

653167

国际原子能机构技术报告丛书 第212号



铀矿测井方法

YOUKUANG CEJING FANGFA

原子能出版社

封面设计：李松林

统一书号：15175·861 定价：2.60元

ISBN 7-5022-0007-X/TD·2



国际原子能机构
技术报告丛书第212号

铀矿测井方法

于铭强 周镭庭 译

朱文泉 校

原子能出版社

内 容 简 介

本书是国际原子能机构组织美、加、澳等国专家编写的。书中全面地编述了铀矿勘探中所使用的各种测井方法及测井仪器，其中包括所有的放射性测井方法及一般矿产勘探的多种常规测井方法。文中较详尽地阐述了铀矿测井的数据解释，并给出了各种解释和计算实例。本书的内容对发展中国家和工业化国家的铀矿勘探机构和人员，均有非常实用的参考价值。这是迄今为止最系统和最全面的铀矿测井文献。

本书是铀矿物探人员不可缺少的参考书，对其他地球物理勘探工作者和高等院校有关专业师生也有较大参考价值。

Borehole Logging for Uranium Exploration: A Manual

Technical Reports Series No. 212 IAEA 1982

国际原子能机构技术报告丛书第212号

铀矿测井方法

于铭强 周镭庭 译

朱文泉 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092^{1/32}·印张10.25·字数 227千字

1988年4月北京第一版·1988年4月北京第一次印刷

印数1—600

统一书号：15175·861 定价：2.60元

ISBN 7-5022-0007-X/TD·2

目 录

1. 引言	1
1.1. 测井工作如何适应铀矿勘探计划的要求	2
1.2. 天然放射性	5
2. 钻孔: 它的特点及影响	20
3. 测井方法	32
3.1. 普通测井方法	32
3.1.1 总计数率 γ 测井	33
3.1.2 γ 能谱测井	63
3.1.3 中子测井	82
3.1.4 电阻、电阻率和电导率测井	93
3.1.5 自然电位测井	129
3.1.6 井径测量	154
3.1.7 钻井测斜	157
3.2. 其它测井方法	169
3.2.1 中子活化测井	169
3.2.2 密度测量	173
3.2.3 声波测井	190
3.2.4 激发极化测井	198
3.2.5 磁化率测井	208
3.2.6 地层倾角测量	210
3.2.7 泥浆测井	214
3.2.8 石油测井和石油测井设备的利用	216
4. 仪器	218
4.1 基本仪器系统	218
4.2 先进仪器系统	235

4.3 放射性测量数据的统计处理.....	241
5. 野外工作方法.....	243
6. 测井解释.....	262
6.1 勘探工作的指导思想.....	262
6.2 测井资料的解释.....	263
附录A: 总计数率 γ 测井的标定方法.....	285
附录B: 总计数率 γ 测井的死时间测定方法.....	293
附录C: 总计数率 γ 测井的修正系数.....	298
附录D: 单位.....	305
主要参考文献.....	310

1. 引 言

在国际原子能机构1976年出版的报告*中概括地指出了铀矿勘探中测井工作的重要性：“测井能快速和经济地向勘探地质人员提供所需要的大多数深部信息，其中包括就地取样和分析、岩性划分、地层对比等资料。较为复杂的测井计划还要测量岩石物理参数，如密度以及湿度或划分不同类型的地质建造等。由于可以利用成本较低的无岩心钻孔或以前为其它目的所打的钻孔进行测井来获得所需的资料，因此测井工作可大大地降低钻探费用。一般说来，与常规的岩心或钻屑地质编录和取样分析工作相比，测井能提供更有代表性、更为客观的资料，同时也就又快又省。”

在字典中，“Log”一词被定义为“进程的记录，如船速记录”。**钻孔测井是对一种或多种物理测量值随钻孔深度而变化的记录。借助电缆把各种探测器、探头或带有其它传感器的下井仪器放入孔中，便可进行测井记录。例如可包括电测井、核子测井、声波测井和温度测量等。在铀矿勘探中

* 指国际原子能机构1976年出版的“铀矿勘探中放射性测量结果的表示方法及仪器的校正”；该文已收编在1982年中国原子能出版社出版的“铀矿勘探放射性测量单位和仪器校正”一书中。——译者注

