

重离子活化分析的标定方法

张维成

活化分析的基础是核反应，由核反应生成放射性核素放出的射线强度或核反应中放出的瞬发辐射强度与待测元素含量有定量的关系，这便是活化分析所依据的基本原理。对于入射粒子为带电粒子时，计算公式为：

$$A = (1 - e^{-\lambda t}) N f \int_0^R \sigma(x) dx \quad (1)$$

式中，A 为带电粒子轰击靶核时产生的放射性强度(次/秒)，与 $N \cdot f \cdot \sigma(x)$ 成正比，与照射时间 t 成指数关系；N 为待测核素的原子浓度(原子数/克)；f 为粒子流强(粒子数/秒)；R 为粒子的射程(克/厘米²)，R 等于零相当于靶子表面；x 为距表面的深度； $\sigma(x)$ 为核反应的截面。在照射过程中，带电粒子贯穿物质时，能量迅速消耗，反应截面不是常数，而是随穿透距离(x) 而变。且是 x 的复杂函数。因此求诱导放射性和元素含量的关系时，关键是如何解决(1) 式中的积分问题。该积分用数学的方法难以解决，只能依靠实验的办法。一般解决的方法有等效厚度法，平均截面法，厚靶产额法，平均阻止本领法。这些方法没有本质的区别，它们均来源于同一个活化方程式(式1)，分别把式(1) 的积分值包括在等效厚度，平均截面，厚靶产额和平均阻止本领这四种实验值内，它们的差异就在于对该积分项给予不同的处理方法。

在运用等效厚度法时，方程式(1) 可改写为：

$$A = (1 - e^{-\lambda t}) N f \sigma_0 e \quad (2)$$

式中 σ_0 为开始入射粒子能量时的活化截面(cm²)；e 为等效厚度，可从活化曲线上求得。

当测得样品的绝对放射性 A 及 $f \cdot t$ ，查得 σ_0 ，并预先测好 e 值就可算出待测元素的含

量，这是绝对测量方法，也可用相对法。

在采用平均截面法时，方程式(1) 可写成下列形式：

$$A = (1 - e^{-\lambda t}) N f \bar{\sigma} R \quad (3)$$

式中 $\bar{\sigma}$ 为平均截面，它的定义为：

$$\bar{\sigma} = \frac{\int_0^R \sigma(x) dx}{\int_0^R dx} = \frac{\int_0^R \sigma(x) dx}{R} \quad (4)$$

式(3) 表示平均截面与诱导放射性的关系。如果已知 $\bar{\sigma}$ (测平均截面的方法是通过测已知含量的厚样品的绝对放射性，按式(3) 算出 $\bar{\sigma}$ ；另一方法是由激发函数求得 $\bar{\sigma}$)，并测得绝对放射性 A 和其它数值，就得出待测元素的含量。平均截面对不同的靶材料基本上是一个常数，这对于采用相对法，带来了很大的方便。

在采用厚靶产额时，式(1) 有下列形式：

$$A = \left(\frac{1 - e^{-\lambda t}}{\lambda} \right) Y I \quad (5)$$

式中 Y 是厚靶产额，它表征采用带电粒子反应形成放射性核素的速度，是一个只与入射能量有关而与辐照时间无关的物理量。其定义为：

$$Y = 6.24 \times 10^{12} \cdot \frac{N \lambda}{Z} \int_0^R \sigma(x) dx \quad (6)$$

式(5) 中用束流 I (微安) 代替粒子流 f (粒子数/秒)，f 与 I 有如下的关系：

$$f = 6.24 \times 10^{12} \frac{I}{Z} \quad (7)$$

式中 Z 为入射粒子电荷数。

若待测元素 x 是基体 m 中的一个杂质，则式(5) 变为如下形式：

$$A = Y_x \cdot C \frac{R_m}{R_x} I \left(\frac{1 - e^{-\lambda t}}{\lambda} \right) \quad (8)$$

式中 c 是元素 x 在基体 m 中的含量, R_m 和 R_x 分别为基体 m 和元素 x 中的射程。如果已知 Y 值 (当测得绝对放射性强度 A 就可算出厚靶产额, 文献已有一部份厚靶产额数据可供使用), 通过绝对测量获得 A 后可算出杂质含量 C 。通常仍使用方便的相对法。

在采用平均阻止本领法时, 方程式 (1) 变为下面形式:

$$A = (1 - e^{-\lambda t}) N f \frac{1}{\left(- \frac{dE}{edx} \right)_{E=E_m}} \int_0^{E_i} \sigma dE \quad (9)$$

式中 E_i 为入射粒子能量; $\left(- \frac{dE}{edx} \right)$ 是靶物质对入射粒子的能量在 E_m 时的阻止本领; E_m 是对平均阻止本领的平均能量, 其定义为:

$$E_m = \frac{\int_0^{E_i} E \sigma(E) dE}{\int_0^{E_i} \sigma(E) dE} \quad (10)$$

E_m 可由激发函数或厚靶产额来求得, 采用厚靶产额更有利, 因为产额的数据更易测量也更精确。平均阻止本领法本身的误差很小可忽略而不计, 但使用阻止本领值而引入的系统误差是不清楚的。若采用双核反应的方法, 选择适宜的照射条件, 计算中可不引入任何阻止本领和射程值, 方法本身和系统误差都很小, 结果会更精确。

