

735302

高等学校试用教材

铀矿物探 γ 场理论 计算和应用

卢 存 恒 著
赵 廷 业 主审

162

原子能出版社

高等学校试用教材

铀矿物探 γ 场理论 计算和应用

卢存恒 著

赵廷业 主审

张百义 审

原子能出版社

高等学校试用教材
铀矿物探γ场理论计算和应用
卢存恒 著 赵廷业 主审
张百义 审

原子能出版社出版
(北京2108信箱)
国防科工委印刷厂印刷
新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张8.375·字数179千字
1991年12月北京第一版·1991年12月北京第一次印刷
印数1—1000

ISBN7-5022-0375-3
TL·174(课) 定价: 2.30元

内 容 简 介

本书为高等学校勘查地球物理专业的选修课教材，也可供铀矿地质专业、核电子学及核技术应用专业学生参考。

本书提出了 u 、 v 、 w 函数，并应用这些函数进行了多种铀矿物探 γ 场的理论计算；制作了多种量板，并应用这些量板进行了多种 γ 异常解释；还进行了有关 γ 场的多种参数的计算和测定，研究了有关 γ 场的多种因素的影响和修正。

本书对从事各种 γ 测量工作的铀矿物探、煤田物探、石油物探和辐射防护人员也具有一定参考价值。

☆ ☆ ☆

本书由赵延业高级工程师主审，经铀矿地质教材委员会放射性物探课程组于87年4月由章晔教授主持召开的审稿会审定，同意作为高等学校试用教材。

序 言

本书作者以 γ 射线近似算法为理论基础, 采用了不同于国内外同类教科书和有关文献中的数学途径, 在铀矿物探 γ 场理论计算中提出了 u, v, w 函数求解方法, 阐述了各函数的数学表达式、基本性质及计算程序, 列出了常用函数表。这几个函数列入目前我国铀矿物探 γ 场理论计算中, 就其应用范围和计算的简便性而言, 较已发表的金格函数、 G 函数和 F 函数有一定的优越性。

在本书中, 除已发表的铀矿物探 γ 场理论计算公式外, 作者还提出了带状辐射体空间 γ 场、立式铅屏取样 γ 场和多种型式矿石模型 γ 场计算公式, 并应用上述诸函数给出各种计算公式 (包括原有的和新提出的) 的函数表达式。同时应用这些公式进行了各种 γ 测量的 γ 场计算, 制作了各种异常解释用量板, 探讨了诸如航空 γ 测量异常的带状反演问题, 航空及地面 γ 测量的地形影响问题, 不同条件下介质吸收系数的测定和计算问题, 不同类型矿石模型的饱和度计算问题, 以及 γ 测井反褶积分层解释中特征参数计算问题。对书中大部分理论计算数据, 作者还给出了同等条件下实测验证结果, 以检验理论计算的可信性。

本书作为勘查地球物理专业的选修课教材，可使学生加深对 γ 场正反演理论计算的理解、掌握运算方法和提高定量的应用能力。对野外物探工作者也是一本较适用的参考文献。本书不同于一般专业教材，其中大部分内容属作者教研、科研成果，具有专著性质。它从生产实践中提出问题，经过理论研究，又提出解决实际问题的答案，因此在许多方面具有实用价值。

核工业总公司地质局

赵廷业

一九八八年二月二十五日

目 录

第一章 γ 场理论计算物理基础

第一节 天然放射性核素的 γ 辐射	(1)
一、铀系($4n+2$) γ 辐射	(1)
二、钍系($4n+3$) γ 辐射	(4)
三、釷系($4n$) γ 辐射	(4)
四、鉀-40 γ 辐射	(6)
第二节 γ 场及其度量	(7)
第三节 γ 射线的主要特性	(8)
一、 γ 射线与物质的相互作用	(8)
二、原子截面	(10)
第四节 γ 射线的迁移	(10)
第五节 γ 射线照射量率计算	(13)
一、窄束 γ 射线的吸收系数	(13)
二、有效原子序数	(14)
三、窄束 γ 射线照射量率计算	(16)
四、宽束 γ 射线照射量率的近似计算	(16)

