

高等学校教学用书

有色冶金概论

● 罗庆文 主编

YOUSE
YEJIN
GAILUN

冶金工业出版社

高等学校教学用书

有色冶金概论

昆明理工大学 罗庆文 主编

冶金工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

有色冶金概论/罗庆文主编. —北京:冶金工业出版社,
1986.4(2007.2重印)

高等学校教学用书

ISBN 978-7-5024-0426-0

I. 有… II. 罗… III. 有色金属冶金—高等学校—教材
IV. TF8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 011772 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)

责任编辑 宋良 美术编辑 王耀忠 责任印制 丁小晶

北京市铁成印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1986年4月第1版;2007年2月第7次印刷

850mm×1168mm 1/32;9印张;236千字;280页;17901~19400册

20.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64013877

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

本书是根据冶金工业部1982年教材工作会议制定的教材计划编写的，为冶金部属高等学校非有色冶金专业用书。其内容包括有代表性的八种有色金属，主要论述了它们冶金过程的原理和实践，此外还介绍了有色冶金中主要的综合回收工艺。

本书除用作非有色冶金专业教学用书外，亦可供从事有色冶金工作的科技人员参考。

本书由昆明工学院刘飞鹏（第一、四、五、七章）、罗庆文（第二、三、六章）、曾崇泗（第八、九、十章）编写，由罗庆文统一修改定稿。在编写过程中参考了各院校的有关教材，征求了有关教师的意见，特此表示感谢。

由于水平有限，书中一定存在不少缺点和错误，请读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 绪论	1
第一节 金属及其分类.....	1
第二节 矿物、矿石和精矿.....	2
第三节 冶金的概念及冶金方法分类.....	4
第二章 铜冶金	7
第一节 概述.....	7
第二节 火法炼铜的基本理论.....	10
第三节 铜精矿的密闭鼓风炉熔炼.....	18
第四节 铜精矿的反射炉熔炼.....	23
第五节 铜精矿的电炉熔炼.....	29
第六节 铜精矿的闪速熔炼.....	34
第七节 冰铜的吹炼.....	38
第八节 其他炼铜方法.....	44
第九节 粗铜的火法精炼.....	54
第十节 铜的电解精炼.....	56
第十一节 湿法炼铜.....	59
第三章 镍冶金	66
第一节 概述.....	66
第二节 硫化镍精矿的火法冶炼.....	67
第三节 氧化镍矿的火法冶炼.....	70
第四节 镍的精炼.....	75
第五节 硫化镍精矿的湿法冶炼.....	81
第六节 氧化镍矿的湿法冶炼.....	83
第四章 铅冶金	86
第一节 概述.....	86

第二节	铅精矿的烧结焙烧	89
第三节	铅烧结块的鼓风炉熔炼	96
第四节	粗铅的精炼	103
第五章	锌冶金	112
第一节	概述	112
第二节	锌精矿的焙烧	115
第三节	火法炼锌	121
第四节	湿法炼锌	135
第六章	锡冶金	153
第一节	概述	153
第二节	锡精矿的炼前处理	155
第三节	锡精矿的还原熔炼	159
第四节	锡炉渣的熔炼	165
第五节	粗锡的精炼	168
第七章	铝冶金	173
第一节	概述	173
第二节	氧化铝生产	175
第三节	金属铝生产	196
第八章	钨冶金	209
第一节	概述	209
第二节	钨精矿的分解	212
第三节	钨酸钠溶液的净化和钨酸的生产	218
第四节	三氧化钨的生产	224
第五节	致密钨的生产	225
第九章	钛冶金	231
第一节	概述	231
第二节	钛铁矿的还原熔炼	234
第三节	二氧化钛的生产	236
第四节	四氯化钛的生产	243
第五节	海绵钛的生产	252

第六节	致密钨的生产.....	258
第十章	有色冶金中的综合回收.....	263
第一节	从铜、铅、镍电解阳极泥回收贵金属.....	263
第二节	从铅锌生产中回收锗和铟.....	268
第三节	从锡生产炉渣回收钽、铌、钨.....	274
第四节	从氧化铝生产中回收镓.....	278
参考文献	280

第一章 绪 论

第一节 金属及其分类

通常把元素周期表中具有金属光泽、可塑性、导电性及导热性良好的化学元素称为金属。在元素周期表中，金属元素有80多个，其它元素称为非金属。金属的分类是按历史上形成的工业分类法，这种分类法虽然没有严格的科学论证，但一直沿用到现代。

