

镍

提取冶金

Ni

R.小博尔德等著

有色金属公司译

冶金工业出版社

镍

(提取冶金)

[加] J. R. 小博尔德 等著

金川有色金属公司 译

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书译自加拿大1967年出版的J. R. 小博尔德等著《The Winning of Nickel》一书。原书分镍的地质、镍的采矿、火法冶金、湿法冶金四篇。本书翻译出版的是后两篇，（前两篇中译本《镍（地质、采矿）》另行出版）其主要内容为系统介绍国外一些镍冶炼厂的生产实践，包括工艺、设备、操作和技术条件。同时也扼要地提供了镍生产发展的历史资料，论述了一些过程的基本原理。

在翻译出版过程中，对原书中的资产阶级观点和材料作了必要的删改，在正文和注解中补充了一些内容，并将计量单位从美制换算成公制，重新编排了章节和图序。本书可供从事有色冶金的工人、干部、技术人员、有关院校教师和工农兵学员参考。

本书由金川有色金属公司负责翻译，冶金工业部北京矿冶研究院校对。在对全书组织翻译前，对外经济联络部已摘译并经中国科学院化工研究所校对整理供内部使用的部分章节，重校后亦采用于本书中。

镍

（提取冶金）

〔加〕J.R.小博尔德 等著

金川有色金属公司 译

*

冶金工业出版社出版

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 7 5/8 字数 200 千字

1977年9月第一版 1977年9月第一次印刷

印数00,001~3,800册

统一书号：15062·3275 定价（科三）0.74元

目 录

第一章 硫化镍矿的选矿	1
第一节 引言	1
第二节 解离	4
1. 细碎	4
2. 分级	6
第三节 富集	8
1. 浮选	8
2. 磁选	13
第四节 脱水	14
1. 浓密	14
2. 过滤	16
第五节 国际镍公司选矿生产实践	17
1. 铜崖选矿厂	17
2. 克里弗顿选矿厂	20
3. 里瓦克选矿厂	22
4. 汤普森选矿厂	23
第六节 鹰桥公司选矿生产实践	25
1. 鹰桥选矿厂	25
2. 哈第选矿厂	28
3. 弗克尼斯湖选矿厂	28
第七节 舍利特高尔顿公司选矿生产实践	29
第八节 奥托昆普公司选矿生产实践	31
第二章 硫化镍矿的火法冶金	35
第一节 引言	35
第二节 焙烧	38
1. 多层焙烧炉	39
2. 沸腾焙烧炉	40
3. 烧结机	41

4. 回转窑	44
第三节 熔炼	44
1. 鼓风炉熔炼	46
2. 反射炉熔炼	48
3. 闪速熔炼	51
4. 电炉熔炼	54
5. 转炉吹炼	56
第四节 收尘	59
1. 旋风收尘器	59
2. 洗气塔	60
3. 静电收尘器	62
4. 袋室收尘器	63
第五节 国际镍公司焙烧及熔炼生产实践	64
1. 铜崖冶炼厂	65
2. 康尼斯顿冶炼厂	68
3. 汤普森冶炼厂	69
第六节 鹰桥公司熔炼生产实践	71
第七节 奥托昆普公司熔炼生产实践	74
第八节 硫化镍和硫化铜的分离	76
1. 控制缓冷过程和冰镍分离	76
2. 国际镍公司冰镍分离实践	80
第九节 铜崖厂硫化镍精矿的焙烧	84
第十节 苏联的生产实践	87
第三章 硫化镍矿的湿法冶金	89
第一节 湿法冶金概述	89
第二节 高压氨浸法——舍利特高尔顿厂	97
第三节 从磁黄铁矿中回收铁和镍	112
1. 国际镍公司铁矿回收工艺过程	113
2. 鹰桥磁黄铁矿处理工艺过程	131
第四章 硫化镍矿的精炼	137
第一节 引言	137
第二节 电解原理	139
第三节 金属阳极的电解精炼	145

1. 国际镍公司电解精炼生产实践	147
2. 鹰桥公司电解精炼生产实践	152
3. 苏联的电解精炼生产实践	156
第四节 电解提纯法	157
1. 硫化镍阳极的电解提纯	157
2. 国际镍公司生产实践	158
3. 不溶阳极的电解提纯	165
4. 奥托昆普公司生产实践	166
第五节 气化冶金——羰基法	170
1. 国际镍公司的常压羰基法	171
2. 加压羰基法	175
第五章 氧化镍矿的火法冶金	180
第一节 引言	180
第二节 熔炼成冰镍	182
1. 安诺尼姆镍公司	183
2. 住友	189
3. 志村化工	189
4. 奥尔斯克、列日、乌发列依	189
第三节 熔炼成镍铁	191
1. 安诺尼姆镍公司	193
2. 住友、太平洋、志村化工、日本矿业公司	197
3. 日本冶金工业公司	198
4. 拉瑞姆纳镍公司	200
5. 莫尔诺镍公司	201
6. 汉纳镍公司	201
第六章 氧化镍矿的湿法冶金	209
第一节 引言	209
第二节 常压氨浸取——尼加罗厂	209
第三节 高压硫酸浸取——自由港硫公司	220
参考文献	235

