

冶金工程概论

张训鹏 主编

 中南大学出版社

冶金工程概论

张训鹏 主编

中南大学出版社

冶金工程概论

张训鹏 主编

-
- 责任编辑 秦瑞卿
责任印制 汤庶平
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:0731-8876770 传真:0731-8710482
- 印 装 中南大学印刷厂
-
- 开 本 787 × 1092 1/16 印张 12.5 字数 302 千字
版 次 1998 年 12 月第 1 版 2005 年 7 月第 3 次印刷
书 号 ISBN 7-81061-127-5/TF · 009
定 价 25.00 元
-

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

本书是按照高等学校冶金工程专业学科目录和冶金工程概论教学大纲编写的规划教材。

本书主要介绍了钢铁和主要有色金属（铜、铝、锌、钨等）的提取冶金过程的基本原理、工艺特点和基本工艺流程。通过学习，学生对冶金（包括火法、湿法和电冶金）生产过程有一个全面而概括的了解，初步掌握冶金的基本知识，为进一步学习冶金学理论和生产工艺打下必要的专业基础。除此之外，本书还简要介绍了金属分类，主要金属的性质、用途、资源状况、生产方法、近年来的世界产量和价格，以及发展我国冶金工业的基本国情等方面的内容。因此它可作为非冶金专业，尤其是冶金相关专业的普通冶金学教材，对从事冶金行业的管理人员也是一本实用的专业参考书。

本书由张训鹏（第1~6章）、贺庆元（第7章）、邓汝富（第8章）编写，由张训鹏任主编。本书由中南工业大学郭遼、彭容秋、李洪桂和龙远志四位教授审阅并提出了宝贵意见，谨此表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中错误和缺点难以避免，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

| | |
|-----------------------------|------|
| 第1章 绪 论 | (1) |
| 1.1 金属及其分类 | (1) |
| 1.2 金属产量和价格 | (3) |
| 1.3 冶金和冶金方法 | (3) |
| 1.4 冶金工艺流程和冶金过程 | (5) |
| 1.5 冶金工业在国民经济中的地位和作用 | (7) |
| 复习思考题 | (8) |
| 第2章 矿石与选矿 | (9) |
| 2.1 矿石 | (9) |
| 2.2 选矿 | (12) |
| 复习思考题..... | (20) |
| 第3章 炼 铁 | (21) |
| 3.1 概述..... | (21) |
| 3.2 高炉冶炼用原料..... | (21) |
| 3.3 高炉冶炼中铁氧化物碳热还原的一般规律..... | (26) |
| 3.4 高炉冶炼炉内反应..... | (31) |
| 3.5 高炉结构及附属设备..... | (35) |
| 3.6 高炉生产的主要技术经济指标和发展方向..... | (39) |
| 复习思考题..... | (42) |
| 第4章 炼 钢 | (43) |
| 4.1 概述..... | (43) |
| 4.2 炼钢基本原理..... | (46) |
| 4.3 氧气转炉炼钢..... | (54) |
| 4.4 电弧炉炼钢..... | (58) |
| 4.5 平炉炼钢..... | (61) |
| 复习思考题..... | (64) |
| 第5章 铜冶金 | (65) |
| 5.1 概述..... | (65) |
| 5.2 造钼熔炼的原理..... | (71) |
| 5.3 传统造钼熔炼方法..... | (76) |
| 5.4 闪速熔炼..... | (80) |
| 5.5 熔池熔炼..... | (85) |

| | | |
|------------|---------------|--------------|
| 5.6 | 冰铜吹炼 | (88) |
| 5.7 | 粗铜精炼 | (91) |
| | 复习思考题 | (101) |
| 第6章 | 锌冶金 | (102) |
| 6.1 | 概述 | (102) |
| 6.2 | 硫化锌精矿的焙烧 | (106) |
| 6.3 | 湿法炼锌的浸出过程 | (110) |
| 6.4 | 硫酸锌溶液净化 | (118) |
| 6.5 | 锌的电解沉积 | (120) |
| 6.6 | 鼓风炉炼锌 | (125) |
| | 复习思考题 | (132) |
| 第7章 | 铝冶金 | (133) |
| 7.1 | 概述 | (133) |
| 7.2 | 氧化铝生产的矿物原料和方法 | (134) |
| 7.3 | 铝酸钠溶液 | (136) |
| 7.4 | 拜尔法生产氧化铝 | (137) |
| 7.5 | 碱石灰烧结法生产氧化铝 | (147) |
| 7.6 | 联合法生产氧化铝 | (152) |
| 7.7 | 铝电解生产 | (155) |
| | 复习思考题 | (164) |
| 第8章 | 钨冶金 | (165) |
| 8.1 | 概述 | (165) |
| 8.2 | 钨精矿的分解 | (169) |
| 8.3 | 纯化合物的制备 | (175) |
| 8.4 | 氢还原生产金属钨粉 | (185) |
| 8.5 | 致密钨的生产 | (189) |
| | 复习思考题 | (190) |
| | 主要参考文献 | (191) |

