

放射性矿石的伽玛辐射取样

【苏】B. Л. 沙什金 著

原子能出版社

内 容 简 介

本书对天然产状铀、钍矿石伽玛辐射取样进行了论述。依次分析了天然产状放射性矿石的伽玛辐射谱成分、辐射取样时记录伽玛辐射的特点、用于定量解释的换算系数的理论和实验数据。

以单独的章节分析了影响伽玛辐射取样结果的因素：铀、钍之间的放射性平衡破坏和矿石的射气扩散。

在伽玛测井和坑道伽玛取样的有关章节中阐述了这两种方法的理论基础、方法应用的特点、干扰因素的影响以及消除干扰因素的修正方法、结果的解释方法等。

本书适用于从事铀、钍矿床普查、勘探和开采的物探人员和地质人员以及有关专业的高等院校学生。

В. Л. ШАШКИН
ОПРОБОВАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ РУД
ПО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЮ
МОСКВА АТОМИЗДАТ 1972

* * *

放射性矿石的伽玛辐射取样

[苏] В. Л. 沙什金 著

于 铭 强 译

蒋 永 一 校

*

原子能出版社出版
北京第一印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ • 印张 $5^{11/16}$ • 字数 120 千字
1976 年 2 月北京第一版 • 1976 年 2 月北京第一次印刷
印数 001—2750 • 定价：0.55 元
统一书号：15175 • 043

目 录

引言.....	1
第一章 天然产状放射性矿石的伽玛辐射谱	5
1.1. 概述	5
1.2. 铀系和钍系元素的伽玛辐射谱	7
1.3. 均匀无限辐射-吸收介质伽玛辐射的计算谱	12
1.4. 含铀、钍的无限介质的伽玛辐射仪器谱	15
第二章 记录伽玛辐射的方法	36
2.1. 探测器的效率和灵敏度	36
2.2. 辐射仪的校正	40
第三章 定量解释伽玛测量结果的换算系数	51
3.1. 概述	51
3.2. 无限介质和半无限介质系数的理论计算	52
3.3. 岩石和矿石的有效原子序数	55
3.4. 无限介质和半无限介质系数的实验测定	57
3.5. 根据实验和计算数据确定的无限 和半无限介质系数	59
第四章 放射性矿石的放射特性	73
4.1. 概述	73
4.2. 放射系中放射性平衡的破坏	73
4.3. 铀矿石中放射性平衡破坏的某些规律	75
4.4. 研究放射性平衡破坏的方法	78
4.5. 铀矿石的射气扩散	79
4.6. 氡从天然产状铀矿石中的释出	82
4.7. 混合型铀-钍矿石	84

第五章 伽玛测井	85
5.1. 概述	85
5.2. 均匀介质中的伽玛测井	86
5.3. 在密度变化的介质中伽玛测井的特点	94
5.4. 钻孔中测量伽玛辐射的特点	98
5.5. 用伽玛异常面积法对伽玛测井数据的解释	103
5.6. 伽玛辐射在泥浆和套管中的吸收修正	110
5.7. 伽玛测井的分层解释	114
5.8. 高铀含量矿石钻孔中伽玛测井曲线的解释	120
5.9. 矿石的射气扩散和进入钻孔中的氡 对伽玛测井结果的影响	121
5.10. 对矿石中放射性平衡破坏的修正	125
5.11. 伽玛测井误差及测井检查	129
5.12. 勘探铀矿床时伽玛测井的应用	131
第六章 坑道的伽玛取样	134
6.1. 概述	134
6.2. 伽玛辐射的测量	135
6.3. 辐射仪的校正	139
6.4. 换算系数的确定	140
6.5. 坑道伽玛取样方法	141
6.6. 放射性平衡破坏和氡的释出对伽玛 取样结果的影响	145
6.7. 伽玛取样误差及其检查	151
第七章 伽玛能谱取样方法	158
7.1. 按伽玛辐射谱分别测定铀和钍	158
7.2. 伽玛能谱测井	162
7.3. 伽玛能谱取样	167
参考文献	171