** Log或Logging原义是记录，在地质勘探中常译为“测井”，在另外一些情况下也可译为“记录”，其基本意义都是一种过程或进程的记录，所谓测井就是测量钻孔过程的记录。——译者注

测量某些参数特别有用。本书论述了铀矿勘探中最常用和有效的各种测井方法，包括介绍每种方法的物理基础、方法的应用及测井实例的分析。对将来可能更有用但目前尚不常用的方法仅作较简单评论。

最后介绍了各种测井系统（多参数系统），其中包括测井仪器、野外工作方法和某些特定地质环境的测井数据的解释。

1.1 测井工作如何适应铀 矿勘探计划的要求

1.1.1 测井阶段的划分

一个成功的勘探计划是由系统而连贯的，且各自能作出结论的各个工作阶段所组成。一般说来可包括以下阶段：

1.1.1.1 初步评价

本阶段要作出的基本结论是是否应进行找铀工作。要考虑的问题是选择可能对铀成矿有利的远景区（根据现有地质和物探资料选择）。此后应根据现有的地质认识对选出的有利区进行详细地质评价，以便缩小需要调查的面积。在此阶段常常采用航空照片进行地质解释。在选定的地区应进行野外地质检查和放射性测量检查，以便确定此区何处存在可能的含矿环境。

1.1.1.2 第一阶段的计划

在一项勘探计划的第一阶段，需要考虑分为几个步骤来完成。如果航空放射性测量、地面放射性测量和（或）地表化探效果好，则必须考虑进行这些测量。进行区域的或局部

的地质填图是很需要的。对地层钻探应仔细计划，并同时考虑地层钻孔的测井。所有上述工作都是为了寻找异常。地质评价和此后的后续工作将进一步完善和确定合理的工作顺序。

1.1.1.3 第二阶段的计划

在第二阶段，将详细研究第一阶段用放射性测量方法圈定的远景区。可以采用地质填图、地球化学评价（槽探、麻花钻和基岩的化探取样）、对异常远景区内的勘探或普查孔进行测井工作。可以采用岩矿鉴定和进行地面地球物理测量，以便进一步圈定远景区。

第二阶段应能确定是否存在铀矿化以及对发现的矿化是否有足够理由继续执行勘探计划。

1.1.1.4 第三阶段的计划

第三阶段是开发阶段的开始。在此阶段要对铀矿远景进行圈定钻探和测井，还要进一步完善所作出的详细地质解释、详细地进行地球化学测量、岩石学研究和初步的工程可行性研究。

如果在此阶段认为可能获得储量，则可继续进行第四阶段及以后阶段的计划。

1.1.1.5 第四阶段的计划

第四阶段是勘探计划开发阶段的主体。此阶段包括按足够密的网格进行详细地钻探和测井，网格密度满足矿石储量计算所要求的标准工程的规定。在该阶段还要对未来的矿区进行详细的工程研究。

很明显，在这种理想的勘探顺序中，在勘探计划的所有阶段都要采用测井方法。在踏勘性地层钻探中、在接着进行的普查性钻探中、在圈定矿体的钻探中以及为计算矿石储量

和工程研究而进行的详细钻探中都要采用测井方法。测井是搜集和处理工作区数据资料的主要技术。

1.1.2 测井应用的讨论

1.1.2.1 地层钻探

进行地层钻探的目的是确定工作区内是否存在有利的主岩层序。这种钻探通常在软岩石地区进行，但在结晶岩环境的钻探工作已日益引起人们的兴趣。总计数率 γ 测井、电阻率和SP测井均有助于确定地层钻孔中的沉积岩石特性。在结晶岩环境下，主要测井方法是 γ 能谱测井、密度测井、声波测井，可能还有中子测井。测井探头中有测量多种参数的探测器，通常都包括总计数率 γ 测量。许多探头都有探测 γ 射线的大块闪烁晶体，因此对放射性的微弱变化具有很高的灵敏度。利用这种放射性变化曲线以及电测井和其它测井曲线，可以区别岩石边界、岩性、岩石单元和可能存在的层不整合界面。