第1章 绪论

1.1 金属及其分类

通常把元素周期表中具有光亮的金属光泽，很高的导热、导电性及良好的延展加工性的化学元素称为金属。

在目前已知的 109 种元素中，对于其中的 93 种金属元素（尚有一部分未在工业上应用）各国有不同的分类方法。有的分为铁金属和非铁金属两大类：铁金属系指铁和铁基合金，其中包括生铁、铁合金和钢；非铁金属则指铁及铁合金以外的金属元素；有的分为黑色金属和有色金属两大类。我国采用后一种分类方法，即将铁、铬、锰列入黑色金属，因为铬和锰的生产与铁及铁合金关系密切；将铁、铬、锰以外的金属列入有色金属。可见，我们所指的黑色金属即铁金属，有色金属即非铁金属。

在提取冶金工业中，通常按密度大小、矿物原料富集程度、发现的早晚以及用途和价格又将有色金属分为：轻金属、重金属、稀有金属及贵金属四大类，见图 1-1。

顾名思义，轻金属与重金属的区别在于其密度，轻金属的密度均在 4.5g/cm^3 以下，例如，铝（2.7）、镁（1.74）；重金属的密度均在 6g/cm^3 以上，例如，锑（6.62）、锌（7.14）、铜（8.95）、铅（11.34）、汞（14.2）。这两类有色金属的化学性质也有较大差异，轻金属比重金属化学性质活泼，提取比较困难。在我国惯常所说的 10 种常用有色金属（铝、铜、锌、铅、镍、镁、锡、锑、钛、汞）中就有 9 种是重金属和轻金属，因其产量大，用途广，价格低，又称常用有色金属或贱金属。

贵金属是因其价格比一般常用金属昂贵而得名，如金、银和铂族金属等，它们与其它金属的区别还在于其化学活性很低，例如它们不与氧直接起反应，故又称惰性金属。

至于稀有金属，在目前已知的 93 种金属元素中约占 60 种（有的尚未在工业上应用）。这类金属中有的地壳丰度小，天然资源少；有的地壳丰度虽大，但赋存状态分散，不容易被经济地提取；有的在物理-化学性质上近似而不容易分离成单一金属。这些金属因过去制取和使用得很少，故得名为稀有金属。稀有金属开发较晚。第二次世界大战以来，由于新技术的发展，需求量的增大，稀有金属的研究和应用得到迅速发展，冶金新工艺不断出现，生产量也逐渐增多。稀有金属所包括的金属也在变化，如钛在现代技术中应用日益广泛，产量增多，所以有时也被列入轻金属。