引 言

在勘探和开采金属矿床时总是要进行取样，其目的是确定矿体厚度和矿体中有益组分的含量。取样的实质在于采取样品及随后对能代表一定矿体体积的样品进行分析。通常在坑道和钻孔揭露的矿体上取样。在坑道中取刻槽样品，在钻孔中取岩心。

取样应有代表性。换句话说，样品的总体应该给出有关矿体的厚度及其中有益组分含量的正确数据。要做到这一点，必须遵守一定的取样规则，按一定的网格取样，以便能根据各单个样品的平均分析结果正确地确定矿体的平均参数。

造成取样误差的主要原因是取样不正确和分析中的错误。对样品的取样和分析进行相应的检查，可以查明并尽可能消除系统误差。偶然误差对取得矿体正确的平均参数并无多大影响，因为将结果平均时，此种误差的影响将被大大减弱。

在铀、钍矿床上，除进行类似于其它矿床的一般地质取样外，还进行 γ 辐射取样。

利用铀、钍矿石的放射性进行取样分析，可以简化地质取样时粉末样品的那种分析方法，而代之以放射性分析方法^[1-3]；此外，采用辐射取样将根本改变原来的取样方法。用 γ 辐射取样，能够在天然产状下确定放射性矿体的厚度和其中的铀、钍含量。虽然此法与采样无关，但仍然称为取样方法，因为辐射取样所解决的问题与普通地质取样一样。

在坑道中根据 γ 射线的取样称为 γ 辐射取样，在钻孔中

则称为 γ 测井。

γ 辐射取样的主要优点是：能在测量之后立即得到结果，而地质取样的结果则需数日之后才能得到。采用 γ 辐射取样，可以避免因过多含矿物质的选择性损耗或过多含矿物质混入样品而造成的误差。

当岩心采取率不高时，钻孔的岩心取样结果就不准确，而利用 γ 测井方法总是可以取得可靠结果。这样，就有可能部分地采用无岩心钻探，甚至可以根据冲击钻钻孔的 γ 测井数据确定矿体的各种参数。在露天开采时，为进行爆破，即采用此种冲击钻钻孔。

应该指出，坑道中的 γ 辐射取样，总可以用刻槽取样代替，并可得到同等精度的结果；而对钻孔来说则是另一种情况：当岩心采取率不高或岩心中的含矿物质有选择性损失时， γ 测井方法便成为唯一的取样方法。

苏联于1945—1946年开始在铀矿床的勘探中采用 γ 测井和 γ 辐射取样方法^[4,5]。

γ 测井很早就使用了，但仅用于根据岩石的放射性区分钻孔中的岩性。在生产了第一批轻便盖革辐射仪并取代了野外电离型 γ 静电计之后，才有可能采用 γ 测井的定量解释方法 and 研究坑道 γ 辐射取样方法。

以后数年又进行了许多研究工作，以改进 γ 测井方法和 γ 取样方法，并继续研制测量 γ 射线的仪器，也积累了在铀矿床上实际应用 γ 辐射取样的大量资料。与此同时发展了这些方法的理论。 γ 测井理论的研究具有很大意义。通过理论研究，奠定了 γ 测井结果定量解释的基础，并且能够在理论上计算各种测量条件下的 γ 测井曲线，确定钻孔中泥浆和套管的影响等。研究工作表明， γ 测井理论的某些原理可应用

于坑道的 γ 辐射取样。

在早期， γ 测井理论仅以 γ 辐射与岩石相互作用的简单概念为基础，因而当时还不可能计算换算系数(即将测到的 γ 辐射换算成矿石中的铀或钍含量)。

在初期阶段，换算系数是针对每个矿床的矿石用实验方法确定的。后来通过理论和实验研究，确定了辐射源均匀分布无限介质和半无限介质的 γ 辐射谱，同时还研究了矿石的物质成分和探测器的效率对测量结果的影响。这样就使 γ 辐射取样方法的物理基础更为明确，使之能够用实验方法对各种类型矿石和各种探测器确定准确的换算系数。

