

鈾礦的選礦問題

汪淑慧 王瑞德

本文敘述了鈾礦的幾種主要的選礦方法。比較系統地介紹了放射性選礦，敘述了礦山檢查站及各種機械放射性選礦的方法，並涉及一些細節，如選礦前礦石的準備、篩分、取塊樣、放射顯明度的測定等等。對放射性選礦的設備、儀器做了概述，也介紹了一些放射性分選的指標。

由於鈾礦的浮選有了比較多的公開資料，所以我們只對幾種常見鈾礦物（瀝青鈾礦、鈣鈾雲母）的選礦及在工業上效果較好的斜磷鉛鈾礦的浮選進行了介紹。

在本文中我們試圖從鈾的地球化學觀點敘述鈾與幾種其他伴生有用元素的分離方法，並對鈾礦的重選等其他選礦方法進行了簡單的介紹。

引 言

在前幾年鈾礦的選礦問題沒有被重視，幾乎所有的礦山都將鈾礦石直接送去水冶，這是因為各國富礦資源在開始時是比較多的。但是幾年以來高品位的鈾礦儲量已大大地耗竭（如剛果的申戈洛布維、加拿大的錳錠港、美國的科羅拉多州高原），新的富鈾礦床的普查又沒得到良好的結果。因此現在各國開采的鈾礦資源很少有品位高於 0.30%^[4] 的，由於鈾礦品位的逐漸減低，而品位低的礦直接水冶是不經濟的。因為利用水冶要消耗化學藥品，而這些藥品不僅要和有用礦物作用，而且還要和無用礦物作用，從而決定了試劑的大量消耗。所以許多國家都認為如果 U_3O_8 的品位低於 0.1%，直接水冶是不經濟的^[1]。

最近幾年來各國鈾礦工作者開始重視鈾礦的機械選礦問題，美國及其他資本主義國家都有很多科學家投入到鈾礦選礦研究工作，蘇聯及兄弟國家亦在進行研究。目前雖然只有鈾礦的放射性分選實際應用範圍較大，其他方法在工業上還較少應用，但各國對選礦的研究不但沒有停止，相反地研究規模是愈來愈大。

鈾礦的機械選礦主要用於低品位或平衡表外礦，提高其品位，使其達到工業上有經濟價值的礦，或用於除去某些對水冶、離子交換、萃取有害的物質，或用選礦方法綜合回收鈾礦中其他有用成分。此外因為利用機械選礦還可以使某些直接用化學浸出不經濟的礦石成為有開采價值的，所有這些都使鈾礦的資源擴大了。

鈾礦的選礦方法有下列幾種：

1. **手選** 利用礦石顏色差別或利用放射性強度不同（由輻射計試探）挑選出富礦塊或除去大塊廢石，或利用某些鈾礦在紫外線照射下發螢光的性質來進行手工挑選。
2. **放射性選礦** 利用礦塊中放射性強度的不同進行選礦，以達到廢棄脈石的目的。
3. **重力選礦** 利用某些比重不同的原生鈾礦物（如晶質鈾礦等）進行重選。
4. **重懸浮液選礦** 亦是利用比重的不同分出原生鈾礦物。
5. **浮選** 利用鈾礦與其他礦物表面物理、化學性質的不同，將鈾礦物選入浮選泡沫，廢棄尾礦。或將其他礦物（如硫化物、方解石等）浮出，而使鈾礦留在浮選尾礦中。
6. **選擇性磨礦** 利用某些鈾礦物的易碎性及容易成礦泥的特點而將其與粗粒度的脈石用篩子、分級機或水力旋流器分開。
7. **靜電選礦** 利用鈾礦物與其他礦物的導電性的不同而進行分離。
8. **磁礦** 利用磁性來分離 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 。此法適用於含有 25—30% 氧化鐵的含鈾礦。

石,而不是直接选取铀矿物。

据了解在某些国家还进行着新的铀矿选矿法的研究。

所有的铀矿选矿方法,都是水冶前的一个辅助过程。这些方法在不同的国家都有或多或少的应用。其中实际意义最大的是放射性选矿,次之为重选、浮选。

铀矿的放射性选矿

一般情况

矿石的放射性分选是在1943年出现的。1944年一月,在美国创制了第一台运输带式的带有辐射仪和选取机械的分选机——推杆分选机。苏联是在1946—1947年开始研究的。但近几年来美国并没有大力研究放射性分选,苏联则是大大的前进了一步。

放射性分选是一种最新的最经济的选矿方法,它很简单,不需要破碎及磨矿作业,且不消耗化学药品。对铀矿的选矿来说,目前它是最主要的选矿方法,且已广泛的应用于工业上。

放射性分选过程的原理是基于个别矿块(或矿份)中放射性强度的不同。把矿块(或矿份)机械地分离成具有不同含铀量的几种产品,而各种矿块中铀的含量的测定,一般要在矿石放射性平衡的情况下进行(在平衡破坏不十分严重时也是可以的)。铀的含量是利用铀的衰变产物的总放射性,主要是镭和氡的放射性来决定。射线中穿透力最强的是 γ 射线,根据 γ 射线可以判断镭和氡的含量,因而也就能知道矿石中铀的含量。

放射性检查站

放射性选矿应用范围很广,它既可以在矿山又可以在工厂使用。某些矿区铀的矿化很不均匀,但在开采时脉石和有用矿物容易混合(由于矿体和围岩的交界或夹层所形成),为了使金属不遭受损失和使脉石不混入矿石中,以及对废石的不必要的运输,往往设立放射性检查站。这种检查站可设在地下(无矿体的坑道中)或地面上,设在地下的优点是可以免去把非工业矿石提升到地面,缺点是在坑道内地方狭小,工作不方便,很难自动化。

