

# 绝对计数式选矿辐射仪最佳探测时间的探讨

王子翰

本文分析了探测效率、选矿灵敏度和探测时间之间的相互关系，并用数学方法导出了适用于绝对计数式选矿辐射仪的满足一般工程设计需要的计算公式，提供了为获得最高选矿灵敏度而确定最佳探测时间的方法，最后利用 PM-912 型选矿辐射仪所测量的实际数据验证了这种原理和公式的正确性。

选矿灵敏度是选矿辐射仪的主要技术参数之一。选矿灵敏度的高低与平均探测效率、探测时间、自然本底水平等因素有关。对于某一确定的选矿辐射仪(包括探测器)来说，自然本底是一个固定的数值，而其探测效率的高低将取决于探测时间的选择。因此，在这种情况下如何选择探测时间才能够得到最高的选矿灵敏度，将是这里所要讨论的中心问题。

## 一、探测效率和探测时间的关系

直接影响探测效率的因素是很多的，例如探测器的结构和安装、计数管的类型、测量仪器(辐射仪)的分辨能力以及矿块(或用标准源代替)的比重和粒度等。但是，对于某一给定的放射分选机组来说，这些因素都是被限定了的，因此我们仅探讨一下探测时间和探测效率之间的关系。

探测效率  $S$  是这样定义的：在探测时间  $t_M$  内，分布于矿石(或标准源)内的每克铀(放射平衡)在探测器上所引起平均脉冲计数率，可用下面积分式表示：

$$S = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \bar{N}(t) dt}{M(t_2 - t_1)} \text{ 脉冲/秒} \cdot \text{克(U)}. \quad (1)$$

式中  $t_1, t_2$ ——测量的开始和结束时刻，秒； $\bar{N}(t)$ ——在任何时间的平均脉冲计数率，脉冲/秒； $M$ ——分布于矿块内的平衡铀，克。

标准源处于相对于探测器的各不同位置时，辐射仪所记录的脉冲计数率可用方向性图表示，如图 1 所示。图中  $\bar{N}_0$  为当矿块恰好处在探测区中心时的脉冲计数率。假定方向性图是对

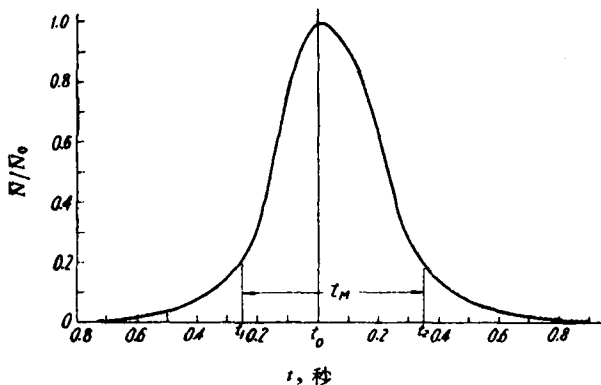


图 1 方向性图  
(在 PM-912 型分选机上测量的)

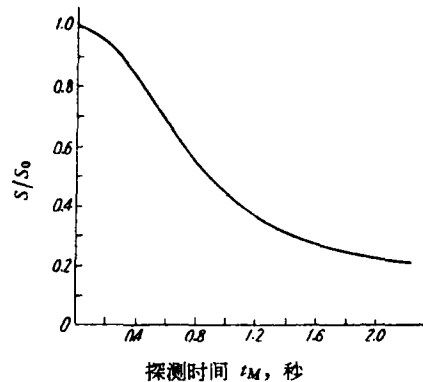


图 2 探测效率曲线

称的。其探测时间是选择，是以探测时间的分配对探测区中心(有最高的脉冲计数率)是对称的，使测量的开始和结束时刻所对应的脉冲计数率  $\bar{N}(t_1)$  和  $\bar{N}(t_2)$  近似相等，以获得最高的探测效率。以  $t_M = t_2 - t_1$  代入(1)式可得

$$S = \frac{\int_0^{t_M} \bar{N}(t) dt}{M t_M} \quad (2)$$

探测效率  $S$  是探测时间  $t_M$  的函数，按照对称原则选取不同的  $t_M$ ，便可得到对应的  $S$  值，如图 2 所示。图中  $S_0$  为  $t_M = 0$  时的最大探测效率，由(2)式可得

$$S_0 = \frac{\bar{N}_0}{M} \quad (3)$$

为了理论上研究和分析的方便，应当找出能够代表  $S$  和  $t_M$  函数关系的具体方程式。可是，一个完善和精确的数学表达式的求得是一项复杂而困难的工作，而且在一般设计中也不是十分需要的。对于某一确定的放射分选机来说，探测时间只有在一限定的范围内选取才是有意义的。例如，对 PM-912 型放射分选机来说，在矿斗运转速度为 0.43 米/秒的条件下，每通过一个矿斗的周期为 0.93 秒，这个时间包括了探测时间和还原时间，因此，探测时间不可能超过 0.93 秒，但也不会太小。实际上探测时间的选取限定在 0.4—0.9 秒的范围内已是足够的了。