用点状镭源校正辐射仪的方法的研究，对 γ 辐射取样方法的发展有很大意义。

采用对 γ 辐射有高记录效率的闪烁探测器，是放射性测量仪器的一大改进。用带闪烁探测器的 γ 能谱仪研究了无限介质的 γ 辐射谱。

γ 辐射取样方法，主要在铀矿床上得到了广泛的实际应用。经验证明，对于计算矿石储量来说，辐射取样结果在大多数情况下是相当准确的，对于铀、镭之间放射性平衡严重破坏的矿石而言则为例外。氡的衰变产物是铀系的 γ 放射体，因此铀、镭之间放射性平衡的任何破坏，都会使按 γ 辐射确定的铀含量产生误差。

由于矿石的射气扩散而引起的镭、氡之间的放射性平衡破坏，导致损失一部分 γ 放射体。由此而造成的取样误差，可以用专门修正方法加以消除。

积累的经验表明，在很多情况下对放射性平衡破坏的矿石也能进行 γ 辐射取样。当然，与平衡矿石相比，此种情况下的取样精度和可靠性要低些。

在矿石中同时存在铀系和钍系元素时，根据 γ 辐射总量仅能测定某当量的铀、钍总含量。分别测定铀、钍的依据是，它们所放出的 γ 辐射谱不同。进行这种测定时，要采用闪烁 γ 能谱仪。

铀、钍混合矿石和放射性平衡破坏的铀矿石并不多见。 γ 辐射取样多在具有平衡的铀矿石矿床上进行，因此我们所论述的基本问题是针对此类矿石而言的。对铀、钍混合矿石和不平衡铀矿石的取样方法特点在文中将单独论述。

在进行 γ 辐射取样时，所得结果可能因存在系统误差而不准确。出现系统误差有如下几个原因：换算系数值不准确；矿石的射气扩散和放射性平衡破坏的修正有错误；在坑道中进行 γ 辐射取样时对干扰辐射的补偿不正确； γ 测井时钻孔中氢的影响等。用其它方法进行取样，可以发现是否存在 γ 辐射取样的系统误差。例如，可用刻槽取样检查坑道中的 γ 辐射取样，用岩心取样检查 γ 测井。当把这些方法作为检查方法使用时，应对其提出更高的要求，以便得到正确的结果。将 γ 辐射取样结果与用作检查的地质取样结果按数组样品进行比较。在进行对比时应采用适当的数理统计方法和统计检验，使之能够发现和确定基本取样结果可能产生的系统误差值^[6]。正确地整理 γ 辐射取样结果，对于评价所得数据的精度和正确性有很大意义。

作者在论述本书的资料时，认为读者是了解放射性勘探和熟悉地质取样方法的^[7,8]。

目前在许多专著和一系列文章中论证了有关 γ 测井和 γ 辐射取样某些课题的数学解法。作者认为在本书中没有必要重复这些推导，仅利用其最终结果，作为推荐相应方法的依据。感兴趣的读者可以在本书附录文献中找到这些推导。

第 一 章

天然产状放射性矿石的伽玛辐射谱

1.1. 概 述

在对天然产状放射性矿石取样时，被记录的 γ 辐射谱与放射性元素的原始 γ 辐射谱有关，与介质的散射和吸收特性有关，并与测量的几何条件有关。

对放射性矿石取样时进行的 γ 辐射测量一级近似地可归结为以下两类：在均匀无限辐射-吸收介质中进行的测量，其中放射源具有均匀的体分布或面分布（即无限介质）；另一类是在无限延伸的介质表面上进行的测量（即半无限介质）。实际测量的几何条件与以上两类模型有一定差别，且所有矿石中的放射源分布也是不均匀的，此种情况可在具体的工作方法中加以考虑和修正。

