金属冶炼废气来源	505
5.2	轻金属冶炼废气组成成分及资源特征	512
5.3	铝冶炼废气综合利用	512
5.4	镁冶炼废气综合利用	516
5.5	轻金属冶炼废气工程实例	519
	参考文献	522

第6章 稀有稀散金属冶炼废气综合利用技术

6.1	稀有稀散金属冶炼废气来源	523
6.2	稀有稀散金属冶炼废气组成成分及资源特征	527
6.3	钨冶炼废气综合利用	527
6.4	钼冶炼废气综合利用	528
6.5	稀有稀散金属冶炼废气工程实例	529
	参考文献	534

第7章 贵金属冶炼废气综合利用技术

7.1	贵金属冶炼废气来源	535
7.2	贵金属冶炼废气组成成分	537
7.3	黄金冶炼废气综合利用	537
7.4	贵金属冶炼废气工程实例	538
	参考文献	540

第四篇 有色金属工业废水处理与综合利用技术

第1章 有色金属工业废水特征与综合利用状况

1.1	有色金属工业废水来源与分类	542
1.2	有色金属工业废水特征与危害性	543
1.3	有色金属工业废水综合利用现状	545
1.4	有色金属工业废水综合利用存在的问题与发展趋势	546
	参考文献	547

第2章 有色金属工业废水综合利用技术方法

2.1 酸性废水及重金属废水处理技术方法	548
2.2 选矿废水处理技术方法	550
2.3 氰化废水处理技术方法	551
2.4 含氟废水处理技术方法	552
2.5 氨氮废水处理技术方法	552
参考文献	554

第3章 有色金属采选废水综合利用技术

3.1 有色金属采选废水来源与水质特征	555
3.2 有色金属采选废水综合利用处理技术	557
3.3 有色金属采选废水工程实例	566
参考文献	575

第4章 重有色金属冶炼废水处理与综合利用技术

4.1 重有色金属冶炼废水来源与污染特征	576
4.2 重有色金属冶炼废水处理与循环利用技术	597
参考文献	624

第5章 轻有色金属冶炼废水处理与综合利用技术

5.1 轻有色金属冶炼废水来源与污染特征	625
5.2 轻有色金属冶炼废水处理与综合利用处理技术	635
5.3 轻有色金属冶炼废水工程实例	637
参考文献	639

第6章 稀有金属冶炼废水处理与综合利用技术

6.1 稀有金属冶炼废水来源与污染特征	640
6.2 稀有金属冶炼废水处理与综合利用处理技术	649
6.3 稀有金属冶炼废水工程实例	652
参考文献	654

第7章 贵金属冶炼废水处理与综合利用技术

7.1 贵金属冶炼废水来源与污染特征	655
7.2 贵金属冶炼废水处理与综合利用处理技术	657
7.3 贵金属冶炼废水工程实例	662
参考文献	664

索引

第一篇 有色金属工业概论



第 1 章



有色金属工业种类

有色金属是指铁、铬、锰三种金属以外的所有金属。有色金属可分为重金属(如铜、铅、锌)、轻金属(如铝、镁)、贵金属(如金、银)及稀有稀散金属(如稀有轻金属锂、铷、铯等,稀散金属镓、铟、铊等)。与黑色金属相比,有色金属更具有耐蚀性、耐磨性、导电性、导热性、韧性、高强度性、放射性、易延性、可塑性、易压性和易轧性等特殊性能^[1]。

有色金属是国民经济发展的基础材料,航空、航天、汽车、机械制造、电力、通信、建筑、家电等绝大部分行业都以有色金属材料为生产基础。随着现代化工、农业和科学技术的突飞猛进,有色金属在人类发展中的地位越来越重要。它不仅是世界上重要的战略物资、重要的生产资料,而且也是人类生活中不可缺少的消费资料的重要材料,我国有色金属工业是以开发利用矿产资源为主的重要基础原材料产业。

1.1 重有色金属工业

重有色金属是指密度大于 $4.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的有色金属材料,包括铜、铅、锌、镍、锡、锑、钴、汞、镉、铋等纯金属及其合金。本节主要介绍铜、铅、锌、镍、锡、锑。