这样一来，我们就可以用一个近似的数学表达式来表示在实用的限定范围内  $S-t_M$  的关系：

$$S = -a t_M^{\frac{1}{2}} + b \quad (4)$$

式中  $a$  和  $b$  为待定的系数。对于某一给定的放射分选机和选矿辐射仪来说， $a$  和  $b$  是确定的。具体地说， $a$  和  $b$  可由已知的  $S-t_M$  曲线(图 2)和最大探测效率  $S_0$  求得。为了获得更好的实际效果和准确性，随着计数管的更换和辐射仪性能的变化，可对  $a$  和  $b$  进行适当的修正。

## 二、选矿灵敏度和探测时间的关系

在放射分选过程中，选矿辐射仪所测量的信号是统计性质的。因此，选矿辐射仪的调整是建立在统计学原理基础上的。选矿辐射仪的调整值  $A$ (脉冲数)应满足下列不等式：

$$\bar{N}_{\phi} t_M + R_{\phi} \sqrt{\bar{N}_{\phi} t_M} < A < (\bar{N} + \bar{N}_{\phi}) t_M + R \sqrt{(\bar{N} + \bar{N}_{\phi}) t_M} \quad (5)$$

式中  $\bar{N}$ ， $t_M$  的意义如前所述； $\bar{N}_{\phi}$ ——本底平均脉冲计数率，脉冲/秒； $R_{\phi}$ ——在本底作用下的调整机率函数； $R$ ——在本底和有用信号共同作用下的调整机率函数。

根据选矿灵敏度的定义， $R_{\phi} = -R = 1.28$ 。在理想的条件下，可得如下的表达式：

$$\bar{N}_{\phi} t_M + R_{\phi} \sqrt{\bar{N}_{\phi} t_M} = A = (\bar{N} + \bar{N}_{\phi}) t_M - R \sqrt{(\bar{N} + \bar{N}_{\phi}) t_M} \quad (6)$$

设  $M_0$  表示选矿灵敏度的铀金属量(克)，则以

$$\bar{N} = M_0 S \text{ 和 } R_{\phi} = -R \quad (6')$$

代入(6)式便可得到选矿灵敏度的数学表达式为：

$$M_0 = \frac{2R_{\phi} \sqrt{\bar{N}_{\phi} t_M} + R_{\phi}^2}{S t_M} \quad (7)$$

式中  $R_{\phi} = 1.28$ 。对于某一分选机来说，若假定其平均本底脉冲计数率  $\bar{N}_{\phi}$  是确定的。那么，在限定的范围内选取一个合适的探测时间  $t_M$ ，便可得到最高的选矿灵敏度。

现将(4)式代入(7)式，得

$$M_0 = \frac{2R_{\phi} \sqrt{\bar{N}_{\phi} t_M} + R_{\phi}^2}{(-a t_M^{\frac{1}{2}} + b) t_M} \quad (8)$$

若設  $B = \frac{1}{2}R_{\phi}\bar{N}_{\phi}^{-\frac{1}{2}}$ ,  $C = \frac{b}{a}$ ,  $D = \frac{2R_{\phi}\bar{N}_{\phi}^{\frac{1}{2}}}{a}$ , 則(8)式即為

$$M_0 = -D \frac{t_M^{\frac{1}{2}} + B}{t_M(t_M^{\frac{1}{2}} - C)} \tag{9}$$

為了計算方便, 設  $x = t_M^{\frac{1}{2}}$ ,  $y = M_0$ , 利用微分法求對應於最高選礦靈敏度的最佳探測時間  $t_{M_{最佳}}$ .

$$y = -D \frac{x + B}{x^2(x - C)}$$

使

$$\frac{dy}{dx} = -D \frac{x^2(x - C) - (x + B)(3x^2 - 2Cx)}{x^4(x - C)^2} = 0,$$

則

$$2x^2 + (3B - C)x - 2BC = 0.$$

求解得到  $x$  的兩個根, 不過這裡我們只取其具有實際意義的一個:

$$\begin{aligned} x_{最佳} &= \frac{(C - 3B) + \sqrt{(C - 3B)^2 + 16BC}}{4} = \\ &= \frac{C - 3B}{4} + \sqrt{\left(\frac{C - 3B}{4}\right)^2 + BC}. \end{aligned}$$

由此可得最佳探測時間為

$$t_{M_{最佳}} = \left[ \frac{C - 3B}{4} + \sqrt{\left(\frac{C - 3B}{4}\right)^2 + BC} \right]^2 \tag{10}$$