稀有金属根据各种元素的物理和化学性质、赋存状态，生产工艺以及其它一些特征，又分为稀有轻金属、稀有高熔点金属、稀有分散性金属、稀土金属和稀有放射性金属等五类。

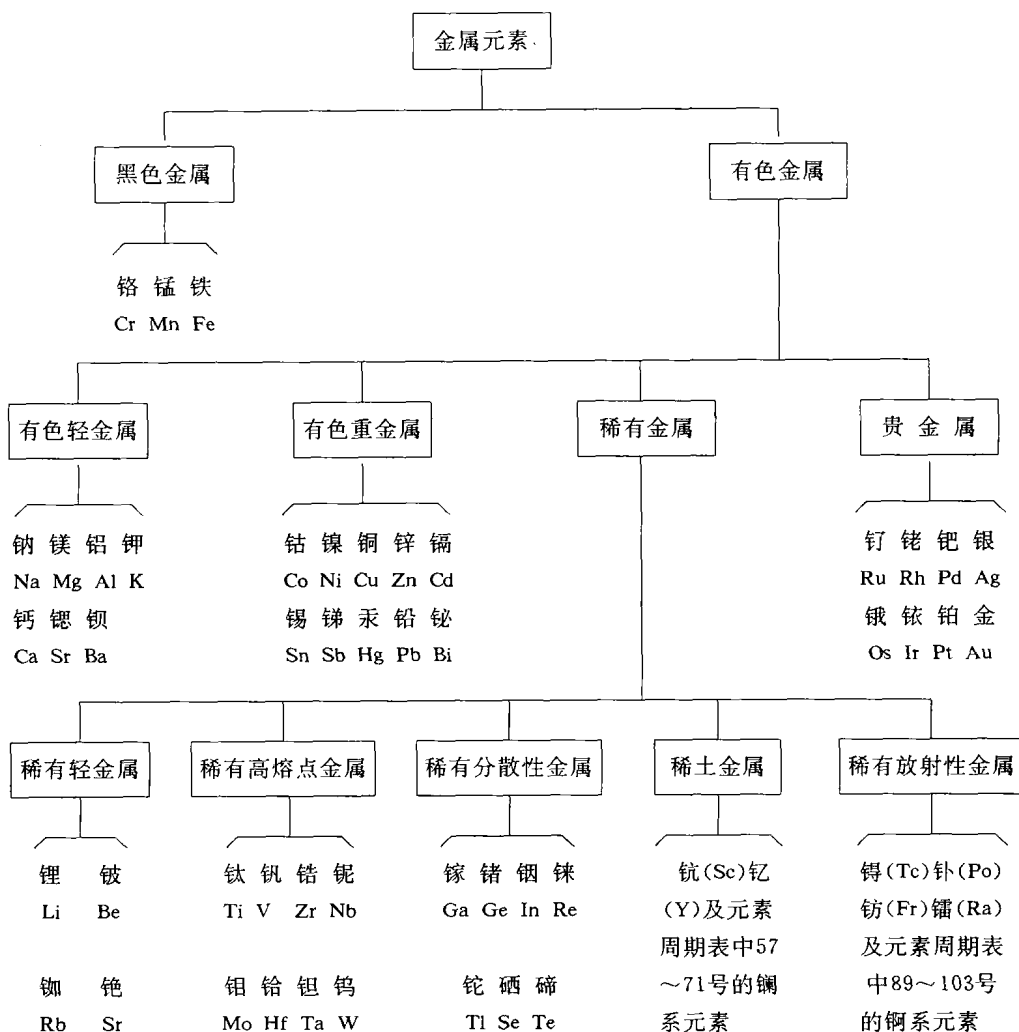


图 1-1 金属元素的分类

稀有轻金属，如锂、铍等，其特点是密度小，如锂的密度为 $0.53\text{g}/\text{cm}^3$ ；稀有高熔点金属的特点是熔点都很高，如钛的熔点为 1660°C ，钨的熔点为 3400°C ；稀散金属，如铟、锗、镓、铊等，这一类金属在地壳中几乎是平均分布的，没有单独的矿物，更没有单一的矿床，它们经常以微量杂质形态存在于其它矿物的晶格中；稀土金属包括镧系元素和与之化学性质近似的钪和钇共 17 个元素。“稀土”是从 19 世纪沿用下来的名称，实际上稀土并不似土，能制得典型的单一金属；稀土也并不稀少，地壳中含量比铅、锌、锡、钼、钨和贵金属多几十倍或几百倍。稀土金属的物理性质和化学性质非常相近，相互间差别很小，所以在矿石原料中，稀土金属总是相互伴生的；也正因为稀土金属性质相近，所以提取各种单独的纯稀土金属或单个的纯稀土化合物都是相当困难的。稀有放射性金属包括各种天然放射性元素钋、镭、锕及锕系元素，其特点是具有放射性。稀有放射性金属习惯上不视为普通提取冶金的对象。

1.2 金属产量和价格

众所周知，钢铁的产量特别大，而有色金属中的铝、铜、锌、铅等次之。大量生产的金属价格较低，如钢是最便宜的金属；反之，如铂族金属，产量很少，价格却昂贵。

世界主要金属的产量及其单价如图 1-2 所示。二者的关系大体上可用一圆滑的曲线表

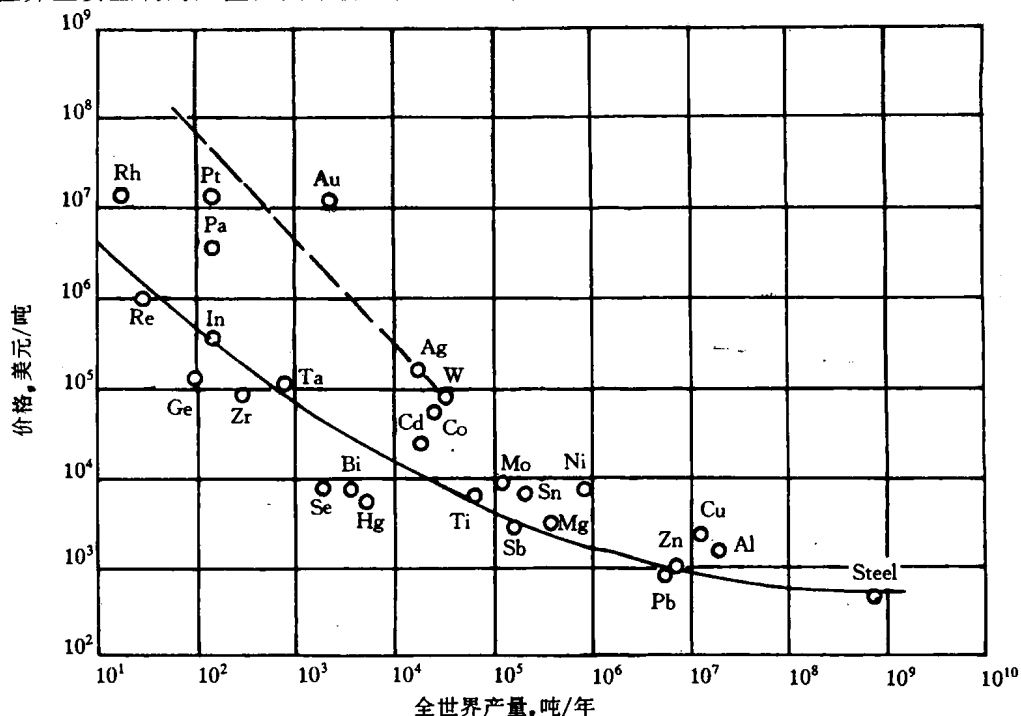


图 1-2 主要金属的产量与价格 (1996 年)

示，其中，金、银等金属除稀少之外，还具有作为稀贵金属的特殊价值。据 1996 年世界资料统计，铜、铝、铅、锌、镍、锡、金、银等 8 种有色金属的产量虽仅为钢产量 (7.5 亿吨) 的 6.4%，但其产值则达到钢产值的 50% 以上。有色金属和黑色金属相辅相成，共同构成现代金属材料体系。