1.1.2.2 普查钻探

打普查孔的目的是直接向地球化学异常或放射性异常中钻进或者向异常下部钻进，以便打到异常的源体。利用 γ 测井结果是很重要的，因为在现场对任何可靠的 γ 测井数据加以计算，通常就能确定出当量 U_3O_8 的量。在此阶段对电测井曲线常常不够重视。但利用此种资料可获得很有价值的信息。电阻率测井曲线最适用于研究地质剖面。除了铀矿化完全受地层控制的情况外，铀矿化常常与碳质物质有关。这种碳质物质与围岩相比常具有较低的电阻率（在有石墨的情况下电阻率很低）。在此种条件下SP响应也可能有变化。

1.1.2.3 圈定钻探

假定前面的普查钻探是成功的，则应继续进行钻探，以便确定矿化范围和确定含矿地质环境的性质。每个孔的 γ 测井结果都应计算成当量 U_3O_8 的量。如果钻孔数量根据工程标准达到了足够的密度，而且对一个区段的铀矿含量进行了孔与孔的对比，那么便可估算出体积和大致计算出矿石量。如果相邻孔之间与矿化带相应的电测井曲线均相一致，则孔与孔之间对比的可信度能显著提高。如果孔与孔之间的电测井和 γ 测井响应有明显差别，则很可能是地质条件不一致或构造破坏造成的，在此种情况下不应随便地在孔与孔之间进行内插。在相邻孔中，两个看起来是相连接的地质断面可能并不连续。只有当测井的解释者对地质环境和有关岩石的 γ 场特征和电性特征有良好了解，才能可靠地判断相邻孔之间铀矿化的连续性。

1.1.2.4 为计算矿石储量而进行的详细钻探

在矿床开采之前进行最后阶段的钻探时，钻探网络的合理密度通常取决于工程的要求。实际的钻探网络间距取决于矿体的大小、含量变化幅度和将来采用的开采方法。钻探网络间距通常在5米和30米之间变化。通过测井可以获得大量数据，因此最好用计算机处理测井信息。

1.2 天然放射性

铀，92号元素，是天然放射性元素，常伴有另外两种元素——19号元素钾和90号元素钍。当利用 γ 辐射探测铀时，钾和钍有干扰作用，因此了解这些元素的特性是很重要的。

1.2.1 钾 (K)

钾是自然界中丰度较大的元素，在地壳中占2.6%。但放射性核素 ^{40}K 在天然钾中仅占很小一部分(0.0118%)。它仅放射一种能量为1.46MeV的 γ 射线。利用该特征能量可以用 γ 能谱仪鉴别和测量岩石中的钾。 ^{40}K 的半衰期为 1.3×10^9 年。某些岩石中的钾长石所放出的 γ 辐射有较高的强度，以致能干扰低含量铀 γ 辐射的测量。但钾的 γ 辐射常常对区分岩性有用(见表1.0)。

表1.0 不同物质的钾含量

物 质	钾 含 量	
	平 均	范 围
钾盐	54	
钾碱	44.9	
无水钾镁矾	20	
微斜长石	16	
钾盐镁矾	15.1	
光卤石	14.1	
正长石	14	
杂卤岩	12.9	
白云母	9.8	
黑云母	8.7	
伊利石	5.2	3.51—8.31
长石砂岩(砂岩)	4.6	4.4—5.1
正长石	4.53	
海绿石	4.5	3.2—5.8
花岗岩	4.0	2.0—6.0
苏长岩	3.3	
花岗闪长岩	2.90	
页岩	2.7	1.6—9.0

续表1.0

物 质	钾 含 量	
	平 均	范 围
火成岩	2.6	
杂砂岩 (砂岩)	1.8	1.2 1.2
闪长岩	1.66	
玄武岩	1.3	
砂岩	1.1	0—5.1
辉长岩	0.87	
辉绿岩	0.75	
高岭石	0.63	0—1.49
灰岩	0.27	0—0.71
蒙脱石	0.22	0—0.60
正石英岩 (砂岩)	0.08	0—0.12
白云石	0.07	0.03—0.1
纯橄榄岩	0.04	
海水	0.035	

