

# 六十年代的选矿

胡为柏

(中南矿冶学院教授)

湖南科学技术情报研究所

一九六三年五月

# 目 录

1. 最近选矿的动向和成就	1
1.1 破碎、磨矿效率的提高	2
1.2 筛分、分级的强化	5
1.3 重力选矿新设备和新工艺	6
1.4 浮选的新进展	8
1.5 磁选、电选成就	11
2. 新选矿法的展望	13
2.1 放射能选矿法	13
2.2 离子浮选法	15
2.3 热粘选矿法	15
2.4 电泳选矿法	17
2.5 介电选矿法	17
2.6 电化学选矿法	18
2.7 光电选矿法	19
2.8 粘附选矿法	20
2.9 弹性选矿法及其他机械性质选矿法	20
2.10 化学选矿法、冶金选矿法	21
3. 六十年代选矿的技术水平	22
3.1 原矿种类增多、品位降低及处理量的扩展	22
3.2 产品质量——超纯精矿	24
3.3 回收率及综合利用程度——无尾矿	25
3.4 劳动生产率——自动选矿	26
结束语	27
参考文献	29

# 六十年代的选矿

矿产资源并不是固定的、日趋贫竭的，相反它随着选矿科学的发展而变化着、逐步扩展着。

不言而喻，在二十世纪六十年代，社会生产的发展和物质生活的提高，对矿产资源必将提出愈来愈迫切的要求。因此，为合理地综合利用矿物资源而发展起来的选矿科学，必将更加急剧的向前推进。

本文试图对“六十年代的选矿”作概略的探讨。首先综合归纳了近几年来国际选矿科学的动向和较重大的成就；然后展望六十年代正在形成的及可能兴起的新选矿法；最后对六十年代选矿科学可能达到的技术水平，进行初步的推断。这篇概括性论文中，不可能详列技术数据及新机器的图样。请读进一步从文末的120多篇文献中查索。

## 1. 最近选矿的动向和成就<sup>(1)</sup>

自1960年以来，选矿界努力的目标，不外乎：(1)提高产品的质量 and 增产品种，以适应各种工业部门，特别是尖端工业部门的需要；(2)找寻新方法，改进流程，设计新的高效的设备，来提高回收率并降低成本；(3)力求自动化，最大限度地提高劳动生产率。

首先，对于近代工业的基础——煤和铁的选矿，已成为60年代工业中重大的生产对象。在1955年，全世界经选矿的铁矿占全部铁矿量不到1/3，但到1962年，苏联入选的铁矿量达7千万吨，已占全部铁矿量的2/3左右；美国入选的铁矿量达8千万吨，亦占全部铁矿量2/3左右；而西德及日本所用的铁矿，几乎是全部经过选矿的。在1955年，全世界的煤经过选矿的还不到2成。而到1962年，炼焦煤差不多都要经过选矿。苏联1962年入选原煤达1亿4千万吨左右，美国入选原煤达1亿吨左右。由这些数字就可看出，60年代单单铁和煤的选矿，其规模是多么庞大。

另一方面，选矿又面临着供应近代三大尖端技术（核能、电子技术、宇宙飞行）以大量高质量的特种矿物原料的任务。例如，核能燃料需要铀和钍就要求选收各种含铀矿物和独居石等含钍矿物；建造原子反应堆需要铪和钨，就需要选收铪英石及各种钨钼矿；用于中子控制的材料的中子吸收剂，要从硼砂及铪英石中提取；用于中子减速剂的铍，要求选出绿柱石、矽铍石等含铍矿物。电子工业需要钨、钼、钽、铌，就促进了这类矿物的选矿技术；作为电子器件原料的锗、镓、铟、镉、铟等，就要求对有色金属硫化矿选矿时注意综合选收这些元素。宇宙飞行器的制造，要求选矿提供铌、钽矿，超纯高岭土、超纯石墨等原料。

另外象用作农业肥料的磷灰石和钾盐的浮选，也成为大规模发展的方向。

总之，随着其他工业生产发展的需要，选矿的领域在扩大，产品品种日趋增加，质量也日趋提高，是很明显的第一个动向。

其次，为了综合利用，提高回收率、降低成本，近年来出现了一些新颖的选矿方法，来选收各种过去认为无法选收利用的矿物；采用了新的流程，来提高回收率；设计了新型的高效的选矿设备，来降低成本。

新的选矿法在近年来已见诸大规模利用的为选别铀矿的放射能电子筛选法〔2〕；用于选别岩盐的热粘选矿法〔3〕；用于高岭土的电泳选矿法〔4〕；用于选别金钢石、萤石、煤的光电选矿法〔5〕；用于有色金属硫化矿浸出的细菌选矿法等〔6〕。

新流程的特点，就是选矿和冶金化学处理等过程密切结合。如处理铀、钍、钷等稀有金属矿的流程，就综合应用了放射能选矿法，重力选矿法、浮选、浸出、离子交换，溶剂萃取等过程，得出化学精矿〔7〕。另一特点就是中矿处理流程的根本改变，例如对硫化矿复杂中矿采用焙烧、挥发、旋涡熔渣、治渣产品的浮选，加压氧化浸出，浸出沉淀浮选等；对非硫化矿中矿采用苏打压煮浸出等。另外如用离子交换法回收浮选药剂及处理废水等〔8〕。

新设备如无介质磨矿机〔9〕、超细振动磨〔10〕、冲击式破碎机；弧形筛，搅拌筛分槽（Hukki式筛）〔11〕；各式重介质水力旋流器〔12〕；多层或快速刻槽式摇床〔13〕，离心或喷射式跳汰机〔14〕，电振溜槽及尖缩溜槽（Pinched sluices，又名Cannon式选矿机）〔15〕；回转螺旋分选机（Helicoid；Helicoidal）〔16〕；喷射式离心浮选机〔17〕；离心式及永磁场磁选机〔18〕；无极带式自动清筛过滤介质的过滤机〔19〕；细旋式垂直上升的皮带运输机（名为Serpentex Conveyor〔20〕）。以及超强磁（达43,000高斯）〔21〕的出现等。