1.3 冶金和冶金方法

冶金是一门研究如何经济地从矿石或精矿或其它原料中提取金属或金属化合物，并用各种加工方法制成具有一定性能的金属材料的科学。

广义的冶金包括矿石的开采、选矿、冶炼和金属加工。由于科学技术的进步和工业的发展，采矿、选矿和金属加工已各自形成独立的学科。狭义的冶金是指矿石或精矿的冶炼，即提取冶金。

从矿石或精矿提取金属 (包括金属化合物) 的生产过程称为提取冶金。由于这些生产过

程伴有化学反应，又称为化学冶金；它研究火法冶炼、湿法提取或电化学沉积等各种过程的原理、流程、工艺及设备，故又称过程冶金学。习惯上把过程冶金学简称为冶金学。

冶金的方法很多，可归结为以下三种方法：

(1) 火法冶金 它是指在高温下矿石或精矿经熔炼与精炼反应及熔化作业，使其中的金属与脉石和杂质分开，获得较纯金属的过程。整个过程一般包括原料准备、熔炼和精炼三个工序。过程所需能源，主要靠燃料燃烧供给，也有依靠过程中的化学反应热来提供的。

(2) 湿法冶金 它是在常温（或低于 100℃）常压或高温（100~300℃）高压下，用溶剂处理矿石或精矿，使所要提取的金属溶解于溶液中，而其它杂质不溶解，然后再从溶液中将金属提取和分离出来的过程。由于绝大部分溶剂为水溶液，故也称水法冶金。该方法主要包括浸出、分离、富集和提取等工序。

(3) 电冶金 它是利用电能提取和精炼金属的方法。按电能利用形式可分为两类：

① 电热冶金：利用电能转变成热能，在高温下提炼金属，本质上与火法冶金相同。

② 电化学冶金：用电化学反应使金属从含金属的盐类的水溶液或熔体中析出。前者称为水溶液电解，如铜的电解精炼和锌的电解沉积可归入湿法冶金；后者称为熔盐电解，如电解铝，可列入火法冶金。

采用哪种方法提取金属，按怎样的顺序进行，在很大程度上取决于金属及其化合物的性质、所用的原料以及要求的产品。冶金方法基本上是火法和湿法。钢铁冶金主要用火法，而有色金属冶金则火法和湿法兼有。

冶金方法的采用，正面临着能源的节省、环境保护、矿物资源日趋贫乏和资源综合利用等紧迫问题。在一定程度上它支配着冶炼厂的生产、设计、建厂和冶金技术的发展。节约能源依靠新技术和新方法，尤其是要改革电炉熔炼和有色金属电解生产过程的现有工艺，降低电耗。湿法冶金和无污染火法冶金能较好地满足日趋严格的环保要求，具有很大的发展前景。为了维持工业增长的需要，必须采取措施处理贫矿，一方面提高选矿技术，同时研究更有效的冶炼方法。矿物原料，尤其是多金属矿物原料的综合利用，是提取冶金降低生产成本提高经济效益的关键问题。近年来有色金属提取冶金企业正在努力实现多产品经营，并把金属生产和材料加工结合起来，提高冶金产品销售的附加值，借以降低主金属的冶炼成本。

从废金属和含金属的废料中回收金属对于扩大金属资源、降低金属生产能耗，减少环境污染有极其重要的意义和经济效益。常把金属废料称为二次原料以区别于矿物原料；把产出的金属产品称为再生金属以区别于矿产金属。近年来再生金属的产量在有色金属的消费量中已占有很高的比例，例如铜、铝、铅、锌等再生金属产量已占其金属总消费量的 30%~50%。同样，炼钢厂所产钢量有 35% 左右是由返回的废钢铁炼出来的。再生金属工业已成为冶金工业的重要部分。

冶金和其他学科领域一样，涉及的范围很广，它与化学、物理化学、热工、化工、机械、仪表、计算机等有极其密切的关系。冶金学不断地吸收上述基础学科和相关学科的新成就，指导着生产技术向广度和深度发展，而冶金生产工艺的发展又会对冶金学的充实、更新和发展提供不尽的源流和推动力。

1.4 冶金工艺流程和冶金过程

黑色金属矿石的冶炼，一般情况，矿石的成分比较单一，通常采用火法冶金的方法进行处理，即使有的矿石较为复杂，通过火法冶金之后，也能促使其伴生的有价金属进入渣中，再进行处理，如高炉冶炼用钒钛磁铁矿就是属于这种类型。

有色金属矿石的冶炼，由于其矿石或精矿的矿物成分极其复杂，含有多种金属矿物，不仅要提取或提纯某种金属，还要考虑综合回收各种有价金属，以充分利用矿物资源和降低生产费用。因此，考虑冶金方法时，要用两种或两种以上的方法才能完成。

由矿石或精矿提取和提纯金属不是一步可以完成的，需要分为若干个阶段才能实现，但各个阶段的冶炼方法和使用的设备都不尽相同。各阶段过程间的联系及其所获得的产品（包括中间产物）间流动线路图就称为某一种金属的冶炼工艺流程图。例如，钢铁冶金和湿法炼锌的工艺流程简图如图 1-3 所示。根据表示不同的内容，工艺流程图可分为设备连接图、原则流程图和数质量流程图。设备连接图是表示冶炼厂主要设备之间联系的图；原则流程图是表示各阶段作业间联系为主的图；数质量流程图则是表示各阶段作业所获产物的数量和质量情况的图。

