

高等学校教学用书

普通冶金学

上册

选矿 生铁冶金 钢冶金

东北工学院 中南矿冶学院 西安冶金学院合编



中国工业出版社

目 录

緒論.....	7	§ 9 高炉冶炼中的几种特殊送风方法.....	62
§ 1 冶金的概念.....	7	§ 10 簡易配料計算舉例.....	63
§ 2 冶金方法的分类.....	7	§ 11 高炉物质平衡与热平衡的概念.....	64
§ 3 冶金过程简介.....	8	第四章 高炉操作	66
第一篇 选 矿		§ 1 开炉, 检修, 停炉.....	66
第一章 矿石及其破碎	12	§ 2 炉前操作.....	67
§ 1 矿石的概念和选矿的任务.....	12	§ 3 炉况的掌握与调节.....	67
§ 2 破碎.....	12	§ 4 高炉的故障与事故.....	69
§ 3 筛分.....	15	第五章 高炉冶炼产品及技术经济 指标.....	71
§ 4 分级.....	15	§ 1 高炉冶炼产品.....	71
§ 5 破碎、磨細和分级的一般流程.....	16	§ 2 高炉冶炼的技术经济指标.....	73
第二章 选矿方法	16	第三篇 鋼 冶 金	
§ 1 选分.....	16	第一章 概 述	76
§ 2 重力选矿法.....	17	§ 1 鋼的化学成分、性能、編号.....	76
§ 3 电磁选矿法.....	18	§ 2 炼鋼的任务.....	78
§ 4 浮游选矿法.....	19	§ 3 炼鋼方法发展过程的概略.....	79
§ 5 精矿的脱水.....	21	第二章 轉炉炼鋼法	80
第二篇 生鉄冶金		§ 1 轉炉炼鋼法的起源与发展.....	80
第一章 炼鉄原料及其处理	24	§ 2 轉炉中杂质氧化的次序.....	81
§ 1 鉄矿石.....	24	§ 3 底吹轉炉炼鋼法.....	81
§ 2 錳矿石.....	26	§ 4 側吹轉炉炼鋼法.....	86
§ 3 熔剂.....	27	§ 5 純氧頂吹轉炉.....	92
§ 4 鉄矿石的代用物.....	27	第三章 平炉炼鋼法	93
§ 5 冶炼前鉄矿石的处理.....	28	§ 1 平炉炼鋼法的簡史及其特点.....	93
§ 6 高炉燃料.....	30	§ 2 平炉热工工作要点.....	93
第二章 高炉构造及附属设备	32	§ 3 平炉的分类及平炉炼鋼法的分类.....	94
§ 1 高炉車間的原料供应和平面布置.....	32	§ 4 平炉燃料.....	95
§ 2 高炉炉体构造.....	35	§ 5 平炉用的耐火材料.....	96
§ 3 热风炉和风的供应.....	40	§ 6 平炉构造.....	96
§ 4 高炉煤气的除尘.....	42	§ 7 平炉热工.....	103
§ 5 渣鉄处理设备.....	45	§ 8 平炉熔炼的一般原理.....	104
第三章 高炉冶炼原理	46	§ 9 平炉生产的原料.....	109
§ 1 概述.....	46	§ 10 碱性平炉炼鋼法的操作.....	111
§ 2 炉料受加热作用而产生的变化.....	46	§ 11 酸性平炉炼鋼法.....	114
§ 3 还原反应.....	46	第四章 轉炉及平炉炼鋼車間和技术 经济指标.....	116
§ 4 渗碳.....	46	§ 1 轉炉及平炉炼鋼車間.....	116
§ 5 造渣.....	46	§ 2 轉炉及平炉的技术经济指标.....	120
§ 6 脱硫.....	46	第五篇 黑色电冶金	121
§ 7 炉缸内的燃烧过程.....	46		
§ 8 炉料和煤气的运动与分布.....	46		

§ 1 电冶金的发展.....	121	§ 1 鑄錠設備及其澆注前的准备.....	140
§ 2 冶炼金属的电弧炉.....	122	§ 2 澆注溫度与澆注速度.....	145
§ 3 炼钢电弧炉的构造.....	122	§ 3 鎮靜鋼的澆注.....	145
§ 4 碱性电弧炉熔炼.....	125	§ 4 沸騰鋼的澆注.....	146
§ 5 不氧化法和复合炼钢法.....	131	§ 5 小鋼錠的澆注.....	146
§ 6 酸性电弧炉炼钢法.....	132	§ 6 鋼錠的脫模和冷却.....	147
§ 7 感应电炉.....	132	§ 7 鎮靜鋼鋼錠結構及其缺陷.....	147
§ 8 真空熔炼及真空处理.....	135	§ 8 沸騰鋼鋼錠結構及其缺陷.....	149
§ 9 铁合金的生产.....	138	§ 9 鋼錠中的偏析現象.....	150
第六章 鑄 錠.....	140	§ 10 連續注錠.....	151



緒 論

§1 冶金的概念

冶金是一門研究如何經濟地從礦石或其他原料中提取金屬，並使之經過加工處理適用于人類應用的科學。

它包括化學冶金和物理冶金兩部分。前者常稱冶金學，其任務是研究如何從原料中提取金屬；后者包括金屬學，其任務主要是研究金屬及合金的組織與性能，以便進一步將金屬加工處理以適應各工業部門的需要。目前由各種廢金屬煉得的再生金屬，也是很重要的。

各種冶金過程系應用各種化學方法或物理化學方法使原料中的主要金屬與其他金屬或非金屬的元素化合物分離，以獲得純度較高的金屬。這種提取與提純金屬的方法都是以物理化學為理論基礎。但是，冶金是一門複雜的科學，所涉及的科學技術範圍很廣，一般說來，它與物理、化學、物理化學，化工、機械、熱工、電工等均有着密切的聯繫。

