

4

中国科学院图书馆
中国科学院图书馆

中国科学院图书馆 图书馆学

王立群

中国社会科学出版社



Х. Б. 麦日博尔斯卡亚

В. Л. 沙什金 И. П. 舒米林著

放射性矿石的 β - γ 分析方法

于 铭 强译

中国工业出版社

1947年以来,国外对放射矿石的 β - γ 分析方法已进行了全面的研究。此方法在研究及实际运用中积累了系统而丰富的经验。

由于测定铀、钍含量的放射性测量法代替了费用大而生产效率低的化学分析,所以不论是在普查与勘探时或是在开采与加工处理铀与钍矿石时,均博得广泛的采用。

本书可作为核地质、冶金及物探工程技术人员和有关专业的师生参考。

Х.Б.Межиборская
В.Л.Шашкин И.П.Шумилин
АНАЛИЗ
РАДИОАКТИВНЫХ РУД
 β - γ -МЕТОДОМ
Атомиздат 1960

* * *

放射性矿石的 β - γ 分析方法

于 铭 强 译

*

中国科学院原子核科学委员会编委会编辑

中国工业出版社出版(北京东黄城根路10号)

(北京市书刊出版事业许可证出字第110号)

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $2^{1/4}$ ·字数48,000

1962年5月北京第一版·1962年5月北京第一次印刷

印数0001—2,690·定价(10—7) 0.33元

*

统一书号: 15165·1436 (核-21)

序 言

放射性矿石的实验室放射性测量分析，包括对 鈾 或 釷（放射系的起始元素）的测定和对其他放射性元素（鈾和釷的衰变产物）的测定。

对预先用化学方法分离出来的个别放射性元素的放射性测量属于放射化学分析的领域，在本指南中不作研究。对样品预先不进行化学处理的分析属于直接放射性测量分析。例如，对研碎的样品中的鈾和釷含量的测定。

测定鈾和釷含量的放射性测量法，由于代替了费用较大和生产效率较低的化学分析，所以不论是在普查和勘探时，或是在开采和加工处理鈾矿和釷矿时都被广泛地采用。

在开始的初期阶段，放射性测量方法曾用于测定平衡的鈾矿石和釷矿石〔2、8、11〕。在此类矿石中，可以根据三种放射性辐射中的一种辐射，用比较样品的和相应标准源的放射性的方法确定起始放射性元素的含量。 α 方法曾是一种首先得到广泛推广的分析鈾矿石的方法。但是由于此种方法具有一系列缺点，因而目前实际上并不采用。

分析放射性矿石的 β - γ 方法从1947年〔29、38、39〕开始研究。现在对这种方法已经进行了全面的研究，而且在方法的运用方面也积累了丰富的经验。

最近几年还研究了分析复杂放射性矿石的方法；这些方法的原理是测量一定能量范围内的 γ 辐射〔6、13、24〕。但是目前这些方法还未得到广泛推广。

编写“放射性矿石的 β - γ 分析方法”一书的目的，在于论述根据 β 和 γ 辐射分析放射性矿石的方法。本书适用于了解放射性测量学基础的人员。

指南的第四章中采用了E.M. 热列兹诺娃提供给作者的资料。

作 者

目 次

序言

第一章 根据 β 和 γ 辐射测量样品的放射性	1
1. 记录 β 和 γ 辐射方法的总述	1
2. 主要天然放射性元素的 β 和 γ 辐射	2
3. 薄层、厚层和中间层的概念	2
4. γ 测量	7
5. β 测量	7
6. 铀系、钍系元素和钾的 β 和 γ 辐射的比值	17
第二章 矿石的放射性测量分析中的 β - γ 方法	21
1. 方法的原理	21
2. 测量条件的选择	23
3. β - γ 方法计算方程式中各个系数的确定	24
4. 标准源。内标准法和贫化法	26
5. 用 β - γ 方法分析时所使用的仪器	31
6. 一般建议	36
第三章 对 β - γ 方法分析结果的评价	42
1. 结果的正确性	42
2. 结果的准确度	44
3. β - γ 方法的灵敏度	47
4. 分析结果的统计整理	49
5. 分析结果的检查	50
第四章 三组分矿石的放射性测量分析	54
1. 分析的原理	54
2. 采用单阈鑑别的分析	57
3. 在软 γ 射线范围内采用微分鑑别的分析	58
4. 实际建议	60
第五章 镭含量和射气扩散系数的确定	62
1. 射气方法	62
2. γ 方法	64
参考文献	68