第一章 硫化镍矿的选矿

第一节 引言

人类迄今开采的大部分镍矿床，都是由含硫的矿物组成的。这些硫化物的特性，对于研究如何从中获取有价金属的科学技术的发展，具有重要意义。十九世纪后期，在加拿大安大略省的萨德伯里地区发现和开采了硫化物的矿床，使该地区成为世界上镍的重要产地，并在长期经验积累的基础上，产生了各种提镍的工艺。后来，在芬兰和在加拿大曼尼托巴省的利恩湖和汤普森地区也发现了硫化矿，这导致新企业和新工艺的建立。苏联也正在开采类似的矿床。虽然氧化镍矿日渐成为镍的重要来源，但目前世界上产镍量的四分之三左右仍是从镍的硫化矿物中取得的。

硫化镍矿提取冶金的发展，受多种因素的影响。因为硫化矿物与脉石矿物是呈明显的单独颗粒状态出现，这种矿石易于在操作过程的一开始就用机械方法将其大部分的脉石成分除去。其他金属（特别是铜和铁）硫化物的存在特征也很重要，这些金属与硫结合，构成矿石中矿物的组成部分。从一开始，镍铜分离和除铁就是镍冶金的中心问题。尤其是最近，铁的回收变成很重要的问题。此外，这种矿石通常还含有少量的但很重要的钴和贵金属，因此，一种提取方法可能会有助于这些金属的回收，而另一种提取方法就可能会把这些金属损失掉。

硫本身也是一个基本因素。在形成矿石时，硫起着富集有价值元素的重要作用；但是为了提取这些有价值元素就必须与硫解离。在脱硫的过程中，利用各种金属对硫和氧的亲力的差异，实现这些金属的分离。当经济上有利时，硫也以适于用户需要的形式予以回收。

从这种矿石中提取镍，包括一系列富集和精炼的步骤。过程

的设计，是要使提取后产品的品位逐步提高，而处理的物料量则逐步减少。与这个指导原则相关，并且同等重要的是，应使在每一步骤中有价值物料的损失保持在最小值。在最前面的处理过程中，将不需要的物料最大量地排除，以使有用产品的回收率提高到经济上有利的程度，这是提取冶金的一条重要原则。

硫化镍矿是各种硫化矿物和数量不等的没有经济价值的岩石矿物(称为脉石)的混合物。一般说来，有两种方法从矿石中除去所含的大量脉石。一种是在炉子中熔化矿石，使脉石成熔融状态与硫化矿物分离。一种是用机械方法将矿石分成需要的和不需要的两部分，为此，将矿石破碎并磨成细小颗粒，然后使硫化矿物颗粒从脉石颗粒中分离出来。

在第一种情况下，当矿石熔化时，熔融的脉石组分成为炉渣浮于硫化矿物熔体的表面，可以弃去。事先不经过富集的熔化法只适用于品位很高的矿石，这种矿石常为含有脉石的块状硫化矿物。由于这种矿床十分罕见，现今开采的矿床中只有一小部分是块状型的。因此直接熔化法的应用已经比早年大为减少。

现今大部分矿山开采的是由大量脉石组成而仅含有少量硫化矿物的低品位浸染矿石。如果单纯用熔化法来分离这种矿石中的脉石，需要大量的炉床能力和燃料，这当然是很不经济的。因此现今开采的许多浸染矿床，在早年当然不被认为是矿石。确实有些这样的矿床，当时只开采了其中的块状硫化矿而被抛弃。今天，由于有了高效率的选矿方法，能够机械地除去矿石中的大量脉石，在费用较高的熔化阶段以前，富集其中的有价金属，因而低品位矿床才得到大量的开采和利用。

前已指出，在硫化镍矿石中，各种硫化矿物呈单独颗粒存在，不同的硫化矿物之间以及硫化矿物与脉石之间都有着明确的界面。硫化镍矿石中常见的主要硫化矿物有：镍黄铁矿 $(\text{Ni}, \text{Fe})_9\text{S}_8$ ，是一种含有少量钴的镍铁硫化物；磁黄铁矿， Fe_{n-1}Sn ， n 一般约近于8，但可从8变到16，是一种含有少量镍的硫化铁；黄铜矿， CuFeS_2 ，是一种铜铁硫化物。在硫化镍矿石中，作为一般

