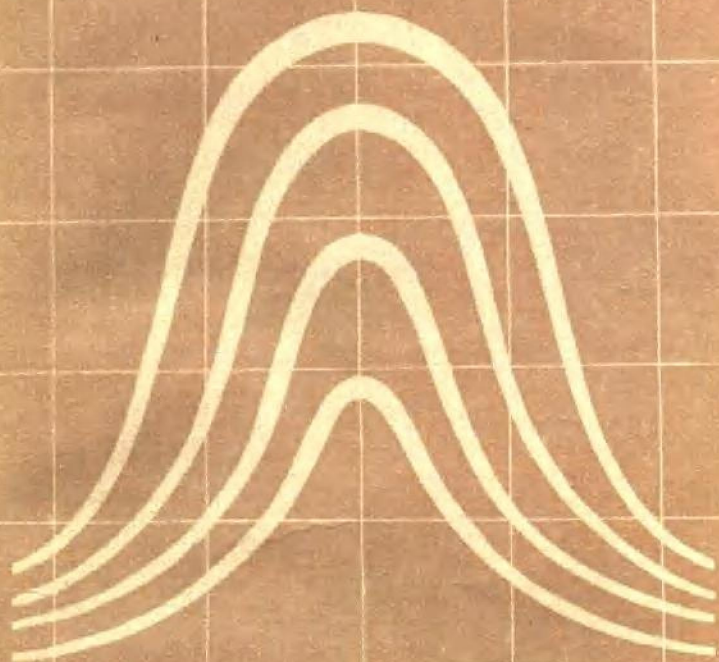




〔苏〕 A. П. 塔塔尔尼科夫 著

925.6
物理选矿法

原子能出版社

核物理选矿法

〔苏〕 A. П. 塔塔尔尼科夫 著

汤家骞 译

原子能出版社

А. П. ТАТАРНИКОВ
ЯДЕРНОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ
АТОМИЗДАТ, 1971

核物理选矿法
〔苏〕А. П. 塔塔尔尼科夫 著
汤家骞 译

原子能出版社出版
(北京2108信箱)
北京印刷一厂印刷
(北京市西便门)
新华书店北京发行所发行·新华书店经售



开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $5 \frac{1}{8}$ · 字数 110 千字
1983年1月第一版·1983年1月第一次印刷
印数001—1400 · 统一书号: 15175·456
定价: 0.65元

内 容 简 介

本书对近几年来迅速发展的有用矿物辐射选矿法中的核物理选矿法进行了探讨。

书中简述了这些新的物料加工方法的物理基础，并提出了这些新方法的分类，重点则放在这些方法的理论和工艺等问题上。对决定矿石分选效率的一些主要因素进行了分析。对选矿设备的特点和用核物理法加工矿石的原则流程也进行了讨论，并详细地阐述了新方法中的某几种方法(如 γ 吸收法， γ 中子法，中子活化法等)。最后扼要地叙述了辐射安全问题。

辐射选矿法，作为矿石预选的手段，目前已应用于黑色、有色和稀有金属矿，以及煤的选别上。

本书可供从事黑色、有色和稀有金属矿和煤等方面工作的工程技术人员，大专院校有关专业师生之用。

序 言

以外电离辐射源为基础的核物理分选法,属于有用矿物分选的最新方法。这些方法的发展开始于五十年代,但到六十年代才首次得到应用。这些方法的产生与发展是与核物理和电子学的成就有很多联系的。

在核物理选矿法中,每种方法发展的程度是不一样的。它们之中有些已经应用于工业,另外一些接近于使用,还有一些尚处于试验室或理论研究阶段。目前,在研究和应用新的选矿法方面,已经积累了一定的经验,其中有些已经发表在国内外文献中。然而,一方面由于文献零散,有时很少公开,而且也不完整;另一方面考虑到这些新方法的前景,因此有必要对已有的材料进行综合,并对核物理分选法的理论和工艺进行较为充分的探讨。本书是首次在这方面的尝试。

核物理法的一般物理基础是由核物理学中的原子和原子核性质、放射性、射线和辐射源的类型及性质、射线与物质的相互作用、核反应、电离辐射的探测等部分组成。这些问题在文献〔1, 18, 25, 41, 43, 51, 56, 58, 69, 72, 80〕中有较多的阐述,因此,本书不再赘述。