γ 辐射谱的定性特性曲线可以根据 γ 辐射在圆筒形屏中的衰减试验得到；测量时圆筒屏套在探测器上。衰减曲线的形状取决于 γ 辐射谱、屏的材料和探测器的效率。采用具有一套钢屏和铅屏的充气计数管进行的测量给出了如下初步结果，即点状镭源的和无限放射性介质的 γ 辐射谱有差别，不同物质成分的无限介质，其 γ 辐射谱之间也有差别（图 1.1）。

有关无限和半无限介质 γ 辐射谱的更多的资料，是用闪烁能谱仪测量方法得到的。闪烁能谱仪测量的基础是：在能谱仪的输出端得到的电信号，其值的大小与闪烁体吸收的 γ 辐射的能量成正比^[9,10]。最近几年闪烁能谱测量又有一些发

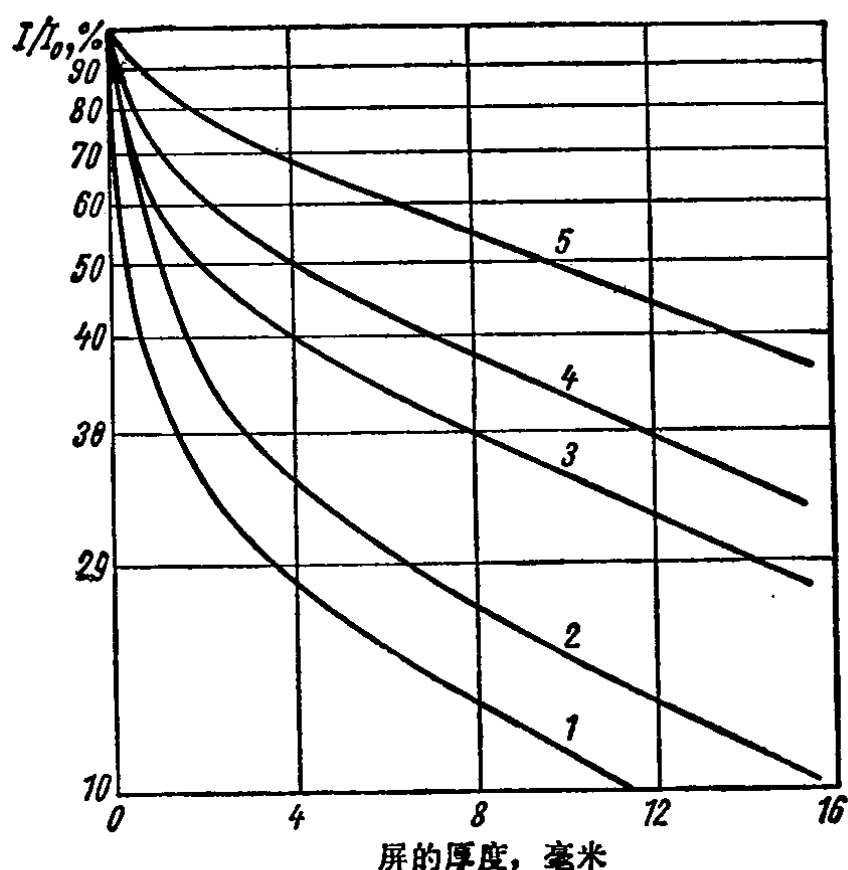


图 1.1 含铀的无限介质的和点状镭源的 γ 辐射衰减曲线(用铅屏屏蔽); 探管(1 毫米 Al)

1——BC 型计数管, 灰分为 16% 的煤 ($Z_{\text{有效}}=11$); 2——BC 型计数管, 硅酸盐岩石 ($Z_{\text{有效}}=16.5$); 3——MC 型计数管, 灰分为 16% 的煤; 4——MC 型计数管, 硅酸盐岩石; 5——MC 型计数管, 点状镭源。