总之，为了综合而充分地利用矿物资源、提高指标，降低成本，必须在工艺上创制新方法，采用起根本变化的新流程，设计新型的高效选矿器械，是第二个努力方向。

第三个动向是自动化。选矿过程在三十年前还是相当繁重的劳动，但到五十年代就基本上机械化了。六十年代将是选矿过程的自动化。1960年以来，在苏联、美国、西德、日本都先后出现了高度综合自动化的选矿厂。电视普遍地采用，还在研究用电子计算机直接自寻最佳技术操作条件。例如，一个日处理量为5000吨的铜选矿厂，机械化阶段还需要200名左右工人，运转率最高在90%左右，但目前自动化以后，仅需4名值班工人，运转率可达97%左右，并且指标稳定。不论在劳动生产率、经济利益、技术管理等各个方面，自动化都有很大的优越性。因此，近年来国际选矿界将研究力量集中到自动化方面，是极其显著的动向〔22〕。

上面系整个选矿领域中比较突出的总动向。至于近年来选矿的具体成就及动向，兹分科加以扼要的论述。

## 1.1 破碎、磨矿效率的提高

破碎磨矿的努力目标是提高效率、节省能耗。近年来表现在：（1）自磨，（2）提高设

备效率，(3)新破碎方法，(4)粉碎助剂，以及(5)理论研究等方面。

(1)自磨就是不加钢球或棒等作磨矿介质，而是用矿块自磨。近年来在国外大型选矿厂中推广吹落式自磨机(Aerofall mill)。已经证实，这不仅功耗小，磨损少，并且会使矿石沿晶粒间界破碎，对以后的选别(重选、磁选、浮选)起有利的影响。例如美国Jones & Langhlin钢铁公司，新安装的吹落磨机和原装棒磨机对比，在原矿品位(24.3%Fe)及精矿品位(60.6%Fe)指标相同条件下，前者的回收率为79.9%，而后者仅74.8%。南非Mangula选矿厂，用新装的吹落式自磨机与原装球磨机对比，在磨矿细度同为65—200目条件下，前者的浮选回收率为93.5%，后者为92%，可见吹落式自磨机的排矿的单体分离状况较好。对浸出的影响可举南非Dornfontein金铀矿选矿厂新装吹落式自磨机与原装棒磨及砾磨机的对比试验为例，前者磨矿细度为60.4—200目，浸出用硫酸耗量5.8公斤/吨浸出率88.5%；而后者磨矿细度要达79.7—200目，硫酸耗量增至9.0公斤/吨，浸出率仅79.0%。并且吹落式自磨机产品的分级效率也有所提高〔9〕〔23〕〔24〕。

总之，近年来发展吹落自磨机，已肯定有下列优点：(1)流程简化，不要过去的几段开路、几段闭路破碎磨矿流程，而就用一段流程，直接从粗块磨成合于分选要求的细度；(2)产物的解离和粒度组成改善，有利于分选；(3)钢材消耗少，成本低；(4)铁的污染少，有利于浮选及浸出。近年来还利用吹热风的方法来磨潮粘的矿石，从而解决了潮粘矿石难于破碎筛分的麻烦问题。

另一类抛落式(Cascade)自磨机亦得到推广，它有干式(周边排矿)及湿式(格子排矿)两种。例如加拿大魁北克矿区安装了12个这类磨机，直径18吋，长5呎，破碎能力为每日60,000吨。在北欧(瑞典、挪威)的钨矿和铅锌选矿厂中也新装了这类磨机。

在日本则发展成一种垂直筒式的塔式磨碎机。另外在芬兰则试验采用普通球磨机加大磨筒直径用超临界转速自磨〔24〕。

显然，自磨的发展，是六十年代碎矿工艺的一件大革新。今后看来还要不断改善并推广。

(2)提高设备效率。破碎磨矿的效率低，是整个选矿过程的薄弱环节。而破碎磨矿的成本，往往占选矿总成本的一半左右。所以，提高破碎、磨矿效率，具有重大意义。近年来曾以冲击或压缩的试验条件作为比较标准，测定了虎口破碎机破碎石英的相对效率仅4.4%，球磨机的相对效率仅10—14%，冲击式破碎机的相对效率为20—27%。可见效率都不高，能的损失很可观。

目前对提高破碎磨矿效率，有好几派意见：有一派认为发展大型设备，比较经济。所以近年来机器愈来愈大。在法国，虎口碎矿机的给矿口的大达8呎3吋×5呎3吋，这样，就可用容量为6立方码的大抓石斗直接给矿，可以给入重达10吨的大石块，破碎至12吋，生产率为每小时600—800吨。磨机的大型化尤为突出，例如1962年美国Allis-Chalmers公司制造的大球磨机，用于湿磨的是13'×42'，用于干磨的是13'×36'，所用的电动机容量为3,300马力。在Tucson铜选矿厂，新装了12'×16'的大棒磨。锤碎机的生产率也有很大提高，1961年在澳大利亚安装的一台破碎石灰石的锤碎机，功率为650马力，给矿口为1300毫米，破碎产物粒度为85—25毫米时，每小时处理量为350吨〔25〕。

另一派认为应改进机器结构或类型，例如近年来西德着重推广冲击式破碎机，改变锤碎机的冲击锤的安装方法。增加虎口碎矿机的摇动频率，简化排矿结构。采用水压装置等。这种增加摇动及冲击作用的发展障碍，是零件磨耗问题。目前采用两种办法：(1)采用耐磨材料如碳化钨等；(2)采用自护衬垫，即利用被碎矿石本身衬垫在易磨耗地区，形成一层坚实的受磨表面。

另一派是主张改变工艺操作条件来提高效率。如芬兰的胡基(R. T. Hukki)，近年来做了许多磨机“超临界转速”的实验[26]。他提出提高磨矿效率的措施是：(1)减少磨矿介质的总重量(即充填率)；(2)增加个别磨矿介质的质量；(3)减少磨矿介质和磨机内衬的磨擦，即采用平滑的内衬。此时磨机以临界转速的210%超速运转，生产率最高。他还提出在磨机中心轴线上挂上一些压板，压制球荷的滑动，这样在100%临界转速时可得到相当于200%临界转速的效果。而磨机内衬可采用矿石自护衬垫。但苏联所作的校验试验[27]，认为最有利的磨机转速与球的充填率有关，只有在球的充填率 $<30\%$ 时，超过100%临界转速在一定范围内是有利的。如果对同一磨机、同一矿石而论，最高生产率的操作条件，应是球的充填率为40%，转速为临界转速的83.2%。并且用塑料透明的球磨机进行观察，发现超临界转速条件下磨矿时，主要是最外层球与磨机内衬相对滑动所起的研磨作用。而另一方面，加拿大及美国的一些选矿厂却提倡“低转速非打击作用”的操作条件[28][29]，即转速由平常的74%临界转速变慢至60%临界转速，改装小球(球径由 $1\frac{1}{2}$ "减为1")，少装球(球荷充填率由40%减至25%)，结果生产率略有增加，但大大节省了电能消耗。但是，英国路斯(Rose, H. E.) [30]进行研究结果认为：装小球、少装球会降低生产率，没有多大好处。

