放射性选矿的統計学性质及选矿輻射仪的調整

王本仪

鈾矿的放射性选别是利用探测器和选矿輻射仪記录运輸带上矿石的 γ 射綫所产生的电流脉冲．在一定时間內当脉冲数达到仪器所給定的調整值时，那么仪器即控制选取机械动作，从而达到分选的目的．

放射性选矿具有統計学性质，分选的精确度取决于矿石的放射性的統計性以及在射綫探测器和輻射仪綫路中的元件所引起的过程的統計性．在絕大多数的情况下，統計性誤差服从一般的分配定律．

对于某一粒級的矿石，矿块的重量不同、金属含量不同，因而所产生的脉冲数不同；同时在各个不同的瞬間，衰变的原子数不同，即放射性強度不同，因而使矿石的脉冲数产生統計涨落．另一方面，在进行分选时，周围环境也是不断变化的，相邻的高品位矿石的照射，放射性尘埃的污染，也都会引起本底脉冲数的統計涨落．苏联学者柯夫达（Г. А. Ковда）和斯克里尼欽科（М. Л. Скриниченко）考虑到这两个方面，提出了一个公式[1]（图1）

$$(\bar{N}+\bar{\Phi})-R_1\sqrt{\bar{N}+\bar{\Phi}}>A>\bar{\Phi}+R_2\sqrt{\bar{\Phi}},\tag{1}$$

式中 $\bar{N}$——在給定的时間內被記录的矿块的平均脉冲数；$\bar{\Phi}$——在同样的时間內被記录的本底的平均脉冲数；$\pm R_1\sqrt{\bar{N}+\bar{\Phi}}$——全部被記录的脉冲数对其平均值的可能誤差；$A$——表示仪器动作一次所需脉冲数的調整值；$\pm R_2\sqrt{\bar{\Phi}}$——被記录本底的脉冲数对其平均值的可能誤差．$R_1$，$R_2$ 为几率的函数．

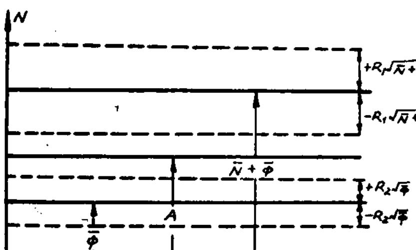

图 1　調整值与矿块及本底脉冲数的关系

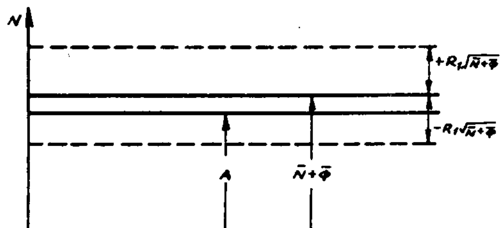

图 2　調整值与矿块本底脉冲数的关系

在进行放射性选矿时，乃同时記录矿块的脉冲数和本底的脉冲数，因此仪器的調整值应服从下式（图 2）：

$$(\bar{N}+\bar{\Phi})+R_1\sqrt{\bar{N}+\bar{\Phi}}\geqslant A\geqslant(\bar{N}+\bar{\Phi})-R_1\sqrt{\bar{N}+\bar{\Phi}}.$$

当 $(\bar{N}+\bar{\Phi})+R_1\sqrt{\bar{N}+\bar{\Phi}}=A$ 时，

$$R_1=\frac{A-(\bar{N}+\bar{\Phi})}{\sqrt{\bar{N}+\bar{\Phi}}};$$

当 $(\bar{N}+\bar{\Phi})-R_1\sqrt{\bar{N}+\bar{\Phi}}=A$ 时，

$$R_1=-\frac{A-(\bar{N}+\bar{\Phi})}{\sqrt{\bar{N}+\bar{\Phi}}},$$

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

即

$$R_1 = \pm\frac{A-(\bar{N}+\bar{\Phi})}{\sqrt{\bar{N}+\bar{\Phi}}}.$$

令

$$A_0 = \bar{N}+\bar{\Phi};\quad \sigma = \sqrt{\bar{N}+\bar{\Phi}},$$

則

$$R_1 = \pm\frac{A-A_0}{\sigma}. \tag{2}$$

根据矿石放射性的統計涨落和本底的統計涨落，对于一定性質的矿石仪器記录的脉冲数服从正态分布定律(高斯分布律)．其分布密度为

$$F(A) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(A-A_0)^2}{2\sigma^2}}, \tag{3}$$