展; 目前闪烁能谱测量不仅用于研究放射性矿石的 γ 辐射谱, 而且还用于解决放射性勘探的某些具体任务, 这些任务通常与测定一定能区内的 γ 辐射有关。

由于 γ 辐射与探测器的相互作用, 在闪烁能谱仪的输出端便可记录到仪器谱; 此种仪器谱与作用于探测器的 γ 辐射谱有很大的差别。这种差别与下列因素有关: 闪烁体物质对 γ 量子的康普顿散射、闪烁体的附件对 γ 辐射的反向散射、当闪烁体中的碘激发时次级电子和 X 射线量子在闪烁体边缘部分的损失等。此外, 探测器的能量分辨率和记录效率对被

测辐射能量的依附关系，对测量结果也有影响。根据上述可明显看到，仪器谱与闪烁体的尺寸有关。随着闪烁体尺寸的增大，一系列干扰因素的影响将随之减少，仪器谱将更接近 γ 辐射谱(见 2.1 节)。

目前根据仪器谱恢复 γ 辐射谱的方法已研究成熟。通常此任务用电子计算机完成，但也可以采用近似图表法^[11]。

对解决大多数放射性勘探任务来说，仅测量仪器谱即足够了。例如，在 γ 能谱取样时，为了选择测量条件，也需要测量仪器谱；应该用准备用于取样的探测器来测定这种仪器谱。

所以在实际应用时，在各相应情况下采用带屏蔽的探测器所测得的仪器谱比较方便。

γ 放射源均匀分布的无限和半无限介质的 γ 辐射谱测量方法，在文献[12]中已有详述，这里不加叙述。

除了无限和半无限介质的 γ 辐射谱外，还必须了解用于校正辐射仪的点状镭源的 γ 辐射谱(见第二章)。

1.2. 铀系和钍系元素的伽玛辐射谱

铀及其短寿命衰变产物(到镭)的 γ 辐射总能量不超过平衡铀系元素 γ 辐射总能量的 1.5%。UX₁ 的 γ 辐射产额为 0.065 量子/衰变(对 64 千电子伏谱线)和 0.148 量子/衰变(对 93 千电子伏谱线)。

铀系的主要 γ 放射体是氡的短寿命衰变产物 RaB 和 RaC，其 γ 辐射谱所概括的能量在 188 和实际可达到 2445 千电子伏的范围内。虽然对平衡镭的 γ 辐射谱已研究 30 余年，但直到现在许多研究人员对每条谱线的量子产额评价还有差别。因此表 1.1 中列出了某些研究人员相互较为符合的

表 1.1 与其衰变产物平衡的镭的 γ 辐射谱

元 素	γ 量子能量 (千电子伏)	γ 量子产额/衰变		
		[13]	[14]	[15]
$^{88}\text{Ra}^{226}(\text{Ra})$	188	0.012	0.012	—
$^{82}\text{Pb}^{214}(\text{RaB})$	241	0.105	0.106	0.108
	285	0.052	—	—
	294	0.189	0.240	0.194
	350	0.377	0.435	0.388
	395—417	0.021	—	—
	450—465	0.020	—	—
	485—509	0.028	—	—
	535	0.009	—	—
$^{83}\text{Bi}^{214}(\text{RaC})$	609	0.471	0.443	0.483
	652	0.023	0.030	0.023
	661			
	703	0.008	0.016	0.008
	721	0.007	—	—
	740	0.004	—	—
	769	0.053	0.056	0.054
	787	0.012	0.013	0.012
	806	0.015	0.018	0.016
	821	0.009	0.008	0.009
	885	0.004	—	—
	935	0.033	0.040	0.033
	960	0.005	—	—
	1050	0.005	—	—
	1120	0.166	0.159	0.170
	1155	0.018	0.024	0.018
	1207	0.006	0.020	0.006
	1238	0.060	0.067	0.062
	1281	0.017	0.018	0.017
	1378	0.048	0.047	0.049
	1385—1438	0.040	0.046	0.040

