

有色金属 冶金工艺

YOUSE
JINSHU
YEJIN
GONGYI

★ 李明照 编著



化学工业出版社

有色金属 冶金工艺

★ 李明照 编著



化学工业出版社
· 北 京 ·

本书结合国内外的生产实践与科学研究,系统地介绍了铜、铅、镁、铝、金、银和钛等重要有色金属的基本知识与冶炼工艺,重点对国内外先进的生产线进行了充分阐述。同时,为提高技术人员处理实际生产问题的能力,本书对有色金属的冶金实践也进行了针对性很强的介绍。

本书可供从事有色金属研究和生产一线的工程技术人员参考,也可作为高等工科院校学生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

有色金属冶金工艺/李明照编著. —北京:化学工业出版社, 2010.8

ISBN 978-7-122-08757-7

I. 有… II. 李… III. 有色金属冶金-工艺 IV. TF8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 105230 号

责任编辑:丁尚林

文字编辑:徐雪华

责任校对:战河红

装帧设计:杨 北

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 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 20 $\frac{1}{2}$ 字数 504 千字 2010 年 10 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:49.00 元

版权所有 违者必究

前 言

金属是指自然界中至今已发现的一百多种元素中，具有良好导电、导热和可锻性能的元素。金属种类繁多，通常分为黑色金属和有色金属两大类。黑色金属指铁、锰、铬及它们的合金；有色金属指除铁、锰、铬以外的所有金属。有色金属的分类，各个国家并不完全相同，通常按其密度、价格、在地壳中的储量及分布情况、被人们发现和使用的早晚等分为四类，即重有色金属、轻有色金属、贵金属和稀有金属。

冶金学是研究人类从自然资源中提取有用金属的科学。从人类最早使用金属到今天，已有数千年历史。金属的生产和使用，开创了人类文明的历史。在近一百多年的现代工业生产中，冶金工业作为一门基础材料工业，发挥了重大作用，冶金学也逐步完善为一门主要以热力学为理论基础的、独立的专业学科。

笔者及其课题组成员多年从事有色金属的生产、教学与科研工作，积累了丰富的实践经验和技术资料。本书结合我国有色金属的实际状况，主要论述了具有代表性的金属铜、铅、镁、铝、金、银和钛的基本知识及冶炼过程的原理和实践等，旨在促进我国有色金属工业的发展。

本书可供从事有色金属研究和生产一线的工程技术人员参考，也可作为高等工科院校学生的教学参考用书。

笔者衷心希望此书能够为上述人员提供帮助。但由于学术水平有限，书中一定存在疏漏和不足之处，真诚地希望读者提出宝贵意见。

李明照

2010 年 5 月

目 录

第 1 章 金属的基本知识	1
1.1 金属及其分类	1
1.2 矿物、矿石和矿床	2
1.3 冶金方法分类	3
第 2 章 铜冶金	5
2.1 铜冶金的基本知识	5
2.1.1 铜的性能和用途	5
2.1.2 铜冶金的原料	5
2.1.3 铜冶金的方法	6
2.2 冰铜熔炼	7
2.2.1 冰铜熔炼目的	7
2.2.2 冰铜熔炼流程	8
2.2.3 冰铜熔炼期间的反应	9
2.2.4 冰铜	9
2.2.5 炉渣	11
2.2.6 冰铜与炉渣的分离及渣含铜	13
2.3 鼓风炉熔炼冰铜	13
2.3.1 密闭鼓风炉熔炼的基本原理	14
2.3.2 密闭鼓风炉熔炼实践	17
2.3.3 密闭鼓风炉熔炼产物和技术经济指标	18
2.4 反射炉熔炼冰铜	19
2.4.1 反射炉熔炼的基本原理	19
2.4.2 反射炉的熔炼实践	24
2.4.3 反射炉熔炼产物和技术经济指标	26
2.5 电炉熔炼冰铜	27
2.5.1 电炉熔炼的基本原理	27
2.5.2 电炉熔炼实践	29
2.5.3 电炉熔炼的主要技术经济指标	31
2.6 闪速炉熔炼冰铜	32
2.6.1 闪速熔炼的基本原理	32
2.6.2 闪速熔炼实践	35
2.6.3 闪速熔炼的产物及主要技术经济指标	40
2.6.4 闪速炉渣的处理	41
2.7 冰铜的吹炼	42