规律，磁黄铁矿的含量普遍高于其他两种矿物。

镍黄铁矿含有约34%的镍，其颗粒大小自粗粒至显微镜下可见，常与磁黄铁矿共生。磁黄铁矿含铁约60%，含镍低于1%，后者部分呈固熔体存在；部分为颗粒极细的镍黄铁矿。虽然很早就认识到回收磁黄铁矿中铁的价值，但直到不久前还没有经济适用的方法来达到这个目的，大量的磁黄铁矿与镍黄铁矿一道熔炼，回收所含的少量镍，而铁则完全损失于废渣中。现在，磁黄铁矿已经能够经过处理和镍一样同时回收其中的铁和硫。这在选矿实践上具有重大的意义。黄铜矿含有约35%的铜，与磁黄铁矿伴生，但通常不像镍黄铁矿那样以细粒浸染于磁黄铁矿中。它有少量分散于脉石中，在较小的范围内，在镍黄铁矿中也有散布。

矿石的大部分是脉石，象硫化矿物一样，这些岩石也呈晶粒存在，在晶粒间有着明显的界面。当矿石破碎时，有沿晶体界面破裂的趋向，因此，易于破碎成脉石的颗粒及解离的硫化矿物颗粒。选矿作业的这一阶段称为磨矿，即是将脉石及硫化矿物的晶粒各各相互分开或解离。这样，就能够在有用矿物损失不大的情况下除去大量的脉石颗粒，而各种有用矿物的颗粒也能够彼此分开。选矿作业的这一阶段称为富集。而将从矿石中分离出来的含有大量有用矿物的部分命名为精矿，其余主要为废弃的脉石部分称为尾矿。由于硫化矿物与脉石之间或各种硫化矿物之间的彻底分开是不可能的，因此，产生了名为中矿的另一部分。中矿由各种硫化矿物及脉石或混合硫化矿物组成，需作进一步处理，以达到更完善的分离。

关于矿石经过选矿以获得富集了各种有用矿物的精矿的经济意义，可举一典型例子来说明其价值。设一种矿石含镍1%，使其选矿比为10:1(即10吨矿石产1吨精矿)，设矿石中90%的有用金属进入精矿，则处理10000吨这样的矿石，其情况可表明如下：

矿石品位	1%
矿石处理量	10000吨

产精矿量	1000吨
矿石含金属量	$10000 \times 0.01 = 100$ 吨
精矿含金属量	$100 \times \frac{90}{100} = 90$ 吨
精矿品位	$\frac{90}{100} \times 100\% = 9\%$

这样,矿石中90%的物料经过选矿的全过程而得以除去,却仍然保留了90%的有用金属于精矿中,有用金属损失10%乃是获得提高矿石品位的经济效果所必须付出的代价。

第二节 解 离

欲从浸染矿石的脉石中获取有价矿物,必须将矿石破碎得十分细小,使硫化矿物成为晶粒从脉石中解离出来,脉石也成为晶粒从硫化矿物中解离出来。除了细碎这个减小矿石尺寸的阶段以外,解离还包括分级,即将细碎合格的矿石细粒分离出来送至下一工序处理,较粗的部分则循环返回进一步降低其细度。

1. 细碎

通常细碎的程序是干式破碎和湿式碾磨。在正常情况下,矿石在矿山用颚式破碎机及圆锥破碎机破碎至便于运输和选矿厂处理的粒度,在选矿厂还须将来自矿山的矿石在圆锥破碎机(图1)中进一步破碎至25毫米或更小^①。对辊破碎机有时也用于最后一段破碎。一般每一段的破碎比为4比1,即破碎产品中最大块的直径为破碎机进料最大块直径的四分之一。

欲将矿石细碎到硫化矿从脉石中解离出来的程度,还需最后

① 经破碎机破碎后的矿石只有一个尺寸——厚度是符合该破碎机的产品规格的。例如产品规格为20毫米的破碎机,其产品厚度等于或小于20毫米,而长度及宽度可能超过20毫米甚远。这种情况同样适用于通过条筛的破碎块,若筛条的间距为20毫米,则破碎块的长、宽、厚之一必然等于或小于20毫米,其余两个尺寸则不必如此。通过格筛(方格或长方格)的破碎块必然有两个尺寸和筛格尺寸相适应,第三个尺寸理论上可以任意长。当然,从破碎产品小的一端来看,碎块是一直可以小到粉尘的。