综上所述，提高破碎磨矿设备效率是一个具有重大意义的问题。石本各派主张是相辅相成的，各有其优缺点及具体适用条件。

(3)新破碎方法。要根本上改善破碎磨矿效率，彻底的办法是设计按新的原理操作的新机器。目前已试验成功并在试制推广的计有：①离心磨机或竖式转筒磨机，如瑞典工厂试验是两个同心竖筒，利用一个筒转动或两个筒都转动，研细夹在两筒间的矿石。外筒直径为1.5米，高为1.0米，内转筒直径为1米。②振动磨：这几年在振动机构上有改进，用于吹细物料的细磨，现在美国出品为 $30'' \times 30''$ 的，马达为75马力。③喷气磨(Jetmill)，这是用7—15大气压的蒸气由喷嘴喷出，形成约600米/秒的高速气流冲击其中粉粒而粉碎。目前在美国、西德、法国都有工业出品，但还只是在化学工业中应用。④其他正在试验的方法，有高周波电磁感应破碎法，水电效应破碎法，以及用核爆炸破碎法等。

(4)粉碎助剂。所谓粉碎助剂是一种有助于粉碎的药剂，当其加入时，可增加粉碎的效率。过去研究较成功的助剂有R. D. A(一种芳基烷基磺酸)炭黑、油酸钠。近年来研究得知，加聚缩硅醇(Silicone)是颇为有效的[31]。

(5)粉碎理论的研究。近年来(如1962年在Frankfurt召开的第一届“破碎”学术会议)着重下列几方面[32]：(1)矿石粉碎的物理过程，(应变类型，单粒破碎，集合应变)；(2)功耗规律；(3)粉碎产物的粒度特性及比表面；(4)应用相似论，概率论，矩阵论的解

新研究法；(5)晶粒間界破碎的机理[33]；(6)粉碎力学化学 (Mechanochemie) 等。“粉体工学”是目前逐渐形成的一門新学科。

## 1.2 筛分、分级的强化

近年来，在选矿各分科中，筛分分级有比较显著的进展。这是因为：(1)由于过去对筛分注意不够，不论在选矿厂设计或实际操作时，都发现筛分是一个薄弱的环节；(2)对于细粒贫矿，由于分级不善，使以后的分选作业无能为力；(3)在化工、建筑材料、煤、铁矿等破碎筛分厂中，迫切要求提高筛子的生产率和筛分效率。因此，促进了筛分、分级的强化。

强化主要表现在新式的筛子和分级机方面。同时对理论的研究也引起人们的注意。

(1) 概率筛 (又名Mogensen sizer)[34]。这种筛子的结构原理与旧型不同，在于它是通过概率理论计算而设计成的。一类是多层平面筛，各层筛孔大小及孔的位置都按概率计算决定，从而能使筛下产物的粒度分布合于要求。另一类是倾斜筛，出品的称为D型Mogensen sizer，共5层，筛面倾角，各层筛孔相对位置都按概率计算结果排列。根据同一原理，还制成L型振动格条筛[35]。都已在瑞典选矿厂投入生产，其特点是：不堵塞，筛网寿命长，分离精确，调节筛下分离板的位置，可任意调节分离粒度，能筛分较湿的(含H<sub>2</sub>O可达3.7%)的物料。

(2) 弧形筛 (又名Bogensieb)[36]。首先在荷兰出现，现在在选煤厂已普遍推广。是很有效的细粒(2-0.04毫米)湿式筛分机。其筛面是弧形的，筛的格条与给矿流动路线互相垂直。为了避免摩擦，用一段时间后，筛面可以上下倒转使用。还制成一种反转型的DSM弧形筛。其单位面积的处理能力为普通筛子的10-50倍。常用作振动筛前面的辅助脱水。优点是构造简单、造价低、应用范围宽。

(3) 搅拌筛分槽(Screen cell)[11]。对于小于1毫米物料的分粒，过去都采用水力分级机及水力旋流器。细粒级的工业筛分是一个尚未彻底解决的问题。而芬兰在1962年提出一种搅拌筛分槽。这实质上是一立方体的槽子，槽底接上分砂圆锥体，槽中安装机械搅拌器。在槽子上部装上几片倾斜的筛面，各个筛面都有独立的振动器。给矿从槽子中部进入，粗粒落入下部分砂圆锥体，定期排出(分砂圆锥体处还有上升水流)，细粒随水流向上行通过筛网流出。因此，重力及离心力有助于粗粒的分出，甚至粗粒不会与筛网接触。这种筛分槽特别适用于0.1毫米至1毫米的物料，其单位筛面的生产率比普通所用的筛子高10至50倍。并且分粒精确度高。

(4) 顶流分级机(Overdrain classifier)[37]。这种是改良带耙式，其特点是分级机身顶部是密闭的，形成清洗室，与粗砂夹混的水及细泥由顶部排出，从而得出清净的返砂。

(5) 复合旋流器(Duplex Cyclone)[38][39]。这是把一大一小两个旋流器连通成一个单元。给矿由大旋流器的侧面射入，得出沉砂及溢流，在圆筒部分与小旋流器相通，洗滌水由小旋流器侧面射入。小旋流器亦得沉砂和溢流产品。因为两旋流器中的矿浆回转方向相反，又有洗滌水流射入，所以分级精度高。

(6) 透平旋流器 (turbocyclone) [38][40]。这种旋流器与普通靠压力给矿的旋流器不同，而是一种“不用泵”的离心旋流器，给矿自行流入，受内部的旋转叶轮（和机械搅拌浮选机相似，称为透平）的作用而旋流。这与离心分离机作用相同。它的优点是透平（旋转叶轮）的转速可以人为精确调节，因而分离粒度也可调节，（最细可达8-9 $\mu$ ），并且摩擦也少。

(7) 轴流旋流器 (fixed impeller hydrocyclone) [41]。这是在一个圆筒中部设一固定叶轮，使给入的矿浆发生旋回运动。给矿由圆筒上部给入，溢流由下部中空管流出，而沉砂由圆筒下部侧边流出。优点是压力损失少，分级效率较好。