在矿山,放射性检查站一般都是测大容器内的矿石,如在矿车、汽车、或固定圆筒容器中的。其目的除了废弃一部分尾矿外,还可以从非工业矿石里分选出工业矿石,从贫矿石里分选出富矿石,并且可以记录出采掘出的各种品位的矿车数量,以便于计算金属平衡。为此目的,法国应用一种固定的圆筒形容器,吊车将矿石自动送入圆筒中。圆筒为盖革计数管所环绕,并与弹簧秤相联,可同时测定矿石的含量及重量。圆筒下设一溜槽,当测量结束后(30秒)仪表可自动调此溜槽到与品位相适应的位置,自动打开圆筒底部活板门,矿石经溜槽进入与其品位相适应的矿仓中。重量和品位也由控制仪表自动记录^[1]。

另外还有测矿车或汽车中铀品位的放射性检查站,虽所用的仪表、型号和性能有几种,但基本原理是一样的。探测器(盖革计数管)放在固定的位置(如特制的通路旁的两侧墙壁上),矿车或汽车开进(此通路)后进行测量(15~25秒),并记录。然后,仪表操纵执行机械,将道叉放置一定位置,则矿车可自动走向与其品位相适应的方面。应用这种检查站可获得三、四种产品,如富矿、贫矿、平衡表外矿及废石,所得产品可分别进行处理。

由于矿车内矿块重量较大,辐射计不能确保分选结果。为了避免在废石中夹杂着高品位的矿块,有时废石通过一皮带型放射性分选机,以回收其损失。

矿石的块选、份选、流水选及其流程的确定

为了准确的进行选矿,在放射性分选厂内不是采用大容积选矿,而是应用块选、份选(堆

选)或流水选。在块选和份选时每个矿块或矿堆分别经过分选机;在流水选矿时,矿石不成分或块而連續流水式地经过分选机。这三种方法都有实际意义。流水选的优点是处理量大,矿石的准备简单(不用进行筛分或只要分成二三个级别),但这种方法只在矿石放射性显明度非常好的情况下才能采用(如在热液矿床矿体和脉石有明显的分界),否则达不到分离的目的。块选或份选对显明度较高或较低的矿石都行;对显明度较低的矿石采用块选其结果最好,但其处理量是比较低的。

由于放射性分选是按鈾含量(由其衰变产物的 γ 射线判定)来分离富矿、贫矿和脉石的,这就首先向人们提出了进行放射性测量的矿石的粒度问题。在这里看来上限是不存在的,最大的矿块可以用手提式的辐射仪进行检查,用手选的方法分离(有的用抓斗式机器将大块矿石放到固定地点测量后,操作員按其品位放到其相应的矿堆内)。但是从设备方面来看,建立大块矿石分选的連續过程是相当困难的,因为大矿石运输不方便,所以现在进行的放射性分选矿块粒度不超过250毫米或300毫米。至于谈到下限问题就要复杂些了。对可选的矿石(即矿化不均匀的)粒度减小,矿块含鈾量之间的差别可以加大(小粒度矿石显明度增高),所以放射性分辨的能力也增大。但若进行块选时其处理量显著降低,并当粒度减小时其含鈾数量也降低,使目前用的探测器很难探测,所以目前在工业上应用的下限为30(或20)毫米。

既然进行块选时按矿块中的鈾金属含量的多少来分选,所以保证分选时矿块重量相近的问题很重要。在工业上将矿石按重量分组是有困难的,将原矿筛分成很多级别还比较理想,但这样会使流程复杂。不过要进行筛分是许多国家所公认的。筛比取多少在各国各地都不相同,而筛比的决定也与显明度的强弱有关。显明度很强的矿石,筛比就可以取大一些。苏联在这方面进行了大量的研究工作,确定在一般情况下在块选时筛比变化在1.6—1.3之间比较合适。

一个矿区的矿石是否能进行放射性分选的先决条件是各块矿石(或各份矿)之间鈾分布的不均匀程度。研究矿石在数量上鈾矿的不均匀程度(显明度)是很重要的问题,否则很难解决选矿的工艺。显然,矿块间含量差别越大(即显明度越强),则矿石放射性分选的可选性也就越大,若各个矿块中品位相同,就没有进行放射性分选的可能。

为了研究矿石放射性的可选性,应从筛分后的各级别中取出一定数量的有代表性的矿块来进行每块矿石的测定,以决定鈾分布的均匀情况。但在每级别取多少块才有代表性,现在还没有统一的想法。理论上当然是块数愈多愈准确,但这样工作量太大。矿块数的决定是与鈾分布的均匀程度有关的,若均匀则可少取些,另外也与采取的或然率有关。在苏联不少的科学家进行过研究工作,结果认为每个级别矿块数应不少于600块。应用的初步结果是矿块数可以减少而不影响指标。

对于矿块内含鈾量的测定,常用的有两种方法。一种是粉末测量法,就是把单个矿块磨细后,取样用 β 法测定其中金属含量(采用一套不同鈾含量的粉末标准源,以便比较);另一种是直接对矿块进行放射性测量(大部分是 γ 法)。然后与用一组不同重量的标准源所得的曲线进行比较,可直接求出品位。经常认为第二种方法是较好的,它不仅简单并且工艺条件与工业选矿条件相近;另外有些矿石表面为矿泥所遮盖,而矿泥品位又较高时,就可以考虑在选矿工艺流程中采用预先洗矿,以便减少鈾的损失,增加尾矿出量。而洗矿作业是否需要也应测定比较后才能决定。若采用粉末测量法,就较难看出矿泥的影响。