現在，已發現的元素有102種，其中80種是金屬元素。在這些金屬中，習慣上把鐵、錳、鉻三種稱為**黑色金屬**；另外，鐳、錒、釷（Tc、Pm、Fr）和十種超鈾元素（共十三種）屬于人造放射性金屬元素；其餘64種都列為**有色金屬**。按照它們的性質、用途及其在地殼中的儲量等的不同，往往又將64種有色金屬進行下列分類：

有色重金屬：銅、鋁、鈷、鉛、鋅、鎳、錫、鎢、汞、鉍等。

貴金屬：金、銀、鉑、鈳、銻、銻、鉑等。

輕金屬：鋁、鎂、鈣、鋰、鉍等。

稀有金屬：鈾、鎢、鉍、鉍等。

放射性金屬：鐳、鈾、鈳等。

冶金工業通常分為黑色冶金工業和有色冶金工業。前者包括鐵、生鐵、鋼和鐵合金（如鉻鐵、錳鐵等）的生產；后者包括其餘所有各種金屬的生產。

§2 冶金方法的分類

冶金方法是使礦石或精礦中的金屬與脈石分離，並破壞金屬化合物的鍵以游離金屬且使之純化到工業品位的方法。由於冶金原料的不同，因而冶煉方法有很大的差異。儘管如此，近代科學技術的進步，使得各種冶金方法也日臻完善。根據各種方法的特點可分為以下三類：

1. **火法冶金** 是在高溫的條件下，礦石或精礦經受一系列的物理化學變化，使其中的金屬與脈石及其它雜質分離，從而得到較純的金屬的方法。這一方法達到高溫所需的熱能，通常是依賴于燃料燃燒來供給的，在個別的情況下，也有依靠某些化學反應所放出的熱能來供給。火法冶金包括干燥、焙解、焙燒、熔煉、蒸餾等過程。

2. **濕法冶金** 是在低溫下（一般低於100°C）用溶劑處理礦石或精礦，使欲提取的金屬溶解進入溶液，然後從溶液中將金屬提取出來的方法。所用的溶劑應盡可能与有用礦物作用，而不使脈石或其它雜質溶解，只有這樣才能達到使金屬與脈石分離的目的。濕

法冶金包括浸出、净化和置换沉积或电积等三大过程。有时矿石或精矿在浸出前还要经过某些预先处理过程（如烧结、焙烧等）。

3. **电冶金** 简单说是利用电能提取金属的方法。根据利用电能性质不同，电冶金又分为下列两类：

1) **电热冶金** 即是利用电能转变为热能进行冶炼。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。两者主要的区别，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，同时也利用电能转变为热能，借以加热金属盐类，使成熔体，故也可列入火法冶金一类。

§3 冶金过程简介

在生产实践中，各种冶金方法往往包括若干个冶金过程，兹简单介绍如下：

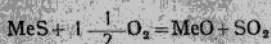
1. **选矿** 是用物理方法使脉石和有用矿物分开，以提高矿石中金属含量的方法。它是冶炼的准备过程。由于富矿不多，须大量利用贫矿，其重要性是很明显的。

2. **干燥** 目的在于除去原料中的水分。原料中含水分过多是不允许的。比如，对火法冶金来说，潮湿的原料入炉后，在高温下水分的蒸发需消耗大量的热，相应地消耗更多的燃料，否则会导致炉温下降，作业时间的延长，甚至影响产品的质量。此外，过多的水分将会产生大量的水汽因而影响炉气的成分，影响冶炼过程的正常进行，同时大量的炉气的产生，必然要求增大处理炉气的设备。如在寒冷地区，冬季湿矿冻结，以致运输困难。所以潮湿原料应该干燥。

3. **焙解** 目的在于分解水化物（或氢氧化物）、碳酸盐以除去其中的水分、二氧化碳及有机物等等。这一过程系将矿石（如锰矿）或某些中间产物（如钨酸、氢氧化铝等）在200℃以上的温度处理。

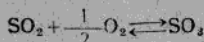
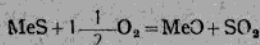
4. **焙烧** 是将矿石或精矿在适当的气氛下，加热到低于它们熔点而不出现熔化状态的温度，使其中某些组成分起化学变化的过程。这一过程包括将矿石或精矿中的杂质驱除到气相中或根据下一步处理的要求改变物料的化学成分。按照过程中主要化学反应的性质的不同，焙烧分为以下四种：氧化焙烧、还原焙烧、硫酸化焙烧及氯化焙烧等。

氧化焙烧 冶金工业上常采用此种方法处理硫化矿。其实质是使矿石或精矿中的金属硫化物与空气中的氧起作用，使一部分或全部金属硫化物转变为金属氧化物的过程。使硫化物全部变为氧化物的氧化焙烧又称为“死烧”（如火法炼锌）。焙烧并能除去矿石或精矿中的大部分砷、锑、硫等有害杂质。氧化焙烧时的主要反应可以下式代表：



式中MeS表示金属硫化物。

硫酸化焙烧 这种焙烧是将矿石或精矿中被提取的金属硫化物部分或全部转变为可溶性硫酸盐的过程。这种焙烧多用于湿法冶金，如湿法提锌及铜。其反应可用下列方程式表示：



氯化焙烧 是将矿石或精矿与氯化剂(NaCl , CaCl_2 , HCl , Cl_2 等)混合经过焙烧转变成可溶性氯化物的过程, 此过程多用于稀有金属冶金中。例如生产金属钛的四氯化钛, 是二氧化钛受氯化剂作用时(通常有碳存在)生成的: $\text{TiO}_2 + 2\text{CaCl}_2 = \text{TiCl}_4 + 2\text{CaO}$ 。

还原焙烧 是将矿石或精矿与还原剂(如碳质或气体还原剂)混合进行焙烧, 使其中金属氧化物还原成低价氧化物或经还原得到金属的过程。例如铁矿石中的 Fe_2O_3 , 为了便于磁选, 将这种矿石经过还原焙烧后, 使其变成有磁性的 Fe_3O_4 , 故此种焙烧又称为磁化焙烧: $3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$ 。