第一章 根据 β 和 γ 辐射测量样品的放射性

1. 记录 β 和 γ 辐射方法的总述

在对放射性矿石进行放射性测量分析时，测量的依据是比较被测样品和标准源的放射性。采用此种测量可以免除一些伴随着绝对测量所产生的一系列复杂的修正〔3〕。

样品和标准源放射性的测量比较可以用电离方法或脉冲方法进行。

在根据 β 和 γ 射线分析放射性矿石时，广泛地采用装有气体放电计数管和闪烁计数器的仪器。气体放电 β 计数管实际上能够记录射入计数管内部的全部 β 质点。所以能够被记录下来的质点的最低能量极限，是取决于计数管管壁的厚度。

目前采用具有云母窗（5—6毫克/厘米²）的端座式计数管、具有铝阴极（~30毫克/厘米²）和钢阴极（~60毫克/厘米²）的圆筒式计数管和具有各种内部金属镀层的玻璃计数管（~250毫克/厘米²）。

气体放电计数管对 γ 射线的灵敏度大致为1%，对一定能量的 γ 量子的灵敏度系取决于阴极材料。在记录 γ 辐射方面采用各种专门的计数管（内部具有金属镀层的MC型、BC型和TC型计数管或具有钢阴极的CTC型计数管），但是也可以采用用于记录 β 辐射的薄壁计数管（AC型和CTC型计数管）〔10〕。

借助于闪烁计数器〔一般使用NaJ(Tl)晶体〕测量 γ

輻射，可以把記錄效應提高到百分之几十；對於小體積的（少於能够全吸收 γ 射線的體積）晶体而言，記錄效應隨着光子能量的增大而降低。

使用閃爍計數器可以根據能量分析 γ 輻射。因而閃爍計數器不僅用於記錄低強度的 γ 輻射（弱放射性礦石，小稱量樣品），而且也可用於區分一定能量範圍內的 γ 輻射。

閃爍測量可以用標準計數儀器的專門附加裝置進行（積分 γ 測量），或用各種能譜測量儀器進行（微分 γ 測量和極限鑑別測量）。放射性測量分析中所採用的儀器和計數管，在論述記錄放射性輻射方法的專門規範和一系列文獻中〔1、2、3、24、25、33〕已有闡述，這裡不再作詳細研究。

2. 主要天然放射性元素的 β 和 γ 輻射

放射 β 和 γ 射線的主要天然放射性元素的特征列在表 1 和表 2 中。

由於 UX_2 的半衰期很短，因而它總是和 UX_1 處於平衡狀態中。對 RaB 和 RaC 來說也是同樣情況，在礦石中與氡處平衡狀態，並且可以把它們看作為一個放射體。這樣，在釷系中便可以分為三組 β 放射體： $U (X_1 + X_2)$ 、 $Ra (B + C)$ 、 RaE 和兩組 γ 放射體： $U (X_1 + X_2)$ 和 $Ra (B + C)$ 。由於地球化學過程作用的結果，在自然條件下各組之間的平衡比值可能遭到破壞。