将 A 看为随机变量，則 A_0 相当于 A 的数学期望值，即 A 的最可几值，它等于其平均值．σ 为均方根差．

知道了随机变量的分布密度，就可計算事件(即矿石选取)的几率：

$$\rho = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{-A}^{A} e^{-\frac{(A-A_0)^2}{2\sigma^2}}dA$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-R_1}^{R_1} e^{-\frac{R_1^2}{2}}dR_1. \tag{4}$$

图 3 为正态分布曲綫图．

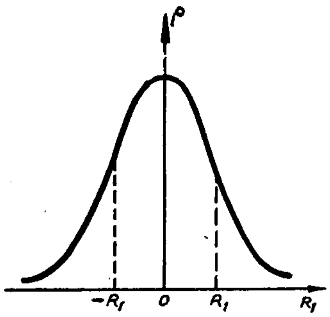

图 3　正态分布

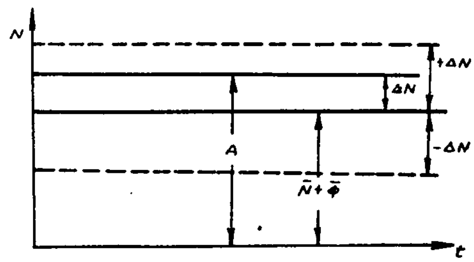

图 4　調整值与矿块及本底脉冲数的关系

現在我們根据 R_1 为正值和負值(即調整值为正偏差或負偏差时)的情况来計算矿石的选取几率．

1. 当 R_1 为正值，即 $A > \bar{N}+\bar{\Phi}$ 时(如图 4)．为了表示簡便起見，令

$$+\Delta N = +R_1\sqrt{\bar{N}+\bar{\Phi}},$$

$$-\Delta N = -R_1\sqrt{\bar{N}+\bar{\Phi}},$$

$$A-(\bar{N}+\bar{\Phi}) = \Delta N'.$$

当 $(\bar{N}+\bar{\Phi})-\Delta N < A$ 时，机器不能动作．当 $(\bar{N}+\bar{\Phi})+\Delta N > A$ 时，只有 $|\Delta N| > |\Delta N'|$，机器才能动作．所以机器动作的几率为

$$\rho' = \frac{1}{2}(1-\rho) = \frac{1}{2}\left(1-\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-R_1}^{R_1} e^{-\frac{R_1^2}{2}}dR_1\right). \tag{5}$$

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图 5 中的阴影部分面积卽为所求的値.

計算时可利用高斯分布的性质：

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-R_1}^{+R_1} e^{-\frac{R_1^2}{2}} dR_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{R_1} e^{-\frac{R_1}{2}} dR_1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{-R_1} e^{-\frac{R_1}{2}} dR_1$$

$$= F(R_1) - F(-R_1) = F(R_1) - [1 - F(R_1)] = 2F(R_1) - 1. \tag{6}$$

$F(R_1)$可根据高斯函数几率积分表查出.

2. 当 R_1 为負値卽 $A < \bar{N} + \bar{\Phi}$ 时(如图 6).

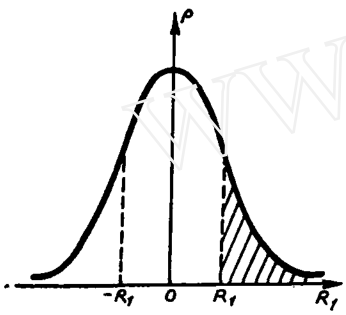

图 5 ρ′ 值示意图

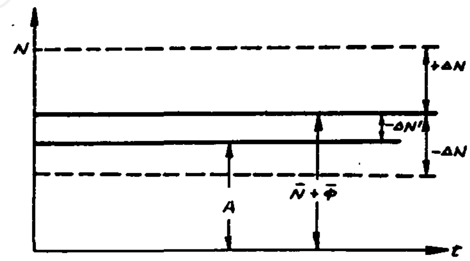

图 6 調整值与矿块及本底脉冲数的关系

$$A - (\bar{N} + \bar{\Phi}) = -\Delta N'.$$

当 $(\bar{N} + \bar{\Phi}) + \Delta N > A$ 时，机器能动作；当 $(\bar{N} + \bar{\Phi}) - \Delta N < A$ 时，只有 $|\Delta N| < |\Delta N'|$ 机器才能动作. 所以在此情况下机器动作的几率为：

$$\rho'' = 1 - \frac{1}{2}(1-\rho) = 1 - \frac{1}{2}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-R_1}^{R_1} e^{-\frac{R_1^2}{2}} dR_1\right) = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-R_1}^{R_1} e^{-\frac{R_1^2}{2}} dR_1\right). \tag{7}$$

图 7 中的阴影部分面积卽为所求之値.