5. **烧结** 这种焙烧是将粉矿或精矿加热焙烧, 并烧结成多孔的块状物料的过程。烧结焙烧与上述各种焙烧的区别在于烧结焙烧过程中, 不仅矿石或精矿中有用矿物发生化学变化(如硫化物变为氧化物), 而且其中的 SiO_2 (脉石成分之一)也为某些金属氧化物化合物合成熔点较低的硅酸盐, 这些硅酸盐在烧结温度下, 熔化成液相, 它使矿粉粘结成块状物料, 称为烧结块。例如, 铁矿烧结时产生 $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ 使矿粉结块。

6. **熔炼** 熔炼是将矿石、精矿或经过焙烧或烧结焙烧的物料与熔剂一道加热至足以使它们全部或绝大部分熔化的高温下进行冶炼的过程。熔炼时, 物料与各组分发生一系列化学反应, 结果得到两种或两种以上的互不相溶的液体产物——粗金属或锍(由几种金属硫化物组成的熔合体)及熔渣(脉石和熔剂等组成的熔融体), 并产生炉气和烟尘。由于比重不同, 各种液态产物在熔炼炉内自动分层。炉渣的比重较小, 故在上层, 金属比重最大居最下层, 锍的比重大于炉渣而小于金属, 故居中间层。因此, 矿石或精矿熔炼时, 能使其中的金属或金属化合物与脉石分开, 而达到提炼金属的目的。

按照熔炼过程中化学反应的特点, 可将熔炼分为以下几种:

还原熔炼 这种熔炼法是将金属氧化矿或焙砂(或烧结块)与熔剂在高温下还原气氛中进行熔炼的过程, 这种过程是基于各种元素对氧亲和力不同的原理。所采用的还原剂(如木炭、焦炭、无烟煤等)在作业温度之下对氧的亲和力必须大于被还原的金属对氧的亲和力, 只有这样, 金属氧化物才能被还原出来而得到粗金属, 矿石中的杂质和脉石则与加入炉内的熔剂造成炉渣。

例如, 从锡石(SnO_2)炼锡, 是经过两个阶段还原出来的:

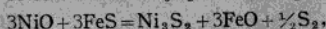
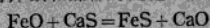


氧化熔炼 是利用某些元素容易氧化而除去合金中杂质的方法。例如, 在转炉中吹炼冰铜时, 可使其中硫化铁氧化, 从而和硫化铜分开:



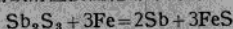
造硫熔炼 这种熔炼法是将金属硫化矿(或是氧化矿与硫化剂)及熔剂一道进行熔炼, 使矿石或精矿中一部分铁的硫化物在高温下先行氧化再与熔剂(主要是石英)造渣, 其余铁的硫化物与被提取的硫化物(如铜、镍的硫化物)结合成渣。这样就使被提取的金属硫化物与脉石及某些杂质分开, 以便下一步处理。

例如，从氧化镍矿炼镍时，铁和镍都为硫化钙所硫化：

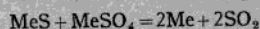
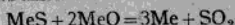


生成的镍是 Ni_3S_2 和剩余的 FeS 的合金。

沉淀熔炼 (又称置换熔炼) 沉淀熔炼的实质是利用一种金属将欲提取的金属从其硫化物中置换出来的过程，例如用铁屑置换硫化镍中的镍：

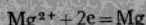


反应熔炼 反应熔炼是熔炼时炉料中的金属氧化物或硫酸盐与其硫化物起交互反应而形成金属及 SO_2 的过程。其反应如下：



熔析熔炼 是不经化学作用而将熔体分成数相的过程。例如当过热的均一的铜铅合金冷却时，铜的溶解度降低，因而它的结晶就浮在合金的上面。

电解熔炼 是利用电的化学效应而在高温下将物质分离的过程。例如在电解炉内，可使镁从熔融的氯化镁中还原出来：



7. **蒸馏** 这种方法适于处理含某些低沸点金属的原料。某些低沸点金属氧化物被还原时，其还原温度往往高于该金属的沸点，故这种金属一经还原，即呈气态挥发出来而与脉石分开，再将这种金属蒸汽冷凝成为液体金属而后收集之，这种方法称为蒸馏。

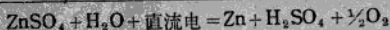
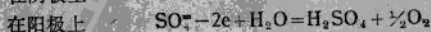
8. **精炼** 将熔炼或蒸馏得到的粗金属中所含的杂质除去而得到适于工业用较纯金属的过程称为精炼。精炼的方法有电解精炼和火法精炼等。电解精炼是利用电流的化学效应，从粗金属铸成的阳极中使欲提取的金属溶解于电介质中，接着在阴极上沉积析出，以达到被提取的金属与杂质分离的目的。火法精炼是将空气通入熔融粗金属中，使其中的杂质氧化，呈气体形态或与熔剂组成炉渣而除去。

9. **浸出** 是利用溶剂将矿石或焙砂中的有用矿物溶解，使金属进入溶液中，而脉石则不被溶解呈残渣状态与欲提取的金属分离的过程。最简单的浸出过程是原料中可溶成分在水中单纯溶解的过程。

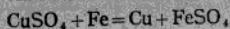
10. **净化** 在浸出矿石或焙砂时，常不免有部分金属或非金属杂质与欲提取的金属一道溶于溶液中。这些杂质可利用水解法或置换法或其他方法从溶液中除去。这种过程称为净化。

11. **金属的沉积** 应用下列任何一种方法将金属从溶液中沉积出来的过程称为金属沉积。其方法计有：

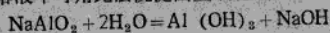
电积法 乃是利用电化学反应，使溶液中欲提取的金属在阴极上沉积析出。例如硫酸锌溶液的电积：