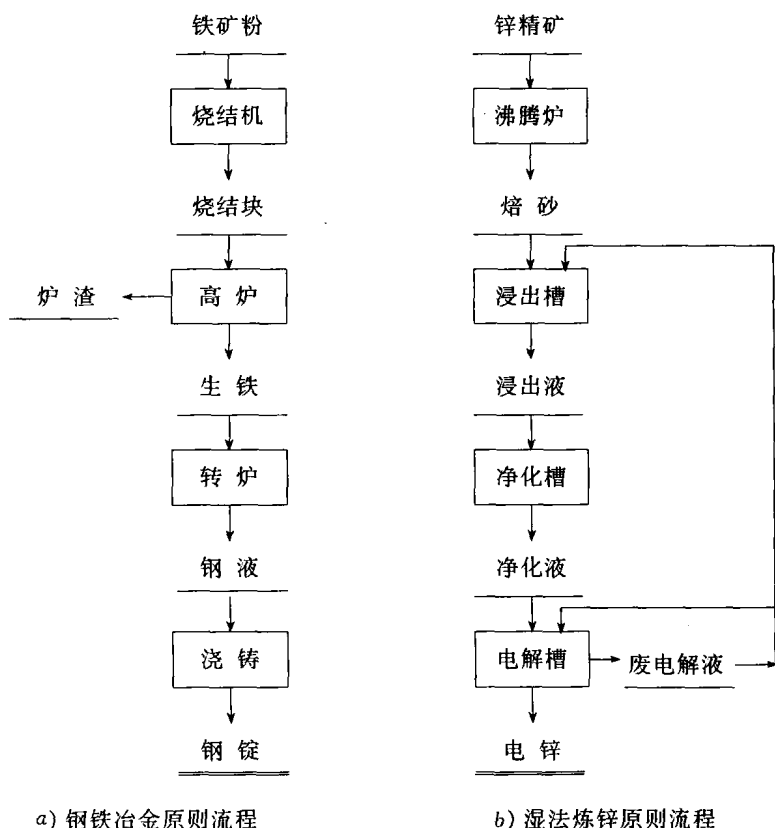


图 1-3 冶炼工艺流程图实例

从钢铁冶金和湿法炼锌的工艺流程图可知，一种金属的冶炼工艺流程包括多个冶炼阶段，而每一个冶炼阶段可能是火法、湿法或电化学冶金的方法。所以，通常把每一个冶炼阶段称为冶金过程。如高炉炼铁是一火法冶金过程，锌焙砂浸出是一湿法冶金过程，而净化液电积则为电化学冶金过程。

冶金工艺过程，包括许多单元操作和单元过程。本节重点介绍几个单元冶金过程：

(1) 焙烧：是指将矿石或精矿置于适当的气氛下，加热至低于它们的熔点温度，发生氧化、还原或其它化学变化的过程。其目的是改变原料中提取对象的化学组成，满足熔炼或浸出的要求。焙烧过程按控制气氛的不同，可分为氧化焙烧、还原焙烧、硫酸化焙烧、氯化焙烧等。

(2) 煅烧：是指将碳酸盐或氢氧化物的矿物原料在空气中加热分解，除去二氧化碳或水分变成氧化物的过程，煅烧也称焙解，如石灰石煅烧成石灰，作为炼钢熔剂；氢氧化铝煅烧成氧化铝，作为电解铝原料。

(3) 烧结和球团：将粉矿或精矿经加热焙烧，固结成多孔状或球状的物料，以适应下一工序熔炼的要求。例如，烧结是铁矿粉造块的主要方法；烧结焙烧是处理铅锌硫化精矿使其脱硫并结块的鼓风炉熔炼前的原料准备过程。

(4) 熔炼：是指将处理好的矿石、精矿或其它原料，在高温下通过氧化还原反应，使矿物原料中金属组分与脉石和杂质分离为两个液相层即金属（或金属铕）液和熔渣的过程，也叫冶炼。熔炼按作业条件可分为还原熔炼、造铕熔炼和氧化吹炼等。

(5) 火法精炼：在高温下进一步处理熔炼、吹炼所得含有少量杂质的粗金属，以提高其纯度。如熔炼铁矿石得到生铁，再经氧化精炼成钢；火法炼锌得到粗锌，再经蒸馏精炼成纯锌。火法精炼的种类很多，如氧化精炼、硫化精炼、氯化精炼、熔析精炼、碱性精炼、区域精炼、真空冶金、蒸馏等。

(6) 浸出：用适当的浸出剂（如酸、碱、盐等水溶液）选择性地与矿石、精矿、焙砂等矿物原料中金属组分发生化学作用，并使之溶解而与其他不溶组分初步分离的过程。目前，世界上大约 15% 的铜、80% 以上的锌、几乎全部的铝、钨、钼都是通过浸出，而与矿物原料中的其它组分得到初步分离的。浸出又称浸取、溶出、湿法分解，如在重金属冶金中常称浸出、浸取等，在轻金属冶金中常称溶出，而在稀有金属冶金中常常将矿物原料的浸出称为湿法分解。