续表

元 素	γ 量子能量 (千电子伏)	γ 量子产额/衰变		
		[13]	[14]	[15]
$_{83}\text{Bi}^{214}(\text{RaC})$	1509	0.022	0.033	0.023
	1541	0.008	—	0.008
	1583	0.011	0.013	0.011
	1605	0.004	0.004	0.004
	1668	0.010	0.006	0.011
	1728	0.024	0.019	0.024
	1764	0.163	0.149	0.168
	1784	—	0.032	—
	1791	—	0.009	—
	1848	0.020	0.014	0.021
	1862	0.008	0.015	0.008
	1900	0.004	0.009	0.004
	2017	0.001	0.003	~0.001
	2085	0.001	0.004	~0.001
	2117	0.014	0.015	0.014
	2204	0.052	0.054	0.054
	2292	0.004	0.004	0.004
	2410	0.002	—	~0.001
	2445	0.016	0.020	0.016
一次衰变的总 γ 量子数(不计镭的 γ 量子)		2.169	2.189	2.063

数据。

一次衰变的 γ 量子的总能量为 1.785 兆电子伏，其中 RaB 的 γ 辐射占 0.208 兆电子伏，RaC 的 γ 辐射占 1.572 兆电子伏。平衡镭谱中 γ 量子的平均能量为 0.86 兆电子伏。

在镭的 γ 辐射谱中还能区分出镭衰变产物的特征辐射。

在 75—88 千电子伏能区内，平衡镭特征辐射的总 γ 量

子产额大约为 0.2—0.3 量子/衰变。

在铀系元素的 γ 辐射谱中有能量为 0.185 兆电子伏的 U^{235} 的谱线。铀系元素衰变产物 (AcX—AcG) 的总 γ 辐射为铀衰变产物的 γ 量子数的 1.7%。该系元素 γ 辐射的最大能量为 870 千电子伏。

平衡钍的 γ 辐射谱较铀谱的研究为差。表 1.2 中列出了不同作者的数据，其量子产额的差别甚大。仅对能量为 2.62 兆电子伏谱线根据 ThC 的分支衰变可靠地确定了量子产额等于 1 量子/衰变。通常采用的分支系数等于 0.337。根据对 2.62 兆电子伏谱线的比确定其它谱线的量子产额。

钍系中的 γ 辐射实际上仅与 $MsTh_2$ 和钍射气的衰变产物有关。根据热量测量数据，衰变作用的 γ 辐射能量为 2.594 兆电子伏，其中 $RdTh$ 的衰变产物的 γ 辐射占 1.662 兆电子伏。钍系元素所放出的 γ 量子的平均能量等于 1.19 兆电子伏。

在钍系 γ 辐射谱中还有 $MsTh_1$ ，ThB 和 ThC 的特征辐射，其能量在 75—88 千电子伏区内。根据某些估计^[18]，特征辐射的量子产额等于 0.305 量子/衰变。铀系和钍系元素的 γ 辐射之间的比在数量上可通过钍的铀当量表示。所谓铀当量，即按 γ 辐射相当于单位平衡钍的平衡铀数量。以类似的方法也可以确定铀的钍当量。显然，钍的铀当量在数值上等于相同数量的平衡钍和铀的 γ 辐射的比值。

γ 辐射既可用 γ 量子的总能量或总通量来表征，也可用一定能区内 γ 量子的能量或通量来表征。相应地可分为钍对铀的 γ 量子能量当量、量子通量当量等。对于原始辐射而言，钍的能量铀当量等于 0.45， γ 量子通量当量为 0.31。