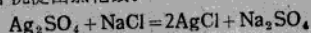
置換法是利用一种負电性金属从溶液中置換出另一种正电性金属的方法。例如用鉄屑从溶液中置換出金属銅，这是我国宋代劳动人民首先創造出来的方法：



水解法是利用金属盐类的水溶液在一定条件下水解或难溶的氢氧化物或碱性盐类的方法。例如，从鋁酸鈉溶液中可用此法沉淀出氢氧化鋁：



化学沉积法是在金属化合物的溶液中加入适当药剂而形成金属难溶盐的方法。例如用氯化鈉从硫酸銀溶液中沉淀出氯化銀：



第一篇 选矿

第一章 矿石及其破碎

§1 矿石的概念和选矿的任务

在地壳成分中有46.59%氧, 27.72%硅, 8.13%铝, 5.01%铁, 2.09%镁, 0.01%铜, 0.005%锌, 0.0016%铅。其它金属的含量虽然不大, 但对于国民经济的发展也有重要的意义。所有金属元素的绝大多数是以化合物状态存在于自然界中。凡有一定的化学成分及物理属性(主要是结晶构造)的叫做矿物。有用的矿物经各种地质作用而富集为矿床, 采掘出来就是矿石。但矿石不是纯粹矿物, 乃是有用矿物和脉石的天然集合体, 其金属含量大到用现代技术经济条件可能提取的数量。

某种金属的矿石, 一般指该金属为主要的提取对象而言, 例如铁矿石、铜矿石、铅矿石等等。但铜矿石中常含有金, 铅矿石中常含有银, 这些贵金属都是应该同时提取的。又如共生的铅锌矿、含钼的铁矿、含钼的铜矿以及含有稀有元素的矿石都是应该综合利用的复合矿石。

根据矿石中金属化合物的性质, 把矿石分为自然元素矿石、硫化物矿石、氧化物矿石、碳酸盐矿石、硅酸盐矿石等等。

矿石中金属的含量叫做矿石的品位。按品位的高低, 可把矿石分为能直接冶炼的富矿和不能直接冶炼的贫矿。但由于选矿科学技术的发展, 对贫矿中金属的含量相对地降低了。例如, 在前一世纪, 仅含有1~2%Cu的矿石才算是铜矿石, 而在这个限度已降到0.5%。一般, 铁矿石含铁不得少于30%Fe, 锌矿石不少于3%Zn, 铅矿石不少于3%Pb, 金矿床不少于0.00001%Au (0.1克/吨)。

根据有用矿物和脉石的物理性质, 用机械的方法把它们分开, 从而获得品位高的各种金属的富矿, 降低生产金属的成本, 并扩大了矿石的资源, 就是选矿的任务。它对于冶金工业的发展具有重要的意义。

§2 破碎

采掘出来的矿石, 其块度往往大到1~1.5米以上, 既不适于冶炼, 也不便于厂内运输。此外, 许多矿石中的有用矿物和脉石结合得非常致密, 要把它们分开, 就必须先把它们破碎。按冶炼或选矿需要的程度来说, 破碎可分为粗碎、中碎、细碎和粉碎四个阶段, 其粒度范围大致如下:

	最初的粒度, 毫米	最终的粒度, 毫米
粗碎	1500~300	300~100
中碎	300~100	50~10
细碎	50~10	10~2
粉碎	2	≤0.05

破碎矿石常用的机械可分为以下几种：

1. 颚式破碎机(图1-1)，根据在固定颚板和可动颚板表面間周期地压碎物料的原理，来进行破碎工作。这种类型的破碎机主要用于粗碎。

2. 圆锥破碎机 运用可动圆锥沿着固定圆锥内表面转动来进行連續的破碎工作的机器。这种破碎机应用范围頗广。粗碎时使用粗碎圆锥破碎机或称旋迴破碎机(图1-2)。中碎时使用标准型圆锥破碎机。細碎时使用短头型圆锥破碎机。

3. 磨矿机 根据矿石在机内被自由降落的磨矿介质的冲击力和磨擦力，来进行連續磨矿的工作。可用鋼球、鋼棒或砾石作磨矿的介质，从而有球磨机、棒磨机或砾磨机的名称。它們都可用于粉碎；球磨机(图1-3)用得較多。

当球磨机的圆筒沿着本身的几何中心軸綫旋轉时，鋼球被帶到一定高度而后落下，因而打击矿块(图1-4)。正确的轉速是磨細的关键問題。轉速过大，則鋼球受离心力作用紧貼在圆筒内表面而不下落。轉速过小，則鋼球仅在圆筒的下部滚动，磨細的效率就很低了。因此，工业上常用的球磨机轉速为規定速度，即临界速度的 53~86% Л.Б.列文逊推荐最有利的轉速为