(8) 重力惯性空气分级机 (Gravitational-Inertial Classifier) [42]。这是一种涡旋式的。给料与主气流由顶部进入田螺状的分级室后，细粒落入旋涡区回转，受侧面进入的辅助气流的作用，最后沿侧边的百叶窗式的出口向上排出。而粗粒因重力惯性关系，不会在旋涡区旋转，就下落至底部排去。这种分级机的优点是沒有转动部件。按照空气动力学原理将操作条件调节好以后，就可不用看管。在美国磷灰石选矿厂及石灰石、水泥厂中已推广应用。

(9) 筛分分级理论。近年来对矿粒在筛面上的运动、筛分概率和效率方面进行了一些理论研究。找出了大规模筛分的规律性，求出了各种筛分效率的实用公式 [43]。在分级方面，研究了机械分级机的水动力学理论，对溢流粒度进行了理论计算，导出了分级的产率、回收率和效率公式 [38]。对水力旋流器的水动力学和工艺计算，及各种工艺因素的研究，仍然在大规模深入地进行 [44][45]。

### 1.3 重力选矿新设备和新工艺

在煤、钨、钨、锡、金刚石、稀有金属砂矿的选别中，重力选矿始终占居重要的地位。重力选矿进展主要表现在：(1) 新设备的出现，增加了分选的精度和选别深度（能处理更细的矿粒）。(2) 新工艺、新方法的出现，降低了成本，提高了回收率及产品质量。六十年代重力选矿的总趋势有三：(1) 重介质选矿法进一步的发展；(2) 离心力和振盪作用的应用；(3) 处理细粒的新设备。

(1) 重介质选矿是重力选矿的主要发展方向，不仅在煤、铁、金刚石等选矿厂普遍采用，在锰、铅、锌矿亦普遍应用。例如日本，五年来有80%的铅锌浮选厂加装重介质选矿，预先丢弃1/3以上脉石，从而提高了浮选厂的处理量及原矿品位。重介质法另一优点是生产率大，可以大规模处理贫矿，这就扩大了矿物资源。并且，由于重介质法的分选精度高，过去认为不能用其他重选法有效处理的矿石，改用重介质法，变得能有效的选收。

重介质选矿法的成就主要在三方面：①介质：重液和重悬浮液；②设备；③工艺控制。

①介质的进展。表现在近年来重液选矿法的工业化。过去，重液法只能在实验室求理论分选指标时少量应用。由于重液贵，用量大耗损多，难于工业化。但1961年出现了用四溴乙烷 (Tetrabromethane) 的大规模选矿厂。其原因是由于：从滴水中提取四溴乙烷



的方法有改进，能取得大量价廉的四溴乙烷；矿石在处理前，先用表面活性剂处理，分选后很易从矿石表面洗脱收回，每吨矿所耗损的重液还不到1公斤；对于微细的矿粒，先采用一次过滤回收重液，然后用石油脑再调浆，再用水进行二次置换过滤，结果使每吨矿仅耗0.5—1公斤四溴乙烷和约3公斤石油脑，因而经济上很合算。至于重浮悬液所用的重剂，过去都是用硅铁、方铅矿及磁铁矿。并且认为硅铁是最好的（比重大、耐磨、磁性强、易回收）。但是，硅铁的磨细很花钱，并且湿磨过程中腐蚀剂损失达20%左右。1953年左右提出新的方法，就是用电炉熔炼含15—20%硅的硅铁，这种铁水流出时，用喷雾法使其成为细粒，这方法所得硅铁细粒很圆，耐磨并且悬浮液粘度低。但是熔炼1吨这种硅铁，约需化2100瓩小时电能，成本还是相当高。何况处在偏远地区的矿区，尚有运输硅铁等供应问题。因此，近几年来，有趋向于尽量设法利用选矿厂本身的产品，如黄铁矿、磁铁矿、钛铁矿、甚至建议用砂矿中选出的一部分重砂返回作为重剂。在选煤时用黄土、混合矿物等。

②在设备方面，现在重介质分选设备已有几十种〔46〕。各有其优缺点。看来最值得注意的是两种：一种是重介质水力旋流器，由于介质在其中急剧的运动，因而大大有利于分选。它适用于处理5毫米至0.2毫米的矿粒，在国外已大规模推广用于铁矿的分选〔47〕，它采用磁铁矿作为重剂。另一种是重介质振动溜槽，此法首先由瑞士的斯文逊（Svensson）提出〔48〕，又名Strip法。其构造很简单，就是一振动溜槽，重剂（用磁铁矿、黄铁矿、钛铁矿或石榴石。）在槽中形成一定的床层，分选矿石通过溜槽中重浮悬介质的作用和溜槽振动作用而分离。上层为轻矿物，下层为重矿物。此法在西欧及北欧已推广于铁矿、锰矿、铬矿、钛铁矿及多金属硫化矿。在苏联铁矿中，亦正在推广〔49〕。

③在工艺控制方面的进展：已由只用一种比重分出两种产品，发展成用两种比重分选出三种产品。例如，在比重2.78时浮出脉石，在比重2.78—3.15时浮得萤石精矿，比重大于3.15的是方铅矿精矿〔50〕。另外对于硅铁悬浮体，事先用重铬酸钾和树胶处理。向悬浮体加入表面活性剂减低粘度。以及应用电磁开关控制沉砂的排出等。

（2）离心力和振盪作用的应用。离心力选矿法近年来有很大发展，如螺旋选矿机已普遍推广，对离心机的结构的改进，使它能适用于煤泥的脱水及选别。苏联新式的CFC—100型的离心机转速高达每分钟15,000转〔51〕。离心跳汰机亦在试验中。应用振盪作用（包括电磁及机械振盪、超声振盪）促进分选，看来也是发展方向之一。如振盪溜槽、振盪摇床、振盪浮槽分级机等。

（3）处理细粒的重选新设备。一般而论，重选的成本比浮选低，但主要缺点是古典的重选设备只适合于处理粗粒及中等粒度的矿粒。因此，生产上的需要就促使人们努力创造处理细粒的重选设备。这方面几年来有较大进展，兹列举一些已工业化的新设备：

①卡太维式矿泥跳汰机〔52〕：这是南美卡太维（Catavi）锡选矿厂首先应用的，它与圆锥隔膜跳汰机相似，但是用低压（约1大气压）的气动装置传动，产生特殊的不对称周期：上冲速度慢而时间长，下降速度快而时间短。上冲与下降时间之比为4:1，冲程范围为1.25—100毫米，冲次最大为400次/分。另一特点是用三角形棒条代替筛板，棒