由於釷的衰變產物的壽命很短，在自然條件下釷系中實際上總是保持着放射性平衡。

3. 薄層、厚層和中間層的概念

根據被測定樣品的不同特點，有時必須變化輻射層的厚

表 1

元 素	半 衰 期	β 辐射的最大能量 (兆电子伏)	該組分的相对 数量 (%)
鈾-鐳系			
Th ²³⁴ (UX ₁)	24.1天	0.112 0.205	20 80
Pa ²³⁴ (UX ₂)	1.22分	1.52 2.32	5 95
Pb ²¹⁴ (RaB)	26.8分	0.65	100
Bi ²¹⁴ (RaC)	19.7分	1.65 3.17	77 23
Bi ²¹⁰ (RaE)	5.02天	1.17	100
釷系			
Ac ²²⁸ (MsTh ₂)	6.13时	2.18 1.85 1.72 1.15 0.66 0.46	10 9 7 53 8 13
Pb ²¹² (ThB)	10.6时	0.36 0.59	88 12
Bi ²¹² + Tl ²⁰⁸ [Th (C+C')]	60.5分 3.1分	1.80 2.20	34 66
鉀			
K40	1.2 · 10 ⁹ 年	1.32	88

度，在某一些情況下採用薄層，在另一些情況下則採用中間層或厚層。

這些概念的意義可以在下面得到解釋。

大家知道，窄束 γ 射綫的吸收是按照指數定律進行的：

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (1)$$

式中： I_0 ——無吸收體時的計數率，

I ——在有 x 厚度的吸收層存在的情況下的計數率，

x ——吸收層的厚度（克/厘米²），

表 2

元素	γ 光子能量 (兆电子伏)	100次衰变的 光子数	元素	γ 光子能量 (兆电子伏)	100次衰变的 光子数
铀-镭系			钍系		
UX ₁	0.090	31.0		0.336	9.0
UX ₂	0.78	5.0		0.410	4.0
	0.82			0.458	3.0
Ra	0.184	1.2		0.907	25.0
				0.964	20.0
RaB	0.241	10.6	钍系		
	0.294	24.0	ThB	0.238	44.1
	0.350	43.5		0.299	4.0
RaC	0.607	39.8	ThC'	0.726	8.4
	0.766	6.7		0.830	12.7
	0.933	6.8		1.03	4.0
	1.12	20.2		1.34	3.3
	1.24	6.0		1.60	4.7
	1.38	5.9		1.81	4.7
	1.76	22.3		2.20	1.7
	2.2	6.0	ThC''	0.277	3.5
	2.45	2.2		0.510	8.3
钍系				0.582	27.0
MsTh ₂	0.127	1.0		0.859	5.0
	0.184	24.0	2.62	33.7	
			K ⁴⁰	钾	
				1.46	12

$\bar{\mu}$ ——质量吸收系数 (厘米²/克)。

实际工作证明, β 射线的吸收也近似于指数定律。

公式 (1) 适用于外部吸收体对射线吸收的情况。

如果辐射源为具有 x 厚度 (克/厘米²) 的放射物质层, 则在此种情况下便产生自吸收的现象。

在此情况下，将（1）式积分便可求出計数率：

$$I_x = \frac{I_0}{\mu} (1 - e^{-\mu x}) \quad (2)$$

或

$$\frac{I_x}{I} = \frac{1 - e^{-\mu x}}{\mu x}, \quad (3)$$

式中： I_x ——从具有 x 厚度（克/厘米²）的层所記錄到的計数率；

I ——在沒有自吸收时从 x 厚度层所能記錄到的計数率；

I_0 ——从厚度为 1 克/厘米² 的无自吸收的层所記錄到的計数率。

式（2）和式（3）的关系表示在图 1 和图 2 上。图 1 上的曲綫分为三部分。曲綫的第一部分具有傾斜的直綫形状，第二部分弯曲，第三部分則差不多与 x 座标軸平行。