在放射性勘探中，钍的铀当量，通常是根据钍和铀含量相同的矿石的 γ 辐射所造成的脉冲计数率比值确定的。在此

种情况下，当量与探测器的效率有关。当铀系和钍系元素的 γ 辐射谱在一个窄能区内实际相同时， 钍的铀当量与探测器的效率无关。

表 1.2 钍系元素的 γ 辐射谱

元 素	能 量 (千电子伏)	γ 量子产额/衰变			
		[16]	[17]	[18]	[19]
$^{228}\text{Ac}(\text{MsTh}_2)$	184	0.010	0.021	—	—
	338	0.125	0.090	0.090	—
	410	0.011	0.040	0.040	—
	462	0.020	0.030	0.030	—
	911	0.243	0.250	0.246	—
	969	0.133	0.200	0.197	—
	1587	0.120	—	0.118	—
	1640	0.065	—	0.197	—
$^{228}\text{Th}(\text{RdTh})$	89	0.016	—	—	—
	137	0.0026	—	—	—
	169	0.0009	—	—	—
	212	0.0027	—	—	—
$^{224}\text{Ra}(\text{ThX})$	241	—	—	—	0.047
$^{212}\text{PbThB}$	238	0.380	0.441	0.300	0.440
	300	0.038	0.040	0.034	0.034
$^{212}\text{Bi}(\text{ThC})\rightarrow\text{ThC}'$	727	0.068	0.084	0.046	0.062
	785	—	—	—	0.009
	893	—	—	—	0.003
	953	—	—	—	≤ 0.003
	1074	—	—	—	0.006
	1350	—	0.033	0.026	≤ 0.001
	1513	—	—	—	≤ 0.003
	1620	0.049	0.047	0.046	0.016
	1800	0.031	0.047	0.046	≤ 0.002
	2200	—	0.017	0.013	0.011
$^{212}\text{Bi}(\text{ThC})\rightarrow\text{ThC}''$	287	—	—	—	0.003

续表

元 素	能 量 (千电子伏)	γ 量子产额/衰变			
		[16]	[17]	[18]	[19]
$_{83}\text{Bi}^{212}(\text{ThC}) \rightarrow \text{ThC}^{\circ}$	328	—	—	—	0.001
	452	—	—	—	0.001
$_{81}\text{Tl}^{208}(\text{ThC}^{\circ}) \rightarrow \text{ThD}$	252	—	—	—	0.005
	277	0.030	0.035	0.030	0.023
	511	0.074	0.030	0.073	0.078
	583	0.270	0.270	0.265	0.291
	763	—	—	—	0.006
	860	0.050	0.050	0.053	0.037
	2620	0.337	0.337	0.337	0.337
一次衰变的总 γ 量子数		2.046	2.062	2.187	2.168*

* $\text{MsTh}_2, \text{RdTh}$ 和 ThX 按文献[16], ThB, ThC 和 ThC° 按文献[19]。

1.3. 均匀无限辐射-吸收介质伽玛辐射的计算谱

对放射源均匀分布的均匀无限辐射-吸收介质的 γ 辐射谱的理论计算, 以 γ 辐射的多次散射理论为基础^[20-22]。

在放射源均匀分布的介质中散射的 γ 辐射的空间-角分布用玻耳兹曼辐射迁移方程式表示。该方程式有不同的近似解法。 $\Gamma. M.$ 沃斯科博依尼科夫^[23]、 Ю. П. 柳巴文 等^[24]对天然放射性元素均匀分布的无限介质进行了计算。这些计算是针对简单成分的岩石根据 γ 辐射的主要成分完成的。计算误差不超过 15%。

对无限介质的 γ 辐射谱进行理论分析之所以必要, 是为了弄清形成谱的一般规律并查明谱与原始 γ 辐射的能量和介质成分的关系。对于这些目的来说, 已达到的能谱的理论分析精度完全能满足要求。