条間距为6.2毫米。在棒条間鋪有一层比重为1.1的橡皮球。水由三角棒条下面側管进入，上冲期的慢水流将橡皮球举起，矿浆以低速通过棒条間隙，于是輕的脈石粒随水流向尾矿堰流出；随之而来的急速下降水流使棒条下的空間形成真空，橡皮球迅速落回棒条，阻塞一部分通道，此时棒条下空間的真空和棒条上的液柱压力使矿浆以高速通过此狭窄通道，形成大量細的高速噴射流，給細粒矿泥以极高的动能，从而促进分选。

②轉管离心分选机[53]。这就是使矿浆通过一轉管（长1100毫米，直徑20毫米），利用回轉的离心力作用使不同比重及不同粒度的矿粒以不同的速度向管壁运动，同时又利用管壁的阻力使其以不同的速度向前移动。用这种設備可以处理寬粒度物料，特别是細达10—30 $\mu$ 的物料。

③回轉螺綫分选机(Helicoid)[16]。这是与圆盘搖床相似的。但是呈振盪的螺綫形。这又与螺綫选矿机相似，但它有振盪作用。因而矿浆在其中同时受到离心力及垂直上下振动。离心力使輕矿粒抛向螺綫邊緣，使重矿粒向螺綫中心；而垂直上下的力使矿层松散及紧密，造成充分分离的机会。

④尖縮溜槽(Pinched Sluices)[15][54][55]。这是一种傾斜溜槽，但上端寬(9")，逐步向下端尖縮(至1")。由于槽口逐渐縮小，給矿濃而流动慢，因而向出口处逐渐形成厚和挤的矿流，促进分选。輕矿物在上层冲向較远处，重矿物滯留在底层沿槽口处流出，因分矿器将两者隔开。这种尖縮溜槽可以排成圓圈，成为几层。由上面給矿的名为坎农(Cannon)分选器，由中央管向上冲給矿的名为卡尔博科(Carpco)分选器。目前已在砂矿精选中推广。

上述这些新設備的特点，都是构造比較简单，因而便于推广。

(4)重选理論的研究主要是：①水力旋流器，特别是重介質水力旋流器中的矿粒运动規律；②跳汰机床层及水动力学，特别是細粒跳汰行为[56]；③搖床操作的規律[57]；④重介質分选时介質的物理化学性質；以及振盪溜槽等的运动規律。

## 1.4 浮选的新进展

浮选作为主要的选矿方法，近年来的进展很大[58]。主要可归納为几个方面：①难选矿物的浮选；②微細矿泥的浮选；③浮选剂的进展；④浮选机的改进；⑤浮选理論研究等。

(1)难选矿物的分选。是浮选进展的主要方面，可以按矿物类型扼要敘述如下：

①有色金属硫化矿，主要成就表现在复杂銅鉛鋅硫化矿的分选[59]，其中如混合精矿的优先分离、阶段选别及联合流程的应用，共生的富含镓、錳、锗、銻等矿物的控制回收，中矿的处理等。

②有色金属氧化矿方面，氧化銅的浮选成就是孔雀石浮选的成功。摸清了硫化作用的条件及机理，采用浮选、焙燒、水冶等联合流程有效地处理了过去认为难选的泥質銅矿[60]。在氧化鉛鋅矿方面，已經从不能选到有工业化的选矿厂，对各种氧化鉛鋅矿的浮选条件也已摸清[61]。

③在稀有金属矿方面，主要成就有：砂矿中钽铌的分选，研究了预先酸处理对各种含钽矿物（金红石、钽铁矿、钙钽矿）及锆英石、黄绿石、锡石等分选时的应用条件[62]。研究得知，在充氧矿浆中，可将金红石、钽铁矿、锆英石一齐浮出成混合精矿，然后在充氮条件下使含钽矿物受抑制，优先浮出锆英石精矿[63]。钽铌矿石如黄绿石的浮选，近年亦有很大进展[64][65][66][67]。目前有用油酸苏打法，长链胺加润湿剂法及8羟基奎琳法等。绿柱石及锂辉石的分选亦是有显著的成就。例如绿柱石，在苏联一般在碱性矿浆中用皂类捕收剂浮选，所得粗精矿用酸处理后，在酸性介质中用磺化石油再浮。在美国一般先用NaF及H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>脱泥，然后在PH=6—7条件下，加NaF、油酸或石油磺酸浮绿柱石。在印度，先脱泥，用HCl、HF处理，加BaCl<sub>2</sub>活化石英，以茜素红S作为绿柱石的抑制剂，加油酸和萘醇在PH>11时浮除石英，然后加油酸、萘醇，在PH=6时浮绿柱石。矽铈石的浮选是先脱泥，用HF及六偏磷酸钠作调整剂，以油酸及柴油混合物作捕收剂。从伟晶岩中综合回收绿柱石、锂辉石、钨锡矿、钽铌矿、长石、云母等。美国矿业局的伟晶岩选矿专题研究进行已近十年。一部分研究结果（锂辉石、绿柱石、长石、云母的浮选分离）已设厂生产。沥青铀矿，次生铀矿、铀矿的浮选，继续发表了一些研究结果[68]。对于这些放射性矿物，实验室证明用脂肪酸及加工石腊是可以浮选的。独居石粗精矿可以在强酸性介质中用胺盐浮选。

④在黑色金属矿方面，赤铁矿浮选在苏联、美国、我国、西德都已建有大规模浮选厂。研究方向是寻找有效易得的药剂及适合铁矿浮选特性的浮选机。近年来针对铁矿的可浮性作了许多研究[69]。研究了褐铁矿的浮选[70]。从含蛇纹石的矿石中浮选钨矿得到成功，先加NaF、油酸、柴油磨矿，然后用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>调节PH至5.0浮得钨铁矿。

⑤其他难选矿物如重晶石、方解石、白云石的分选[71]，用16至18个碳的烷基硫酸酯（0.25—0.3公斤/吨）可以有效地浮出重晶石，合适PH=10，水玻璃用量1.5—2公斤/吨。