第一章阐述核物理法共有的一般理论问题和设备组成。第二章重点介绍物理基础和分选各种有用矿物最有发展前途的方法的使用问题。第三章叙述新分选法的工艺要素和一些其它问题。操作中的辐射安全问题放在第四章中简要叙述。

概 论

所有有用矿物核物理选矿法的特征是借助外部电离辐射源对物料进行照射,并根据射线与矿块物质相互作用时所产生的某种效应显示的强度将受照的矿物原料分成含量不同的产品。

矿物原料物质组成的复杂性,射线种类及其性质以及射线与物质相互作用的多样性,这些在原则上决定了矿物原料核物理分选法可能是多种多样的。

按其性质,核物理选矿法是用分选块状物料的。仅这一点就在许多方面决定了新选矿法在整个工艺流程中的地位。它们用于矿石采出后尚未经过磨矿的第一阶段上。

核物理选矿法有其自己的优缺点。它们的缺点在于块状物料中的矿物不可能达到高度分离,因而分选时有用矿物的富集比也就不可能高。然而,在许多情况下,由于采用核物理选矿法而不需要磨矿及其它一些昂贵的矿石加工作业就能废弃大量的脉石(可占入选级别的50—90%),因此此缺点可得到补偿。同时,采用核物理选矿法在选矿的最初阶段还能提高矿石中有用矿物的含量。在某些情况下,还可以使选矿所得精矿中含有的、能降低下一步加工效率的成分减少。

因此,保证了新的选矿方法的工艺效率高,经济效果好。

总之,用各种核物理法分选矿物原料的实质如下:一定粒级的矿块在运行中受到辐射源所放射出的某种射线照射或透视,当粒子与矿块物质相互作用时,粒子或被吸收,或被散射。由于 γ 量子的光电效应和生成电子对,以及核反应和其它等等效应作用的结果,粒子可能被吸收。各种核反应通常

伴随着发射某种粒子,导致生成释放 β 、 γ 或中子射线的放射性同位素。粒子在物质中散射的结果使粒子的运动方向有所改变,能量也相应有所损失,在某些情况下还会产生如 (n, n') 和 (γ, γ') 的核反应。散射的射线同样能在矿块内局部地被吸收。由于吸收和散射过程的结果,初级粒子流就被减弱。

在某些具体条件下,尤其是这些效应与矿石中的某个成分(化学元素,矿物等)有直接联系时,上述的某些效应可以是有决定意义的。在这种情况下,用电子仪器探测该效应所显现出的强度,就可以测出每块矿石中所具有的成分。如果在电子仪器的线路中加入一个专门的逻辑单元,则可以区分出那些通过照射区时被测射线通量(一级近似与矿块中要测定的成分相对含量成正比)高于(或低于)某个事先给定水平的矿块。然后,由辐射仪控制的专门分离装置(挡板、高压喷气阀等)从总的矿石流中分出这些矿块。这样就将进行照射的矿块分成有用成分含量不同的产品(包括废弃尾矿)。

总之,实现核物理法分选矿物的必要作业程序是:矿石准备,送料去辐照,矿石照射,射线探测和将矿石分成选矿产品。在未深入分析选矿全部流程之前,必须指出,主要的决定性的作业是矿石照射和射线探测作业。实质上这些作业是对相对于辐射源和射线探测器移动的各个矿块进行快速测定的作业。它们在很大程度上决定着矿物原料分选的效率。

在核地球物理学中,样品和矿物分析及快速测定的准确度是很高的,其误差通常在百分之几的范围内^[40,43,56,64,72,75,79,80]。但是,这只有在专门创造一些分析和测定的良好条件后,才能从各方面保证达到上述误差范围。

这些条件是:1)使样品照射和射线测量时几何条件恒定,只要准备的样品大小(重量)和形状一样即可;2)使辐射源到

样品和样品到射线探测器之间的距离固定。特别要注意的是,样品到辐射源和到探测器之间的距离要保证尽可能小。在许多情况下,如果样品的照射或探测的时间较长(长达10—20分钟),那么分析的准确度就高。预先将样品磨碎并且将粉状物料仔细地搅拌,同样也可以大大降低(或者消除)有用成分分布不均所造成的影响。