2.7.1	冰铜吹炼的基本原理	42
2.7.2	转炉吹炼实践	45
2.7.3	转炉吹炼的产物及主要技术经济指标	47
2.8	粗铜的火法精炼	49
2.8.1	粗铜火法精炼的基本原理	49
2.8.2	火法精炼实践	51
2.8.3	火法精炼的产物及主要经济技术指标	54
2.8.4	降低精炼渣含铜的措施	56
2.9	铜的电解精炼	57
2.9.1	铜电解精炼的基本原理	57
2.9.2	电解精炼的条件控制	58
2.9.3	铜电解精炼实践	59
2.9.4	电解精炼产物及主要经济技术指标	64
2.10	湿法炼铜	66
2.10.1	铜矿石浸出的基本原理	67
2.10.2	浸出体系的选择	68
2.10.3	浸出方式	69
2.10.4	从浸出液中回收铜	71
2.10.5	废液处理	72
2.10.6	废渣处理	73
第3章	铅冶金	75
3.1	铅冶金的基本知识	75
3.1.1	铅的性质和用途	75
3.1.2	铅冶金的原料	76
3.1.3	铅冶金的方法	77
3.2	硫化铅精矿的烧结焙烧	77
3.2.1	烧结焙烧概述	77
3.2.2	铅精矿烧结焙烧的基本原理	79
3.2.3	烧结焙烧实践	82
3.2.4	烧结焙烧产物及技术经济指标	87
3.3	铅烧结块鼓风炉还原熔炼	88
3.3.1	还原熔炼的目的	88
3.3.2	炉料组成及对炉料的要求	88
3.3.3	还原熔炼的基本原理	89
3.3.4	铅鼓风炉还原熔炼实践	93
3.3.5	铅鼓风炉熔炼的产物	96
3.4	粗铅的火法精炼	98
3.4.1	概述	98
3.4.2	粗铅精炼	98
3.5	粗铅的电解精炼	100

3.5.1	铅电解精炼概述	100
3.5.2	铅电解精炼的基本原理	100
3.5.3	电解精炼的条件控制	102
3.5.4	铅电解精炼实践	104
3.5.5	铅电解精炼产物	106
3.5.6	铅电解主要技术经济指标	107
3.6	硫化铅精矿的直接熔炼	108
第4章	镁冶金	110
4.1	镁冶金的基本知识	110
4.1.1	镁的性质和用途	110
4.1.2	镁冶金的原料	112
4.1.3	镁冶金的方法	113
4.2	硅热法炼镁	114
4.2.1	白云石煅烧的基本原理	114
4.2.2	白云石煅烧实践	115
4.2.3	白云石煅烧条件控制	116
4.2.4	回转窑煅烧白云石热平衡计算	118
4.2.5	煅烧白云石的产物	120
4.2.6	MgO 还原的基本原理	121
4.2.7	MgO 还原实践	124
4.2.8	MgO 还原的产物	129
4.2.9	硅热法炼镁新工艺	129
4.3	电解法炼镁	130
4.3.1	水氯镁石制备氯化镁	131
4.3.2	水氯镁石脱水实践	133
4.3.3	菱镁矿 (MgO) 制备氯化镁	135
4.3.4	菱镁矿 (MgO) 氯化实践	137
4.3.5	氯化镁电解	140
4.3.6	氯化镁电解实践	144
4.3.7	氯化镁电解产物及主要经济技术指标	148
4.4	粗镁精炼	149
4.4.1	结晶镁的化学组成及杂质分布	149
4.4.2	结晶镁除铁	150
4.4.3	结晶镁的熔剂精炼	151
4.4.4	结晶镁的其他精炼方法	154
4.4.5	镁锭的浇注	155
4.4.6	镁锭	156
4.4.7	镁锭的表面处理	156
第5章	铝冶金	159
5.1	铝冶金的基本知识	159