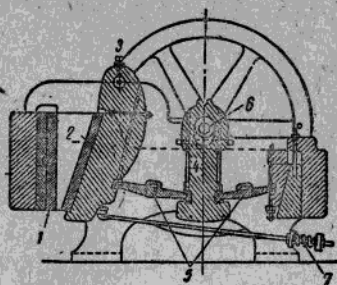


图 1-1 颚式破碎机

1—用硬質鋼制的固定顎板； 2—以同样材料制成的可动顎板；
3—軸； 4—連杆； 5—肘板； 6—偏心軸； 7—拉杆和螺旋形彈簧

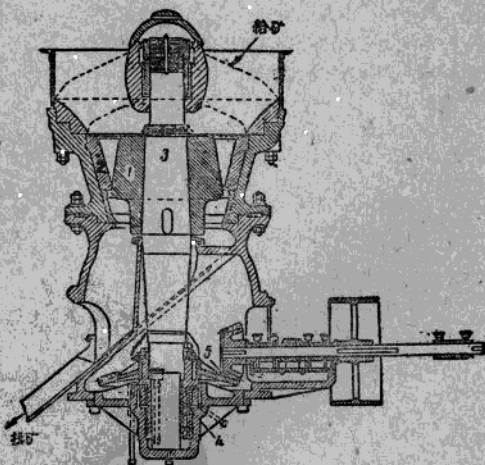


图 1-2 粗碎圆锥破碎机

1—可动圆锥； 2—固定在破碎机架上的不动圆锥； 3—带动可动圆锥的軸； 4—偏心軸套； 5—齿輪传动裝置

$$n = \frac{23.8}{\sqrt{R}} = \frac{32}{\sqrt{D}}$$

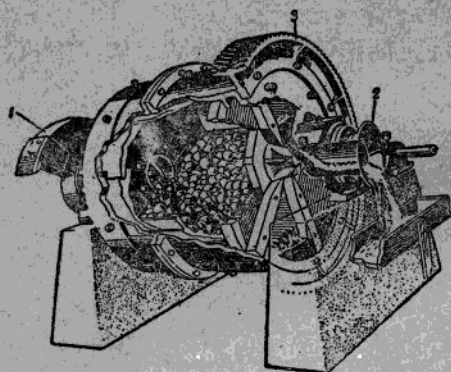


图 1-3 球磨机

1—给矿器；2—空心轴颈（由此排出已磨好的矿浆）；
3—齿圈（与主动齿轮减速器相啮合）

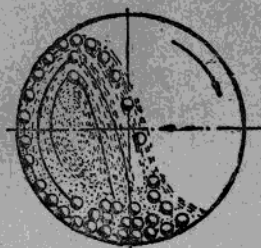


图 1-4 在球磨机中的磨碎过程

式中 n ——球磨机每分钟的转数；
 R ——球磨机半径，米；
 D ——球磨机直径，米。

当不允许细矿被钢球磨损的铁粉所污染时，则采用砾磨机，即用砾石代替了钢球的磨矿机。

粉碎多在水中进行，借以防止物料的成团或扬尘。固体粒子与水的混合物称为矿浆。矿浆的浓度以液体和固体的重量比或固体的重量百分数来表示，矿浆通常含 40~75% 的固体。

表示破碎作业的基本性能之一，就是碎矿比。这是指矿石破碎前最大块度直径和破碎后最大块度直径之比。例如，将矿石自 1 米破碎到 80 毫米，则碎矿比为 $\frac{1000}{80} = 13$ ；若破碎到 0.2 毫米时，则碎矿比为 $\frac{1000}{0.2} = 5000$ 。当碎矿时，根据碎矿比就可以确定需要几道破碎工序和选择何种破碎机械。

破碎的程度愈大，则消耗的能量愈多。这是由于施于碎矿的有用工作反映于此操作所产生的新表面的增加。

设有立方矿粒，每粒之长度为 d 厘米，此粒的面积将为 $6d^2$ 厘米²。今用理想的碎矿机将此矿粒碎为 8 个立方体，每粒之长为 $d/2$ ，每小立方体的面积为 $6(d/2)^2 = 3d^2/2$ 厘米²，总面积为 $8 \times 3d^2/2 = 12d^2$ 厘米²。在此一操作中面积的增加将为 $12d^2 - 6d^2 = 6d^2$ 厘米²。

今破碎比此小立方体为更小的立方体，使每粒之长度为 $d/4$ 厘米，每立方体的面积将为 $6(d/4)^2 = 3d^2/8$ 厘米²。然有 8×8 或 64 个立方体，故总面积将为 $64 \times 3d^2/8 = 24d^2$ ，面积的增加为 $24d^2 - 12d^2 = 12d^2$ 。

在每一情况下，矿粒的直径减少一半，然第二次操作产生了两倍于第一次操作所得的新面积。换句话说，破碎 1 吨 1 厘米的矿石至 0.5 厘米所产生的新面积，远多于破碎同一矿石由 10 厘米到 5 厘米所产生者。此一规律也适用于非立方体的矿石。因此，在实

实际生产中，总是遵循着“不作任何过度的破碎”这一原则。

§3 筛 分

筛分就是把粒度不同的矿石过筛分类，以适应各种冶金过程的需要。例如，在破碎之前把小于破碎机排矿口尺寸的矿石筛出来，就可以去掉破碎机多余的荷载而提高其生产率。一般每一段破碎之后，都有筛分作业。

工业上常用的筛子有固定式和可动式两种。

固定式的条筛也叫做格筛，乃是用钢棒作筛条，平行地构成 $35\sim 40^\circ$ 角的倾斜平面。筛条间的距离与所要求的筛分粒度相适应，一般不小于25毫米。矿石沿筛面滑下而分为大小两级。

可动筛中有摇动筛、振动筛、筒筛，每种还有不同的类型。兹以惯性振动筛为例，略述如下。

惯性振动筛（图1—5）根据筛子的不平衡轮运动的惯性作用，来筛分细小矿石（0.1~15毫米）。

可动筛框用四具弹簧装置于不动的筛架上。在可动筛框上安装了两个轴承。在轴承中转动的主轴上，有两个重量不平衡的惯性轮；由于它们的作用，在转动时造成了离心力，引起装置在弹簧上的筛框振动。振动的方向与筛子水平面成直角。

振动筛底由细钢丝网在可动的金属筛框上作成。一台筛机上，可安装筛孔大小不同的三个振动筛。

当筛孔很小时，习惯上不用格眼直径的大小，而用所谓网目表示筛眼的尺寸。在1英吋（=25.4毫米）的长度中有多少大小相同的方孔数叫做网目。

§4 分 级

筛分作业不适用于极细矿粒按粒度的分类。细小物料容易成团或飞扬起来。所以常

在水中按矿物的粒度和比重把矿物混合物分成级别。这一作业叫做湿式分级。

常用的分级机为机械分级机。兹举其中的耙式分级机（图1—6）为例，说明作业原理。耙式分级机有平底的倾斜钢槽。矿浆沿溜槽给入，充满这一容槽，再经溢流堰流出。此时较粗、较重的粒子从矿浆中沉降出来