在分选过程中照射和探测矿块时,这些条件是不可能全部满足的。虽然分选限定在一定的粒级范围内,但矿块大小(重量)、形状仍然是各不相同的。又因为照射和探测是在矿块运行过程中进行的,所以实际上不可能保证长时间地照射和探测(大于1秒),也不可能保持辐射源到矿块和矿块到探测器之间的距离恒定。正是由于以上这些以及其它一些情况,分选过程中单个矿块快速测定的准确度和可信度要比在分析实验中测定相应的元素低得多。在这种情况下,有用成分含量的测定误差可达25—50%甚至更大,而且此误差在一定程度上反映分选的效率。鉴于这种情况,对作为核物理分选法不可分割的一部分的矿块快速测定问题,必须进行专门研究,以使在测定矿块有用成分含量时,能显著地降低可能误差。

在四十年代末到五十年代前半期,苏联和美国就对本书所阐述的选矿法中的某些方法进行了远景评价。结果确定了:中子活化、光中子、 γ 吸收选矿法原则上是可行的。六十年代开始了核物理选矿法发展的新阶段。此时已由一般理论研究过渡到个别方法的工程研究上,从而使得光中子法和 γ 吸收法在工业上获得应用,其它一些方法也接近于应用阶段。估计,采用核物理分选法,在黑色金属、有色及稀有金属、煤以及其它矿物原料方面,将日益扩大^[8,34,50,59,64,68,90,91,97,99]。

符 号 表

- D ——放射性成分或有用成分的重量, 克;
 D_0 ——分选机灵敏阈, 克;
 E ——粒子能量, 兆电子伏 (脚标 α , β , γ , n 分别表示 α 和 β 粒子, γ 量子和中子);
 $F, F_{\text{有用}}, F'_{\text{本底}}$ ——矿块相对于探测器处于静态时, 探测时间内的平均脉冲数 (分别为总的、有用成分的和本底的脉冲数);
 $F, F_{\text{有用}}$ ——矿块相对于探测器处于动态时, 探测时间内的平均脉冲数 (分别为总的和有用成分的脉冲数);
 $G, G_{\text{有用}}, G_{\text{干扰}}$ ——粒子产额 (分别为总的、有用成分的和干扰成分的), 粒子/秒;
 I_0, I ——粒子流开始和结束时的通量, 粒子/秒·厘米²;
 N_0, N ——给定时间内原子开始和结束瞬间的数量;
 P ——事件的概率;
 $Q_{\text{静}}, Q_{\text{动}}$ ——分选机的静态和动态灵敏度;
 $S_{\text{有效}}$ ——矿块的有效截面 (积), 厘米²;
 T ——半衰期;
 $W, W_{\text{有用}}, W_{\text{干扰}}$ ——给定时间内总的、有用成分的和干扰成分的粒子数量;
 a ——同位素的放射性强度, 衰变次数/秒;
-

d ——矿块的平均尺寸（直径），毫米或厘米；

f ——脉冲平均计数率，秒⁻¹；

p_i ——某一成分在总矿石或矿块中的部分（数量），%或克；

q ——矿块重量，克；

$t_{\text{照}}, t_{\text{延}}, t_{\text{探}}$ ——分别为照射，延迟和探测时间，秒；

v ——矿块运行速度，厘米/秒；

Δ, Δ_0 ——分选机的分辨能力和分辨阈，%；

Π ——表示辐射源的量并与条件有关，可表示为克镭当量；粒子/秒；粒子/秒·厘米²；微安；千瓦等；

Σ ——相互作用的宏观截面，厘米⁻¹（脚标吸、散、《活化》代表吸收、散射、活化）；

ϕ_0, ϕ ——开始和结束的粒子流，粒子/厘米²；

α, β ——分别为矿石（矿块）和各级别组分中
有用成分的含量，%；

μ ——射线的线性吸收系数，厘米⁻¹；

ν —— $-0.693(e^{-0.693 t/T})$ 中的系数；

ρ ——矿石密度，克/厘米³；

σ ——相互作用有效截面（微观截面），靶
(1 靶 = 1×10^{-24} 厘米²)。

目 录

序 言	iii
概 论	iv
符号表	vii
第一章 一般理论问题和设备组成	1
1. 应用不同射线的可能性	1
2. 核物理分选法的分类	4
3. 照射条件的共同特性	9
4. 射线探测条件的共同特性	19
5. 分选设备的主要系统	27
6. 设备的灵敏度和分选过程的统计特性	39
7. 有用矿物的工艺特性	45
第二章 主要的核物理分选法	57
1. 吸收法	57
2. 探测初级射线与物质的原子相互作用时产生的 散射和其它射线的分选法	74
3. 探测核反应瞬发射线的分选法	78
4. 活化法	88
第三章 核物理分选法的工艺要素	113
1. 有用矿物分选的原则流程	113
2. 筛分对入选粒级矿块重量均匀性的影响	116
3. 物料的照射	122
4. 分选制度	126
5. 矿石分选效果的经济评价	134