(7) 液固分离：该过程是将矿物原料经过酸、碱等溶液处理后的残渣与浸出液组成的悬浮液分离成液相与固相的湿法冶金单元过程。在该过程的固液之间一般很少再有化学反应发生，主要是用物理方法和机械方法进行分离，如重力沉降、离心分离、过滤等。

(8) 溶液净化：将矿物原料中与欲提取的金属一道溶解进入浸出液的杂质金属除去的湿法冶金单元过程。净液的目的是使杂质不致于危害下一工序对主金属的提取。其方法多种多样，主要有结晶、蒸馏、沉淀、置换、溶剂萃取、离子交换、电渗析和膜分离等。

(9) 水溶液电解：利用电能转化的化学能使溶液中的金属离子还原为金属而析出，或使粗金属阳极经由溶液精炼沉积于阴极。前者从浸出净化液中提取金属，故又称电解提取或电解沉积（简称电积），也称不溶阳极电解，如铜电积、锌电积；后者以粗金属为原料进行精炼，常称电解精炼或可溶阳极电解，如粗铜、粗铅的电解精炼。

(10) 熔盐电解：即利用电热维持熔盐所要求的高温，又利用直流电转换的化学能自熔

盐中还原金属，如铝、镁、钠、钽、铌的熔盐电解生产。

在考虑某种金属的冶炼工艺流程及确定冶金单元过程时，应注意分析原料条件（包括化学组成、颗粒大小、脉石和有害杂质等）、冶炼原理、冶炼设备、冶炼技术条件、产品质量和技术经济指标等。另外，还应考虑水电供应、交通运输等辅助条件。其总的要求（或原则）是过程越少越好；工艺流程越短越好。

由于冶金原料成分的复杂性，使用的冶金设备也是多种多样的，如火法冶金中的烧结机、沸腾炉、闪速炉、转炉、回转窑、反射炉、鼓风炉、电炉等。湿法冶金中有各种形式的电解槽和各种反应器。除此以外，还有收尘设备、液固分离设备。这些设备的使用选择，同样决定着冶金过程的效果，甚至冶金是否能取得成功的关键。

需要提及的是，冶炼金属的工艺流程，除了提取提纯金属以外，还要同时回收伴生有价金属，重视三废（废气、废渣、废液）治理和综合利用等方面的问题。因此，完整的工艺流程是很复杂的，所包含的冶金过程也是很多的。

1.5 冶金工业在国民经济中的地位和作用

冶金工业是整个原材料工业体系中的重要组成部分，它与能源工业和交通运输业一样，是构成国民经济的基础产业。材料是人类社会发展的物质基础和先导，没有金属材料便没有人类的物质文明。国民经济各个部门都离不开金属材料。目前，尽管陶瓷材料、高分子材料和复合材料发展很快，但是金属材料在今后很长时间内仍将是占主导地位的。

钢铁是用途最广泛的金属材料。人类使用的金属中，铁和钢占 90% 以上。人们生活离不开钢铁，人们从事生产或其他活动所用的工具和设施也都要使用钢铁。钢铁产量往往是衡量一个国家工业化水平和生产能力的重要标志，钢铁的质量和品种对国民经济的其他工业部门产品的质量，都有着极大的影响。

我国 1997 年生铁的产量为 11374 万吨，钢 10757 万吨，是目前世界上钢铁产量最多的国家。在今后，我国的钢铁工业将以提高质量、扩大品种、降低成本和节约原材料及能源为中心，进一步发展现代化钢铁冶炼技术。

世界有色金属的产量虽然只占钢产量的 7% 左右（我国目前只占 4.8%），但由于有色金属具有许多特殊的优良性能，例如它们分别具有导电、导热性好，密度小，化学性能稳定，耐热、耐酸碱和耐腐蚀，工艺性能好等特点，是电气、机械、化工、电子、通讯、轻工、仪表、航天等工业部门不可缺少的材料，也是其它材料所不能代替得了的材料。

当今国际社会公认，能源技术、信息技术和材料技术是人类现代文明的三大支柱。占元素周期表中约 70% 的有色金属及其相关元素是当今高科技发展必不可少的新材料的重要组成部分。飞机、导弹、火箭、卫星、核潜艇等尖端武器以及原子能、电视、通讯、雷达、电子计算机等尖端技术所需的构件或部件大都是由有色金属中的轻金属和稀有金属制成的。此外，没有镍、钴、钨、钼、钒、铌、稀土元素等有色金属也就没有合金钢的生产发展。有色金属和轻金属在某些用途（如电力工业等）上使用量也是相当可观的。科技发展需要有色金属，经济发展也需要有色金属，有色金属科技的发展又离不开人类科技和经济的发展，两者相互促进，相得益彰。

我国发展有色金属工业具有潜在的资源优势。我国的矿产资源潜在总值仅次于独联体和美国而居世界第3位，是世界上矿产资源总量丰富，储量可观，品种较齐全，资源配套程度较高的少数国家之一，其中钨、锑、锡、钼、锂、铍、镁、稀土金属的储量占世界首位。

新中国成立以来，我国有色金属工业得到了持续发展，有色金属产量从1949年的1.33万吨增加到1996年523.10万吨，居世界第2位，仅次于美国。我国有色金属产量位列世界第一的有锌、锑、钨、锡、稀土，列第二位的有铅、镁、钼，列第三位的有汞、铋，列第四位的有铜、铝、钛、镉，另外镍为第7位，银列第8位。我国已稳居世界有色金属生产大国的行列之中。有色金属工业为国民经济创造了巨大财富，1996年有色金属工业总产值达736.18亿元，成为了国家的优势产业。钨、锑、铅、锌、锡等有色金属是我国重要的出口产品，每年为国家换回大量的外汇。