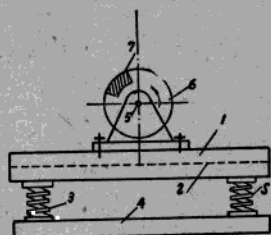


图 1—5 惯性振动筛略图

1—可动筛框；2—筛网；3—弹簧；4—固定筛架；5—主轴；6—惯性轮；7—不平衡重量

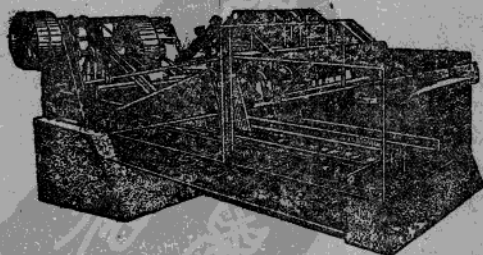


图 1—6 耙式分级机

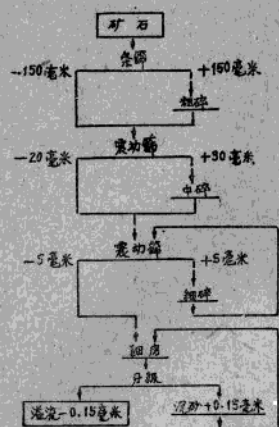


图 1—7 原矿石破碎及磨碎流程

的速度要大于较小、较轻粒子的速度。沉降到分级机槽底的粗颗粒叫做沉砂，被机械耙耙向排出端，送回磨矿机中再度研磨。细颗粒则被溢流带走，就是分级机的产品。矿浆通过分级机的运动速度和矿浆的粘度愈小，则溢流中的粒子愈细。变更液固比，来调节受分级矿浆的速度和粘度，可以得到含有预定粒度的颗粒的溢流。

§5 破碎、磨细和分级的一般流程

图 1—7 说明原矿石破碎、磨碎和分级的一般流程。在具体的情况下，由于被粉碎物料的特性或者最终产品的要求，此流程可以简化或复杂一些。

在选矿厂，磨矿机和分级机常组成闭路循环系统，使得两种作业配合进行。破碎机也可用同样的方式与筛子构成闭路进行工作。

第二章 选矿方法

§1 选 分

原矿石经过破碎、筛分、粉碎、分级等准备处理后，就可以进行选分。采用适当的方法，机械地把有用矿物和脉石分开，以产生一部分富集物，叫做精矿，送去冶炼。其余主要由脉石组成的部分，叫做尾矿，一般废弃不用。介于精矿和尾矿之间的，叫做中矿或中间产品，须进一步选分。如果原矿石系复合矿石，例如铅锌矿，用选择选矿的方法，可以获得铅精矿和锌精矿。又如从铜矿中除回收黄铁矿和磁铁矿外，还回收辉钼矿等有用矿物。由此可见，选分过程不过是有用矿物的集中，并不改变其化学成分和结合状态，所以简单、便宜，大大减少冶炼矿石的数量，从而提高冶炼设备的生产率。

选矿有两个重要的技术经济指标：①精矿产率，即某种选分产品重量与原矿重量之比，以百分率表示；②金属回收率，即从原矿选入精矿中的金属重量对原矿中金属总重量的百分比。这两个指标都可根据金属的平衡，用公式表示出来：

$$100 \times \frac{\alpha}{100} = r \times \frac{\beta}{100} + (100 - r) \times \frac{\gamma}{100}$$

式中 α ——原矿中金属的含量，%；

β ——精矿中金属的含量，%；

r ——精矿产率，%；

γ ——尾矿中金属的含量，%。

解上式得：

$$\textcircled{1} \text{ 精矿产率: } r = \frac{\alpha - \varnothing}{\beta - \varnothing} \times 100\%;$$

$$\textcircled{2} \text{ 金属回收率: } \varepsilon = \frac{\beta r}{\alpha} \times 100\%.$$

例如,某厂在磁选铁矿过程中,原矿含铁量(α)为37%,精矿含铁量(β)为60%,在尾矿含铁量($\varnothing$)为12%时,则

$$r = 100 \times \frac{37 - 12}{60 - 12} = 100 \times \frac{25}{48} = 53\%;$$

$$\varepsilon = \frac{53 \times 60}{37} = 80\%.$$

由此可见,要提高精矿品位同时增加金属回收率,必须降低尾矿的金属含量;否则,提高品位就会降低金属回收率。

根据矿物物理性质的不同,有许多选矿方法:

手选 根据被选矿物具有特殊的颜色,光泽和形状而直接在输送带上进行选分;或者将大块的富矿选出,或者将大块的脉石去掉。

洗选 根据被选矿物和脉石在水中具有不同的性质进行选分,即其中之一可以被水粉化,而另一种仍保持块状。

筛选 根据被选矿物的硬度、脆性,于破碎后把粉碎程度大的矿物用筛分方法选别出来。

重力选矿 根据被选矿物和脉石具有不同的比重和其颗粒在液体或空气中降落速度的不同而进行选分。

电磁选矿 根据被选矿物和脉石具有不同的磁感应性而进行选分。

浮游选矿 根据被选矿物和脉石具有不同的润湿性而进行选分。有些矿物或脉石的表面容易被水润湿,而另外一些矿物或脉石的表面不易被水润湿。可用药剂改变矿物表面为水润湿的可能性。

为了完成选矿的任务,究应采用那种方法或那几种方法,要看矿石的性质如何,通过试验研究加以确定。在现代选矿厂中较常采用的有重选、磁选和浮选。

§2 重力选矿法

这种方法的理论基础是,有用矿物和脉石的比重不同,从而它们在液体、气体等介质中的落下速度也不相同。常用水作为分离矿物粒子的介质。处理粗粒的矿物,用跳汰法;处理细粒的矿物,用淘汰法(摇床法)。兹将跳汰法略述如次。