由此可见，用浮选法选别难选矿物，近年来进展很大。今后尚会扩充到油页岩的分选，按岩相组成进行分选，按粒级浮选等。

(2) 微细矿泥的浮选。这是许多研究机关的主攻方向。如西德的Clausthal矿业学院选矿研究所，就连续研究了微细的褐铁矿、白钨矿、锡石、磷灰石矿泥的浮选行为。例如对于褐铁矿和石英的人工混合矿泥，用十二烷基肌氨酸（甲基甘氨酸）在电场下浮选，可得到很好的分选指标[72]。用可可脂肪酸钠肌氨酸（商品名Medialan KA，学名Na-Koko.fettsaure-Sarkoid）浮选黑钨矿泥和白钨矿泥也获得成功[73]。对于磷灰石矿泥，采用磷酸酯钠盐得到很好的结果[74]。

苏联的克拉辛（В.И.Классен）则对10—5μ的微粒的浮选，着重利用水中拆出的微泡或真空浮选法[75]。

在美国，对细泥的浮选1962年出现了“负载法”。选磷灰石细泥时，加入较粗粒的硫作为负载体，于是磷灰石细泥粘附于粗粒硫中上浮。经洗滌后硫可再用。在浮除高岭土中的锐钛矿时，用粗粒方解石作为负载体[76]。

由此看来，矿泥浮选已有了许多令人鼓舞的新的、有效的工艺方法出现。

(3) 浮选剂的进展。在黄药类而论，1962年用量最大的是乙基黄酸钠，其次是戊基黄酸钾，第三是乙基黄酸钾。而异丙基黄酸钠（美国氰胺公司343号）及二丁基黄酸钠（301号）有增长的趋势。烃基酸为脂肪酸目前趋向于应用石油剂产品及纸浆废液塔尔油。石油磺酸酯有增长的趋势。

选煤用浮选剂是研究的重点。已系统地探索了各种非极性浮选剂（如辛烷、己烷、苯、甲苯、二甲苯、萘烷等），烷醇（乙醇、戊醇、己醇、辛醇等）各种脂肪酸，各种醛和酮、醚类。以及各种药剂混合使用及氢离子浓度的影响。已得出下列有系统的结论[77]：①简单烃类化合物单独使用对煤没有多大捕收作用，但混入少量表面活性物后起浮选作用；②中等分子量的烷醇是最有希望的煤浮选剂，它不仅起捕收作用，还有起泡作用；③脂肪酸类有一定浮选作用，以己酸、辛酸较好。更长链的酸因溶解度低及易形成胶束，效果较差；④同质异构物的浮煤作用不同，如醛比酮的作用强；⑤醚类的作用与其结构及分子量有关，分子量大的效用也大；⑥芳族化合物的浮煤性质视极性基的性质、数目及排列位置而定；⑦浮煤时最好将极性化合物与非极性物混合使用，而以极性化合物起主导作用；⑧在各种煤及浮选剂的特定条件下，必须控制PH值才能得到最佳结果。

选铁矿用浮选剂是另一研究重点。首先是研究脂肪酸的作用，现在已知道[78]：①不饱和的比饱和的有效；②顺式的选择性比反式的好；③碘价小于110的可以在PH 6—7的范围内，使铁矿与石英很好分选；④氧化的铁矿会析出大量钙、钡离子，活化石英类脉石，而碘价大于110的脂肪酸是对被活化的石英类脉石很强的选择捕收剂，在PH=11时，可以反浮选（将石英类浮出）。其次是研究油酸的代用品，目前认为有实际意义的是[79]：①塔尔油；②硫酸化皂；③非硫化化合物（制造烷基磺酸钠的副产品）；④木材水蒸气蒸馏所得的重油；⑤氧化煤油及氧化石蜡；⑥烷基磺酸酯（石油中煤油部分的硫化产物 $C_{10-11}H_{20-21}SO_3Na$ ，以及油酸和胺基磺酸缩合后的钠皂Игпон等）。目前看来主要是细致的处理（如加乳化剂等）及混合使用这些代用品。第三是研究应用阴离子捕收剂如ИМ-11，АНП（Амионигро Парафин），Катапин А等。

新浮选剂近年来亦有很多发现，其中已有工业出品的，如适合选铁矿应用的一系列Aerosol表面活性剂（其中C-61，系十八烷基胺）；另一系列螯环类浮选剂（Sequestering Agent）[其中S-3135可能是 $(RO)_2P(S)Cl$ ]特别适用于硫化矿；Z-200号（是二硫代氨基酸的衍生物）适于铜铁、锌铁分选；在胺类方面提出混入磷酸酯、硫酸酯、Na-CMC（羧基甲基纤维素）等制成乳剂。以及高级醇类、杂醇油类NM-6—8等新起泡剂等[80]。

(4) 浮选机的改进。近年来浮选机的类型有了变化，除原有机械搅拌式浮选机外，深型气升式浮选附加充气器在选煤厂得到重视，其次是用旋流器进行浮选。另外，出现了喷气管道式新型浮选机[17]。

各种浮选机的合理使用及强化，也是研究的重点。在苏联，近年来组织了Механобр型浮选机，Сихани浮选机，Уралмеханобр型浮选机的对比试验。证明用Сихани的快速浮选制度，可使浮选机生产率增加45%，回收率提高1.5%，浮选剂消耗量可减少10—

15%〔81〕。目前浮选机的充气量及给矿量都大大增加，并研究清楚，各种矿石适用的浮选机不同。例如煤的浮选机应加大充气量；而铁矿的浮选机充气量不能过大；铜矿浮选机应搅拌强烈，而铅锌矿应和缓；某些非金属矿适用气升式等。对于同一厂内，不同粒级采用不同型式的浮选机会大大提高指标，例如美国 Hanna 煤选矿厂，近年来技术上最大的改进，就是将煤泥分为三级，—180目，180—48目，48—14目，分别用 Fagergren（回转子）式，Fahrenwald（叶轮）式及水力旋流器分别浮选，成效极其显著〔82〕。

浮选机的另一改进是普遍采用包以橡胶的部件，来增加浮选机的使用期限。

（5）浮选理论研究。由于浮选法在工业上的广泛应用，一直吸引着物理化学家的重视，目前已形成应用物理化学的一分枝——浮选表面化学。目前动向是：①吸附、润湿性与可浮性关系的研究〔83〕。如日本佐佐木恆孝、和田正美等导出各种接触角与表面吸附的关系式；②表面电性与可浮性关系的研究〔84〕。近年来对赤铁矿、钛铁矿、氧化铅矿、方解石、石英、白钨矿、钨矿、刚玉等矿物的动电位的测定已表明，当矿物表面荷负电、阳离子捕收剂较有效；而荷正电时，阴离子捕收剂较有效，逐步能够利用 PH 及金属活性离子，调节界面双电层结构，从而控制可浮性。③药剂与矿物的作用机理一直是浮选理论研究重点，目前主要是利用各种先进的物理化学研究方法来进行研究药剂的吸附量、物理化学常数、混合用药、药剂吸附层的稳定及解吸等〔85〕。④矿粒向气泡固着的行为，目前着重在表面双电层及离子泳动扩散的研究，对矿粒向气泡粘附时表面力及能的计算〔86〕。⑤矿物结构与可浮性的关系。目前主要研究矿物结构及表面污染与浮选剂结构及化学组成的对应关系，解理面、断裂面、晶格能、溶解热等与可浮性的关系〔87〕。⑥浮选过程的动力学，目前着重研究整个浮选过程的动力学方程式以及强化浮选过程的各项工艺因素〔88〕。