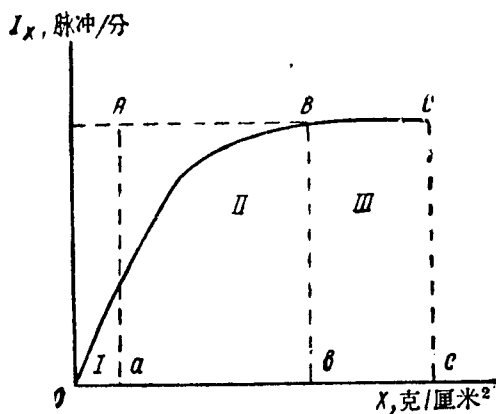


图 1 計数率与輻射层厚度的关系曲綫

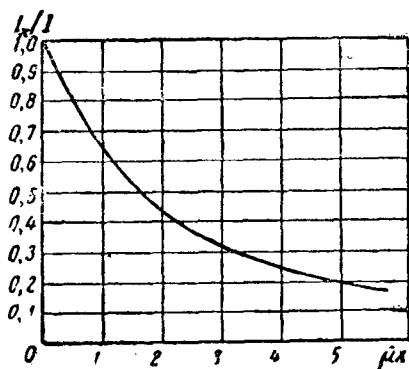


图 2 样品层中辐射自吸收的函数曲线

曲线的第一部分属于薄层。这里所记录的辐射强度实际上与层的厚度成比例：将式（2）分解后，对低 x 值来说便可得下式

$$I_x \approx I_0 x. \quad (4)$$

在已知下式中 $\bar{\mu}$ 的情况下便可以确定薄层的范围

$$\bar{\mu} x \leq 0.1. \quad (5)$$

在运用薄层进行测量的情况下，被测元素的含量按下式计算：

$$Q_{\text{нп}} = q_{\text{эт}} \frac{I_{\text{нп}} \cdot P_{\text{эт}}}{I_{\text{эт}} \cdot P_{\text{нп}}}, \quad (6)$$

式中： $Q_{\text{нп}}$ ， $q_{\text{эт}}$ ——样品中和标准源中元素的含量，

$I_{\text{нп}}$ ， $I_{\text{эт}}$ ——测量样品和标准源时的计数率，

$P_{\text{нп}}$ ， $P_{\text{эт}}$ ——样品和标准源的重量。

曲线的第二部分符合于中间层（即厚度界于薄层和厚层之间的层——译者注）。在这里辐射源中的自吸收开始造成显著影响，因而计数率 I_x 的增长不能相应于层厚度 x 的增长。在此情况下可以用（3）式求出自吸收的修正值；并可借助

于(3)式根据求得的 I_0 值确定 I 值〔然后再按(6)式计算〕。

曲线的第三部分属于厚层部分(也称“饱和层”、“极限层”和“无限厚层”)。

厚度等于或大于射线在该物质中的射程的层理解为厚层,因而式(2)中的 $e^{-\mu x}$ 便近似于零。在此种情况下所记录的计数率与 I_0 成比例(从式(2)中可以看出),即与放射性物质的含量成比例,而与样品的总重量无关(在辐射物质的表面相同的情况下);因而适用于厚层的计算公式具有下列形式:

$$Q_{up} = q_{gr} \frac{I_{up}}{I_{gr}} \quad (7)$$

4. γ 测量

铀系 γ 射线的平均能量采用0.8兆电子伏,质量吸收系数(对混凝土而言)等于0.068厘米²/克。

那么 γ 射线的薄层范围可以由式(5)中确定:

$$x \leq 1.5 \text{ 克/厘米}^2。$$

如果采用1.3克/厘米³作为研碎矿石的平均堆积密度,则可求得,在根据 γ 射线测量时可以算为薄层的最大厚度将近为12毫米。钍系中, γ 射线的平均能量近似于铀系中 γ 射线的平均能量。

在实验室的分析中,在进行 γ 测量时,采用厚度相同的样品和标准源,其厚度在 γ 射线薄层界限内;因而 γ 测量结果按式(6)计算。

5. β 测量

β 质点的吸收与用于激发和电离介质原子的能量耗失有

关（电离耗失）和轫致辐射的能量耗失有关（辐射耗失）。此外还见有弹性散射。

对于天然放射性物质的 β 辐射而言，仅仅电离耗失和弹性散射是主要的（第一和第三过程），而辐射耗失则不大。

电子的散射取决于原子序数，因而对不同化学成分的物质来说散射也各不相同。 β 质点在辐射层中的散射（自散射）能够造成各向异性的角度分布，而且当采用厚度为 β 质点射程的0.1~0.2的薄层和中间层进行测量时这种散射会起着很大作用〔34〕。为了减少散射的影响，必须在尽可能大的立体角条件下进行测量（最好是 4π 或 2π ）。