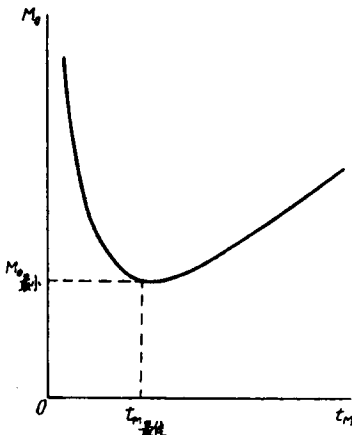


圖3  $M_0-t_M$  曲線

總結前面的分析和計算可以看出, 對於任何給定的放射分選機和絕對計數式的選礦輻射儀來說, 首先要測量出本底脈沖計數率  $\bar{N}_{\phi}$  和方向性圖, 繪出  $S/S_0-t_M$  曲線; 然後計算出  $a, b, B, C$  和  $D$  各係數; 最後利用(10)式計算出最佳探測時間  $t_{M_{最佳}}$  才能獲得選礦輻射儀的最高選礦靈敏度。

選礦靈敏度和探測時間的關係曲線如圖3所示。曲線的最低點所對應的就是我們所討論的最佳探測時間和最高選礦靈敏度。

### 三、在 PM-912 型放射分選機組中的應用

通過計算, 一方面驗證前面所討論的基本原理和計算公式的正確性; 另一方面也為如何進行實際計算提供一種具體的方法。

利用 PM-912 型分選機和輻射儀, 我們測得如圖1所示的方向性圖, 繪出了  $S/S_0-t_M$  曲線, 並測得 1000 克重 0.10% 品位的放射標準源的  $\bar{N}_0 = 86$  脈沖/秒,  $\bar{N}_{\phi} = 15$  脈沖/秒, 計算出  $S_0 = 86$  脈沖/秒·克(U)。

根據圖2曲線查得:  $t_{M1} = 0.49$  秒,  $S_1 = 65$ ;  $t_{M2} = 0.81$  秒,  $S_2 = 46$ 。

分別將  $t_{M1}$  和  $S_1$ ,  $t_{M2}$  和  $S_2$  代入(4)式, 得

$$-a\sqrt{0.49} + b = 65,$$

$$-a\sqrt{0.81} + b = 46.$$

求解后,得到  $a = 95$ ,  $b = 132$ . 再将  $a$  和  $b$  之值代入(4)式便可得出  $S-t_M$  函数关系式为

$$S = -95\sqrt{t_M} + 132. \tag{11}$$

为了說明和驗證公式(11)的正确性,我們以不同的探測時間,利用(11)式來計算与此相對应的探測效率;另外,又利用图 1 根据作图法測量出对应的  $S-t_M$  值,并将两种結果同时列于表 1 以資对比.

表 1 探測效率  $S$  的測量值和計算值的比較表

探測時間 $t_M$ , 秒	0.25	0.36	0.49	0.64	0.81	1.00	1.21
測量 $S$ , 脉冲/秒·克	80.0	74.0	65.5	56.0	46.5	37.5	31.0
計算 $S$ , 脉冲/秒·克	84.5	75.0	65.5	56.0	46.5	37.0	28.0

由表 1 的数据对比可以看出:当探測時間在 0.36—1.00 秒範圍內变化时,探測效率的測量值和計算值之間的最大誤差不超过 1.4%. 由此可知,利用公式(11)來表示  $S$  与  $t_M$  的函数关系是具有相当的准确性的.

根据已經測量得到的  $\bar{N}_\phi$  和計算出的  $a$  和  $b$ ,进一步求出  $B = 0.165$ ,  $C = 1.39$ , 将  $B$  和  $C$  代入(10)式便可得到最佳探測時間:

$$t_{M_{最佳}} = 0.57 \text{ 秒}.$$

在探測時間  $t_M = t_{M_{最佳}}$  的条件下,由公式(4)可求出探測效率  $S = 61$  脉冲/秒·克(U). 将  $t_M$ ,  $S$ ,  $\bar{N}_\phi = 15$  脉冲/秒,  $R_\phi = 1.28$  代入(7)式,便可計算出最高选礦灵敏度:  $M_{0_{最大}} = 262$  毫克鈾.

表 2 选礦灵敏度与探測時間的关系

$t_M$ , 秒	0.10	0.20	0.40	0.50	0.57	0.60	0.70	0.8	1.00
$M_0$ (作图法), 毫克	563	357	273	270	262	267	268	277	303
$M_0$ (解析法), 毫克	470	325	273	270	262	267	268	277	300

在不同探測時間的条件下,利用公式(8)和已知的各个系数來計算对应的选礦灵敏度 ( $M_0$ ), 其結果列于表 2. 为了說明这种計算方法的正确性,我們又根据方向性图确定出对应的  $S$  值之后,再利用公式(7)計算出对应的选礦灵敏度 ( $M_0$ ), 其結果也列于表 2.