第二章 γ 场理论计算数学基础

第一节 几个 γ 场函数表达式的建立	(20)
一、函数的提出	(20)
二、各函数的取值范围和性质	(23)

三、各函数函数值的计算	(25)
第二节 u 、 v 、 w 函数及与原有 γ 场函数间关系	(26)
一、 u 函数与金格函数及 F 函数间关系	(26)
二、 u 函数与 G 函数间关系	(27)
三、 v 函数与 u 函数、金格函数间关系	(29)
四、 w 函数与 u 、 v 及金格函数间关系	(30)
第三节 体源 γ 场计算的球坐标积分表达通式和各体源 γ 场的球坐标积分表达式	(31)
一、体源 γ 场计算的球坐标积分表达通式	(31)
二、不同体源 γ 场的球坐标表达式	(32)

第三章 航空 γ 测量

第一节 航测 γ 场计算	(38)
一、锥台型辐射体空中 γ 照射量率计算	(38)
二、楔形辐射体空中 γ 照射量率计算	(42)
第二节 标定航测仪用矿石模型饱和度计算	(48)
一、直三角柱模型的饱和度	(48)
二、长方柱模型的饱和度	(50)
三、正六角柱模型的饱和度	(50)
四、组合模型的饱和度	(51)
五、互换原理的验证和利用	(51)
第三节 航测 γ 异常地形影响修正	(54)
第四节 航测 γ 异常的地面反演	(59)
一、反演种类及其对比选择	(59)
二、辐射体边界的确定	(61)
三、辐射体地面 γ 照射量率及含量的计算	(65)
四、反演实例	(68)

五、测线与辐射体走向斜交时异常的地面反演	(75)
六、矩形反演有关问题	(77)

第四章 地面 γ 测量

第一节 地面测量 γ 场计算	(81)
一、锥台辐射体	(81)
二、带状辐射体	(82)
第二节 地形影响的消除	(88)
一、地形影响修正方法	(88)
二、验证情况	(89)
三、测区修正	(93)
第三节 地面辐射仪标定用矿石模型饱和度计算	(97)
一、点源和体源标定辐射仪的对比	(97)
二、地面矿石模型饱和度计算	(98)
三、圆柱模型对正常场 γ 照射量率的减弱	(100)
四、质量有效吸收系数的测定	(101)
第四节 地面 γ 测量量值的统一	(104)
一、点源和体源标定仪器的统一	(104)
二、不同规格体源的统一	(105)
三、消除模型湿度影响的统一	(106)
四、消除模型正常场影响的统一	(106)

第五章 γ 测 井

第一节 测井 γ 场计算	(107)
一、辐射层边界 γ 照射量率	(107)
二、井轴上任一点 γ 照射量率	(108)
三、探测器的非点状影响	(109)

第二节	异常解释的依据和方法	(110)
一、	分界情况的判别及相遇角 θ 的确定	(110)
二、	确定辐射层边界	(115)
三、	确定辐射层含量	(122)
第三节	γ 测井的换算系数	(126)
一、	质量有效吸收系数的测定	(126)
二、	换算系数的计算和实测	(128)
第四节	辐射层与围岩密度不同条件下的 γ 场计算	(129)
第五节	井液和套管吸收修正	(133)
一、	探管靠井壁时井液、套管平均吸收厚度	(133)
二、	水、铁质量有效吸收系数的测定	(135)
三、	理论计算与实测结果对比	(137)
第六节	氡气扩散对 γ 测井结果的影响	(139)
一、	放射性水和Rn的影响及消除	(139)
二、	干孔内射气扩散的修正	(141)

第六章 γ 能谱测井

第一节	测井条件下天然 γ 场的能量分布	(145)
第二节	不同谱段的质量有效吸收系数	(147)
第三节	各能谱段井液和套管吸收修正	(148)
第四节	γ 测井用矿石模型饱和度计算	(154)
一、	空心圆柱模型的饱和度	(154)
二、	方模型的饱和度	(155)
三、	测井模型饱和度计算的实试验证	(157)