从以上討論中可求出在給定的 R_1 値下的几率 ρ. R_1-ρ 的相应关系可制成一表格. R_1 在 -3.5—$+3.5$ 之間.

柯夫达和斯克里尼欽科还綜合了測量仪器的技术性能和各种参数，提出了矿石脉冲数的公式：

$$N = \Gamma imtfcdF(\omega, a, b), \tag{8}$$

式中 Γ——1 克鈾及衰变产物每秒鐘放出的 γ 数，脉冲/秒·克；i——矿石的放射性平衡系数(小数)；m——矿石中鈾的量，克；ω——探測器的立体角；t——測量时間，秒；f——探測器的效率(小数)；a, b——矿块与探測器及矿块本身的 γ 射綫吸收系数(小数)；c, d——探測器和輻射仪綫路的分辨能力系数(小数).

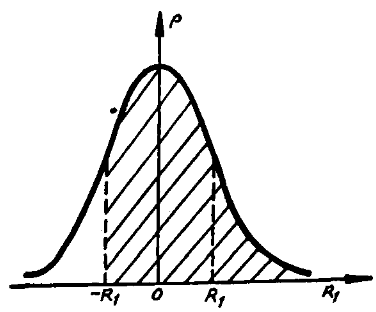

图 7 ρ″ 值示意图

在探測器和輻射仪选定以及測量条件一定的情况下，Γ, f, c, d 及 $F(a, b, \omega)$ 皆为常数. 令

$$S = \Gamma fcdF(a, b, \omega)$$

称之为計数效率，其値可以測得.

于是由(8)式可得

$$m \doteq \frac{N}{ist}, \tag{9}$$

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

又

$$m = \frac{qa}{100}. \tag{10}$$

式中 q——矿块的重量，克；a——矿块中鈾的百分含量，即品位．綜合(9)(10)两式得：

$$N = 0.01qaist. \tag{11}$$

在进行放射性选矿时，同时記录矿块的脉冲与本底的脉冲数，仪器的調整值为

$$A = (\bar{N} + \Phi) + K_1\sqrt{\bar{N} + \Phi}. \tag{12}$$

将(11)式中的N看作在 t 时間内矿块脉冲数的平均值，故代入(12)式得

$$A = (0.01qaist + \Phi) + K_1\sqrt{0.01qaist + \Phi}. \tag{13}$$

由(13)式，对于一定重量的矿块和分选时要求的精矿与尾矿的分离品位(临界品位)，在給定几率的情况下即可求得輻射仪的調整值．反过来，若已知仪器的調整值时，即可求得矿石选取几率．

最后，从以上討論可以得出如下結論：

(1) 就矿石性质而言，一定粒級的矿块(平均重量 q 一定)及临界品位有相应的临界值 N．N 愈小，要求的調整 A 愈小，則因統計涨落引起的誤选可能性愈大，选矿效率愈低． 对于显明度強的矿石，接近临界品位的矿石少，則因偶然誤差引起的誤选可能性小，分选效率高．

(2) 从仪器性能上看，探测器及輻射仪的灵敏度愈高，即計数效率愈高，那么N愈大，A亦愈大，因統計涨落引起的誤选可能性愈小，选矿效率愈高．

(3) 測量时間 t 愈长，則N愈大，A亦愈大，同样因統計涨落引起的誤选可能性愈小，选矿效率愈高．但測量时間太长，即运輸带的速度慢，因而生产能力小． 为此，必須求出滿足选別的最低限度时間，以便尽量提高生产率，但此問題非本文所討論內容．

(4) 本底脉冲数 Φ 小，則因本底引起的統計涨落小，誤选可能性小，选矿效率高．

由此可見，对于性質一定的矿石的选別，为了提高选矿效率，必須提高仪器的灵敏度，以提高計数效率；同时应使周围环境保持清洁，以減少矿石的旁照射，这是进行放射性选矿必須注意的問題．

参 考 文 献

[1] Г. А. Ковда, М. Л. Скриниченко, Некоторые вопросы радиометрического обогащения урановых руд., Труды второй международной энергии, Женева, 1958, Доклады советских ученых, Ядерное горючее и реакторный материалы, М., Атомиздат, 1959, стр. 227. 或 PUAE, 1958, Vol. 3, P 110—116.

[2] 周华章，工业技术应用数理統計学，上册，人民教育出版社，1960．

[3] 复旦大学数学系主編，概率論与数理統計，上海科学技术出版社，1961．

(編輯部收稿日期 1963 年 10 月 14 日)

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net