在厚层中测量时，电离耗失则具有主要意义。电离耗失与物质的平均原子序数的关系不大。它主要与介质的单位体积中的电子数 n 有关：

$$n = N \rho \frac{Z}{A}, \quad (8)$$

式中： N ——阿佛加德罗常数，

ρ ——密度，

Z ——元素的原子序数，

A ——原子量。

从式（8）中可以看出，在厚度（克/厘米²）相同的层中的电离耗失与 Z/A 成比例。

如果考虑到大多数矿石的平均原子序数实际上是固定的，则可作出一个结论：在厚层中矿石样品的 β 测量结果一般与矿石的化学成分无关，而且能足够正确地指示出放射性组分的含量。

薄层。在铀系和钍系的 β 放射体中 UX_1 具有最小的极限

能量 (0.205兆电子伏)。

UX₁的 β 射线的射程大致等于45毫克/厘米²，所以只有采用端座计数管才可能记录这种 β 射线。

在UX₁以后的软 β 放射体是ThB和RaB (0.36和0.65兆电子伏)。这两种放射体的辐射不仅可以用端座计数管记录，而且也可以用具有薄壁铝阴极的 (30毫克/厘米²) 或钢阴极的 (60毫克/厘米²) 圆筒式计数管记录。

一般在进行 β 测量时，采用屏，用于屏蔽UX₁、ThB和RaB的辐射。屏的厚度 (包括计数管的壁厚) 为200~250毫克/厘米²。在此种条件下，用式 (5) 所确定的薄层范围大致为5~7毫克/厘米²。如果也测量软辐射，则薄层的范围应该限制到1~2毫克/厘米²。

为了使薄层达到足够的同质性，必须仔细地研碎样品，其颗粒不应大于50~60微米 (230~270筛眼)。

上面已经指出，在立体角很小的情况下，由于自散射的效应，薄层中的测量结果可能失真。辐射层中的自散射，能够使按标准源单位重量计算的计数率 (单位放射性) 不仅不随着表面密度的增大而减少，反而在某些点上甚至有所增高 (图3)。

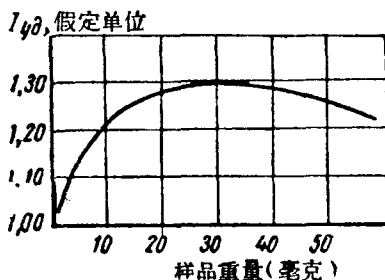


图3 在薄层中测量 β 放射性时计数率与样品层厚度的关系 [40]

在每种物质的一定的层厚度情况下，自散射效应和自吸收效应能够相互补偿。

在利用 4π 或 2π 的几何条件下，要消除自散射的影响，就必须使仪器更加复杂。如果增大测量辐射的立体角，则可以大大减少这种影响。在采用窗孔直径为40毫米的端座计数管（CH-2E）和样品与窗孔之间的距离等于5~6毫米的情况下，可以保证利用全辐射的三分之一。图4是用研碎到320筛眼的八氧化三铀（ U_3O_8 ）试剂（1）和沥青铀矿（2）在上述条件下测得的自吸收曲线。在此种情况下试剂被涂到直径为30毫米的铝盘上。样品与计数管窗孔之间放置了厚度为220毫克/厘米²的铝屏。

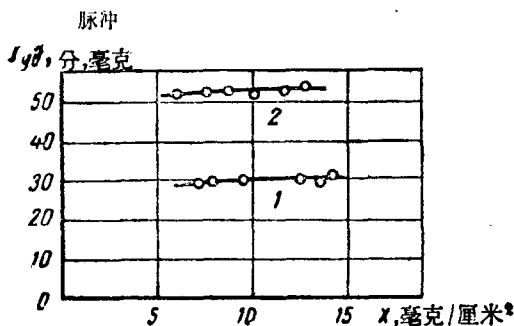


图4 八氧化三铀（1）和沥青铀矿（2） β 辐射的自吸收曲线

在层厚为7~12毫克/厘米²时，两个曲线都有很大的水平段。这意味着，在层厚为7~10毫克/厘米²和采用能够利用全辐射三分之一的几何条件下，在薄层中的测量才可能获得满意的结果。