1.1.1 铜

铜为紫红色金属,晶体结构为面心立方晶格,密度较大,熔点和沸点较高。由于其电导率和热导率好,抗腐蚀能力强,易加工,抗拉强度和疲劳强度高而被广泛应用。在当前世界金属消费量中仅次于铁和铝,居第三位,成为国计民生、国防工程及高新技术领域中不可缺少的基础材料和战略物资,被广泛应用于电气工业、机械工业、化学工业、国防工业等领域。

美国资源调查局(USGS) 2015 年数据显示,全球铜储量共约为 $7.0 \times 10^8 \text{t}$ 。世界铜矿资源分布相对集中,主要集中在智利、美国、赞比亚、俄罗斯和秘鲁等国。其中智利是目前世界上铜资源最丰富的国家,其铜金属储量约占世界总储量的 29.86%。产量、出口量亦居世界第一位。

中华人民共和国国土资源部 2016 年发布的《中国矿产资源报告》数据显示,2015 年我国铜查明资源储量为 $9.9102 \times 10^7 \text{t}$ 。“十二五”期间,铜矿新发现矿产地 52 处,其中大中型 11 处,新增查明资源储量 $2.541 \times 10^7 \text{t}$,在西藏、云南、江西等地新探获一批世界级铜矿

区。我国铜资源特点主要表现为：适合选冶生产的铜矿物原料赋存于多种矿床类型，主要矿床类型有斑岩型矿床、夕卡岩型矿床、层状型矿床、火山沉积型矿床和铜-镍硫化物型矿床五大类，分别占总资源储量的45.5%、30%、8%、8%和7.5%；矿石结构复杂，嵌布粒度不均，多为不均匀浸染粒度矿石，甚至有不少矿物组合；结构嵌布细微，成分复杂，难选矿石较多；矿石化学成分多样，伴生、共生多种有益、有害组分，选冶工艺条件复杂^[2]。

铜冶炼可分为火法冶炼和湿法冶炼两大类。目前，世界铜产量中80%用火法冶炼生产，约20%采用湿法冶炼。火法炼铜多采用熔炼(或熔炼+贫化)—吹炼—火法精炼—电解精炼工艺，最终得到精炼铜。现代湿法冶炼有硫酸化焙烧—浸出—电积、浸出—萃取—电积、细菌浸出等法，适于低品位复杂矿、氧化铜矿、含铜废矿石的堆浸、槽浸选用或就地浸出^[3]。

1.1.2 铅

铅为带蓝色的银白色重金属，质地柔软，易与其他金属(如锌、锡、铋、砷^①等)制成性能优良的合金。金属铅、铅合金和其化合物广泛应用于机械制造、船舶制造、轻工、冶金、化工等行业，其中主要用于蓄电池工业。

据美国地质调查局2015年公布的数据显示，目前全球已探明铅资源量共20多亿吨，主要分布在澳大利亚、中国、俄罗斯、秘鲁等国家。其中澳大利亚占比最大，为40%。

中国的铅矿资源储量较为丰富，位居全球第二位，据中华人民共和国国土资源部2016年发布的《中国矿产资源报告》数据显示，“十二五”期间，铅查明资源储量为 7.7669×10^7 t，新增查明储量为 2.3302×10^7 t。铅矿平均品位1.60%。我国铅矿资源特点主要表现为：矿产地分布广泛，但储量主要集中在新疆、湖南、福建等地；成矿区域和成矿期相对集中；大中型矿床占有储量多，矿石类型复杂，主要有硫化铅矿、氧化铅矿、硫化铅锌矿、氧化铅锌矿以及混合铅锌矿；贫矿多，富矿少，结构构造和矿物组成复杂的多、简单的少。

铅冶炼主要以火法炼铅为主，通常分为粗铅冶炼和精炼两个步骤。粗铅冶炼过程是指铅精矿经过氧化脱硫、还原熔炼、铅渣分离等工序，产出粗铅，粗铅含铅95%~98%。粗铅中含有铜、锌、镉、砷等多种杂质，再进一步精炼，去除杂质，形成精铅，精铅含铅99.99%以上^[4]。粗铅精炼分为火法精炼和电解精炼，我国通常采用电解精炼。