5.1.1	铝的性质和用途	159
5.1.2	铝冶金原料	159
5.1.3	铝冶金的方法	160
5.2	拜耳法生产氧化铝	161
5.2.1	拜耳法生产氧化铝的基本原理	161
5.2.2	拜耳法原矿浆的制备	163
5.2.3	拜耳法高压溶出	164
5.2.4	溶出矿浆的分离与洗涤	169
5.2.5	铝酸钠溶液的晶种分解	173
5.2.6	$\text{Al}(\text{OH})_3$ 煅烧	177
5.2.7	分解母液的蒸发与碳酸钠的苛化	179
5.3	碱-石灰烧结法	181
5.3.1	碱-石灰烧结法的特点	181
5.3.2	碱-石灰烧结法的原理	181
5.3.3	制备生料浆	182
5.3.4	生料浆烧结	183
5.3.5	熟料溶出	185
5.3.6	铝酸钠溶液脱硅	186
5.3.7	碳酸化分解	190
5.4	铝电解	192
5.4.1	铝电解的基本原理	192
5.4.2	铝电解两极副反应	193
5.4.3	铝电解质的组成	194
5.4.4	铝电解质的性质	195
5.4.5	铝电解的添加剂	197
5.4.6	铝电解的阳极效应	197
5.4.7	铝电解原料及能源	198
5.4.8	铝电解槽结构	200
5.4.9	铝电解操作	200
5.4.10	铝电解的技术经济指标	202
5.5	铸铝锭	203
5.5.1	铝液净化	204
5.5.2	影响铸锭质量的因素	204
5.5.3	铸锭	205
5.5.4	产品铝锭	205
第6章	金银冶金	207
6.1	金银冶金的基本知识	207
6.1.1	金银的性能和用途	207
6.1.2	金银冶金的原料	209
6.2	金、银选矿	210

6.3	混汞法提金	211
6.3.1	混汞法提金的原理	211
6.3.2	混汞方法和实践	214
6.3.3	汞膏的分离、压滤和蒸馏	218
6.3.4	含汞废气及工业污水的净化	221
6.4	氰化法提金	221
6.4.1	氰化提金的原理	222
6.4.2	氰化提金实践	224
6.5	炭浆法提金	234
6.5.1	活性炭吸附金、银的机理	234
6.5.2	炭浆法提金实践	236
6.6	树脂矿浆法提金	238
6.6.1	离子交换树脂吸附金、银的原理	239
6.6.2	树脂矿浆法提金实践	240
6.6.3	从载金树脂解吸液中提取金、银	242
6.7	氰化堆浸法提金	243
6.7.1	矿石的预处理	244
6.7.2	提金场地的选择和修建	245
6.7.3	筑堆方法	245
6.7.4	矿堆的浸出	246
6.7.5	废矿堆的洗涤、脱毒和拆堆	246
6.7.6	浸出液回收金	247
6.8	硫脲法提金	247
6.8.1	硫脲的性质	247
6.8.2	硫脲溶解金、银的反应和机理	248
6.8.3	硫脲溶金、银控制的工艺条件	250
6.8.4	硫脲溶金、银实践	250
6.9	铜阳极泥提金	252
6.9.1	铜阳极泥的性质和组分	252
6.9.2	铜阳极泥的火法熔炼	252
6.9.3	铜阳极泥的湿法熔炼	258
6.10	金、银精炼	259
6.10.1	金、银氯化精炼法	259
6.10.2	金、银化学法精炼	259
6.10.3	银电解精炼	262
6.10.4	金电解精炼	266
第7章	钛冶金	271
7.1	钛冶金的基本知识	271
7.1.1	钛的性质和用途	271
7.1.2	钛冶金的原料	272