第七章 γ 取 样

第一节	取样条件下 γ 场计算	(159)
-----	--------------------	-------

一、卧式铅屏取样 γ 场	(159)
二、立式铅屏取样 γ 场	(162)
第二节 定向 γ 取样	(164)
一、定向 γ 取样原理	(164)
二、定向辐射仪的调整	(166)
三、定向辐射仪的标定和使用	(169)
四、定向取样 γ 场	(170)
第三节 γ 取样的换算系数	(177)
一、质量有效吸收系数的测定	(177)
二、换算系数的计算	(178)
第四节 氦气扩散对 γ 取样测量结果的影响	(182)
一、平板法测定射气扩散修正系数原理	(182)
二、平板法和炮孔法所测射气扩散修正系数的对比和 应用	(185)
三、孔隙氦对 α_{sp} 测定的影响	(185)
第五节 有关分层 γ 取样问题	(187)
第六节 其它辐射取样中存在的某些问题	(188)
一、炮孔 γ 取样异常解释中缺失面积问题	(188)
二、 β - γ 综合取样的分层加权问题	(190)
三、 γ 能谱取样的分层取样问题	(191)

第八章 γ 测井分层解释理论

第一节 γ 测井分层解释的基本概念	(193)
第二节 逐次迭代法分层解释原理	(195)
第三节 逆矩阵法分层解释原理	(196)
第四节 形态系数与钻孔环境诸参数的关系	(198)
一、形态系数与单元层饱和度的关系	(198)

二、形态系数的确定	(199)
三、不同钻孔环境下的形态系数值	(200)
四、理论计算与实测形态系数值的对比	(206)
第五节 反褶积分层解释原理	(206)
一、微分式的建立	(207)
二、积分式的反褶积解	(208)
第六节 反褶积特征参数 α 与钻孔环境诸参数的关系	(211)
一、 α 的适度计算	(211)
二、 α 适度值的理论计算	(214)
三、根据实测曲线确定 α 适度值	(215)
四、理论计算 α 适度值的实测验证	(216)
第七节 应用实测 α 值估算矿层与井轴相遇角	(217)
第八节 三种分层解释方法解释结果的实例对比.....	(218)
一、用迭代法求含量	(219)
二、用逆矩阵法求含量	(222)
三、用反褶积法求含量	(224)
参考文献	(227)
附程序1~3	(228)
附表1~12.....	(232)

第一章 γ 场理论计算物理基础

第一节 天然放射性核素的 γ 辐射

某些放射性核素在进行 α 和 β 衰变时，原子核从激发态通过放射 γ 光子跃迁到较低能态形成 γ 辐射。由于 γ 光子的穿透能力比 α 和 β 粒子大得多，所以探测天然放射性核素的 γ 辐射，进行各种 γ 测量，就成为勘查铀矿的主要手段。了解天然放射性核素的 γ 辐射是研究铀矿物探 γ 场的基础。

在自然界中能形成 γ 辐射的天然放射性核素主要有三个天然放射系和 ^{40}K 。

一、铀系($4n+2$) γ 辐射

铀系的母核为 ^{238}U ，系内核素原子核的质量数按 $4n+2$ 排列，各核素 γ 辐射情况如表1-1所示。表中列出了各核素放射的0.5MeV（野外常用 γ 总量测量辐射仪的甄别阈）以上的 γ 光子能量 E 和每次衰变放射的 γ 光子数 n ，以及每次衰变放出的 γ 光子的总能量 nE ，还计算了每一核素、铀组和镭组，以及整个铀系的 n 和 nE 值。

由表1-1可以算出，在铀系中，铀组每次衰变产生的 γ 光子数 n （铀）占整个系列总 γ 光子数 n （总）的12.3%， γ 光子能量 nE （铀）仅占总 γ 光子能量 nE （总）的1.7%；而 n （镭）则占 n （总）的87.7%， nE （镭）则占 nE （总）的98.3%。所以， γ 测量主要测的是镭组 γ 射线，铀组 γ 射线也有一定影响。这

表1-1 铀系 γ 射线谱
(基本数据据核素图表编写组, 1977)