## 1.5 磁选、电选成就

磁选的成就，主要表现在：①各种高效的磁选机，特别是强磁选机；②磁选流程的改进；③磁选理论研究等三方面。

（1）各种高效的磁选机。弱磁场（选强磁性矿物，如磁铁矿等）磁选机的进步，主要是制成永磁场的及利用离心力的磁选机。例如 Sala—Mortsell 式离心带式磁选机，适合于粗粒时干选及细粒（20 $\mu$ 左右）的湿选〔89〕。目前由各种钕铁氧陶瓷物制成的永磁性物料制成的磁选机，已日趋普遍。

强磁场磁选机（选弱磁性矿物）是近年来研究的重点，现在国际上已有许多型式〔90〕：

①横带式（Kreuzbandscheider），目前有 Dings 式的上磁辊、下平极、交叉磁辊的单分选区、及 6 分选区的两种；Humboldt 式是下部磁辊、交叉磁辊的单分选区及 3 分选区两种；Stearns 式上、下部磁辊，下部磁辊带有可倾斜的平极一种，还有 Sime 式上部磁辊、下平极一种。目前出品的这种磁选机的磁场强度一般为 16,000 奥斯特，其中特强磁场的约 25,000 奥斯特。适于处理小于 5 毫米的矿粒。皮带宽度为 100 毫米时的生产率，

从不含铁的锡石中选出钛铁矿、铌钽铁矿，约200公斤/小时；从金红石、锆英石、石英中分选出磁铁矿、钛铁矿、石榴石、独居石，约200公斤/小时，从锡石中选出黑钨矿约250公斤/小时。这种磁选机的优点是便于管理调节，缺点是皮带易破损。

②**輪帶式** (Ringhandscheider) (又称盘式)。目前有苏联列宁格勒单輪及三輪式两种，Krupp单輪及三輪式两种，Rapid三輪式一种，Sime三輪半帶式及三輪阶段皮帶式两种，Wedag单輪及三輪式两种。磁場強度約18,000奧斯特。其优点是不用交叉皮帶，产品截取方便；缺点是皮帶与輪的相对轉速不易调节。

③**輪槽式** (Ringschurrenscheider)。这是将上式的运矿皮帶改为振動溜槽，目前主要是Wedag式。磁場強度約18,000奧斯特。生产率、每小时每100毫米槽寬而論为：从錫石中选黑钨矿200公斤；从金紅石中选钛铁矿250公斤。优点是沒有皮帶破損問題；缺点是槽子的适当振動数及空間間隔需要调节。

④**輪式** (Kingscheider)。这是以一个大轉輪进行选别的，有Krupp出品六个分选区的，和Sime出品十个分选区的。磁場強度为12,000至18,000奧斯特。优点是占地面积小，易调节，可以湿选；缺点是不易观看到分选过程。

⑤**腔式** (Hertscheider)。这是用一腔式磁鉄，其边缘向外傾，形成一截头圓錐式的壳，刻成齿状；在腔的上面圍繞一些半极。矿浆注入磁极与腔面之間的空隙处，于是磁性物粘在齿上，随齿的轉动流向精矿槽，非磁性物立刻流走。这种磁选机主要为Humboldt出品的8磁极式。磁場強度在2.7米工作寬度时，約14,000奧斯特。优点是占地面积很小，适合于細粒弱磁性矿物的湿选；缺点是构造复杂，生产率较小（从冰晶石中选鏡鉄矿，生产率75公斤/小时）。

⑥**輓式** (Walzscheider)。分选是在轉輓与磁极間隙中进行，有上部給矿檢取式及下部給矿拋棄式。目前出品有Humboldt两工作面兩段分选式，Krupp三段分选式，Dings、Rapid、Stearns、Exolon等帶頂先轉輓的兩段分选机。磁場強度为14,000至21,000奧斯特。优点是生产率大，易调节，适应范圍寬；缺点是轉輓易破損，构造复杂。

⑦**鼓式强磁选机** (Starkfeld-Trommelscheider)。这是一磁性鼓輪，鼓輪上刻槽分区。吸取磁性物，非磁性物自行流走。目前出品有Humboldt 5槽式及Wedag 8槽式以及捷克式。磁場強度5,000至12,000奧斯特。优点是适合于处理粗粒（至160毫米左右）分选过程可目睹，结构簡單，生产率大；缺点是不适于細粒。

由上可見，目前强磁場磁选机已有許多式样，各有其优缺点，可根据具体情况选用。例如粗粒干矿，可用鼓式、輪式、輓式；細粒 (< 5毫米) 干矿，可用橫帶式、輪帶式、輪槽式、輪式、輓式；粗粒湿矿，可用鼓式、輓式；細粒湿矿可用腔式、輪式、輓式。

(2) **磁选流程的改进**。近年来鉄矿磁选流程，是先經吹落磨機自磨。产物通过旋風分級器分級。粗粒进入离心式磁选机干选。直接得出便于冶煉的粗粒精矿及廢棄尾矿，中矿返回再磨。而細粒則先經一次干式离心磁选机，分出廢棄尾矿及低品位精矿。再送入普通（帶式或鼓式）湿式磁选机得出湿的細粒精矿及尾矿。

(3) **磁选理論研究**。主要研究对象是：①作用于各种形式矿粒的磁力；②矿物磁

性测定及其成分关系；③各种磁选机磁场的研究；④磁选动力学（包括水介质中矿粒在磁场作用下的动力学）等[91][92]。

在静电选矿方面，主要的进展是研究电选机的各项工艺因素。例如对于辊式电选机，研究了给矿粒度及比重等工艺因素。认为主要关键是非导体矿粒对辊子的针效应（Pining Effect），被抛开的粒子的轨迹则受比重及粒度的影响。对于板式电选机，主要关键是粒子电荷大小及正负号，对于这种电选机，细粒比粗粒更易被吸附[93]。另一方面，是研究矿物表面处理对电选的影响[94]。目前电选在稀有金属选矿中有推广应用的趋势。