在今后，发展我国有色金属工业的目标是充分利用有色金属资源，依靠科学技术进步，高效率，低成本，节能降耗，减少污染，提高综合利用水平，生产品种齐、纯度高，质量优的更多有色金属及其材料，以满足国民经济增长的需要，把我国从有色金属大国变成有色金属的强国。

复习思考题

1. 有色金属分为哪几类？有色金属中的稀有金属又分哪几类？对于每一类有色金属和稀有金属你能举出几种有代表性的金属吗？
2. 提取冶金方法是如何分类的？
3. 火法、湿法、电化学法三种冶金方法包括哪些基本冶金过程？这些冶金单元过程在提取冶金工艺中各起什么作用？
4. 发展我国有色金属工业的资源优势何在？我国有色金属工业目前在世界上处于什么样的地位？

第 2 章 矿石与选矿

2.1 矿石

2.1.1 金属元素在地壳中的分布

地球的外壳称为地壳，大部分为硅酸盐所组成，平均厚度约 12km，其最外层平均厚度仅 1.6km。通过钻探和岩层的褶皱分析估计，地壳中重金属（包括铁）的含量约占 6%，而铜、铅、锌、锡和镍五种有色金属总共不超过 0.65%；但轻金属的含量相当高，达 18%，其中铝为最高，其次为镁，钛含量也相当高。

根据地球化学的统计资料，地壳中丰度最大的元素是氧。表 2-1 列出了 60 种元素在地壳中的平均丰度。在 109 种已知的元素中，氧、硅、铝、铁、钙、钠、钾、镁、钛、锰、磷和氟等共占 99.5%，其中仅有前 8 种的含量超过 1%。在表 2-2 所列的 24 种重要经济元素中也只有铝、铁、镁、钾等 4 种金属元素在地壳中的含量超过 1%。可见人类常用的大多数不可缺少的金属在地壳中含量是微乎其微的。然而，它们之所以能从地壳中被提取出来，是由于地质上亿万年的种种变迁过程才有几十种金属富集成或大或小可供开采和提取的矿床。所以，矿物资源的保护、合理开发及综合利用是国民经济中的大事，必须将近期的利益和长远的利益结合起来，认真地加以规划。

2.1.2 矿床

矿床是具有一定规模，由一个或若干个矿体组成的矿石天然集合体。目前，把技术经济条件下符合开采和利用要求的矿床叫工业矿床，反之叫非工业矿床。矿床中的金属含量为金属储量或蕴藏量，其中经过勘探证明的为探明储量，根据地质条件推算的则称潜在储量或资源。

工业矿床的开采方法分为露天开采和地下开采两类。如果矿床埋藏得比较浅时可采用露天开采；埋藏得深且薄，则可采用地下开采。

2.1.3 矿石

在现代技术经济条件下，把能以工业规模进行加工、提取金属或生产其他产品的矿物集合体称为矿石。能够为人类利用的矿物，叫做有用矿物。不含有用矿物或含量过少，不宜以工业规模进行加工的称为脉石，脉石即废石。所以矿石由两部分构成，即有用矿物和脉石。矿石和脉石的概念是相对的，它随着经济的发展需要、矿山的开采和选矿、冶炼技术水平的

提高而变化。

表 2-1 元素在地壳岩石中的平均丰度, ppm (1ppm = 0.0001%)

| 元 素 | 丰 度 | 元 素 | 丰 度 |
|--------|---------|--------|--------|
| 氧 (O) | 473 000 | 钪 (Sc) | 13 |
| 硅 (Si) | 291 000 | 铅 (Pb) | 10 |
| 铝 (Al) | 81 000 | 钍 (Th) | 10 |
| 铁 (Fe) | 46 000 | 硼 (B) | 8 |
| 钙 (Ca) | 33 000 | 铪 (Hf) | 3 |
| 钾 (K) | 25 000 | 铯 (Cs) | 3 |
| 钠 (Na) | 25 000 | 铀 (U) | 2.5 |
| 镁 (Mg) | 17 000 | 铍 (Be) | 2 |
| 钛 (Ti) | 4 000 | 钽 (Ta) | 2 |
| 锰 (Mn) | 1 000 | 砷 (As) | 2 |
| 磷 (P) | 900 | 锡 (Sn) | 2 |
| 氟 (F) | 600 | 锗 (Ge) | 2 |
| 钡 (Ba) | 580 | 溴 (Br) | 1.8 |
| 锶 (Sr) | 300 | 钼 (Mo) | 1.5 |
| 硫 (S) | 300 | 钨 (W) | 1 |
| 碳 (C) | 230 | 铊 (Tl) | 0.45 |
| 铷 (Rb) | 150 | 碘 (I) | 0.15 |
| 钒 (V) | 150 | 铋 (Bi) | 0.1 |
| 锆 (Zr) | 150 | 铟 (In) | 0.1 |
| 氯 (Cl) | 130 | 镉 (Cd) | 0.1 |
| 铬 (Cr) | 100 | 锑 (Sb) | 0.1 |
| 铈 (Ce) | 81 | 硒 (Se) | 0.1 |
| 锌 (Zn) | 80 | 银 (Ag) | 0.05 |
| 镍 (Ni) | 75 | 汞 (Hg) | 0.02 |
| 铜 (Cu) | 50 | 钯 (Pd) | 0.01 |
| 锂 (Li) | 30 | 铂 (Pt) | 0.005 |
| 镓 (Ga) | 26 | 金 (Au) | 0.003 |
| 镧 (La) | 25 | 碲 (Te) | 0.002 |
| 钴 (Co) | 25 | 铑 (Rh) | 0.001 |
| 铌 (Nb) | 20 | 铼 (Re) | 0.0006 |