现代工业上习惯把金属分为黑色金属和有色金属两大类，铁、铬、锰三种金属属于黑色金属，其余的所有金属都属于有色金属。有色金属又分为重金属、轻金属、贵金属和稀有金属等四类。

有色重金属——包括铜、铅、锌、锡、镍、钴等，它们的比重都很大，由7到11。

有色轻金属——包括铝、镁、钙、钾、钠和钡等，它们的比重都小于5。

贵金属——金、银、铂以及铂族元素属此类，这些金属在空气中不能氧化，由于它们的价值比一般金属贵而得名。

稀有金属——在80余种有色金属元素中，其中大约50种被认为是稀有金属。稀有金属这一名称的由来，并不是由于这些金属元素在地壳中的含量稀少，而是历史上遗留下来的一种习惯性的概念。事实上有些稀有金属在地壳中的含量比一般普通金属多得多，例如，稀有金属钛在地壳中的含量占第九位，比铜、银、镍以及许多其它元素都多；稀有金属锆、锂、钒、铈在地壳中的含量比普通金属铅、锡、汞多。还可以举出一些类似的例子。当然，稀有金属中有许多种在地壳中的含量确实是很少的，但含量

少并不是稀有金属的共同特征。所谓稀有金属系指那些发现较晚、在工业上应用较迟、在自然界中分布比较分散以及在提取方法上比较复杂的金属。

稀有金属按其物理及化学性质的近似、在矿物原料中的共生关系、从原料中提取方法的类似以及其它共同特征，一般又分为五类：

稀有轻金属——锂、铍、铷等属此类，这类金属的特点是比重很小，如锂的比重为0.53。

稀有高熔点金属——钨、钼、钽、钽、铪、铌、铯等属此类，其特点是熔点都很高，如钽的熔点为1660℃，钨的熔点为3400℃。

稀散金属——铟、锗、镓、铊等属此类。这一类金属的共同特点是，在地壳中几乎是平均分布的，没有单独的矿物，更没有单独的矿床，它们经常是以微量杂质形态存在于其它矿物的晶格中。稀散金属都是从冶金工业和化学工业部门的各种废料或中间产品中提取，如分散在铝土矿中的镓，可以在生产铝的中间产品中提取；锗常存在于煤中，可以从煤燃烧的烟尘或含锗渣中提取。

稀有放射性金属——属于这一类的是各种天然放射性元素钋、镭、锕及锕系元素（钍、镤、铀和各种超铀元素）。这类金属的共同特点是具有放射性。

稀土金属——稀土金属在门捷列夫周期系中自成一族，包括在这一类中的有镧及镧系元素（从原子序数为58的铈到原子序数为71的镱，共14个元素）。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。

第二节 矿物、矿石和精矿

矿物是地壳中具有固定化学组成和物理性质的天然化合物或

自然元素。

能够为人类利用的矿物，叫做有用矿物。含有用矿物的矿物集合体，如其中金属的含量在现代技术经济条件下能够回收加以利用时，这个矿物集合体叫做矿石。有用矿物在地壳中的分布是不均匀的，由于地质成矿作用，它们可富集在一起，形成巨大的矿石堆积。在地壳内或地表上矿石大量积聚具有开采价值的区域叫做矿床。

在矿石中，除了有用矿物之外，几乎总是含有一些废石矿物，这些矿物称为脉石，所以矿石由两部分构成，即有用矿物和脉石。

矿石有金属矿石和非金属矿石之分。金属矿石是指在现代技术经济条件下可从其中获得金属的矿石。而在金属矿石中按金属存在的化学状态又分成自然矿石、硫化矿石、氧化矿石和混合矿石。有用矿物是自然元素的叫做自然矿石，例如，自然金、银、铂、元素硫等；硫化矿石的特点是其中有用矿物为硫化物，例如，黄铜矿 (CuFeS_2)、方铅矿 (PbS)、闪锌矿 (ZnS)等；氧化矿石中有用矿物是氧化物，例如，赤铁矿 (Fe_2O_3)、赤铜矿 (Cu_2O)、锡石 (SnO_2)，一般含氧的矿物，如硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐等也包括在氧化矿内；混合矿石内则既有硫化矿物，又有氧化矿物。

矿石的名称是根据从其中得出的金属而确定的，例如，铜矿石、铁矿石、锡矿石等。只产出一种金属的叫单金属矿石；从其中可提取两种以上金属的矿石，称为多金属矿石，如攀枝花的钒钛磁铁矿就是有名的多金属矿石。