1.1.3 锌

锌是一种浅灰色的过渡金属，在常温下，性较脆；100~150℃时，变软；超过200℃后，又变脆。锌在常温下表面会生成一层薄而致密的碱式碳酸锌膜，可阻止锌被进一步氧化。当温度达到225℃后，锌则会剧烈氧化。同时锌也是一种常见的有色金属，能与多种有色金属制成合金，其中最主要的是与铜、锡、铅等组成的黄铜，与铝、镁、铜等组成压铸合金等。锌及其合金主要用于钢铁、冶金、机械、电气、化工、轻工、军事和医药等领域。

据美国地质调查局数据显示，截至2015年年底，全球已查明的锌资源总量超过 1.9×10^9 t，锌储量较多的国家有中国、澳大利亚、美国、秘鲁和墨西哥等。其中，澳大利亚、中国、秘鲁、墨西哥四国的矿石储量占世界锌储量的70.5%。

中国锌资源主要以铅锌伴生矿为主，“十二五”期间，锌查明资源储量为 1.49852×10^8 t，我国新发现矿产地81处，其中大型矿产地41处，锌矿新增查明资源储量为 3.7832×10^7 t，

① 砷为类金属，本书中看作重金属。

主要分布在新疆、湖南、福建等地。

锌的生产方法有火法和湿法两种，锌冶炼主要采用湿法炼锌工艺，其产量占世界锌总量的80%以上。湿法炼锌工艺中，以焙烧—中性浸出—酸性浸出—电积工艺生产硫酸和锌锭为主要流程^[5]。

1.1.4 镍

镍是一种银白色的金属，质坚硬，具有良好的铁磁性和延展性，难熔耐高温，并具有很高的化学稳定性，在空气中不易氧化等特征，主要用于合金(如镍钢和镍银)及用作催化剂(如兰尼镍，尤指用作氢化的催化剂)。

镍的矿物资源主要有硫化镍矿和氧化镍矿，在硫化镍矿中镍以游离硫化镍形态存在，在磁黄铁矿中镍以类质同象赋存。而氧化镍矿中，镍红土矿含铁高，含硅镁低，含镍为1%~2%；硅酸镍含铁低，含硅镁高，含镍为1.6%~4.0%。氧化镍矿的开发利用以由超基性岩风化形成的镍红土矿为主。镍主要以镍褐铁矿形式存在。存于深海底部的含镍锰结核是镍的重要远景资源。2015年全球探明镍基础储量约 8.1×10^7 t，资源总量 1.48×10^8 t，基础储量约60%为红土镍矿，约40%为硫化镍矿。

我国镍矿资源较为丰富，以硫化铜镍矿为主，约占全国总量的90%，并且共伴生元素多、综合利用价值高；红土镍矿约占总量的10%。我国镍矿床类型主要为岩浆熔离型硫化铜镍矿床，围岩种类丰富。我国镍矿资源比较丰富，“十二五”期间查明镍资源量 1.1166×10^7 t，新增镍资源储量为 2.792×10^6 t。

镍冶炼工艺分硫化镍精矿冶炼和氧化镍矿冶炼两大类。硫化镍精矿冶炼生产金属镍主要采用高镍硫磨浮电解和高镍硫浸出电积两种方法。氧化镍矿有两种类型：一种是含镁高的硅酸盐镍矿，宜于用电炉熔炼生产镍铁或镍铈；另一种是含铁高的褐铁矿型氧化镍矿，宜于用湿法冶炼。

1.1.5 锡

锡是一种银白色金属，具强光泽，质软、有延展性、化学性质稳定、抗腐蚀、易熔、摩擦系数小，锡盐无毒，因此广泛用于电子工业、化学药品、冶金工业、航空工业等领域。

全球的锡矿分布比较集中，主要分布在中国、印度尼西亚、秘鲁、巴西等国。其他地区共计约 1.8×10^5 t。据美国地质调查局2015年发布的数据，全球锡储量共约 4.8×10^6 t，基础储量约为 1.1×10^7 t。在自然界中锡主要以自然元素、金属互化物、氧化物、氢氧化物、硫化物、硫酸盐、硅酸盐、硼酸盐等形式存在。目前已发现锡矿物和含锡矿物五十余种，其中具有工业价值的主要矿物为锡石、黄锡矿、圆柱锡矿、硫锡铅矿和辉锑锡铅矿。有时黑硫银锡矿、黑硼锡矿、马来亚石、水锡石、水镁锡矿等也可以相对富集，形成工业价值。