根据矿块测定结果作表,并绘制显明度(可选性)曲线。由可选性曲线很容易得出矿石可选性的好坏,若给出一个尾矿品位指标(如0.01, 0.015%)则可以在曲线上得出其他指标(尾矿出量及其中鈾的损失,精矿出率及其品位、回收率)。

由显明度测定结果所得的指标是理论值,实际放射分选机效率不是100%,故与指标会有一些出入。分选效率的高低与很多因素有关,如分选机型号、矿石显明度好坏、流程的复杂程度等,故变动范围很大,最好的可达90%以上。为了保证分选效果良好,选矿前仪器的调整很重要,仪器调整值的决定,是由矿石显明度测量的结果确定。具体方法是以标准源通过实验的方法来调整,也可以从理论上计算。有关这个问题,苏联科学家柯夫达已在理论上进行了探讨^[11]。

放射性分选工艺流程的选定是由矿石特性、放射性显明度、矿床储量大小来决定。由于矿石粒度不同亦有所差异。一般粗级别流程简单,对显明度较好的矿块一次作业即可得到废弃尾矿。而细级别则需多次作业,故细级别的选矿是比较困难的。由于细级别的块选处理量低及每个矿块的金属量少,故经常采用份选。在采用份选作业时应考虑几种不同品位矿块组合的或然率情况,采用份选则一次作业很难达到要求指标。

设备和仪器

放射性分选可以在不同的分选机上进行。各种分选机很不相同,但都是由三个基本部分组成:1.给矿设备,2.带辐射计的探测器,3.保证物料(矿石)移动及执行分选矿石的机械。

给矿机设备有时不被重视,但是对于放射性分选(尤其是块选)它起着很重要的作用。因为给矿的均匀与否,直接影响产品质量,故在块选时经常需要专门的给矿机。有震动给矿机、摇动给矿机、旋转圆筒式及盘式给矿机等。

探测器是充气计数管或闪烁计数管。前者对 γ 射线探测效率不超过1—2%,灵敏度低,所以它对品位低的矿块或细级别的块矿都不适用。闪烁计数器是利用碘化钠或有机晶体将 γ 射线变成发光脉冲后,经光电倍增管下来而记录下来,它对 γ 射线的探测效率比充气计数管高几十倍,但也不是十分理想的。

辐射仪的工作原理是基于测量计数率或者测量积累脉冲。在某些电子线路内有还原线路,使在测量下一矿块前使电容器短路,以消除因前一块矿石及本底辐射所累积的电荷,这样可以减少本底的不良影响。

在各种结构内,测量矿块(矿份)放射性的时间由零点几秒至若干秒,增长测量时间可以减少由波动所造成的无规律性,以及增加贫矿选入中矿的可能性,以提高分选效率。在几种分选机中都有变换运输带速度的装置。法国并且得出运输带速度与矿块中临界品位之间的数学公式^[10]。但是运输带速度减慢使处理量减低,这是一个很大的缺点,对这个问题有些国家正在进行研究,寻找解决办法。

运输机械常用的是皮带运输机,也有用运输斗的,皮带有的一层,有的两层,探测器一般放在运输带下面,但也有放在运输带上一一定距离处或皮带的两侧或皮带运输机的鼓内。在不同的选矿机中有的放一个探测器(一组计数管),有的两个或三个,这样相应的可以得到两种,三种或四种产品(精矿,中矿1,中矿2,尾矿)。

执行分选矿石的机械也各有不同。有的应用挡板,由于其位置的改变可得到精矿或尾矿;有的应用推杆将精矿从运输带上推入精矿槽;有的应用可开底的斗将精矿排出;也有的用压缩空气将产品吹入相应的产品槽中。西方国家常采用后者,如法国利用压缩空气,将在皮带运输机上的矿块依其品位不同,将富矿块(短时间就可以达到电容器的充电门限)吹入第一槽,中矿块吹入第二槽,尾矿块不受影响而继续进行,直到排入尾矿槽中^[14]。在加拿大培果洛夫(Bicroft)铀矿公司的分选机很有趣,虽然分选机构也是使用压缩空气,但不是将运输带上的矿块吹出去,而是当矿块自由落下时进行分选。当矿块掉到有空气喷出器的地方,若是尾矿块则被空气有力的打击到废矿仓,精矿块却不受影响,而直接掉入矿仓^[17]。

由于选矿机的不同及粒度不同,处理量也就不同。处理 100 毫米以上粒度矿石,每小时处理量一般在 5 吨以上,而 20—30 毫米的产品处理量每小时仅 100 公斤左右(这是法国“黑森林”(Bois. Noirs) 矿山资料)而加拿大培果洛夫铀矿公司采用在自由落下时进行选矿,当粒度为 3 吋时处理量可达 20—25 吨/时。