注：表1.0 用于说明岩层钾含量对 γ 强度的影响。天然钾的 $\sim 0.012\%$ 为放射性钾（即 ^{40}K ），它在衰变时能放出 1.5MeV 的 γ 射线。页岩的 $\sim 20\%$ γ 射线是由同位素 ^{40}K 造成的，其余的辐射通常是由铀系和钍系元素引起的。砂岩平均含有约 12% 长石。甚至正石英岩砂岩也能含 10% 长石。“尽管任何类型的长石都可能存在于酸性长中石。但最常见的是含钾碱(正长石)的变种”(Pettijohn)。

1.2.2 铀 (U)

在铀矿探测时，有意义的 γ 辐射主要来自 ^{238}U 的衰变产物。另外一种天然铀同位素(^{235}U)仅占天然铀的 0.72% ，因此它的 γ 辐射是不太重要的，但它对 neutron 探测技术来说是有用的。 ^{238}U 的衰变由表1.1所示的一系列衰变所组成。衰变系列从长寿命母体 ^{238}U （半衰期 = 4.51×10^9 年）开始，

经过14次连续衰变之后变成最后的稳定产物 ^{206}Pb （铅，82号元素）。该系列的许多衰变都伴有 γ 射线，其能量对特定衰变核素来说是一定的（见图1.1）。不利的是， ^{238}U 本身在衰变时并不放射可被探测的 γ 辐射，因而无法利用它来测量铀含量。对探测铀矿有用的大多数 γ 辐射来自 ^{214}Pb 和 ^{214}Bi （铋，83号元素）的衰变，这两种元素是铀系的第8位和第9位子体产物。当利用 γ 辐射去测定铀时，应该记住这一重要的事实。必须了解该衰变系列中子体产物在自然界中的性状。如果确知子体产物（可以测量其辐射的）与母体

表1.1 铀-238衰变系列

（仅列出主要元素，贡献少于0.2%的衰变产物未列出）

铀-238	(4.51×10^9 年)
↓ α	
钍-234	(24.10天)
↓ β	
镤-234	(1.14分)
↓ β	
铀-234	(2.48×10^5 年)
↓ α	
钍-230	(8.0×10^4 年)
↓ α	
镭-226	(1622年)
↓ α	
氡-222	(2.825天)
↓ α	
钋-218	(3.05分)
↓ α	
铅-214	(26.8分)
↓ β	
铋-214	(19.7分)
↓ β	
钋-214	(1.50×10^{-4} 秒)
↓ α	
铅-210	(22年)
↓ β	
铋-210	(5.20天)
↓ β	
钋-210	(138天)
↓ α	
铅-206	(稳定)

^{238}U 之间的关系，那么就可以测定铀含量。有关这种“平衡”关系将在下面讨论。

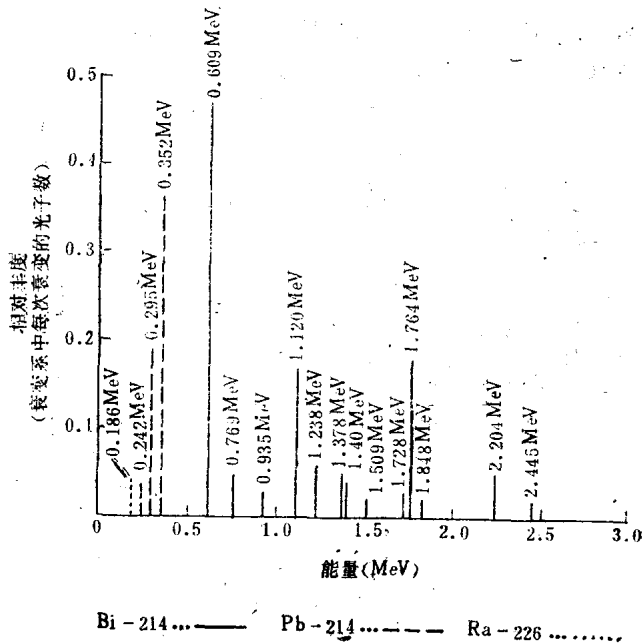


图1.1 铀系特征衰变能量

1.2.3 钍 (Th)