7.1.3	钛原生矿选矿	273
7.1.4	钛冶金的方法	274
7.2	富钛料的生产	274
7.2.1	富钛料的用途及对其的要求	275
7.2.2	高钛渣熔炼的基本原理	275
7.2.3	高钛渣熔炼过程的主要特征	276
7.2.4	敞口电炉熔炼高钛渣	278
7.2.5	密闭电炉熔炼高钛渣	281
7.2.6	电热法生产人造金红石	283
7.2.7	还原锈蚀法生产人造金红石	284
7.2.8	酸浸法生产人造金红石	286
7.3	富钛料的氯化	287
7.3.1	氯化冶金	287
7.3.2	富钛料氯化的基本原理	287
7.3.3	富钛料氯化实践	288
7.3.4	氯化产物	291
7.4	粗 TiCl_4 的精制	291
7.4.1	粗 TiCl_4 的组成和性质	291
7.4.2	粗 TiCl_4 的精制原理及方法	293
7.4.3	TiCl_4 精制实践	296
7.4.4	纯 TiCl_4	299
7.5	海绵钛的生产	299
7.5.1	海绵钛的生产方法	299
7.5.2	镁还原的基本原理	300
7.5.3	真空蒸馏原理	301
7.5.4	镁还原设备	302
7.5.5	镁还原实践	303
7.5.6	海绵钛中的主要杂质	305
7.6	海绵钛真空熔炼	306
7.6.1	真空熔炼的理论基础	306
7.6.2	海绵钛的提纯原理	308
7.6.3	真空自耗电弧炉	310
7.6.4	真空自耗电弧熔炼实践	311
7.6.5	熔炼产物及技术经济指标	313
参考文献		314

稀有轻金属有锂、铍、铷、铯、铪 5 个金属。它们的共同特点是相对密度小，如锂 0.53、铍 1.85、铷 1.55、铯 1.87、铪 4.5，化学活性强。稀有轻金属的氧化物和氯化物具有很高的化学稳定性，难以还原。

稀有高熔点金属有钨、钼、钽、铌、锆、铪、钒和铪 8 个金属。它们的共同特点是熔点高，从 2103K（锆）至 3673K（钨），硬度大，抗腐蚀性强，可与一些非金属生成非常硬和难熔的稳定化合物，如碳化物、氮化物、硅化物和硼化物。稀有高熔点金属的化合物是生产硬质合金的重要原料。

稀有分散金属有铟、锗、镓、铊等。过去认为分散金属的共同特点是在地壳中几乎平均分布，没有单独的矿物，更没有单独的矿床，常以微量杂质形态存在于其他矿物的晶格中。但自从在我国贵州兴仁滥木厂发现独立的铊矿床后，这一观点发生了变化。稀散金属通常从冶金工业和化学工业的各种废料或中间产品中提取，如分散在铝土矿中的镓，可在生产铝的中间产品中提取；锗常存在于煤中，可从煤燃烧的烟尘或含锗渣中提取。

稀土金属包括镧系元素及和镧系元素性质很相近的钪、钇，共 17 个。轻稀土元素（钪组）：镧（La）、铈（Ce）、镨（Pr）、钕（Nd）、钷（Pm）、钐（Sm）、铕（Eu）及钆（Gd）。重稀土元素（钇组）：铽（Tb）、镝（Dy）、钬（Ho）、铒（Er）、铥（Tm）、镱（Yb）、镥（Lu）、钪（Sc）、钇（Y）。18 世纪时，只能获得外观似碱土如氧化钙的稀土氧化物，故起名“稀土”，并沿用至今。稀土金属的原子结构相同，因而物理化学性质相近，在矿石中总是伴生在一起，提取时需经繁杂的工艺才能逐个分离出来。

稀有放射性金属是各种天然放射性元素如钋（Po）、镭（Ra）、锕（Ac）、钍（Th）、镤（Pa）、铀（U）和人造超铀元素如镅（Am）、锔（Cm）、镎（Np）、钚（Pu）等。天然放射性元素在矿石中共同存在，常与稀土金属矿伴生。放射性金属在原子能工业方面起着极其重要的作用。