目前常用的放射性分选机有两种型式,一是皮带式的;另一是链斗式的。分选不同品位的控制机构也可以分为二种:一种是马达挡板式的;另一种是电磁活门式的(可开底的斗)。其所用辐射仪也不相同,皮带式分选机的辐射仪是计数率式的;链斗式的分选机的辐射仪是累积式的。前者主要缺点是灵敏性差,由于计数率式的辐射仪在短时间内的脉冲突增,就会导致控制量达到给定值而使继电器工作。我们知道计数时间愈长误差愈小,而这种皮带式分选机的辐射仪不能增长计数时间,除非用增加时间常数的办法,而这又会导致放电慢,以致当第二个矿块到时电容器还未恢复原来位置。若拉长两个矿块之间的距离,又会使生产率降低。这是这类型仪器的矛盾;另外挡板延迟时间的开始点是由矿块的含量高低来决定的,含量高控制继电器工作早,延迟开始也早。假使延迟时间按高含量矿块调整后,低含量的精矿使挡板启动就会有多余的等待时间,这个等待时间对下一矿块的正确掉落有很大的影响。链斗式分选机虽然无以上缺点,但它结构复杂且非常笨重,携带很不方便,虽灵敏度较高(200 毫克)也还不合理想。两种机械(及仪器)的共同缺点是灵敏度调高时有假动作。

如何使累积式线路用在皮带运输机上,如何使控制挡板的继电器延迟选择在矿块刚出计数区时才开始(不管品位的高低),以及消灭假动作,提高灵敏度,并且能比现用的皮带运输机式更轻便和易于带到矿山去做试验,又能适用于 300 到 25 毫米不同粒度范围的矿石,都是需要研究解决的问题。

放射性分选的指标

由于选矿方法、所用机器、辐射仪、矿石性质及流程复杂程度的不同,所得的指标也有很大差别。举两个例子:

1. 加拿大彼维尔洛日德采用流水式选矿,探测器用碘化钠晶体的闪烁计数器。采用“拉普意达”运送带,其原矿品位为 0.046—0.08% U_3O_8 , 其—305+38 毫米级别的产品在运送带上进行选矿。精矿与—38 毫米混合做为成品,其指标如下:尾矿出率 70—75%, 品位为 0.01—0.02% U_3O_8 ; 成品出率为 25—30%, 品位为 0.15—0.22% U_3O_8 ; 回收率为 75—80%^[8]。

2. 法国“黑森林”矿山采用块选,将矿石筛分成 6 个级别:—120+80, —80+50, —50+40, —40+30, —30+20, —20+0 毫米。除—20+0 毫米级别外,各级别分别送到皮带型选矿机进行选矿,探测器用闪烁计数管。各级别品位变化在 0.071—0.116% U, 所得尾矿品位 0.005—0.025% U。各级别出率为 38.2—65.9%, 回收率为 79.25—97.2% (尾矿品位最高及回收率最低的是—30+20 毫米级别的结果)。

放射性分选指标的好坏是根据废弃尾矿的出量多少及其中金属损失量来决定的,例如尾矿出率大于 70% 其中金属损失又很少,则为很容易进行放射性分选的矿石(放射性显明度强的矿石),一般尾矿出量少于 5% 称为无显明度矿石。至于尾矿出量多少,其中铀损失在什么范围之内才能建立放射性分选厂的问题需依具体条件来决定,如矿山储量的大小、流程的复杂程度、化学处理的价格等等。所以笼统的谈尾矿出率在多少以上就可以建放射性分选厂是不正确的。

考虑放射性分选尾矿的品位总是以水冶浸出渣来比较也不很恰当。固然这样可以使回收率大,但有时并不能使所得铀盐成本最低。因为在有些情况下,为了使放射性分选产品回收率

增加1-1.5%，就需将其出率增加10-15%，增加矿量就需增加水冶设备、化学药剂、蒸汽、电能等等。这样，最后所得铀盐的成本并不低，所以应该找出最合理的选矿出量，以便使铀盐的成本降到最低。

有关这个问题，苏联、法国都有报导。苏联科学家马利采夫进行了详细的研究，按照铀盐成本、勘探、开采、放射性选矿、水冶成本、原矿品位、放射性选矿回收率、出量及水冶回收率之间的关系，找出了铀盐成本与放射性分选出率之间的数学关系式^[10]。由其所列举的例子中可以看出铀盐成本与放射性分选出率之间的关系曲线中有一最低值，即可以看出有一适应于最低成本的放射性分选成品的出率。可以参考这种方法调整放射性分选仪器，并对所得结果进行估价。

放射性分选的发展前途

应该强调放射性分选是最新的选矿方法之一，是很有前途的。虽然不同国家的科学家在理论上进行了研究，在显明度测定、辐射仪调整、运输带速度与品位关系及决定最合适的精矿出量方法等方面做出了一定的贡献，但工作做的还是不够的，需要进一步研究。我们继续努力的方向是提高现有探测器、辐射仪的灵敏度；改善现有分选机，使其轻便、经济、安全、可靠；研究创制新的分选机，使能在工业上分选10毫米或更小的矿块，以扩大放射性分选的应用范围（因为一般矿石中50毫米以上的产品只占原矿的50-60%，若25毫米以上都可选，则可占70-75%，若使10毫米以上都可选，则原矿的80-90%就都可以选了）；并且还要解决在选细级别产品时增加处理量的问题。

铀矿的浮选

一般情况

铀矿的浮选是在最近10年~15年才开始研究的。不同国家先后发表了不少研究成果，研究最多的是铀的氧化物和人工混合物。在了解铀的浮选性质方面已经取得一定的成绩，但在工业上还很少应用，只有少数国家建立了铀矿的浮选工厂。如法国应用酒精乳化了油酸来浮选斜磷铅铀矿，澳大利亚用阴离子捕集剂（油酸、石油、树脂蒸馏物）来浮选铀钍铁矿^[6]。南非维特洛特斯兰得先在用氰化法提取金后的渣中，用黄药和黑药浮选钍铀碳氢矿及硫化物，然后再从浸出铀矿后的渣中浮选硫化物^[11]。