钍衰变系列的母体元素是 ^{232}Th (半衰期 = 1.39×10^{10} 年)，最终的稳定衰变产物是 ^{208}Pb (见表 1.2)。该系列的许多衰变产物都放射具有特征能量的 γ 射线 (图1.2)。与铀系一样，母体 ^{232}Th 本身并不放射 γ 辐射，因此不能利

用它的这种辐射来测定岩石的钍含量。对野外测量来说，最有用的 γ 放射体是该系列中的第9位衰变产物 ^{208}Tl （铊，81号元素）。钍衰变系列的任何子体衰变产物的最长半衰期都很短（与铀系的同种产物相比）。钍系中半衰期最长的是 ^{228}Ra （ ^{232}Th 例外），约为6年。

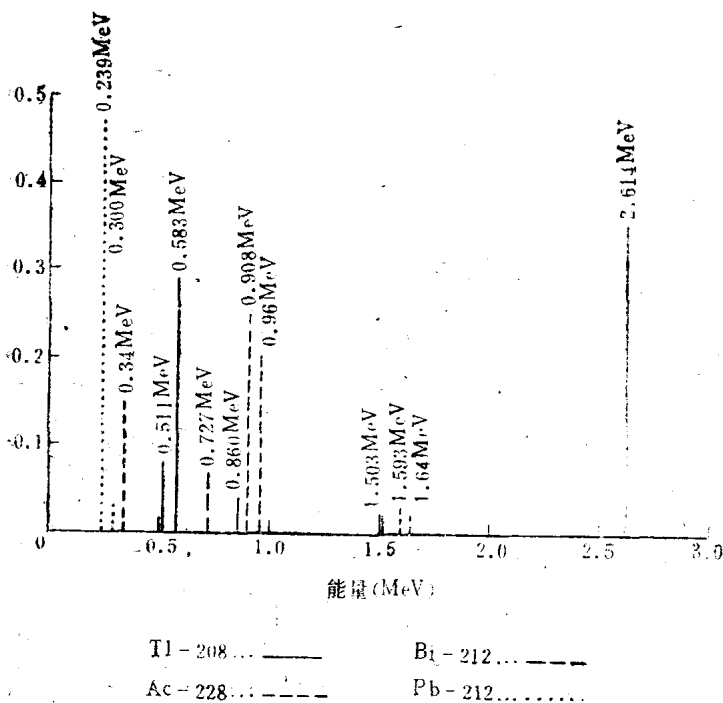
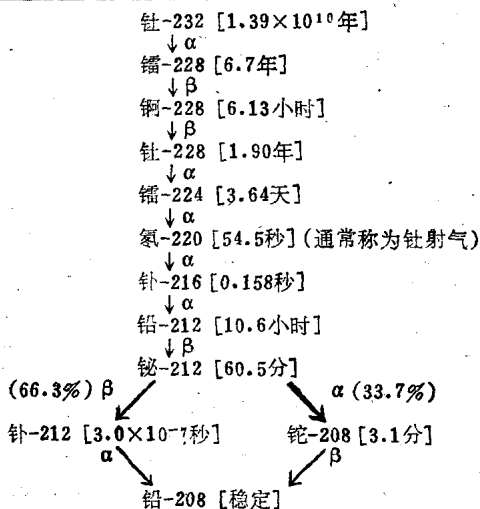


图1.2 钍系特征衰变能量

表1.2 钍衰变系列



1.2.4 放射性平衡

在所有γ测井中,放射性平衡与否是一项重要的考虑内容。铀系核素所放射的大部分γ辐射实际上不是来自铀本身,而来自于该系中的子体产物。

假定子体的量与母体的量直接相关,则可根据γ射线计数率求出母体的量。当放射性衰变系列处于平衡状态时,这种假定便是正确的。

当一个衰变系列(例如²³⁸U系)中产生的每一子体产物的原子数和它衰变掉的原子数相同时,便可称该系列处于平衡状态。当这种条件存在时,便可通过测量任何一个子体的辐射来确定该衰变系列母体元素的量。

问题是这种平衡状态的假定对于测定铀含量的地质物质来说是否是正确的。对大多数γ测井方法来说都假定是平衡