由磨矿来完成。在镍的选矿实践中，磨矿通常是相继在棒磨机和球磨机中进行的。这两种磨矿机都是沿中心轴回转的巨大中空钢筒，一种内装有长钢棒，一种内装钢球或铁球作为磨矿介质。钢筒回转使棒或球贴附筒壁并随之上升，直至重力使之重新滚下或落下。由此产生的冲击和碾磨作用使矿石颗粒得到进一步破碎和粉碎。用坚硬的卵石作磨矿介质的砾磨机，有时也可用以代替球磨机。在有些情况下，干式磨矿虽然也很适用，但破碎后的矿石通常都是和水一道加入到磨矿机中，水便于分配和运输矿石颗粒，也可以避免粉尘的危害。进料中水的比例应加以调整，以获得最好的磨矿效果、最低的磨矿介质消耗和最大的生产量。

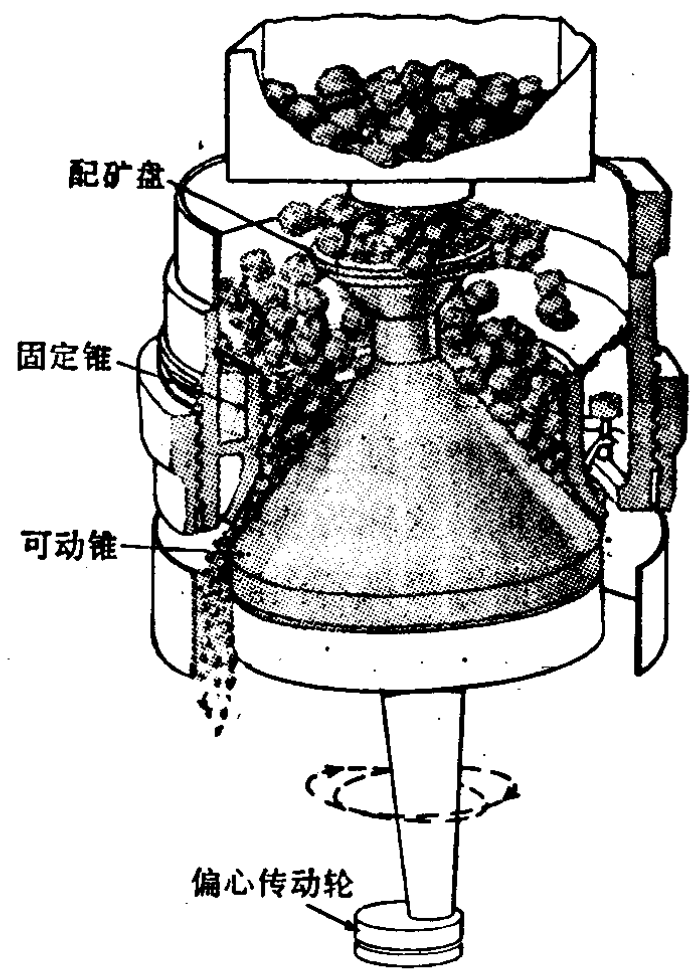


图 1 圆锥破碎机剖面图

有的矿石适合于自磨，即将破碎后的矿石加入磨矿机中，不用外加磨矿介质，利用其本身的互相冲击碾磨以达到磨矿的目的。

这种方法虽然效率较低，但节约了金属磨矿介质。较和缓的冲击碾磨可以提高沿矿石结晶介面破裂的程度，减少不利于浮选的过粉碎颗粒的产生。在所谓“半自磨”作业中，矿石经棒磨机粗磨以后，用经过选择的不同尺寸的矿石代替金属磨矿介质进行细磨。

2. 分级

从磨矿机出来的矿浆中的细小矿石颗粒必须一分为二：已磨细到可以在下一工序处理的部分和较粗的应返回重磨的部分。筛分，虽然在分别破碎产品的粒级上有效，但不适于分离磨矿后的细微颗粒。筛分能力随着网目的提高而降低，此外，筛分只能分别物理尺寸，而不能辨别硫化矿物和脉石，使不含硫化矿物的粗粒脉石和含有硫化矿物的矿石一同返回重磨。