中国锡资源丰富，长期以来一直是锡的生产大国，储量和产量均居于世界前列。至2015年，我国查明锡资源储量为 4.18×10^6 t。矿产地分布于15个省(区)，以广西、云南两省(区)储量最多，湖南、广东、内蒙古、江西次之，以上6省(区)锡储量共占全国的97.7%。位于云南哀牢山区的个旧市，是世界已知最大的锡矿藏之一，素有“锡都”之称。

锡的生产分炼前处理、熔炼、精炼三大工序。依处理原料的不同，在冶炼工艺上主要有还原熔炼-硫化挥发法、硫化挥发-还原熔炼法。我国炼锡厂大多采用“锡精矿还原熔炼—粗锡火法精炼-电解或真空蒸馏—锡炉渣烟化处理”的工艺流程，还原熔炼设备主要有奥斯麦

特炉和电炉等。我国的锡冶炼工艺使用中等品位的锡精矿，并采用烟化炉处理富锡炉渣以取代传统的二段熔炼法。

1.1.6 锑

锑是一种银灰色的金属，在常温下是一种耐酸物质，性脆，无延展性，是电和热的不良导体，在常温下不易氧化，有抗腐蚀性能。锑在合金中的主要作用是增加硬度，常被称为金属或合金的硬化剂。锑及锑化合物首先使用于耐磨合金、印刷铅字合金及军火工业。随着科学技术的发展，现在已被广泛用于生产各种阻燃剂、搪瓷、玻璃、橡胶、涂料、颜料、陶瓷、塑料、半导体元件、烟花、医药及化工等部门产品。

目前，在地壳上虽然已发现含锑矿物达 120 多种，但具有工业利用价值、适合现今选冶条件且含锑在 20% 以上的锑矿物仅有 10 种，即辉锑矿(含 Sb 71.4%)、方锑矿(含 Sb 83.3%)、锑华(含 Sb 83.3%)、锑赭石(含 Sb 74%~79%)、黄锑华(含 Sb 74.5%)、硫氧锑矿(含 Sb 75.2%)、自然锑(含 Sb 100%)、硫汞锑矿(含 Sb 51.6%)、脆硫锑铅矿(含 Sb 35.5%)、黝铜矿(含 Sb 25%)。其中，辉锑矿是锑的选冶最主要的矿物原料。在地质勘探过程中应将矿石划分为自然类型和工业类型。锑矿石的自然类型可分为氧化矿石、混合矿石、原生矿石 3 种。锑矿石的工业类型有单一锑、锑金、锑汞、锑金钨、锑钨等。

锑在地壳中的含量很低，丰度仅为 0.2×10^{-8} ，分布不均匀。全球锑集中分布在中国、俄罗斯、玻利维亚和塔吉克斯坦等国。其中我国锑成矿条件优越，是世界上锑资源最丰富的国家，至 2015 年，锑矿查明资源储量 2.926×10^6 t。锑矿床在空间分布上具有区域性集中的趋向，其储量也明显具有相对集中的特点，我国现已探明的锑矿主要分布在湖南、广西、西藏、贵州和甘肃。

现在金属锑的冶金生产方法可分为火法炼锑与湿法炼锑两大类。火法炼锑是生产锑的主要方法，我国的锑产量居世界首位，几乎全部为火法生产。火法炼锑主要是挥发焙烧(挥发熔炼)-还原熔炼法，即先生产三氧化锑，再进行还原熔炼生产粗锑，此外还有铁沉淀熔炼直接生产粗锑。

1.2 轻有色金属工业

轻有色金属是指密度小于 4.5g/cm^3 的有色金属，包括铝、镁、钠、钙、锶、铍、钛和钾。本章主要介绍铝、镁。

1.2.1 铝

铝是银白色的轻金属(相对密度只有 2.7)。由于铝具有质轻、导热性、导电性和可加工性良好，可构成高强度、耐腐蚀性的合金以及可再生循环利用等优良的性能，因而成为有色金属中应用最广泛的金属，是仅次于钢铁的第二大金属。铝被广泛用于轻型结构材料、建筑工业、电气工业、耐腐蚀性材料、食品包装等。