核 素	E (MeV)	n	nE (MeV)	核 素	E (MeV)	n	nE (MeV)
UX ₁	0.063	0.126	0.00794	RaB	0.275	0.007	0.00193
	0.092	0.070	0.00644		0.295	0.190	0.05605
	0.093	0.078	0.00725		0.305	0.003	0.00092
	0.115	0.009	0.00104		0.314	0.008	0.00251
	0.136	0.001	0.00014		0.352	0.360	0.12672
	0.155	0.001	0.00016		0.462	0.002	0.00092
	0.167	0.001	0.00017		0.481	0.003	0.00144
	Σ	0.286	0.02314		0.487	0.003	0.00146
UX ₂	0.743	0.001	0.00074		0.534	0.002	0.00107
	0.766	0.002	0.00153		0.544	0.001	0.00054
	1.000	0.006	0.00600		0.580	0.904	0.00232
	Σ	0.009	0.00827		0.768	0.001	0.00077
U II	0.053	0.007	0.00037		0.786	0.009	0.00707
	0.121	0.002	0.00024		0.904	0.006	0.00542
	Σ	0.009	0.00061		Σ	0.705	0.2308
I ₀	0.068	0.006	0.00041	RaC	0.273	0.053	0.01447
	0.142	0.001	0.00014		0.395	0.012	0.00474
	Σ	0.007	0.00055		0.450	0.010	0.00450
铀 组	Σ	0.311	0.0326		0.500	0.012	0.00600
Ra	0.186	0.040	0.00744		0.607	0.470	0.28529
Rn	0.510	0.001	0.00051		0.652	0.004	0.00261
RaB	0.053	0.022	0.00117		0.666	0.020	0.01332
	0.242	0.076	0.01839		0.703	0.008	0.00562
	0.259	0.008	0.00207		0.721	0.007	0.00505
					0.769	0.050	0.03845
					0.787	0.012	0.00944
					0.806	0.015	0.01209

续表

核 素	E (MeV)	n	nE (MeV)	核 素	E (MeV)	n	nE (MeV)
RaC	0.837	0.008	0.00670	RaC	1.728	0.030	0.05184
	0.874	0.004	0.00350		1.764	0.170	0.29988
	0.935	0.003	0.00281		1.784	0.030	0.05352
	0.960	0.005	0.00480		1.790	0.008	0.01432
	1.050	0.005	0.00525		1.836	0.003	0.00551
	1.120	0.170	0.19040		1.848	0.020	0.03696
	1.155	0.018	0.02079		1.877	0.002	0.00375
	1.207	0.006	0.00724		1.897	0.003	0.00569
	1.238	0.060	0.07428		2.017	0.001	0.00202
	1.281	0.017	0.02178		2.117	0.010	0.02117
	1.379	0.050	0.06895		2.204	0.050	0.11020
	1.402	0.017	0.02383		2.234	0.008	0.01787
	1.408	0.025	0.03520		2.293	0.004	0.00917
	1.438	0.002	0.00228		2.340	0.002	0.00468
	1.509	0.002	0.00302		2.405	0.002	0.00481
	1.541	0.008	0.01233		2.435	0.020	0.04870
	1.583	0.009	0.01425		Σ	1.465	1.6226
	1.600	0.006	0.00960	镭 组	Σ	2.211	1.8614
	1.661	0.012	0.01993		Σ	2.522	1.8940
1.681	0.002	0.00336		铀 系			

种影响既和 nE (铀)、 nE (镭) 的大小, 又与 n (铀)、 n (镭) 的多少有关。铀组 γ 射线对不同类型的辐射仪的影响不同, 探头用薄铝壳封装的 γ 总量辐射仪, 铀组和镭组 γ 照射量率比可达 10%; 探头带有一定屏蔽层的 γ 总量辐射仪, 此比值约降低为 2~3%; 各种 γ 能谱测量用辐射仪, 一般各能谱道谱段能量选在 1MeV 以上时, 铀组 γ 射线影响可以忽略。