从表 2 亦可得出:在探測時間  $t_M$  为 0.4—1.0 秒的範圍內,利用两种方法所計算的結果是一致的. 根据作图法計算得到的  $M_0$  与  $t_M$  值画出图 4 所示的曲線. 与該曲線的最低点所对应的就是最佳探測時間和最高选礦灵敏度.

对于任何一个确定的設備,探測器的結構型式、輻射儀的分辨能力以及分选机的運轉速度等是固定不变的,因而可以認為探測效率曲線(图 2)的形状是确定的. 并且系数  $a$  和  $b$  也是确定的常数. 在这种条件下,最佳探測時間  $t_{M_{最佳}}$  也是一定的. 但是,由于計數管的更換和衰老、放射性粉尘的污染将使探測效率降低和本底增大. 从公式(10)中可以看出,最佳探測時間( $t_{M_{最佳}}$ )将随本底( $\bar{N}_\phi$ )的变化而变化.

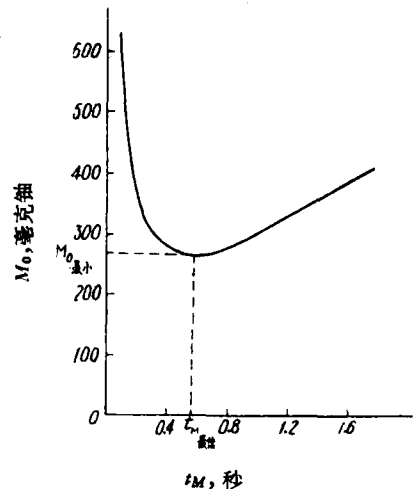


图 4  $M_0$  和  $t_M$  的关系曲線 (PM-912 型, BC-6×10 二层)

根据上面的例子, 已知  $a = 95$ ,  $b = 132$ , 給以不同的本底水平  $\bar{N}_\phi$ , 由(15)式可計算出对应于不同本底的最佳探测时间  $t_{M_{最佳}}$ , 其结果如图 5 所示。

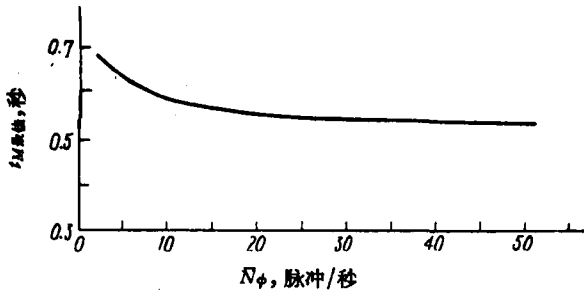


图 5  $t_{M_{最佳}}$  与  $\bar{N}_\phi$  的关系

由图 5 可看出: (1) 当本底  $\bar{N}_\phi$  的变化范围为 1—20 脉冲/秒时, 最佳探测时间  $t_{M_{最佳}}$  的变化范围不超过 0.55—0.70 秒; (2) 当本底大于 20 脉冲/秒时, 最佳探测时间几乎保持不变(0.55 秒)。

第二个例子, 我們仍然引用 PM-912 型放射分选机和辐射仪的测量資料。由于测量的时间和条件不同, 这里引用的資料和数据与前面的有些差别。但是, 仍然可以

应用前面的分析和公式来計算最佳探测时间。这样一来, 进一步地証明了这种分析和公式的正确性和普遍意义。

根据测得的方向性图和(4)式可求出  $a = 112$ ,  $b = 163$ 。

测得  $\bar{N}_\phi = 11$  脉冲/秒, 取  $R_\phi = 1.28$ , 可求得  $B = 0.19$ ,  $C = 1.46$ , 并由(15)式計算出  $t_{M_{最佳}} = 0.64$  秒。

由(8)式計算出最高选矿灵敏度为  $M_{0_{最小}} = 180$  毫克鈾。

#### 四、結 論

关于选矿灵敏度、探测效率和探测时间之相互关系的討論、分析和公式推导, 只是对绝对計数式的选矿辐射仪才是有实用意义的。对于这种类型的放射分选设备, 只要测出一些必要的原始数据(如本底、方向性图等), 就可以利用前面所討論的方法計算出最高选矿灵敏度所需要的最佳探测时间。

通过具体实例的計算, 証明了这种計算方法的正确性和普遍意义。

#### 参 考 文 献

- [1] И. В. Кошелев, Радиометрическая аппаратура для обогащения урановых руд, Госатомиздат, Москва, 1963.
- [2] G. A. Kovda and M. L. Skrinichenko, Proc. 2nd Intern. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1958, vol.3, p. 110—116.

(編輯部收稿日期 1964 年 5 月 12 日)