世界铝土矿资源比较丰富，美国地质调查局 2015 年数据显示，世界铝土矿资源量为 $(5.5 \sim 7.5) \times 10^{10}$ t。世界铝土矿已探明储量约为 2.8×10^{10} t，主要分布在澳大利亚、中国、几内亚、巴西、希腊、圭亚那、印度、印度尼西亚等国家。

我国国土资源部 2016 年发布的《中国矿产资源报告》显示，至 2015 年，我国铝土矿查明

资源储量为 4.71×10^9 t。我国铝矿、铝矾土资源储量分布较为集中，主要分布在山西、贵州、广西和河南。

铝土矿石是目前氧化铝生产最主要的原料，按其矿物成分分为三水铝石、一水软铝石、一水硬铝石和混合型四种类型。根据铝土矿的成因又分为红土型铝土矿、沉积型铝土矿、岩溶型铝土矿、堆积型铝土矿四大类。铝冶炼包括氧化铝和电解铝两大生产过程，生产氧化铝的方法大致可分为碱法、酸法、酸碱联合法、电热法、高压水化学法等，目前，工业上普遍采用碱法生产氧化铝。碱法生产氧化铝，按生产过程的特点又分为拜耳法、烧结法和拜耳-烧结联合法(包括并联、串联、混联联合法等)。

1.2.2 镁

镁是一种银白色的轻质碱土金属，化学性质活泼，能与酸反应生成氢气，具有一定的延展性和热消散性。镁常用作还原剂，置换钛、锆、铀、铍等金属。镁主要用于制造轻金属合金、球墨铸铁、科学仪器和格氏试剂等，也可用于制造烟火、闪光粉、镁盐、吸气器、照明弹等。结构特性类似于铝，具有轻金属的各种用途，可作为飞机、导弹的合金材料。

镁在自然界分布广泛，主要以固体矿和液体矿的形式存在。固体矿主要有菱镁矿、白云石等；液体矿主要来自海水、天然盐湖水、地下卤水等。据美国地质调查局 2015 年公布的数据显示，全球已探明的菱镁矿资源量达 1.2×10^{10} t，主要分布在俄罗斯、中国、韩国。

中国是世界上镁资源最为丰富的国家之一，镁资源矿石类型全，分布广。菱镁矿是中国优势矿产之一，世界菱镁矿储量的 21% 集中在中国，产量的 67% 由中国提供。我国菱镁矿探明储量的矿区有 27 处，分布于 9 个省(区)，以辽宁菱镁矿储量最为丰富，占全国的 85.6%，此外，山东、西藏、新疆、甘肃等地区菱镁矿也较丰富。

目前，炼镁工业使用的原料多为菱镁矿、白云石、光卤石及海水、盐湖水中的 $MgCl_2$ ，菱镁矿为提炼金属镁的主要原料。世界各国生产镁的方法可分为两大类，一类是热还原法炼镁技术，热还原法可分为硅热还原法和碳热还原法两种。硅热还原法包括皮江法、波尔扎诺法(电内热法)、熔渣导电的半连续硅热法三种。我国主要采用皮江法炼镁工艺。另一类为电解法炼镁，又分为电解熔融氯化镁和电解熔盐中的氯化镁。

1.3 贵金属工业

贵金属主要指金、银和铂族金属钌、铑、钐、铱、铂 8 种金属元素。贵金属在地壳中含量少、相对密度大(10.4~22.4)、熔点高、价格贵。贵金属主要应用于首饰及金融储备、催化剂、抗高温腐蚀的器皿器件、信息传感材料、医药等领域。本节主要介绍金。

金为黄色金属，具有面心立方晶格，其特点是有极好的可锻性和延展性。在国民经济和人民生活获得了广泛的应用。黄金不仅是用于储备和投资的特殊通货，同时又是首饰业、电子业、现代通信、航空航天等部门的重要原材料。

世界黄金主要产自矿产金和伴生金，砂金所占比例很小。金矿资源储量主要集中在南非、澳大利亚、俄罗斯、印度尼西亚和美国等国家。2015 年，我国金矿查明资源储量 11563.5t。“十二五”期间，金矿新发现矿产地 131 处，其中大中型 51 处，新增查明资源储量 4949.4t，主要分布在山东、内蒙古等地。我国金矿床的特点主要为：矿床类型多，缺少超大型矿床；资源分布广泛，储量相对集中；富矿少，中等品位多；品位变化大，贫富悬