因此在工厂实践中，细磨后的矿石采用分级进行分离。其原理为颗粒越重（这和颗粒的尺寸及比重二者有关）则在水中沉降的速度越大。这就使较重的硫化矿物颗粒及连生体颗粒能够优先返回重磨，以达到符合所要求的细度；而较轻的，不含硫化矿物的脉石颗粒，则在相对较粗的情况下被排出来。这样，可以降低磨矿成本，也减少了有害矿泥的产量，而磨矿的循环处理能力却得到提高。分级机供给磨矿机进料的一部或全部，磨矿机则将磨细后的矿浆排入分级机，这称为磨矿机与分级机构成闭路。若磨矿机向分级机给矿，而分级机不向磨矿机返砂，则磨矿机称为处于开路。有两种类型的分级机都得到广泛的应用：一种是水力旋流器，利用离心力作用进行分级；一种是机械分级机，利用上升水流和矿物颗粒的重力作用的相对运动来进行分级。

旋流分级器（图2）由安装在一个锥体上的圆筒组成。矿浆从与器壁成切线方向的入口高速泵入器内，而获得一个旋转运动，因此形成的旋流所产生的离心力将矿石颗粒向外抛射。当旋流向下时，较粗较重的颗粒到达器壁，脱离旋流，顺着器壁向下流入锥底，较轻较细的颗粒也随着旋流向下，但由于受离心力的影响较小，不能达到器壁，在锥体的底部进入一个密集的上升旋

流，与其外部下降的旋流作同方向旋转，上升的内旋流通过安装在旋流器上部的检旋管（溢流管）而溢流出来。检旋管的位置虽然也能对分级的细度产生影响，但其主要作用是防止进入器内的矿浆同溢流发生短路。分级细度可由调整进入器内的矿浆浓度来实现。

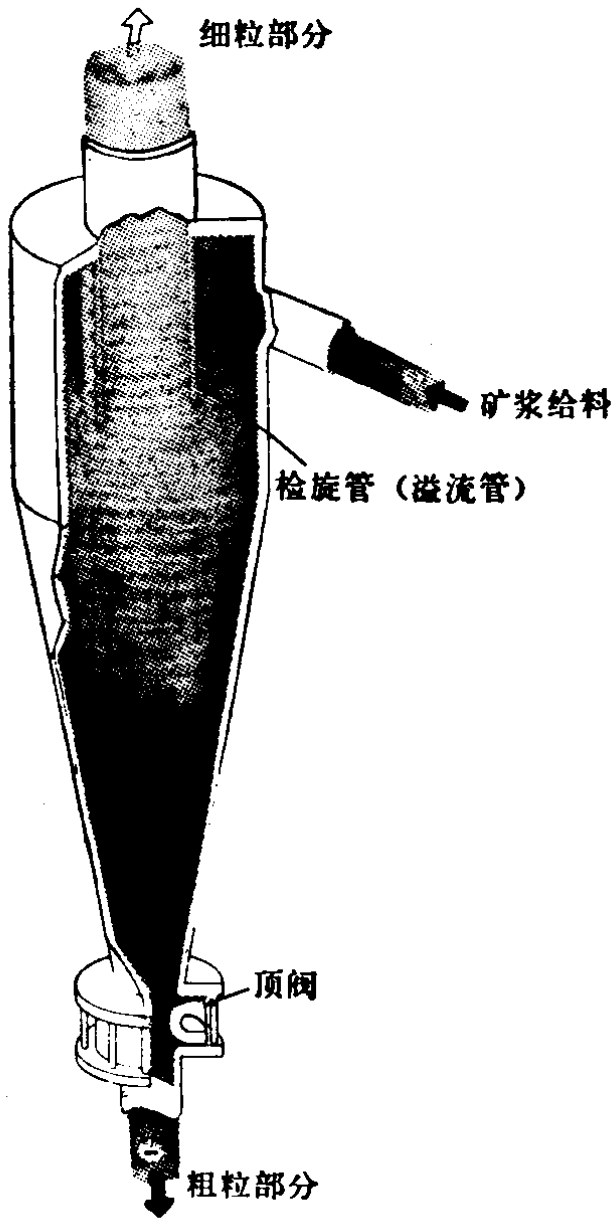


图 2 旋流分级器剖面图

耙式分级机（图 3）是一个狭长的斜底槽。槽的较深的一端起着—个装有溢流堰的沉降池的作用。矿浆，即在水中浆化的细磨矿石，经排矿槽进入池中。矿浆中较细、较轻、缓慢沉降的颗

粒，被水流经溢流堰带出；较粗、较重、沉降迅速的颗粒沉至槽底，被机械耙或螺旋沿着倾斜的槽底向上运动，作为返矿进入磨机再磨。溢流矿浆的浓度或水稀释度是确定分级机分出颗粒细度的极重要因素。过浓，则高比重的矿浆产生较大的浮力，使粗粒也会溢流出去。相反，稀释度越大，矿浆比重越小，颗粒越易于沉降，溢流中的颗粒就越细。大多数硫化镍矿石当细磨成100目左右的颗粒时，其中的有用矿物能够得到良好的分离^①。