表 2-2 经济上重要的金属元素在地壳中的丰度, % (质量)

| 元 素 | 丰 度 | 元 素 | 丰 度 |
|-----|--------|-----|-----------|
| 铝 | 8.00 | 钴 | 0.0028 |
| 铁 | 5.8 | 铅 | 0.0010 |
| 镁 | 2.77 | 铍 | 0.00020 |
| 钾 | 1.68 | 砷 | 0.00020 |
| 钛 | 0.86 | 锡 | 0.00015 |
| 磷 | 0.101 | 钼 | 0.00012 |
| 锰 | 0.100 | 铀 | 0.00016 |
| 钒 | 0.017 | 钨 | 0.00010 |
| 铬 | 0.0098 | 银 | 0.000008 |
| 锌 | 0.0082 | 汞 | 0.000002 |
| 镍 | 0.0072 | 铂 | 0.0000005 |
| 铜 | 0.0058 | 金 | 0.0000002 |

矿石中 useful 成分的含量叫做矿石品位，常用百分数表示，例如，品位 0.5% 的铜矿石，就是指矿石中金属铜的含量为千分之五。对于贵金属，由于它们的含量一般都很低，所以其矿石品位常以每吨中含有的克数来表示，计作 g/t。

矿石价值主要取决于矿石中 useful 成分的含量及其价值，但同样有效成分矿石中脉石的成分和有害杂质的多少也是影响矿石价值的重要因素。矿石一般分为贫矿石、普通矿石和富矿石。这种划分没有统一的标准，每个国家甚至一个国家的不同矿区都有各自的计算范围。例如，我国的铁矿石品位如超过 55%，二氧化硅和硫、磷不多，可直接入平炉炼钢的称为平炉富矿；品位大致在 50% 以上，可直接入高炉炼铁的（脉石碱性氧化物多的允许含铁量更低一些），称为高炉富矿；品位太低，需经选矿而加工富集的，则称贫矿。

随着经济发展和科学技术进步，对矿石的需求不断增加，矿石品位有逐年下降的趋势。1950 年我国开采铜矿石平均品位为 1.8%，80 年代只有 0.76%；锡矿石开采品位从 1.68% 降至 0.2%；钨矿石从 3% 降至 0.25%。又如美国的铁矿石品位从 1951 年的 49.5% 降到 80 年代的 22%~36%。

2.1.4 矿物

具有一定的化学成分及物理属性（如颜色、条痕、光泽、硬度、密度、磁性等）的天然元素和化合物称为矿物。

从提取冶金来看，矿石可以分为自然金属矿、氧化矿以及硫化矿三类。这里所说的氧化矿包括氧化物、碳酸盐、硅酸盐、硫酸盐及磷酸盐在内的广义的氧化物所构成的矿石，还包括其他含氧酸盐（如铬酸盐、钨酸盐等）构成的矿石。硫化矿指的是含有硫化物、砷化物、锑化物、碲化物等构成的矿石。

目前自然界中已知的矿物约 3000 多种，其中有 50 种为造岩矿物，约 200 种为经济矿物，而工业经济价值较大的金属矿物只有 100 多种。冶金工业中常见的矿物如表 2-3 所列。

表 2-3 冶金工业常见金属矿物

| 金属 | 矿物 | 化学式 | 金属 | 矿物 | 化学式 |
|----|-------|----------------------------------------------------|----|------|-----------------------------------------------------------------------|
| 铁 | 磁铁矿 | Fe_3O_4 | 铝 | 高岭石 | $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ |
| | 赤铁矿 | Fe_2O_3 | 锰 | 菱锰矿 | MnCO_3 |
| | 褐铁矿 | $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ | | 软锰矿 | MnO_2 |
| | 菱铁矿 | FeCO_3 | | 蔷薇辉石 | MnSiO_3 |
| 铜 | 自然铜 | Cu | 铬 | 铬铁矿 | FeCr_2O_4 |
| | 辉铜矿 | Cu_2S | 钛 | 钛铁矿 | $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ |
| | 斑铜矿 | Cu_5FeS_4 | | 金红石 | TiO_2 |
| | 黄铜矿 | CuFeS_2 | 锆 | 斜锆石 | ZrO_2 |
| | 孔雀石 | $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ | | 锆英石 | ZrSiO_4 |
| 铝 | 一水硬铝石 | $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ | 钒 | 绿硫钒矿 | V_2S_5 |
| | 三水铝石 | $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ | | 钒铅矿 | $3\text{Pb}_3(\text{VO}_4)_2\text{PbCl}_2$ |