平均阻止本领法也有绝对法和相对法之分, 通常总是采用相对法求被测元素的含量。

上述四种方法中, 等效厚度法从理论上讲比较准确, 因为它完全根据实验值, 未引入任何假设, 但求活化曲线比较麻烦。平均截面法和厚靶产额法的准确度相仿, 若用相对法, 不需要知道平均截面和厚靶产额值, 实验上比较方便。平均阻止本领法是最

精确的方法, 在欧洲很流行。上述的阻止本领可用下式表示,

$$S = f(v, Z_1) \cdot g(v, Z_2) \quad (11)$$

式中 S 为阻止本领, v 和 Z_1 是入射粒子的速度和原子序数, Z_2 是靶核的原子序数。

从式 (11) 可推得: 在相同的粒子速度下, 两个固定靶核阻止本领之比与入射粒子的种类无关。现在可用平均阻止本领的概念来进行验证。

通常对带电粒子反应的厚靶产额可用下式表示

$$Y = n \int_0^{E_i} \frac{\sigma(E)}{S(E, x)} dE \quad (12)$$

式中 n 为靶核中被测元素的浓度; $\sigma(E)$ 为核反应截面; $S(E, x)$ 为入射粒子和靶核的阻止本领; E_i 为入射粒子能量。

对平均阻止本领法, Y 可用下式表示:

$$Y = \frac{n}{S(E_m, x)} \int_0^{E_i} \sigma(E) dE \quad (13)$$

式中 E_m 是平均能量。

对具有一定能量 (E_m) 的入射粒子和含有同一元素的两个靶核 (A, B), 产额比 (R) 可由下式表示:

$$R = \frac{Y_A}{Y_B} = \frac{n_A \cdot S(E_m, B)}{n_B \cdot S(E_m, A)} \quad (14)$$

运用 (11) 式, $S = f(v, Z_1) g(v, Z_2)$, 产额比 Y_A/Y_B 将与入射粒子种类无关。因为

$$\frac{S(E_m, B)}{S(E_m, A)} = \frac{g(v_m, Z_B)}{g(v_m, Z_A)} \quad (15)$$

所以:

$$R = \frac{Y_A}{Y_B} = \frac{n_A g(v_m, Z_B)}{n_B g(v_m, Z_A)} \quad (16)$$

即表明它与入射粒子种类无关。这也可从实验上来验证。为此固定入射粒子的速度, 使用已知靶核 (n_A, n_B 为已知) 和不同的粒子来核对比率 Y_A/Y_B 是否为常数, 另外也可利用已知 n_A, n_B 的阻止本领值进行计算所得的值与实验上得的结果对比。表 1 列出实验中

所采用的靶子，表2列出实验和计算所得的结果。

表1 实验中所采用的靶子

靶子	组成(重量百分比)	
Ti	100	
TiNi	42.9	Ni
	57.1	Ti
TiCu	50.25	Cu
	49.75	Ti
TiFe	49.45	Fe
	50.55	Ti

从实验和计算求得的R值中，除了Ti/TiCu(3%和1.9%)外，其它各R值符合很好，差值都小于1.5%如表3所示。

上述表明：采用平均阻止本领法进行标定时，可以不测定重离子的阻止本领值(有些尚未能精确测定或还没有进行测定)，而用相同速度下的H和He的阻止本领值(已被精确测定了)来代替它，精确度可达1—2%，从而使重离子活化分析法变得更简单方便，也更精确。

表2 从实验和计算求得的R值，实验中固定入射粒子速度为0.985MeV/A

	Ti/TiNi的产额比	Ti/TiCu的产额比	Ti/TiFe的产额比
R_{exp}^{12C}	1.68 ± 0.02	1.875 ± 0.02	1.895 ± 0.02
R_{Th}^{12C}	1.68 ± 0.12	1.84 ± 0.13	1.9 ± 0.13
R_{exp}^{16O}	1.655 ± 0.015	1.815 ± 0.02	1.9 ± 0.02
R_{exp}^{HI}	1.645 ± 0.025	1.82 ± 0.03	1.875 ± 0.04
R_{Th}^{16O}	1.68 ± 0.12	1.84 ± 0.13	1.9 ± 0.13
R_{Th}^{α}	1.66 ± 0.05	1.82 ± 0.05	1.9 ± 0.05
R_{Th}^p	1.68 ± 0.05	1.84 ± 0.05	1.9 ± 0.05

R_{exp} 表示实验值， $^{12C} \dots p$ 表示入射粒子为 $^{12C} \dots$ 质子，HI表示重离子束即为 19F 、 24Mg 、 27Al 、 32S 和 35Cl ， R_{Th} 为计算值。也假定对H和He的阻止本领值引入误差为2%，对 16O 为5%。

表3 实验值和计算值的对比

靶	它们的相差值(%)				
	R_{exp}^{12C} 和 R_{Th}^{α}	R_{exp}^{12C} 和 R_{Th}^{12C}	R_{exp}^{16O} 和 R_{Th}^{α}	R_{exp}^{16O} 和 R_{Th}^{16O}	R_{exp}^{16O} 和 R_{exp}^{HI}
Ti/TiNi	1.08	0.06	0.3	1.3	0.7
Ti/TiFe	0.4	0.4	0.05	0.05	1.5
Ti/TiCu	3	1.9	0.3	1.4	0.4