第三节 富 集

有用矿物从矿石中解离出来以后，还须将其中的脉石分出弃去，并将各种有用矿物分选出来。在镍冶金中，这个程序是根据颗粒的表面特性及颗粒的磁感应来进行的。

广泛应用的方法是泡沫浮选法，这是一个利用不同矿物所具有的不同表面化学性质的方法。这个方法使大量早年认为是没有价值的物料变成了镍的主要资源，也是在高品位块状硫化矿缺乏的情况下，加拿大的镍生产仍然得到不断发展的主要因素。

1. 浮选

浮选法的主要工作原理是在矿浆柱中上升气泡对选择性附着在气泡上的矿粒的提升作用，其余矿粒则因重力作用沉入水中。

① 一种镍矿石的最佳细度由试验室的研究工作和生产实践来确定。细度用筛眼大小表示，筛眼大小以每吋（25.4毫米）长度有多少大小相同的方孔数为基础，这个数称为“网目”或“目”。根据北美标准筛制，网丝直径与筛孔大小相等。因此，200目的筛孔的大小即为 $25.4\text{毫米} \div 200 = 0.13\text{毫米}$ 。一个代表性的分级机溢流的筛分分析如下：

网 目	重 量 %
+ 48	3
- 48 + 65	7
- 65 + 100	12
- 100 + 150	9