铀矿的浮选困难主要有以下几点：

1. 在大多数矿区，铀的矿物与其他脉石矿物紧密共生，甚至在粉碎到-200目时还不能达到单体分离的目的，而极高的粉碎度又会引起它与尾矿一起损失。有时铀还呈分散状态存在。
2. 铀的矿物繁多，一个矿区总有几种铀矿物，而其浮选性质都不一样。对不同矿物性质的研究工作也还不深入。
3. 没有发现选择性强的捕集剂。可以浮选铀矿物的捕集剂，对脉石（石英、长石）也都有捕集作用。

虽然目前用到生产上有一系列困难，但各国还在大力进行研究，以便扩大铀矿资源。

铀矿的浮选目的有下列几种：

1. 浮选铀矿物，丢弃尾矿，节省化学药剂及运输，提高贫铀矿品位。
2. 浮选含铀矿物，丢弃尾矿，如浮选磷酸盐，在提取磷的同时，可提取铀。
3. 除去有害杂质。如：硫化物、萤石、碳酸盐等。对这个问题的可能有两种情况，有时分离出的有害杂质对铀来说是可废弃的，但有时其中还含有铀，需分别处理。

4. 用浮选法还可以综合回收矿石中的其他有用金属。

由以上情况看来，放射性分选虽然简单、便宜，但后三种目的达不到。故铀的浮选是值得深入研究的。

铀矿的浮选

瀝青铀矿的浮选 瀝青铀矿的可浮性是比較差的，目前已經知道的大多数都是采用阳离子捕集剂来进行浮选，能得到較滿意的回收率，但选择性差，在浮选铀矿物的同时，石英、长石也浮起，从而降低了精矿品位。在这种情况下，用脂肪酸来作捕集剂，并在微碱溶液中浮选試驗，苏联科学家爱格列斯的試驗証明^[16]，要使瀝青铀矿吸附到气泡上，則至少需加 1.5 公斤/吨的油酸。而磨到与瀝青铀矿相同粒度的石英、长石、磁铁矿、螢石等，在低的油酸(20~400 克/吨)存在时就吸附到气泡上。因此，当瀝青铀矿上浮时，則与瀝青铀矿同粒度的石英、长石、磁铁矿、螢石也随之浮起，从而影响了精矿的质量。但如果是盐酸处理过的石英，即使加入 2 公斤/吨的油酸，也不能吸附。

表 1

矿物	油酸耗量,克/吨	矿物	油酸耗量,克/吨
瀝青铀矿	1500	赤铁矿	400
石英	200	螢石	20
长石	400	盐酸处理过的石英	在2000时不見吸附

这些資料表明，瀝青铀矿的浮选是个难题，这是因为瀝青铀矿的表面与脂肪酸相互作用不活泼之故。

当用脂肪酸浮选时，大多数脉石能被矿浆中的鈣、鎂、鉄和其他离子所活化。值得注意的是瀝青铀矿不被这些离子所活化，例如，在浮选前用酸处理过的和磨細后不加任何处理的瀝青铀矿，其选別結果基本一样。

为了改善瀝青铀矿的可浮性，苏联的爱格列斯找到了較为有效的調正剂——硫化鈉及砷酸鈉，并进行了試驗。試驗証明，先在 80℃ 时用油酸处理瀝青铀矿—石英混合物，然后加冷水稀释，冷却后，立即进行浮选(在軟水中)，在浮选前加入足量的硫化鈉，則瀝青铀矿的可浮性及选择性显著的提高。

对瀝青铀矿也可采用三分(按重量)油酸，三分重油和一分石油磺酸盐(磺化的石油产品)配成混合捕集剂，乳化于乳化剂中，并配成一定的浓度，进行浮选。为了能提高精矿质量，可加些木質磺酸鈉，但回收率会受到影响。

洛勒特和利意特对瀝青铀矿在长石中呈細脉状态的矿进行过研究，証明在酸性介质中进行試驗較好，所得到的数据如表 2:

表 2

产品	出率%	U ₃ O ₈	回收率%
原矿	100	0.1	100
矿泥	13.80 } 23.95 }	0.1 } 0.31 }	13.80 } 74.30 }
精矿	62.25	0.019	11.90
尾矿	100.00	0.1	100.00

异辛基磺酸盐对瀝青铀矿也有較好的浮选性能。

鈣鈾云母矿的浮选 一些国家在研究鈣鈾云母矿的浮选后指出, 脂肪酸及胺类是较为有效的捕集剂。在国外有的学者对各种脂肪酸也进行了试验, 证明饱和系的固体脂肪酸, 也是处理鈣鈾云母的一种捕集剂。这些捕集剂的性能随碳链长度的增加而改善。用碳原子为偶数的酸 [从含 10 个碳的酸(癸酸)至含 22 个碳的酸(22 烷酸)] 进行试验, 证明含 18 个碳的脂肪酸类效果好, 并且价廉^[9]。

为了改善含 18 个碳的脂肪酸的捕集性能, 可采用下列方法:

1. 提高矿浆温度; 2. 使矿浆中有碳化氢化合物存在, 因此, 当使用 18 碳脂肪酸时, 可先将其溶于碳化氢化合物中(例如: 煤油、汽油、柴油等), 制成乳状液。并认为效果最好的乳状液成分为一分 18 碳脂肪酸, 一分油酸, 1.2 分煤油和 100 分水(均按重量)。