1.2 矿物、矿石和矿床

矿物指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。能够利用的矿物叫有用矿物，如铜矿物（辉铜矿、黄铜矿），金矿物（自然金、铜金矿）等。含有用矿物，且其中金属的含量达到回收利用要求的矿物集合体叫矿石。矿石中，除有用矿物外，还含有一些称为脉石的废石矿物，如铜矿中伴生的常见脉石矿物为石英、石灰石、方解石等。因此，矿石由有用矿物和脉石两部分组成。由于地质成矿作用，有用矿物富集在一起，形成巨大的矿石堆积。矿石在地壳内或地表上大量积聚并具有开采价值的区域叫矿床。

矿石分为金属矿石和非金属矿石。金属矿石指在现代技术经济条件下可从其中获得金属的矿石。金属矿石按金属存在的化学状态又分为自然矿石、硫化矿石、氧化矿石和混合矿石。自然矿石中的有用矿物是自然元素，如自然金、银、铂、元素硫等；硫化矿石的特点是其中的有用矿物为硫化物，如黄铜矿（ CuFeS_2 ）、方铅矿（ PbS ）、闪锌矿（ ZnS ）等；氧化矿石中的有用矿物是氧化物，如赤铁矿（ Fe_2O_3 ）、赤铜矿（ Cu_2O ）、锡石（ SnO_2 ），其他含氧的矿物，如硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐等也包括在氧化矿内；混合矿石内含有硫化矿物和氧化矿物。

矿石的名称根据其中的金属而定，如，铜矿石、铁矿石、锡矿石等。只产出一种金属的

矿石叫单金属矿石，可提取两种以上金属的矿石，称为多金属矿石，如钒钛磁铁矿。

矿石中有用成分的含量叫矿石品位，常用百分数表示。如品位 1% 的铜矿石，即矿石中金属铜的含量为百分之一。贵金属由于含量低，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，而其下限由技术和经济因素确定。矿石品位越低，冶炼每吨金属的费用越高。因此，为降低冶炼费用希望矿石品位越高越好，工业上采用各种选矿方法来提高矿石品位。选矿在提高矿石品位的同时，还可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。经过选矿处理而获得的高品位矿石叫精矿，如铜精矿、镍精矿等。

工业矿床是按照矿床“地质勘探规范”要求，经过地质勘探工作圈定出矿体，计算出矿石储量，由地质勘探部门编写出地质报告，并经国家或省（市、自治区）矿产储量委员会审查批准的报告为依据的矿床。

任何一种矿床，衡量其是否具有工业开采价值，主要决定于该矿床的矿石品位（或有用矿物含量）和储藏量。高于最低平均工业品位、能获得一定利润的矿体或矿体群，并具有一定可采储藏量（能满足一定的开采年限要求）的矿床称为工业矿床。矿床的最低工业品位要求主要取决于矿床开采的难易程度、矿石选冶技术的复杂程度、金属回收率高低和产品市场价格等诸多因素。

矿山的矿石储藏量是经过地质勘探，按照《矿产储量规范》圈定出矿体进行储量计算，并上报国家或省（市、自治区）矿产储量委员会审查批准的储量。矿床地质勘探出的矿石储量，按照所进行的勘探程度不同一般分为 A、B、C、D 4 级，前 3 级为工业储量，后 1 级为远景储量。

1.3 冶金方法分类

冶金是研究由矿石或其他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。黑色冶金工业包括铁、钢和铁合金（如铬铁、锰铁等）的生产；有色冶金工业包括其余所有金属的生产。

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。由于冶金原料（矿石或精矿）中除含有所要提取的金属矿物外，还含有伴生金属矿物和大量无用脉石矿物。因此，提取金属的过程需经多道工序才能完成。一般来说，冶金过程包括：矿石预处理、熔炼和精炼三个主要作业过程。