矿石中有用成分的含量叫做矿石品位，常用百分数表示，例如，品位1%的铜矿石，就是矿石中金属铜的含量为百分之一。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。

矿石品位没有上限，越富越好，而其下限则由技术和经济因素确定。技术和经济条件的变化，使矿石的下限品位不断改变，

从前抛弃的尾矿堆，由于技术进步和国民经济日益增长的需要，今天又被重新利用，这样的事实并不少见。

矿石的品位越低，则获得每吨金属的冶炼费用就越高。所以，为了降低冶炼费用总是希望矿石品位越高越好。各种选矿方法是提高矿石品位的手段，同时，选矿方法还可用来分开两种以上的有用矿物，以便在冶金过程中对这些矿物分别处理，这对于简化冶金工艺流程和降低冶炼费用都是很有利的。

经过选矿处理而获得的高品位矿石叫做精矿，如铜精矿、锡精矿等。

第三节 冶金的概念及冶金方法分类

冶金是研究由矿石或其它含金属原料中提取金属的一门科学。冶金工业通常分为黑色冶金工业和有色冶金工业。前者包括生铁、钢和铁合金（如铬铁、锰铁等）的生产；后者包括其余所有各种金属的生产。

作为冶金原料的矿石（或精矿），其中除含有所要提取的金属矿物外，还含有伴生金属矿物以及大量无用的脉石矿物。冶金的任务就是把所要提取的金属从成分复杂的矿物集合体中分离出来并加以提纯，这种分离和提纯过程常常不能一次完成，需要进行多次。一般说来，冶金过程包括：预备处理、熔炼和精炼三个循序渐进的作业过程。

在现代冶金中，由于矿石（或精矿）性质和成分、能源、环境保护以及技术条件等情况的不同，故实现上述冶金作业的工艺流程和方法是多种多样的，根据各种方法的特点，大体上可将其归纳为三类：火法冶金、湿法冶金和电冶金。

一、火法冶金

火法冶金是在高温条件下进行的冶金过程。矿石或精矿中的部分或全部矿物在高温下经过一系列物理化学变化，生成另一种形态的化合物或单质，分别富集在气体、液体或固体产物中，达到所要提取的金属与脉石及其它杂质分离的目的。实现火法冶金

过程所需热能，通常是依靠燃料燃烧来供给，也有依靠过程中的化学反应来供给的，比如，硫化矿的氧化焙烧和熔炼就无需由燃料供热；金属热还原过程也是自热进行的。

火法冶金包括：干燥、焙解、焙烧、熔炼、精炼、蒸馏等过程。

二、湿法冶金

湿法冶金是在溶液中进行的冶金过程。湿法冶金温度不高，一般低于 100°C ，现代湿法冶金中的高温高压过程，温度也不过 200°C 左右，极个别情况温度可达 300°C 。

湿法冶金包括：浸出、净化、制备金属等过程。

1. 浸出 用适当的溶剂处理矿石或精矿，使要提取的金属成某种离子（阳离子或络阴离子）形态进入溶液，而脉石及其它杂质则不溶解，这样的过程叫浸出。浸出后经沉清和过滤，得到含金属（离子）的浸出液和由脉石矿物组成的不溶残渣（浸出渣）。对某些难浸出的矿石或精矿，在浸出前常常需要进行预备处理，使被提取的金属转变为易于浸出的某种化合物或盐类。例如，转变为可溶性的硫酸盐而进行的硫酸化焙烧等，都是常用的预备处理方法。

2. 净化 在浸出过程中，常常有部分金属或非金属杂质与被提取金属一道进入溶液，从溶液中除去这些杂质的过程叫做净化。

3. 制备金属 用置换、还原、电积等方法从净化液中将金属提取出来的过程。

三、电冶金

电冶金是利用电能提取金属的方法。根据利用电能效应的不同，电冶金又分为电热冶金和电化冶金。

1. 电热冶金 是利用电能转变为热能进行冶炼的方法。在电热冶金的过程中，按其物理化学变化的实质来说，与火法冶金过程差别不大，两者的主要区别只是冶炼时热能来源不同。

2. 电化冶金（电解和电积） 是利用电化学反应，使金属

从含金属盐类的溶液或熔体中析出。前者称为溶液电解，如铜的电解精炼和锌的电积，可列入湿法冶金一类；后者称为熔盐电解，不仅利用电能的化学效应，而且也利用电能转变为热能，借以加热金属盐类使之成为熔体，故也可列入火法冶金一类。