第四章 辐射安全防护问题	137
附 录	141
参考文献	144

第 一 章

一般理论问题和设备组成

1. 应用不同射线的可能性

应用于核物理分选法的射线可相对地分成强穿透能力(中子, γ 量子), 中等穿透能力(β 粒子)和弱穿透能力(α 粒子, 质子, 氘核等)三种。在分选矿石原料时, 最常用的是中子和 γ 射线, 很少用 β 射线。

在评价应用不同射线的可能性时, 除注意射线的穿透能力外, 还必须考虑其它一些因素, 如: 矿块大小, 有用成分在矿块中分布的特性, 所采用的射线探测器的效率, 本底水平以及探测的特征值和含量之间的相互关系。所有这些因素综合在一起, 决定着分选过程中矿石快速取样的准确度。如果作为有效地进行各种分选过程的主要条件是保证必要的准确度的话, 那么分选结果将是肯定的, 而与采用的射线种类无关。现在较详细地来研究一下这些问题。

现有的原矿取样方法是选择代表整个矿体(原矿)的局部矿样。通常, 除取样方法外, 有决定性的不是从总重量中取出多少物料作为样品, 而是样品本身重量。这已为切恰特(Чечотт)公式和统计方法所规定^[26, 75]。

分选矿石时，单个矿块是在运动中进行快速测定的。这时，每块矿石不破碎，而是作为一个整体进行分析。实际上，根据矿块的大小与粒子在物质中的行程关系，可以从整个矿块或者仅从矿块的某一部分得到有用成分含量或物质组成的信息。在后一种情况下，把矿块看作统一的整体进行分析的可信度，将取决于矿块被分析的部分能代表整个矿块的性质到何种程度。

从表1.1可见，用在铝中最大行程表示的射线穿透能力可在很大的范围内变化。当射线能量相同时，差别可达4—5个数量级。

用核物理法分选物料时，每块矿石被研究部分的大小在许多方面都与初级射线以及所探测射线的性质有关。而且，

表 1.1 各种粒子在铝中的最大行程，毫米

能 量 兆电子伏	γ 量子 (损失90%量子)	电子正电子	质 子	α 粒子
0.050	24	0.011	—	—
0.10	59	0.045	—	—
0.50	111	0.63	0.005	—
1.00	135	1.6	0.013	—
2.00	194	3.5	0.043	—
3.0	243	5.8	0.078	0.008
5.0	295	9.9	0.196	0.017
7.0	328	14.2	—	0.028
10.0	370	21.6	—	0.048

初级射线与所探测射线的种类可能彼此相同，也可能不同。同时，矿块被分析的部分主要取决于穿透较少的那一部分射线。其中(表1.2)，采用质子(或 α 粒子)作为初级射线或被探测的射线时，矿石被分析的部分不大，只有在粒度小于10(2)

毫米时, 才可以看出来。采用 β 粒子时, 被分析的部分则大大地扩大。当粒度为50(10)毫米和更小的时候, 被分析的部分为每块矿石总体积的100%。 γ 射线实际上可全部透过小于200毫米的矿块。

表 1.2 采用不同射线时矿块*被分析的体积 (占总体积%)

矿块特性 毫米			粒子能量, 兆电子伏									
			γ 量子			β 粒子			质子		α 粒子	
粒级	平均直径	平均厚度	0.1	1.0	10.0	2.0	5.0	10.0	2.0	5.0	5.0	10.0
-200+100	150	90	66	100	100	3.9	11	24	0.05	0.2	0.02	0.05
-100+50	75	45	100	100	100	7.8	22	48	0.10	0.4	0.04	0.11
-50+20	35	21	100	100	100	16.8	47	100	0.2	0.9	0.08	0.23
-20+10	15	9	100	100	100	39	100	100	0.5	2.2	0.19	0.53
-10+5	7.5	4.5	100	100	100	78	100	100	1.0	4.3	0.38	1.1
-5+2	3.5	2.1	100	100	100	100	100	100	2.0	9.3	0.81	2.3
-2+1	1.5	0.9	100	100	100	100	100	100	4.8	21.7	1.9	5.3
-1+0.5	0.75	0.45	100	100	100	100	100	100	9.6	43.5	3.8	10.6
-0.5+0.2	0.35	0.21	100	100	100	100	100	100	20.5	93	8.1	23
-0.2+0.1	0.15	0.09	100	100	100	100	100	100	48	100	19	53