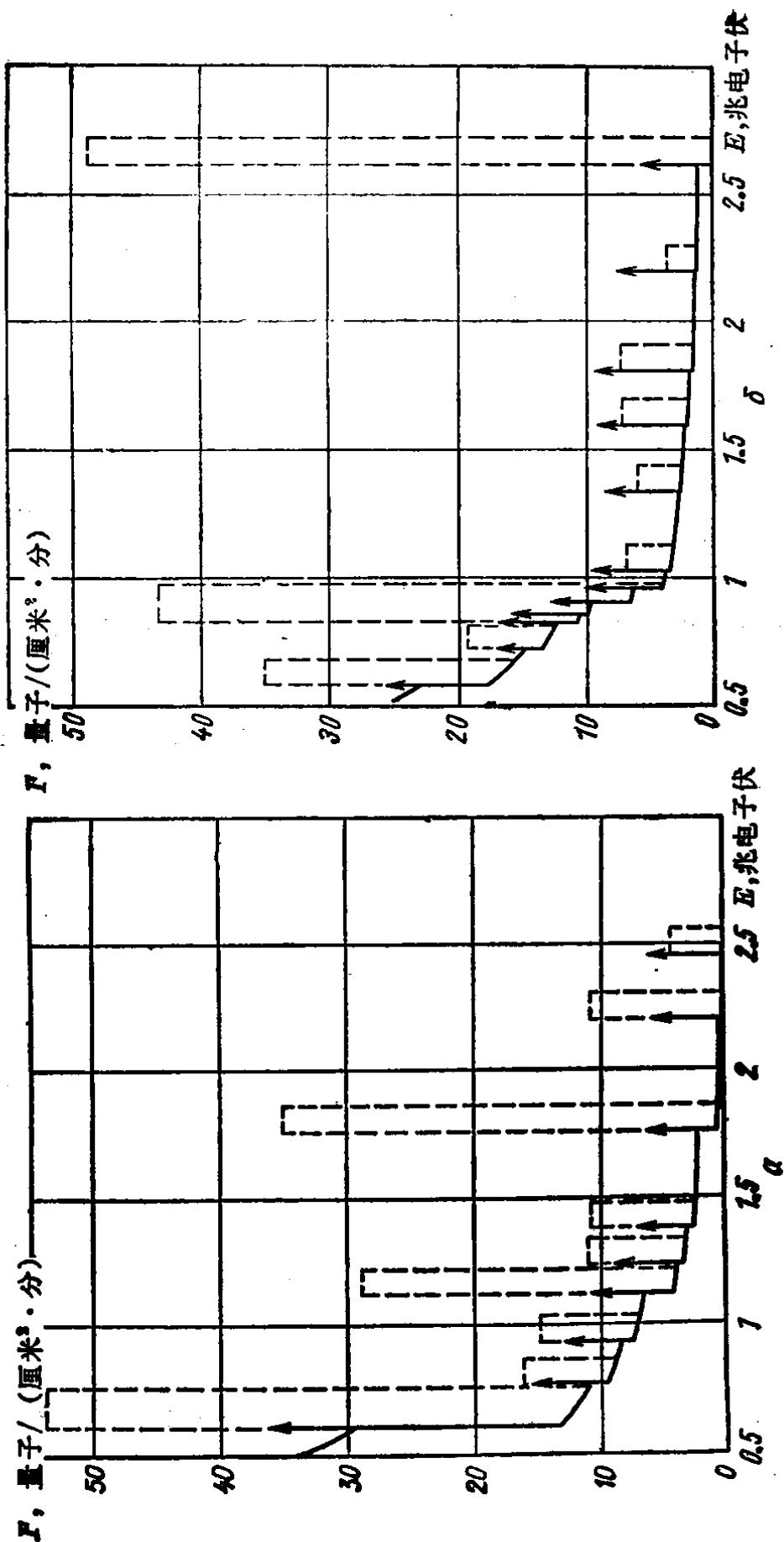


图 1.2 无限介质(花岗岩)的硬 γ 辐射谱

α ——平衡铀含量为 $1 \times 10^{-4}\%$; δ ——平衡钍含量为 $2.3 \times 10^{-4}\%$ 。四条谱线的 γ 量子通量密度在 $0.8-0.9$ 兆电子伏能区联在一起。实线——散射 γ 辐射通量密度。按比例尺表示的虚线梯形面积等于单能辐射的 γ 量子通量密度。