从矿石或精矿中提取金属的生产工艺流程，常常是既有火法过程，又有湿法过程，即使是以火法为主的工艺流程，比如，硫化铜精矿的火法冶炼，最后还须要有湿法的电解精炼过程；而在湿法炼锌中，硫化锌精矿还需要用高温氧化焙烧对原料进行炼前处理。

第二章 铜 冶 金

第一节 概 述

一、铜的性质和用途

1. 物理性质 铜是玫瑰红色的金属，固体铜具有良好的展性和延性，可拉成0.0799毫米的细丝，或加工成0.0799毫米的薄片。液态铜能溶解许多气体，如 H_2 、 O_2 、 SO_2 、 CO_2 、 CO 和水蒸气，因此精炼铜在铸锭之前，要脱除溶解的气体，否则铜锭会有气孔。铸铜含氧应维持0.03~0.05%。

铜的熔点1083℃，沸点2310℃，常温时比重8.89。

铜的导电和导热性仅次于银，如以银的导电和导热性为100%，则铜分别为93%和73.2%。铜的导电性受杂质的影响很大，例如砷含量为0.0013%时，可使其导电率降低1%。

铜的机械加工性能优于铝，例如，当铜和铝丝每单位长度电阻相同时，以铜的截面积、直径、重量和破坏强度相应为1时，则铝的分别为1.61，1.27，0.488和0.64。可见，虽然铝丝重量减轻一半，但由于其强度差，尺寸大，故使电机和马达的体积相应增大。

铜与其它金属互溶性好，很易与锌、镍、锡生成有价值的合金如黄铜、白铜、青铜等，后者具有较大的耐腐蚀和耐磨性能。

2. 化学性质 铜是元素周期表中第一副族的元素，原子量为63.54，有两种不同的化合价——一价和二价，一价的化合物在高温稳定，而二价的化合物则相反。

铜在干燥空气中不氧化，在温度高于185℃时则开始氧化，温度低于350℃时生成红色氧化亚铜 Cu_2O ，高于350℃时生成黑色氧化铜 CuO 。在潮湿的空气中铜被氧化，其表面逐渐覆盖一层

绿色的碱式碳酸铜 $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ，即所谓“铜绿”。

铜与硫化氢生成硫化亚铜 Cu_2S 和硫化铜 CuS 。

在电化次序表中，铜位于氢的后面，因此铜不能溶于稀硫酸和盐酸中，但能溶于硝酸、王水和加热的浓硫酸中，有空气存在时，也能溶于盐酸、稀硫酸和氨水中。

3. 铜的用途 铜在国民经济中的应用范围仅次于钢铁，在有色金属中，铜的产量和消费量仅次于铝。工业发达国家铜与钢铁的比例为1.5 : 100。铜的用途大致分为以下几个方面。

电气工业是用铜的主要部门，占消费铜总量的50%以上。据估计，每100公里断面为150平方毫米的输电线需铜400多吨，一部3000千瓦的发电机需铜580公斤。

机械制造工业用各种铜合金作轴承、轴瓦、活塞、开关、油管、阀门、泵和高压设备等。

国防工业用铜和其合金作各种子弹壳、飞机和舰艇零部件。

其他建筑材料、热工技术、冷却装置和民用设备等，也广泛使用铜和其合金。

铜的化合物用于农业和医药中。

二、炼铜原料

地壳中含铜为0.01%，但铜能形成比较富的矿床。现今开采的铜矿石含铜0.4%以上，实际上大型露天矿把0.2%品位的铜矿石也利用了。

在各类铜矿床中，铜呈各种矿物存在，其中大部分为硫化物和氧化物，少量为自然铜。自然界产出的铜矿物有240种之多，但多数并不常见，也不具有工业价值。常见的硫化矿物有黄铜矿 (CuFeS_2) 、斑铜矿 $(\text{Cu}_3\text{FeS}_3)$ 、辉铜矿 (Cu_2S) 和铜蓝 (CuS) 等；氧化矿物有孔雀石 $[\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2]$ 、硅孔雀石 $(\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ 、蓝铜矿 $[2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2]$ 、赤铜矿 (Cu_2O) 和胆矾 $(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ 等。

现今90%的铜产量来自硫化矿，约10%来自氧化矿，少量来自自然铜矿。

从矿床开采出来的矿石，照例要预先选矿富集，获得铜精矿再送去冶炼。经过选矿所得的铜精矿粒度很小，一般小于0.074毫米，含铜10~30%。

三、铜的生产方法

1. 火法炼铜 现今火法炼铜占铜生产量的90%，主要是处理硫化矿。在火法炼铜时，都是将铜精矿熔炼成冰铜，然后将冰铜吹炼成粗铜。采用这种方法的优点是得到的粗铜比较纯，损失于炉渣中的铜比较少，热能消耗少，而铜的生产率和回收率比较高。火法炼铜的流程如图2-1所示。