铀系中的主要 γ 辐射体是 Rn 的短寿衰变产物 RaB 和

RaC。由表1-1也可以算出，RaB的 nE 占 nE (总)的12.2%，RaC的 nE 占 nE (总)的85.7%。对于能谱测量，由于谱段能量高，能谱仪所接收的 γ 光子几乎全部是由RaC所产生的。

二、铀系($4n+3$) γ 辐射

铀系的母核为 ^{235}U ，也称铀系，系内核素原子核质量数按 $4n+3$ 排列。根据按照表1-1类似的计算，铀系每次衰变产生的 γ 光子数 n (总)为1.58个， γ 光子总能量 nE (总)为0.369MeV。在天然铀中 ^{235}U 和 ^{238}U 具有恒定的质量比(0.722%)。又根据衰变律可以算出，在铀系每次衰变的时间内，铀系可产生6.3次衰变。则按表1-1所列数据，可以算出在天然混合物中，在同一时间里，铀系产生 γ 光子的数量只占铀系产生 γ 光子数量的2.85%($=1.58 \times 0.722\% \times 6.3 / 2.522$)；铀系产生 γ 光子的能量只占铀系产生 γ 光子能量的0.89%($=0.369 \times 0.722\% \times 6.3 / 1.894$)。因此，对 γ 测量来说，一般不考虑铀系影响。此处也不再表列铀系各核素的 γ 射线谱。

三、钍系($4n$) γ 辐射

钍系的母核为 ^{232}Th ，系内核素原子核质量数按 $4n$ 排列。表1-2列出了0.05MeV以上的钍系各核素 γ 辐射的 E 和 n ，以及 nE 值。由表1-2可以看出，钍系每次衰变产生的 γ 光子的数量为2.431，能量为2.1861。这些值与表1-1所列铀系的相应值2.522和1.8940是相差不多的。 ^{232}Th 的衰变率虽然比 ^{238}U 的衰变率小，但 ^{232}Th 在岩石中的正常含量一般比 ^{238}U 的正常

表1-2 钍系 γ 射线谱

(基本数据据核素图表编写组, 1977)

核素	E (MeV)	n	nE (MeV)	核素	E (MeV)	n	nE (MeV)
MsTh II	0.100	0.012	0.00120	MsTh II	1.486	0.009	0.01346
	0.129	0.025	0.00323		1.502	0.005	0.00751
	0.154	0.009	0.00139		1.557	0.002	0.00311
	0.200	0.003	0.00060		1.580	0.006	0.00948
	0.209	0.039	0.00815		1.588	0.032	0.05082
	0.270	0.032	0.00864		1.625	0.003	0.00488
	0.279	0.002	0.00056		1.630	0.017	0.02771
	0.322	0.080	0.02576		1.638	0.005	0.00819
	0.328	0.029	0.00951		1.666	0.002	0.00333
	0.332	0.004	0.00133		1.887	0.001	0.00189
	0.409	0.019	0.00777		Σ	0.953	0.7447
	0.463	0.040	0.01852	RdTh	0.084	0.012	0.00101
	0.478	0.002	0.00096		0.132	0.001	0.00013
	0.510	0.004	0.00204		0.166	0.001	0.00017
	0.562	0.009	0.00506		0.216	0.003	0.00065
	0.727	0.007	0.00509		Σ	0.017	0.0020
	0.755	0.010	0.00755	ThX	0.241	0.037	0.00892
	0.722	0.014	0.01081	Th	0.550	0.001	0.00055
	0.782	0.005	0.00391	ThB	0.115	0.006	0.00069
	0.795	0.042	0.03339		0.177	0.001	0.00018
	0.840	0.009	0.00756		0.239	0.431	0.10301
	0.904	0.008	0.00723		0.300	0.033	0.00990
	0.911	0.250	0.22775		Σ	0.471	0.1138
	0.959	0.003	0.00288	ThC	0.288	0.003	0.00086
	0.965	0.047	0.04536		0.328	0.001	0.00033
	0.969	0.150	0.14535				
	1.111	0.003	0.00333				
	1.247	0.005	0.00624				
	1.459	0.009	0.01313				