跳汰选矿法 是用来选分块状或粗粒矿石的。如矿石粒度不均匀,应先按粒度分级,然后分别来选。这主要因为块矿在水中下沉的速度,不仅决定于矿石的比重,而且还与其粒度的大小有关。如矿浆中有几种不同的矿物颗粒,它们将按其不同的比重而分层地分布起来。跳汰机也有几种类型,兹举活塞式为例,说明如次。

活塞式跳汰机(图1—8)乃是一个用隔板分为两个部分(活塞室和跳汰室)的木箱,隔板下部并不直达箱底。在活塞室中有活塞1,由偏心机构2使其运动,而在跳汰

室中有固定的篩网。沿纵长方面有几个互相接连着的室。每一室中的篩网都較前一室中的篩网降低約 100 毫米。

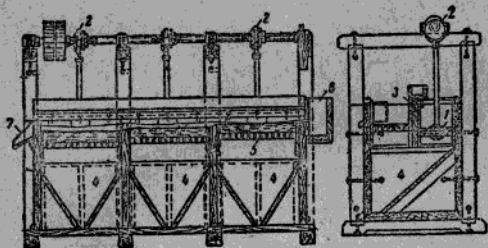


图 1—8 活塞式跳汰机

1—活室；2—偏心机构；3—隔板；4—室；5—篩网；6—木箱；7—斜槽

部跳汰室，再溢流到斜槽 7 中。由于活塞作每分钟 100 到 300 次的运动，故在篩孔和底床孔隙間形成往复前进的水流。降落很快的重粒子落到底床上并且穿过底床的孔隙到达室 4，由那里周期地排出。較輕的粒子則被水平的矿浆流帶走。

这种跳汰机的活塞冲程为 0.5 ~ 8 厘米。机器的生产率介于每昼夜每平方米篩面积 10 到 40 吨矿石之間。

当选分細粒矿物时，在每一个篩网上都安放了碎磁铁矿或細小金属球鋪成的底床。底床材料的比重应该介于几种被分离矿物的比重之間。粗粒級的跳汰 (8 ~ 10 毫米) 就不需要人工底床了。

矿浆由第一个室送入，并且依次地经过全部

§3 电磁选矿法

主要用来精选鉄矿石。磁选的原理是以矿物具有不同的导磁系数为基础的。导磁系数以矿物本身能通过磁力綫的能力来表示，即磁通密度与磁场强度之比。

各种矿物具有程度不同的导磁系数。如以純鉄的导磁系数为 100%，可将矿物分为四类：①强磁性的，例如磁鉄矿 (40.18%)；

②中等磁性的，例如鉄鈦矿 (24.70%)；③弱

磁性的，例如赤鉄矿 (1.32%)；④无磁性的，

例如石英，黄鉄矿 (分别为 0.37, 0.23%)。

矿石中經常含有两种以上的矿物，所以可利用其磁性强弱的不同而在磁场中进行分离。如有赤鉄矿需用这种方法选分，就要先进行还原焙烧，把它变成磁鉄矿。

湿法筒式磁选机 (图 1—9) 适用于选分細粒度的强磁性矿石，因为水能消除磁性和非磁性粒子間的相互粘結。磁选机的磁极装置在一个固定軸上，軸的两端支持在支架上，圓筒以軸为中心轉动。

在圓筒的下部用无磁性物质作成箱子，箱子底用穿孔銅板制成，通过这些孔送入补充水。銅板与两端箱壁制成一定的傾斜度，以便于尾矿的排出。

对于磁性矿物的卸落，采用磁感应刷子的装置。这种刷子是在木棍上釘以长 50 ~ 60

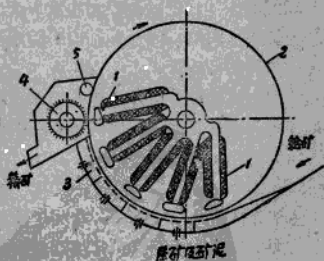


图 1—9 湿法筒式磁选机

1—极性交錯的磁极；2—圓筒；3—穿孔黃銅板；4—磁感应刷子；5—噴水管

毫米，粗4~5毫米的铁钉，其旋转方向与圆筒相反。在刷子的上方安装一个喷水管，其上面有两排小孔，进行喷水。

当进行选矿时，磁性矿粒被吸附在圆筒的表面，经过在不同磁极上的若干次翻轉后，跳越到磁感应刷子上。这种跳越作用是由于铁钉周围产生了强度很不均匀的磁场强度之故。当刷子转动时，附着于其上的矿粒被带到另一面，这时钉子因离开磁场较远而失去磁性，所以矿粒由于离心力和重力的作用而落下。无磁性矿粒在磁性矿粒翻轉时，受铜板小孔中上升水流的作用，使其与磁性矿粒分离，经过铜板孔导至卸出口排出。

对于結晶非常細小，而且脉石与矿物密切結合的矿石，必须首先把它磁化，然后粉碎至150网目(0.104毫米)以下才能分离，进行磁选。当磨矿时在球磨机中加入大量的水，然后使矿浆经过磁选机分成两部分，即精矿和尾矿。尾矿经过浓缩机将大部分水收回后废弃。精矿经过浓缩后，用过滤机滤出。

经过磁选所得的精矿，含铁量由原矿石的30~40%提高到57%以上，和天然富矿的品位大致相同。

如果原矿石系磁铁矿，就可不经过磁化焙烧而直接粉碎进行磁选。

§4 浮游选矿法

浮选主要是在細磨的矿浆中加入适当的浮选剂，并进行强烈的攪拌和充气。經药剂作用而难于为水所潤湿的矿物顆粒附着于分布在全矿浆中的細小空气泡上。当空气泡浮起时，便将那些附于其表面的矿物顆粒一起带到矿浆表面。