有色金属种类繁多，其生产方法也各不相同，主要的冶金方法有火法冶金和湿法冶金两大类。

火法冶金指高温下进行的冶金过程。在高温条件下，利用燃料燃烧或电能产生的热或某些化学反应所放出的热使矿石或精矿经受一系列物理化学变化过程，其中的部分或全部矿物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，使所要提取的金属与脉石及其他杂质分离，从而得到金属。火法冶金是比较古老的冶金方法，重有色金属的提取多采用火法冶金。火法冶金包括：干燥、焙解、焙烧、熔炼、精炼、蒸馏等过程。

湿法冶金指在溶液中进行的冶金过程，温度一般低于 373K。湿法冶金一般包括浸出、过滤、净化及提取金属四个过程。低温下用适当的溶剂浸出矿石、精矿或半成品，使其中要

提取的金属溶解进入溶液，而脉石及其他杂质则不溶解。澄清、过滤后，得到含金属（离子）的浸出液和由脉石矿物组成的不溶残渣。浸出液净化后用置换、还原、电积等方法从其中将金属提取出来。湿法冶金与火法冶金比较具有很多优点，因此湿法冶金越来越广泛地应用在冶金工业上。现代湿法冶金中的高温高压过程，温度一般为 473K，极个别情况可达 573K。

某些金属的冶炼往往是火法冶金与湿法冶金联合使用。如硫化铜精矿的火法冶炼过程中，最后进行电解精炼才能得到高纯度的精铜；而在湿法炼锌过程中，硫化锌精矿需先进行高温氧化焙烧才有利于矿石的浸出。

第 2 章 铜 冶 金

2.1 铜冶金的基本知识

2.1.1 铜的性能和用途

(1) 铜的性能

金属铜，元素符号 Cu，原子量 63.54，相对密度 8.92，熔点 1256K，沸点 2583K。纯铜呈浅玫瑰色或淡红色，铜具有优良的物理化学特性。铜的导电和导热性居所有工程金属材料之冠；对大气、海水、土壤及其他化学介质有较强的耐蚀性；作为结构件，弹性好、耐摩擦、抗磨损；具有一系列良好的加工、铸造、焊接、切削等工艺性能。纯铜可拉成很细的铜丝，制成很薄的铜箔。铜与锌、锡、铅、锰、钴、镍、铝、铁等金属形成合金。黄铜是铜锌合金，青铜是铜锡合金，白铜是铜钴镍合金。

(2) 铜的用途

铜是人类祖先最早应用的金属。早在 6000 年前的史前时期，人类就开始采掘露天铜矿，并用获取的铜制造武器、工具和其他器皿。铜的使用对早期人类文明的进步影响深远，不但为人类社会的进步作出了不可磨灭的贡献，且随着人类文明的发展不断开发出新的用途。

铜是与人类关系非常密切的有色金属，被广泛应用于电气、轻工、机械制造、建筑、国防工业等领域。在我国有色金属材料的消费中铜仅次于铝。铜在电气、电子工业中应用最广、用量最大，占总消费量一半以上，主要用于各种电缆和导线、电机和变压器的绕组、开关及印刷线路板等。在机械和运输车辆制造中，用于制造工业阀门和配件、仪表、滑动轴承、模具、热交换器及泵等。在化学工业中广泛应用于制造真空器、蒸馏锅及酿造锅等。在国防工业中用以制造子弹、炮弹、枪炮零件等，每生产 100 万发子弹，需用铜 13~14t。建筑工业中，用做各种管道、管道配件及装饰器件等。

2.1.2 铜冶金的原料

(1) 铜矿物和临界品位

铜是一种存在于地壳和海洋中的金属。铜在地壳中的含量约为 0.01%，在个别铜矿床中，铜的含量可达到 3%~5%。自然界中的铜分为自然铜、氧化铜矿和硫化铜矿。自然铜及氧化铜储量少，世界上 80% 以上的铜来自硫化铜矿。硫化铜矿石含铜量极低，一般在 2%~3% 左右。