在选矿浓度大的情况下, 先加氢氧化钠调整 pH 值, 使之达到 8.5—9, 再加入乳化液进行强化, 然后再加入硅酸钠, 此时, 鈣鈾云母能得到较好的浮选。采用硅酸钠时, 要注意硅酸钠对鈾矿也有抑制作用。

英国的布特列尔也曾采用结构式与黄药相似的药剂——二硫代氨基甲酸盐作为捕集剂^[3]。并在矿浆中加有硝酸铅, 根据某些理由可以认为这是比较好的。在浮选时其所以(当 pH = 6 时)要加入硝酸铅的道理是: 因鈣鈾云母矿在高浓度的溶液中善于和许多金属离子进行离子交换, 其中最大的钙离子交换比对铜离子来说为 10%, 对锌离子来说为 29%, 对铅离子来说为 45%, 对镉离子来说为 23%, 显然对铅的离子交换比为最大, 故加硝酸铅道理就在此。

有的资料报导用胺类作捕集剂, 对鈣鈾云母矿的浮选, 也有较好的捕集性能, 例如 18 碳胺 NM-11 等。

斜磷铅鈾矿的浮选

在法国斜磷铅鈾矿的浮选厂^[12], 其中斜磷铅鈾矿是分散在石英中的, 并含有一部分粘土质及一些方铅矿、闪锌矿等硫化物。

在试验室用油酸及硅酸钠所获得的结果证明, 是有助于选择性和回收率的, 但由于油酸的消耗量很大, 达 2500 克/吨, 因此不很经济。为了能减少油酸的使用量, 曾采用下列方法: 1. 延长药剂与矿物的接触时间; 2. 改变矿浆浓度; 3. 改变 pH 值; 4. 用燃料油作捕集剂, 等等。但均未获得成功。后来又采用价值低廉的药剂, 如: 石蜡酸、塔罗皂及各种胺来代替油酸, 但仍然很少得到象油酸一样的结果。

而把油酸乳化在酒精溶液中, 则获得了显著的改进, 其优点如下:

1. 油酸用量显著减少, 在实验室的条件下, 可从 2500 克/吨减少到 800 克/吨。2. 在泡沫中减少粘土质。3. 具有一定的耐寒性。

当 pH 值接近 7 时, 用油酸酒精乳化液进行浮选, 接触时间为 10 分钟, 浮选时间为 15 分钟, 在这种情况下, 回收率可达到 90~95%。

并且试验也证明了:

1. pH 值在 6~8 之间的变化, 对浮选影响不大; 2. 从试验结果看来, 工业油酸比纯油酸好。当获得好的结果后, 就运用于工业中, 代替了原来的重选厂。

在用油酸进行浮选时, 需注意下列影响因素:

1. 矿泥: 矿泥对浮选是有影响的, 加上油酸的选择性差, 严重地影响精矿质量, 从另一方面来说, 矿泥多则药剂消耗量也就大。因此, 在浮选前根据具体情况, 可考虑脱泥, 常用水力旋流器来完成这一过程。

2. 钙离子、镁离子、铁离子对脉石具有活化作用, 也能增加油酸的消耗量, 因此, 在试验时,

需做水质试验。

3. 矿浆温度: 因为油酸在温度低于 14°C 时会凝结在一起, 因此, 使用时应高于此温度。

用选矿法排除鈾矿中的有害物质及综合利用鈾矿石

鈾-硫化物 在用酸法浸出鈾矿石时, 一些硫化物在矿浆中起化学还原作用, 这就使鈾的提取不能令人满意。在碱法浸出时, 很多硫化物在相当大的程度上能溶于热苏打溶液中, 消耗碳酸鈉并生成可溶性硫酸盐和金属氢氧化物, 所以为了减少药剂消耗, 在某些情况下, 尤其是碱法浸出时除去硫化物是必需的。另外, 当硫化物品位很高时, 也应进行其综合回收。这里我们研究一下鈾与硫化物的分离问题。

对选矿工作者很重要的一点就是: 鈾-硫化物矿床中, 瀝青鈾矿与硫化物的相互关系。若硫化物中不含有鈾, 则它们的分离是比较简单的。我们知道, 鈾-硫化物类型的矿床一般皆为多次热液矿床, 由于不同矿床的硫化物和鈾(瀝青鈾矿)的生成先后次序不同, 所以它们之间的联系也就不一样。

如鈾矿物和硫化物不是紧密共生, 并且鈾矿浸染粒度又很大, 则可在浸出之前用重选方法分离粗粒的瀝青鈾矿, 以后再用浮选法分出硫化物(加拿大鑛錠工厂就采用这种流程)。

若鈾矿物与硫化物是細粒浸染而其粒度在可浮范围内, 则因为硫化物及鈾矿物表面的物理化学性质相差较大, 故可用浮选方法将其分离。如南非处理金鈾矿就是从酸法浸出后的矿渣中浮选黄铁矿, 以达到综合回收的目的。澳大利亚的拉姆鲁格尔的鈾铜矿也是从酸浸出渣中浮选铜矿物以综合回收其中的铜。