* 矿块是当量体积的平行六面体。

利用不同种类的粒子进行照射或探测的同时, 有可能改变同一块矿石被研究部分的大小。根据射线的种类和能量以及矿块的大小, 被研究的部分在千分之几到100%之间变化。由取样理论^[26, 75]得知, 如果矿块被照射和探测的部分(局部样品)按其性质能代表整个矿块(总体), 则所测得的指标(如果小于100%)是有代表性的。因此, 总的起决定性作用的不是射线的穿透能力, 而是矿块被研究的那一部分的物理性质与样品整体相符合的程度。这种相符合的程度与矿块内有用成分的分布特性、矿石的构造与结构的特点等有关^[30]。对某些具体的物料和射线来说, 相符合的程度由试验测出。试验

要在模拟分选机的条件下照射矿块和探测射线，同时还要对被研究的矿块进行分析，以便确定被测射线强度与矿块中有用成分平均含量之间的相互关系。当相互关系密切时，就是采用穿透能力弱的射线(如 α 射线)照射和探测，原则上亦可以实现矿物原料的分选。实际上，利用穿透能力极弱的光线进行选矿(光电分选法)^[77]也是有成效的。这是因为在特殊情况下，矿块的颜色及物质组成之间有明显的相互关系。

上述情况表明，用核物理法选矿时，原则上不仅可以采用 γ 射线和中子，而且还可以采用穿透能力较弱的粒子，如 β 粒子、加速电子、质子甚至采用 α 粒子。同时，在每一种具体情况下，必须考虑粒子的各自特点和矿石的性质，以拟定保证顺利进行分选的综合条件。要注意的是，虽然在核物理分选法中采用 β 射线已为某些文献^[34, 88]证明是有可能的，但是评价穿透能力较弱粒子的可用性的具体研究还未进行。在采用质子和 α 粒子时，入选物料的洗矿质量，从辐射源到样品和从样品到探测器之间的距离的恒定性，射线在空气中的吸收等，对分选结果都有极重要的影响(比采用穿透能力强的射线要大)。

2. 核物理分选法的分类

射线种类和射线与成分复杂的物质(通常是矿物原料)相互作用过程的多样性，决定了用于有用矿物分选的核物理选矿法也是多种多样的。例如，核地球物理学中，测定矿石和岩石中不同成分的方法，已知的约有90种^[73]。在有用矿物选矿方面来说，利用外部辐射源为基础的方法，目前大约已有10种。而且这些方法的数量还在不断增加。鉴于这种情况，

有必要使这些方法系统化。这就可以较正确地评价新方法发展的前景及其采用的可能性和新方法的相互联系，并且可以阐明首先要进行研究的的方向和运用于工业的方法。

用于测定围岩和矿石组成的核物理方法最完整的分类见文献[73]。文献[34]，对有用矿物核物理选矿法的系统化做了首次尝试。

对于应用各种射线进行原料分选的可能性研究得很不够，因此，目前实际上还不可能制定出完整的核物理选矿法的分类。看来，在分类中每种方法必须反映其物理性质，并要列出其实现的综合条件、方法和方式。

不管采用何种类型的辐射源，首先应该将那些物理过程或核反应效应相近似的一些方法分成几个大组。在核物理分选法内，射线与物质相互作用过程和伴生效应的多样性中，目前最有意义的是：1)初级射线通过物质时，射线通量的吸收程度；2)初级射线在物质中(原子和原子核中)的散射和一些外部表现相近似的过程，例如产生韧致辐射和特征X射线的过程；3)伴随核反应时产生的射线(核反应的瞬发射线)；4)核反应过程中放射性同位素的生成。

依上所述，可将有用矿物核物理分选法相应地分成几个大组(表1.3)。在每一大组内，如有必要，还可按某些局部特点(射线的能量等)分成一些小组。此外，在分类中列出粒子源的可能类型、粒子的种类及能量、利用的效应和探测射线的特点。除少数例外，原则上每种方法的照射制度或采用连续式，或采用脉冲式。表1.3最后一栏中的H或I分别代表实现该方法的最适宜的制度。

本书所阐述的方案是制定核物理选矿法详细分类的首次尝试。在这种分类中考虑了一些发展程度不同的，甚至已在