临界品位决定于采矿和熔炼的成本和铜的售价，如果铜价上升而成本不变，则临界品位降低，反之亦然。

(2) 铜精矿

自然界中的铜，多数以化合物即铜矿物存在，铜矿物与其他矿物聚合成铜矿石。世界上

80%以上的铜矿物组成是 Cu-Fe-S 矿，目前工业开采的 Cu-Fe-S 矿中铜的品位不适于冶炼厂直接冶炼。原因是加热和熔化铜矿中的大量脉石需要消耗太多能量，且需要大容量的熔炼炉。因此，所有需用火法冶金提取铜的硫化铜矿，熔炼前需经物理方法选矿。通常采用的选矿即泡沫浮选法，其原理是利用水对矿物的润湿性，在矿浆中加入使铜矿物疏水的药剂，而脉石则保持亲水状态，铜矿物选择性地附着在气泡上，上浮到矿浆表面，脉石矿物则留在矿浆中，收集附着在气泡上的铜矿物，而脉石等以尾矿形式弃去。选矿得到的铜矿物称为铜精矿，精矿颗粒很小，一般小于 $74\mu\text{m}$ 的占 90%，铜品位为 20%~30%。

用于湿法冶金的铜矿石不进行选矿，而是直接浸出碎矿提取铜。

铜矿石生产铜精矿的一般流程如图 2-1 所示。

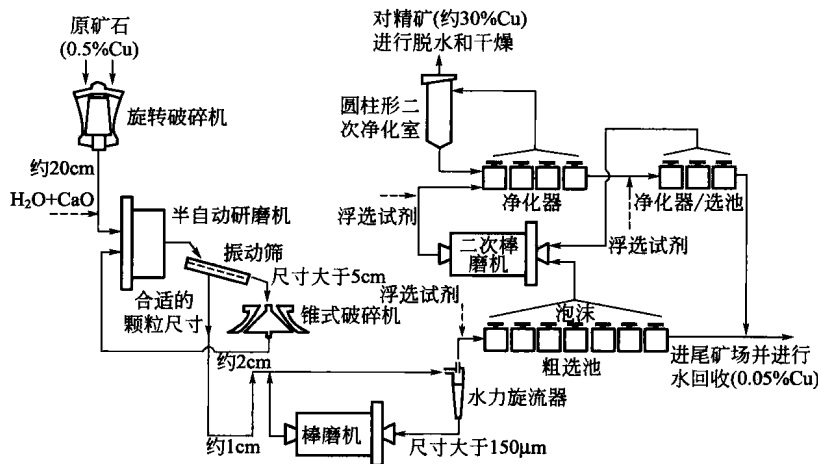


图 2-1 铜精矿生产流程图

(3) 铜矿资源及储量

世界铜矿资源主要分布在北美、拉丁美洲和中非三地，全世界已探明的储量约 3.5 亿吨，其中美洲占世界储量的 60%。我国铜产地集中在华东地区，铜产量约占全国总产量的 51.84%，其中安徽、江西两省产量约占 30%。铜的主要消费地则在华东和华南地区，二者消费量约占全国消费总量 70%。

世界铜矿的工业类型分为斑岩型、砂页岩型、铜镍硫化物型、黄铁矿型、铜-铀-金型、自然铜型、脉型、碳酸岩型、矽卡岩型共九类。其中最重要的是前四类，占世界铜总储量的 96%，其中斑岩型和砂页岩型矿各占 55% 和 29%。世界铜储量超过 500 万吨的巨型铜矿约有 60 个，斑岩矿占 38 个，砂页岩矿占 15 个，合计占巨型铜矿的 88%。

我国可供开采的铜矿资源很少。目前大的铜矿主要有江西德兴铜矿、西藏裕龙铜矿、玉龙铜矿和新近探明的新疆阿舍勒铜矿。

2.1.3 铜冶金的方法

铜冶金技术的发展经历了漫长的历程，但至今铜的冶炼仍以火法冶炼为主，其产量约占世界铜总产量的 85%，现代湿法冶炼的技术正在逐步推广，湿法冶炼的推出使铜的冶炼成本大大降低。