- 150 + 200	9
- 200	60

在此例中，细碎的程度可说明为：65目筛上占10%或10% + 65目，反过来也可以说，60%通过200目筛或60%小于200目（此注解有部分内容是译者补充的）。

矿化气泡上浮至矿浆表面形成泡沫精矿刮出，沉入水中的矿粒则成为底流。此操作在一系列的浮选槽中进行，使可浮矿粒有和气泡接触的充分机会(图4、图5)。

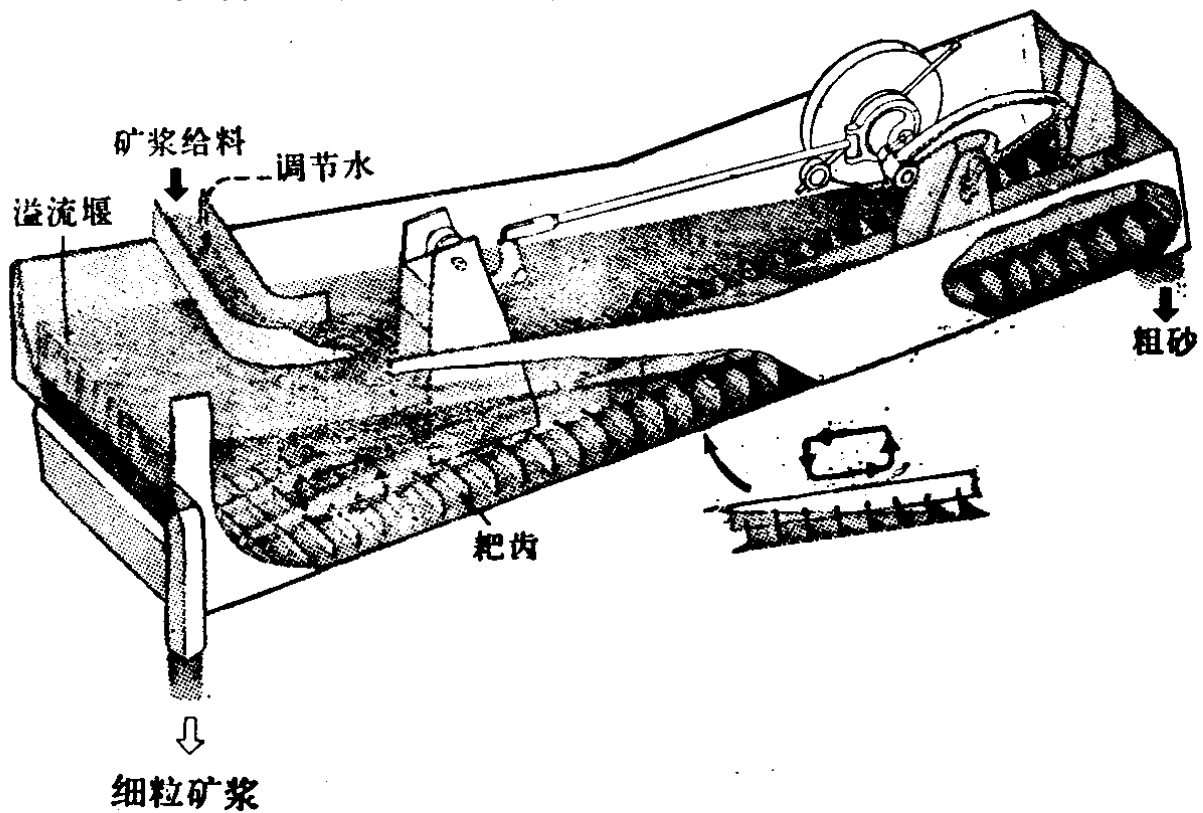


图 3 耙式分级机剖面图

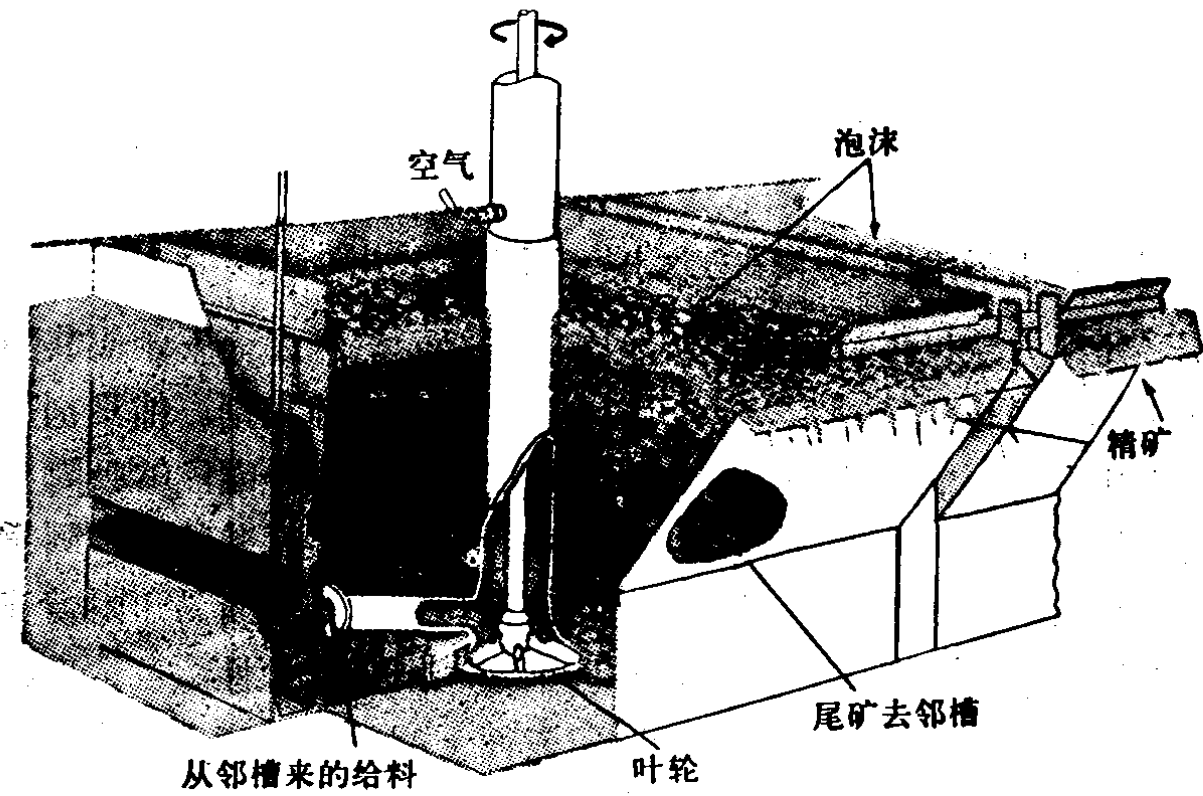


图 4 浮选槽剖视图

此法根据这样一个事实，即一物质不论其本身性质如何，如果它的表面不能为水所润湿，就能附着在空气泡上。除了表面为电中性的碳氢化合物及具有层状结构的矿物，如石墨、滑石等外，大多数矿物由于表面都带着静电荷，能够吸附水的极性分子，因此，在自然状态下，它们都是可润湿的。处理矿浆使所需要的矿粒具备疏水性，即不能为水所润湿因而可浮，而使其余的矿粒具备亲水性，即能为水所润湿因而不可浮。这就是浮选法的关键所在。