## 2. 新选矿法的展望

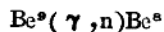
从近年来选矿发展的趋势，可以对六十年代正在形成的或可能兴起的新选矿法作一展望。

### 2.1 放射能选矿法

放射能选矿法是1946年左右开始研究[95]，1955年左右初步工业试验[96]，近年来才大规模推广的一种新的选矿法，大致可分为三类：①利用天然放射能的选矿法；②利用 $\gamma$ 射线照射引起放出中子的反应( $\gamma, n$ )的选矿法；③利用中子打击放出 $\gamma$ 射线( $n, \gamma$ )的选矿法。

(1) 利用天然放射能选矿法。此法用于具有天然放射能的铀矿等的拣选。一种是装置在矿井口卸矿处，根据矿车中含放射性矿物的多少，使探测计数器带动机械装置，使矿车倾倒在品位不同的原矿仓中，从而能按矿车按品位分开。另一种是皮带式拣选机；矿石逐块（适于 $>5$ 毫米窄粒级）给入皮带，在皮带运输途中有盖革计数器，按照计数器所接受的放射能强弱，带动一压缩空气喷嘴，可以将合格精矿吹向一定的矿斗中，这样有可能丢弃大量脉石。例如加拿大用来拣选38.1厘米的铀矿，可以丢弃70—75%脉石，含0.01—0.02%  $U_3O_8$ 。所得精矿品位为0.15—0.22%  $U_3O_8$ ，回收率为75—80%。

(2) 利用 $\gamma$ 射线照射引起放出中子的反应的选矿法[97]。曾实际研究用于绿柱石的拣选，即利用下述反应



以1.63—2.2mev强度的 $\gamma$ 射线照射，可使Be核放出中子。用 $BF_3$ 气体检测管测知，经过电子仪器放大转换，带动机械装置，进行拣选，所用拣选装置亦是皮带运输机式的。

(3) 利用慢中子照射矿物使其放出 $\gamma$ 射线的反应的选矿法。这种方法比上述的适用范围宽。经过测定一些常见矿物的 $\gamma$ 发射强弱如表1所示。所放出的 $\gamma$ 射线可用闪烁计数器测知，然后通过电子仪表放大，带动机械装置，进行拣选。

近年来在西德还研究得知，各种硫化矿受中子照射后其可浮性会发生显著的变化。

放射性矿物的选矿(又名电子拣选)目前在苏联、美国、法国、南非各铀矿山及选矿厂已普遍采用。可以预期,随着原子反应堆的发展,利用( $n, \gamma$ )反应的选矿法在六十年代将普遍发展起来选许多种矿物(如表1)[98]。

矿物按放射性分类

表1

$\gamma$ 发射强的	$\gamma$ 发射中等	$\gamma$ 发射弱的
Al 石榴石	Cl 岩盐	Zn 菱锌矿、閃鋅矿
长石	W 钨铁矿	紅鋅矿
鋁矾土	Sn 錫石	Sb 輝銻矿
綠泥石	As 毒砂	Mg 菱鉄矿
Mn 硬錳矿		Ba 重晶石
蔷薇輝石		Ni 矽鎳矿
黑錳矿		Cr 鉻鉄矿
菱錳矿		S 磁黄鉄矿
軟錳矿		方鉛矿
V 钒鈾矿		黄鉄矿
Ag 深紅銀矿		O 石英
淡紅銀矿		白鉛矿
Cu 硅孔雀石		菱鉄矿
輝銅矿		赤鉄矿
石膏		磁鉄矿
黄銅矿		
孔雀石		
斑銅矿		
斜方銅矿		
黄錫矿		
硫砷銅矿		
Ca 磷块岩		
螢石		
方解石		
鈣长石		
白云石		
白錳矿		
石膏		
Hg 辰砂		
Co 砷钴矿		



## 2.2 离子浮选法

这是向溶液中加入表面活性剂，并通入气泡，使溶液中的离子向气泡聚集刮出的方法。原理上虽然与日常生活用肥皂产生泡沫洗去衣服中的脏物相似。但工业上是1956年左右，因为原子能工厂的水溶液中需要分出放射性物离子，才开始研究成功的，于1959年公开发表[99]。

向溶液中加入的表面活性剂，一般与溶液中所需选出的无机（常为金属）离子，具有相反的电荷。于是两者形成络合盐类，具有疏水性，聚集到气泡界面，而上浮刮出。

初步已知可能用离子浮选法富集的离子及采用的相应的表面活性剂如表2。

离子浮选的被浮离子及相应表面活性剂

表2

被 浮 离 子	相应表面活性剂
铜、铜铵 钴、钴铵 镍、镍铵 铝、锌、镁、钙、钼、铈、钒、铀	十二酸钠 棕榈酸钠 硫酸化脂肪酸 $\alpha$ -硫烷基酸(Sulphoalkyl acid)
铁氟 钴氟、氯化铂 氟铁酰(Fluoferylate), 铀酰硫酸 铬酸盐、钒酸盐、钼酸盐、银氟、硅酸盐	2-十二基2甲基氯化铵 十二基氯化吡啶 十二基氯化胺

此法目前在原子能工业中开始应用，其优点是富集比很大，可以处理离子浓度极稀的溶液。这方面的研究很多，主要是在找寻合适的表面活性剂，并考虑如何回收这类表面活性剂再用的问题。据报导已研究出从人造丝工厂废液中提回收铜，从铀浸出液中提铀；甚至研究从海水中提取金属。

由于这方法利用泡沫上浮，因而称为浮选法。它与浮选矿物的情况不同，在于离子浮选法中只有液气两相，离子是处于溶液中，而浮选矿物是液气固三相。在有些化工杂志中，称此法为泡沫部分分离法(Foam fractionation)也有一定的根据。

看来此法的最近发展，是在处理极贫的氧化铜、镍、钴、金、铈、锌、铝等矿石的水冶过程中，作为从极稀的废液中初步浓缩富集金属之用。也可以用来处理选矿厂、冶炼厂、原子能工厂的废水，来回收各种药剂或金属离子。

## 2.3 热粘选矿法

这是1960年左右发表的新选矿法，首先是用于岩盐的干式分选[3]。其原理是根据