但对于含碳酸盐的鈾-硫化物矿, 回收硫化物就不能从碱法浸出渣中提取, 因为硫化物会增加碱的耗量。在某地的实际工作中, 也遇到过这样的例子。他们就采取首先浮选硫化物的方法, 这里产生的问题是有关鈾的损失及是否能得到对鈾来说是废弃的硫化物。从鈾矿的地球化学角度来看, 在鈾-硫化物类型矿床中的鈾矿物中不含硫化物的情况并不是经常的。当瀝青鈾矿先生成并干缩后, 形成裂纹, 而在这些裂纹中就可能充填硫化物。另外, 在鈾矿物和硫化物一次生成时, 鈾与硫化物紧密共生, 有时成非常細的脉(甚至 0.0001 毫米), 在这种情况下, 采用机械选矿要达到废弃硫化物是困难的。对某地试验中所遇到一个鈾-铜矿来说, 原矿的硫化物浮选就没有得到对鈾来说可废弃的产品。如硫化物精矿出量在 $\sim 3\%$ 时, 鈾在其中的损失就高达 8% 。有些时候, 含碳酸盐的鈾-硫化物矿, 若首先浸出硫化物后, 再分别浸出精矿和尾矿是有利的。但这要看具体情况来决定, 这里经济因素很重要。

虽然在多数情况下, 酸浸出对硫化物没有什么影响, 但对那些有影响的情况, 就应考虑将硫化物浮选出后, 再分别对两种产品进行浸出。在美国就有一个鈾矿厂经常应用这个方法处理含有大量的主要象硫化铜一样的硫化矿物。当然要决定是否采用这种流程, 尚需考虑经济因素。

碳酸盐矿床 对于碳酸盐鈾矿, 不存在综合回收的问题。只是需要除去其有害的影响。碳酸盐鈾矿, 依其中碳酸盐含量的不同, 分弱碳酸盐矿、普通碳酸盐矿及强碳酸盐矿。若这类矿石可以直接采用碱法浸出, 就不存在什么问题了。我们考虑的只是不能进行碱法浸出, 而需要分离碳酸盐的条件。在美国认为, 如果矿石含有 4% 以上的可溶于酸的碳酸盐, 就不能进行酸法浸出, 而应首先将碳酸盐浮选去。当然这个数字视各国情况而定, 如苏联就认为在 6% 以上才不能采用酸法浸出。

碳酸盐鈾矿的选矿并不困难, 用脂肪酸就可将其浮起, 困难在于得到可废弃的碳酸盐。在这里也有两种情况。一种情况是碳酸盐当中含有鈾, 在这种情况下, 得到可废弃的碳酸盐是不可能的, 只能浮选后, 精、尾矿分别处理。第二种情况是碳酸盐中不含有鈾, 在这种情况下, 废弃

碳酸盐有可能得到。但是也有一定的困难，因为碳酸盐与铀矿物的浮选性质相近。曾试图用含4—5个碳原子的硫酸盐选择性的浮选碳酸盐，但结果不佳。在某地浮选出碳酸盐后将精矿在摇床上脱泥，分离出其中的瀝青矿細粒后得到了可废弃的碳酸盐。

在得到的两种产品(精、尾矿)都含铀时，是否分别处理，是否经济是值得考虑的。

含铀磷酸盐 在许多磷灰石矿床中(佛罗里达摩洛哥)都发现矿中含铀约0.01%或更多一些^[5]。若能从这些矿床中附带提取铀，就可以得到大量的铀。

铀在磷酸盐中的存在形式问题，地球化学工作者有不同的看法。主要的有：1. 铀呈吸附状态存在于磷酸盐中，2. 铀呈非常细的化合物 UO_2 分布在磷酸盐矿中，3. 铀离子在磷酸盐晶格中取代其中钙离子的位置等。

在很多含铀磷酸盐矿床中，还没发现过铀的矿物。所以想用浮选方法将铀与磷分开是有困难的。为了综合回收磷与铀，当铀只含在磷酸盐矿物中时，可浮选磷酸盐，废弃尾矿后，从精矿中用水冶方法综合回收磷与铀。如铀均匀的吸附或分散在磷酸盐及其他矿物中时，则浮选出的磷酸盐精矿，需分别从尾矿、精矿浸出铀。而当铀主要吸附和分散在磷酸盐中的其他矿物时，则可用分选法分离出磷酸盐精矿，将铀剩在尾矿中。由于铀的存在形式不同，所以处理的方法也就有所不同。很多具体问题的解决，都是依具体情况及经济因素所决定的。

对于一些在文献上已有多次介绍的矿(如南非金铀矿)的综合利用及一些只能用水冶方法综合回收的矿，在这里就不再提了。

其他方法选矿

重选及重悬浮液选矿

铀矿重选过程的可选性取决于矿物成分和存在形式。原生铀矿如晶质铀矿和瀝青铀矿与其他脉石矿物的比重有很大的差别，所以是有可能重选的。但需视其嵌布粒度及矿石硬度来决定，如含瀝青铀矿的矿石，有时重选并不能得到满意的结果。这是因为它经常与脉石紧密共生，浸染粒度很细的缘故。另外，在重选前需对矿石进行破碎。若矿物硬度不大(如瀝青铀矿、钾钒铀矿等)，则粉碎时铀矿将转入最细的一级，处理这一级矿物用重力选矿效果不高。由此看来重力选矿法的最适合的对象是含有晶质铀矿的卫晶岩矿石和其他铀矿。这类矿物在粉碎时不成矿泥，而有良好的结晶颗粒。晶质铀矿、黑稀金矿、褐钒铀矿、铀的钼铈酸盐矿等经常采用重选，硅质瀝青铀矿等有时亦可以重选。而次生铀矿则不能进行重选。由于矿石性质不同重选的回收率变动很大(60—90%)。