2.1.3.1 火法冶金

一般适用于高品位的硫化铜矿，主要有黄铜矿 (CuFeS_2)、斑铜矿 (Cu_2FeS_4) 和辉铜

矿 (Cu_2S) 等。从硫化铜矿石提取铜的步骤如下。

(1) 浮选富集

浮选富集是将矿石中的铜矿物分离出来得到铜精矿。首先把矿石破碎并磨到要求的尺寸, 然后采用气泡浮选法使 Cu-Fe-S 和 Cu-S 矿物颗粒富集得到富铜精矿, 贫铜尾矿处理后堆弃。

(2) 焙烧 (该步骤可供遴选)

焙烧除了起脱硫作用及除去部分杂质外, 还能使炉料在焙烧炉中很好混合并被预热, 水分全部蒸发。该步骤决定于冰铜熔炼方法。

(3) 冰铜熔炼 (在鼓风炉、反射炉、电炉或闪速炉中进行, 也叫造锍熔炼)

熔炼的目的是把 Cu-Fe-S 中的 Fe 和 S 氧化并除去, 生产熔融的富铜硫化物相即冰铜。熔炼产物冰铜含铜 45%~75%, 熔渣含有少量游离铜, 经回收处理后堆弃, 熔炼过程产生的含 10%~60% SO_2 的烟气捕集后制成硫酸。

(4) 吹炼冰铜成粗铜

冰铜吹炼使用富氧空气或造锍过程产生的氧化性气体, 目的是脱除冰铜中的硫和铁生产含铜 99% 的粗铜。吹炼分脱除 FeS 或渣形成和粗铜形成两个阶段。

最新的铜冶金技术是将焙烧、冰铜熔炼及吹炼冰铜合并在一个连续过程中进行, 称为连续炼铜法, 该方法已达到工业化阶段。

(5) 火法精炼和电解精炼

吹炼冰铜得到的熔融粗铜经过进一步脱硫、氧及其他杂质后, 浇注到铸模内得到供电解精炼用的阳极铜。阳极铜经过电解精炼得到高纯的阴极铜。

除铜精矿之外, 废铜和铜合金也是精炼铜的主要原料之一, 由废铜和铜合金精炼得到的铜, 称为再生铜。回收废铜和铜合金有以下优点:

- ① 比从铜矿提取铜节省更多的能源;
- ② 避免了铜在矿石富集、浸出和熔炼过程的损耗。

2.1.3.2 湿法冶金

一船适于低品位的氧化铜矿, 如碳酸盐、硅酸盐、硫酸盐等。有时也处理硫化铜矿, 但硫化铜矿不能直接浸出, 要先经过焙烧。湿法冶金提取出的精铜称为电积铜。湿法冶金提取铜的步骤如下:

- (1) 借助酸性和碱性溶剂的作用, 使矿石中的铜及其化合物溶解并转入溶液中;
- (2) 用萃取-电积、置换-电积、氢还原或热分解等方法将溶液中的铜提取出来。

火法和湿法冶金的工艺特点比较如下:

- (1) 湿法冶炼设备更简单, 但杂质含量较高, 是火法冶炼的有益补充;
- (2) 湿法冶炼有局限性, 受制于矿石的品位及类型;
- (3) 火法冶炼的成本高于湿法。

可见, 湿法冶炼技术具有大的优越性, 但其适用范围却有局限性, 并不是所有铜矿的冶炼都可采用该工艺。湿法冶炼技术的提高及应用的推广, 降低了铜的生产成本, 提高了铜矿产能。

2.2 冰铜熔炼

2.2.1 冰铜熔炼目的

铜矿石经过选矿得到的是以硫化物为主的精矿, 其中含有少量的氧化物脉石 (Al_2O_3 、