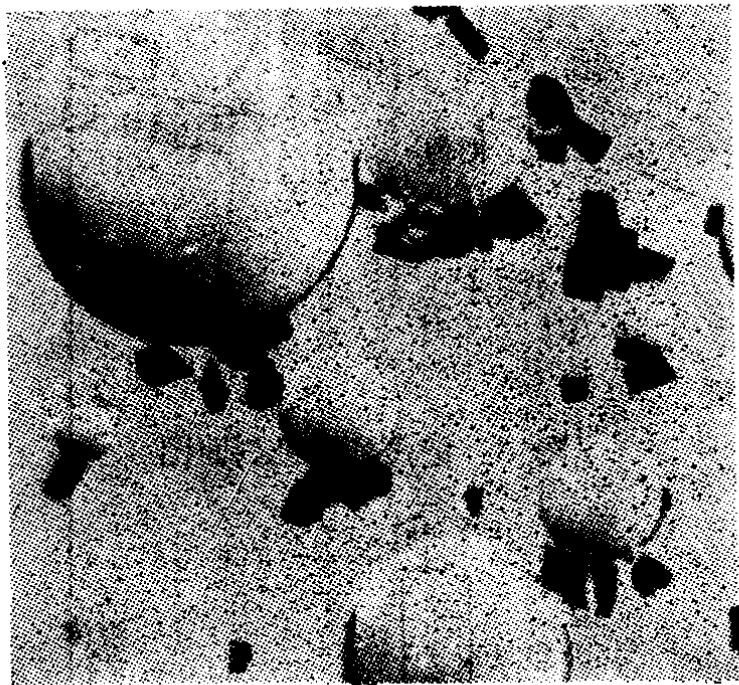


图 5 显微照片示吸附在气泡上的疏水性矿粒升向表面 (×35)

处理方法包括将一种能吸附在所需要的矿物表面上，使其降低亲水性的化学药剂加入矿浆。这种药剂称为捕集剂。捕集剂是有机化合物，它的分子具有的极性基或离子基的一端能够吸附在具有相反电荷的矿物表面上，而其非极性基或碳氢基的一端则指向液相，这样，矿粒就“穿”上了一层亲气斥水的外衣而易于附着在空气泡上(图5)。吸附作用的选择性决定于捕集剂的性质及浓度、矿浆的酸度或硷度以及存在于矿粒表面上的力。酸度或硷度通常用量度矿浆氢离子浓度的 pH 值来表示。表面力的性质则由多种因素确定，其中主要有矿物的化学成分和结晶构造，以及表面电荷

效应等。

起泡剂是一种重要的化学药剂，它也是一种有机化合物。它的分子以极性基指向水相，以非极性基指向空气泡内部，于是气泡上就有了起保护作用的同性电荷分子。能产生相当稳定的泡沫，还能加强气泡壁，延长每一个气泡的寿命。气泡也因为矿粒的附着而更为稳定。对泡沫寿命的要求是能长到容许取去其所携带的矿物为止，而不要成为永久的泡沫。松油、甲酚以及较高的醇类是常用的起泡药剂。

调整剂是一种其影响浮选作用不同于捕集剂和起泡剂的药剂，为了多种目的而加入矿浆中。例如，许多捕集剂除能够优先浮选一种矿物外，还能使其他矿物成为可浮，在这种情况下，在矿浆中加入调整剂以控制捕集剂的选择作用。能阻止浮选作用的调整剂称为抑制剂，它能使某种矿物的表面不能吸附捕集剂。另一种调整剂称为活化剂，它能改变矿物的表面性质以提高其吸附捕集剂的能力而浮选出来。例如，硫酸铜就是一种为此目的而广泛使用的调整剂。调整剂还包括起分散作用的药剂，可以防止矿粒与矿粒的互相粘附，一般称为分散剂。

必须注意，矿物在浮选中的反应受着矿浆pH值的极大影响。pH调整剂是最重要的调整剂。低pH或酸性矿浆常能提高硫化矿物的可浮性，但矿物在酸性矿浆中溶解生成的阳离子活化剂却能妨碍浮选的选择性。高pH，或碱性矿浆能得到良好的浮选及较好的选择性，并能减轻设备的腐蚀程度。消石灰，即氢氧化钙 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ 是一种主要用来提高碱性的药剂，同时也是一种抑制剂。苏打灰，即无水碳酸钠 (Na_2CO_3) ，价值较高，但也常用。苏打灰通常不能代替消石灰，因为后者在溶解后所生成的钙离子能直接起到抑制作用。硷金属氰化物单独或与充气同时使用，能选择抑制某些矿物。

药剂常在浮选每一阶段的首端加入矿浆，如需要可以补加。以前，除起泡剂外，其他的药剂都是在磨矿系统中加入。

自分级机给入浮选系统的溢流一般含固体40%（重量）。硫