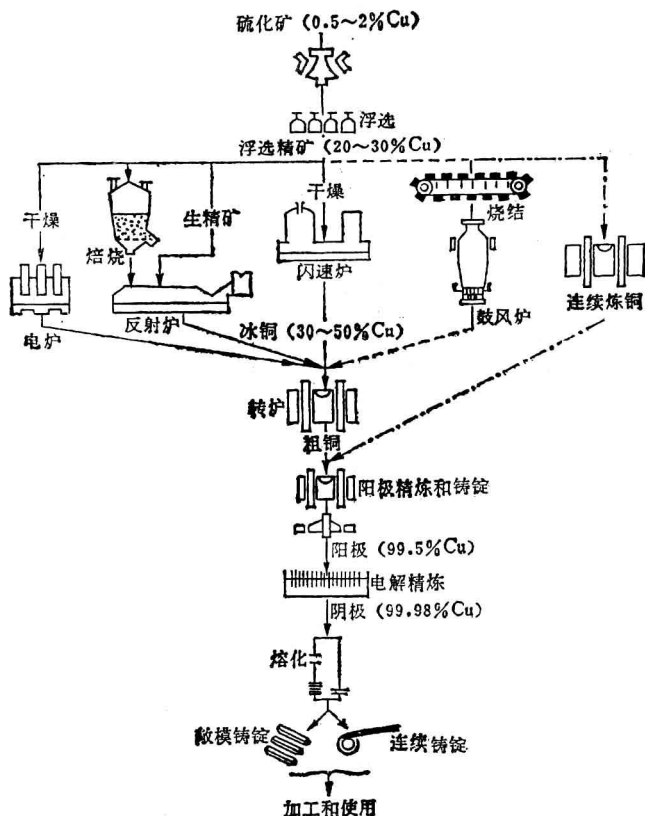


图 2-1 火法炼铜的流程（……较少用，-----在发展中）

由图 2-1 可见，火法炼铜可以在各种不同设备中进行，如鼓风机、反射炉、电炉、闪速炉和连续炼铜炉等。

由各种设备熔炼的冰铜，随后还要经过吹炼、火法精炼和电解精炼，最后得到电铜。

2. 湿法炼铜 湿法炼铜占铜生产量的10%，主要用以处理氧化矿，也有的处理硫化矿。其流程如图 2-2 所示。它包括两个主要过程，铜的浸出和从溶液中电积或置换提取铜。

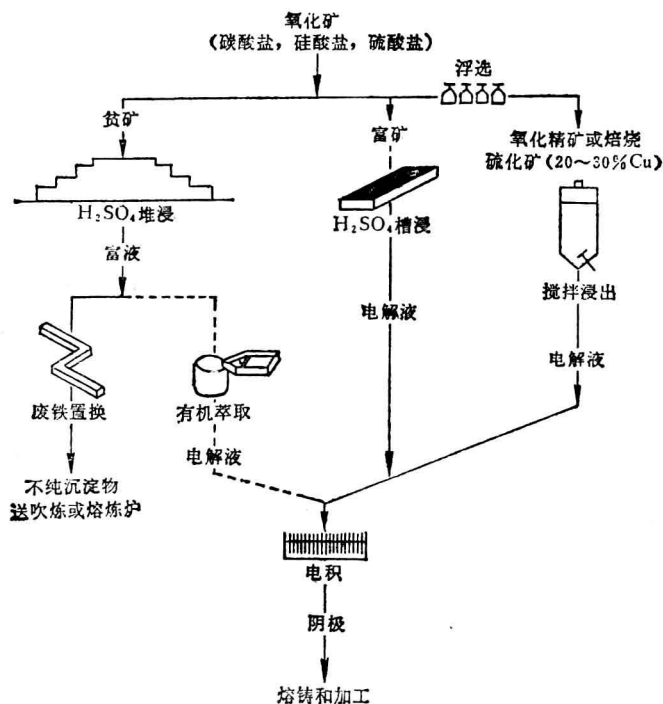


图 2-2 湿法炼铜的流程 (----应用少, 但正在增加)

第二节 火法炼铜的基本理论

一、火法炼铜的基本原理

火法炼铜的目的在于：一是使炉料中的铜尽可能全部进入冰