除了自散射之外，涂有试剂的盘的表面对 β 射线的反射也影响薄层中的测量结果。这种效应随着盘的材料原子序数的增大而增大。因此，为了减少 β 射线反射的影响，必须将

試劑塗到用具有小原子序數的材料（有機透明玻璃、鋁）所製造的盤上。

應該注意的是，在對樣品進行 β 測量時，應該把 τ 底數作為測量中的底數； τ 底數的確定方法將在下面研究。

在採用薄層工作時，將試劑塗到板片上比較方便，而不是塗到盤上。板片被壓緊在專門的夾具上（圖5）。夾具由一個整塊的圓形底板和具有圓錐形邊壁的較厚圓環所構成（圓環可以擰到底板上）。壓住板片的圓環的孔決定着所形成的輻射層的面積。

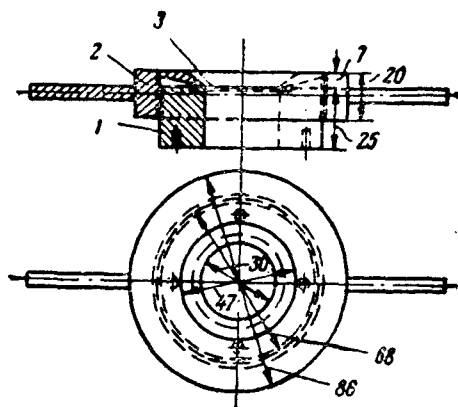


圖 5 塗薄層的器具

1—底板；2—圓環；3—鋁板片。

如果樣品具有足夠好的均質性（如八氧化三鈾 U_3O_8 ），則可用下述方法得到薄層：將研碎了的試劑放入丙酮或甲醇中攪拌成懸浮溶液，然後再把溶液倒入圓環的凹孔內。在紅外線燈下將液體慢慢蒸發之後，便可得到足夠平整的層。

在大多數情況下，樣品都是非均質的，這種方法對於非

均质样品是不适用的。在此情况下，一般都把非均质试剂放到被夹在夹具中的板片上，然后再用几滴丙酮或甲醇浸湿并用尾端烧圆的玻璃棒整平。在液体蒸发之后，同样可以得到足够平整的层（特别是当样品研碎得很好的时候）。试剂的重量用分析天平确定：在涂试剂前后用天平称板片。

厚层。在对放射性矿石进行 β 测量时，极限厚层的厚度值可以用大家所知道的与 β 质点的极限能量 E 和射程 R （克/厘米²）有关的实验公式求出：

$$R = 0.542 E - 0.133,$$

式中： E ——铀系和钍系中最硬辐射的极限能量（兆电子伏）。

将 RaC 的 E 值（3.17兆电子伏）代入式中，便可求出：极限层的厚度大致等于 $1.5 \sim 1.6$ 克/厘米²。在研碎矿石的平均密度等于 1.3 克/厘米³时， RaC 的 β 射线在矿石中的射程将近12毫米。因此可以采用12毫米作为矿石极限层的厚度。

在采用极限厚层进行测量时，样品放置在深12毫米的盘中或具有双层壁的圆筒中（两壁之间的距离为12毫米）。

对天然放射性元素的 β 测量是在 γ 辐射底数作用下进行的。所以为了确定样品的 β 放射性，必须先测量样品的总和放射性；然后在射线入射途径上放上厚度为 1.6 克/厘米²的屏（吸收 β 辐射），再测 γ 底数。从总和放射性中减去 γ 底数便可求出样品的 β 放射性。在测量时一般采用铝屏或铁屏。

如果认为厚为 1.6 克/厘米²的屏能够吸收大致10%的铀系和钍系的 γ 辐射，则在减 γ 底数时应该进行相应的修正。但是这种修正只是当 γ 放射性与样品的 β 放射性相差不大时才有意义。厚层中的 β 测量结果按（7）式计算。