铀矿的重选原理和有色金属是一样的。其常用的设备是跳汰机、摇床、水力旋流器，重介质、螺旋选矿机等。

加拿大有几个铀矿重选工厂，在籍錠港工厂瀝青铀矿(含铜)利用跳汰机等从含铀量为1%的原矿得到品位为20%的精矿，再空运到美国和本国的赫浦港工厂。但其尾矿不是可废弃的。其中含铀0.2—0.3%，在当地用酸法处理。在爱丽多拉等矿床(加拿大大熊湖)铀银矿石亦采用重选。利用跳汰机选后，其尾矿再去浮选银及黄铁矿，随后废弃^[5]。

重选不一定选铀的矿物，也可以选铀矿中其他矿物。如可以从含铀碳酸盐中用重选方法除去硫化物，则其尾矿就可进行铀的碱法浸出。

利用重悬浮液进行铀矿物选矿也在不少国家进行，所用设备为锥形分离器、螺旋分级机，水力旋流器等。

在加拿大、澳大利亚等都有些能用重悬浮液得到好结果的矿。在瑞典用重悬浮液从頁岩

中选铀钍铁矿。

在某地含铀磷酸盐矿($P_2O_5 > 8\%$)首先采用放射性分选废弃20%尾矿后,其精矿再进行重悬浮液选别,可得到含 P_2O_5 28—30%的精矿,并可废弃10—20%尾矿。

在美国艾达荷州 COG 矿物公司用重选过程提高原生铜铀矿品位^[15]。作业中包括跳汰机、螺旋选矿机、水力旋流器等,得到铀的总回收率超过90%。

选择性磨矿及其他方法选矿

有几种特种类型的矿,采用选矿性磨矿是经济的。

有些铀矿物因硬度小,故易细碎。例如沥青铀矿和次生铀矿等都是容易在磨矿时成矿泥的。而一些坚硬的脉石颗粒不因选择性磨矿而受很大的影响。因此我们在磨矿时就可以利用这种性质,采用筛分或分级把粗细粒级分别处理。

对铀矿的选择性磨矿和普通磨矿是一样的。不过球和棒的装量是比磨其他矿石时要少些。有时在选择性磨矿时与水力旋流器联合使用,以除出矿泥。

在美国桑利亚州采用这种方法,大约把临界矿石的品位提高到0.2%^[15]。

在某地用选择性磨矿,铀在矿石中的回收率是80%,而浮选的回收率仅为10%。尾矿的出率65%。其中铀的品位为0.01%。

在大多数情况下,选择性磨矿不能作为一个独立的作业,只是和其他作业联合应用。如美国碳化物核子联合公司,在泥砂分离后作分别浸出处理。

在西德将铀的云母矿加到600—800℃后,立即在水中冷却,可以将矿粉碎,然后进行筛分。在小于1毫米的产品中可回收铀80—90%^[9]。

采用其他选铀矿物的方法,如磁选、静电选等还没有什么显著的效果。

参 考 文 献

- [1] 柏特 C. 马利亚舍尔:“原生铀矿的浮选预选”,有色金属译丛 1957, 6.
- [2] John N. Butter, Robert J. Morris 著,“次生铀矿的浮选”,译自“Mining Engineering” October, 1956.
- [3] 洛勒特,拉依特:“放射性矿物浮选”,核燃料译丛 1959. №1 译自“Canadian Mining and Metallurgical Bulletin” T 49, № 526, 1956, 2.
- [4] 仲托夫 (Н. С. Зантов), 在地质与经济中新的资本主义国家的铀原料基地,原子能第 4 卷第 10 期.
- [5] В. В. 聶符斯基: 铀矿的综合利用,原子能第 4 卷第 5 期 1959.
- [6] Н. Плаксин: “Вестник Академии Наук СССР.” 1956, 7.
- [7] С. И. Митрофанов: “Селективная Флотация” Металлургиздат, 1958.
- [8] Bettens Lapointe: “Mining Journal” 1955, 245, № 6257, 105.
- [9] Грюнвуд, Зальцаи: “Способ обогащения урановых смолков”. Реферативный журнал металлургии 1959, 2.
- [10] Замечания по алектроивному методу сортировки руд Реферативный журнал металлургии 1959, №6.
- [11] С. И. Палький: “Флотация руд редких металлов и олова” 1960. Госорттехиздат.
- [12] “Two instances of physical uranium ore dressing” Peaceful uses of atomic energy, 1955, 8.
- [13] G. A. Koyda: ML Skrinichinko “Some problems of the radiometric method of uranium ore concentration” Peaceful uses of atomic energy, T. 3 1958.
- [14] L. Vuchot, A. Ginocchio, G. Hubert E. Roqueus: “Problems of preconcentration of uranium ores by Physical means: Electronic sorting” Peaceful uses of atomic energy T. 3, 1958.
- [15] F. T. Davis and Glen E. Hanson: “Pretreatment of uranium ores”. Peaceful uses of atomic energy, T. 3, 1958.
- [16] M. A. Eigeles, L. A. Grekulova, M. L. Volova, A. M. Shishov and V. M. Lakenks: “Floation of pitchblende, from synthetic mixtures and ores” Peaceful uses of atomic energy, T. 3, 1958.
- [17] “An Effective ore sorting device” The Mining Journal, October 10, 1958.
- [18] Е. Д. Мальцев. Атомная Энергия №2, 1960.
- [19] “几种钙铀云母矿石的选矿” Mining Engineering 1959. Vol. 11, № 1—2.