在某些矿物顆粒上形成薄膜使其难于被水潤湿所用的浮选药剂称为捕集剂；它們都是高分子有机化合物，例如黄酸盐——黄药、脂肪酸及其盐类和其他有机物质。捕集剂仅仅与某些具有一定化学組成和晶体結構的矿物发生作用而形成难于潤湿的表面薄膜。不受捕集剂作用的矿物在浮选时不能粘附在气泡上，因此也就不能上浮而留在矿浆中。

在浮选时还采用起泡剂，由于起泡剂的作用，在矿浆中形成稳定的泡沫，而能支持住由矿浆中上升的矿物粒子。起泡剂的作用在于用他們来降低水的表面张力。一般使用各种有机物作为起泡剂。

浮选药剂——捕集剂和起泡剂——的消耗量很少，每吨矿石的用量不超过50~300克。这可解释为：捕集剂和起泡剂是表面活性物质；它們积集在水与矿物和气泡的相界面，因此，当整个矿浆中的药剂浓度較小时，这些药剂在各相的界面的浓度仍可能是很大的。

在化学組成上相近似的矿物，例如銅、鉛、鉄的硫化矿，都具有几乎一样的与捕集剂相互作用的能力，因此，在含有若干种硫化矿物的矿石浮选时，它們全都可能进入泡沫中。为了抑制矿物中的一种矿物的浮游能力，我們采用一种药剂——抑制剂，抑制剂通常是各种无机物质，它們与某一种矿物粒子表面发生化学反应而形成薄膜，使之不能与捕集剂互相作用。在抑制剂的作用下，矿物中的某一种矿物失去了浮游能力，但是，与此一矿物相似的其他矿物不与抑制剂发生反应，因而进入泡沫中。

在各相似矿物中的某一种矿物被轉移到泡沫中去之后，可以把以前被抑制的伴生矿物再浮选出来。为此，矿浆中常加入一种新的浮选药剂——活性剂。活性剂通常也是可溶于水的无机物质；由于活性剂作用的结果，以前被抑制的矿物重新获得浮游能力。活

性剂或者是破坏抑制剂所形成的薄膜，或者是改变此薄膜的组成，使之开始接受捕集剂的作用。

例如，优先浮选可以用来分选铅锌矿石。此种矿石含有方铅矿 PbS 、闪锌矿 ZnS 和由黄铁矿 FeS_2 、石英 SiO_2 及其他矿物所组成的脉石。在细磨过的矿浆中加入闪锌矿的抑制剂氰化钠和硫酸锌；因而在闪锌矿颗粒表面上形成氰化锌的薄膜，方铅矿颗粒的表面在这种情况下并不改变。而后，往矿浆中加入捕集剂、起泡剂并进行浮选，此时方铅矿进入泡沫中而闪锌矿则留在矿浆中。刮出铅精矿泡沫后，再复活闪锌矿。这时要加入少量的硫酸铜，使闪锌矿粒子的表面再重新改变为容易接受捕集剂作用的硫化铜薄膜所复盖。在第二次的浮选中，闪锌矿进入泡沫中，便可从矿浆表面刮出锌精矿。第二次浮选后残留在矿浆中的是无用的脉石，即被弃去的尾矿。

在某些情况下，第一次浮选时不加入抑制剂，使方铅矿和闪锌矿一同进入泡沫中；得到铅锌混合精矿。将混合精矿由矿浆表面取出，加了水后又变成新的矿浆，再用此矿浆进行第二次浮选。在第二次浮选中，由于添加了抑制剂，仅仅是方铅矿浮起。在泡沫中得到铅精矿，而在浮选后的矿浆中则是锌精矿。

浮选方法广泛地应用来选别很多不同类型的矿石，其中包括很多有色金属矿石。浮选是在酸性或碱性介质中进行的，后者通常是往矿浆中添加石灰而形成的。

在生产的条件下用于浮选的浮选机采用连续操作——原矿浆不断地送入机器中，而由机器中排出泡沫产品和尾矿矿浆。

根据矿浆与空气搅拌的方式不同，可将浮选机分成气升式的和机械搅拌式的。

机械搅拌浮选机（图1—10）在现代选矿厂中应用得最为普遍。它是具有长方形截面的槽，用横隔板分成许多小室（不超过16）个。

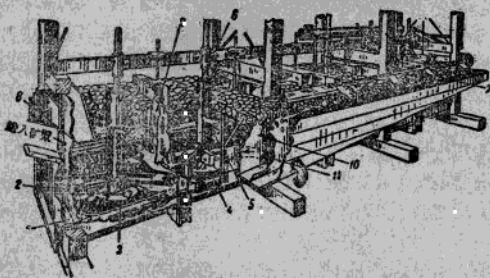


图 1—10 机械搅拌浮选机

矿浆通过间室1沿管2进入浮选机的第一浮选槽。在这里矿浆落在快速旋转的、其上面用盖板4盖上的搅拌器3上。搅拌器是一硬质钢制成的叶轮，其转速为275~600转/分；当其旋转时，空气由管5吸入矿浆中，管5借孔6而与大气相通。

与细小空气泡相掺混的

矿浆上升到隔板8以上的稳定区。

矿浆由第一个浮选槽经过溢流板9而进入中间间室，然后又以同样方式相继地通过机器所有的浮选槽。尾矿浆不断地由最后一个浮选槽排出。漂浮的泡沫用刮泡沫的刮板7从矿浆表面刮出。

如果需要把泡沫产品再加以浮选，则泡沫被引入斜槽10，沿管11重新送去浮选。

浮选过程的工艺流程，甚至在只从矿浆中选出一种矿物时也是非常复杂的。而要从矿石中得到2、3种精矿产品的优先浮选则更为复杂。在图1—11中列举了一个简单的