

核测井原理及应用

周四春 刘晓辉 王广西 杨 强 编著

中国原子能出版社

核测井原理及应用

周四春 刘晓辉 王广西 杨强 编著



中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核测井原理及应用 / 周四春等编著. —北京:中国原子能出版社,2016.10
ISBN 978-7-5022-6380-5

I. ①核… II. ①周… III. ①核测井 IV. ①P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 216214 号

内 容 简 介

本书是成都理工大学国家特色专业“核工程与核技术”的配套系列教材之一。全书共分 7 章,包括自然伽马测井、自然伽马能谱测井、伽马-伽马测井、X 射线荧光测井、中子测井的核物理基础、中子测井、其他核测井方法简介(中子活化测井、中子寿命测井、铀矿裂变中子测井、地球化学测井、核磁共振测井)等内容。

本书不仅适合于作为开设本科核测井课程的教材,对从事核测井工作的技术人员也有参考价值。

核测井原理及应用

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 左浚茹
装帧设计 崔 彤
责任印刷 潘玉玲
印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 15.25
字 数 381 千字
版 次 2016 年 10 月第 1 版 2016 年 10 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-6380-5 定 价 60.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

发行电话: 010-68452845

E-mail: atomep123@126.com

版权所有 侵权必究

前 言

核测井与电测井、声测井并称“三大测井”，是矿产资源勘查，特别是能源矿产勘查的重要手段之一。

在石油勘探中，核测井是最为重要的勘探手段之一，而油气田则是各种核测井方法应用最为普遍的领域。自然伽马、伽马能谱、密度、中子等核测井方法，已经是每口石油钻孔必须开展的测井方法。国家规定，一口石油钻孔，如果没有前述核测井的资料是不能验收的。

在煤田勘探中，自然伽马、密度、选择伽马-伽马等核测井方法，已经是业界公认的经典方法。

在铀矿勘探中，核测井更是当然的主角。对目前国家主攻的砂岩铀矿来说，核测井不仅在勘查阶段是必不可少的测井手段，在（地浸）开采阶段更是最为主要的可以指挥、评价开采作业的技术方法。

在金属矿产勘查中，核测井中的 X 荧光测井具有无可比拟的优越性，通过测井可以提供众多金属矿产的评价资料。在苏联时期，其下属的各加盟共和国就已经在 Sn、Au、Pb、Zn、Sr 等众多种金属矿产勘查中广泛应用 X 荧光测井方法。在东欧、美国、澳大利亚等地区与国家，X 荧光测井也得到广泛应用。

除此而外，在其他矿产勘查，以及工程地质工作中，核测井也能不同程度地发挥作用。

为了满足我国能源矿产勘查以及相关地质工作的需求，在国家特色专业建设项目的支持下，作为四川省质量工程建设的规划教材，我们为我校核工程与核技术专业（放射性物探方向）编写了这本《核测井原理及应用》教材。

这本教材主要面向固体矿产勘探，特别是铀矿勘探，但也考虑到兼顾油气勘探的需要。全书分为 7 章，较为系统地讨论了目前国内外地质勘查中主要开展的自然伽马测井、伽马能谱测井、密度测井、选择伽马-伽马测井、岩性密度测井、X 荧光测井、中子-中子测井的原理与测井方法。对一些特殊的测井技术和新测

井方法,如铀矿瞬发与缓发裂变中子测井、地球化学测井等,教材也给予了简单介绍,力求对核测井有一全貌式的讲述。可供40~50个学时的核测井课程教学之用。

教材由周四春、王广西、杨强和刘晓辉共同编写,其中,周四春编写前言、绪论、第1、第3章,以及第7章7.4节;王广西编写第2章,以及第7章7.1、7.2与7.3节;杨强编写第4章,以及第7章7.5与7.6节;刘晓辉编写第5、第6章。初稿完成后,由周四春进行统筹并定稿。

作为编写本教材的作者,曾经在20世纪90年代为当时我校的放射性物探本科专业讲授过多次核测井课程,为此,当时的核工业部曾在1999年将《核测井原理及应用》列入核工业部部级规划教材编写规划。只是由于后来国家撤销了核工业部,《核测井原理及应用》失去资助而未能最终正式出版。今天,作者在原来的讲稿的基础上,补充最新收集的资料后编写成现在的这本教材,也算完成了一件十分有意义的工作。

需要指出,限于编著者的水平,本教材错、谬之处肯定在所难免,恳请读者提出批评意见。

编著者

2014年初夏

目 录

绪 论	(1)
第 1 章 自然伽马测井	(5)
1.1 岩石的放射性	(5)
1.1.1 岩石中的放射性核素	(5)
1.1.2 放射性核素在岩石中的分布	(8)
1.2 自然伽马测井曲线与伽马测井仪工作原理	(10)
1.2.1 无限均匀介质中任一点的自然伽马照射量率	(11)
1.2.2 无限均匀放射性地层中沿井轴的伽马场	(11)
1.2.3 水平放射性地层中心点的伽马照射量率	(13)
1.2.4 有限厚放射性地层伽马射线沿井轴的分布	(15)
1.2.5 倾斜辐射体的 γ 照射量率	(17)
1.2.6 伽马射线测井仪工作原理	(17)
1.3 伽马测井(GR)的影响因素及其校正	(18)
1.4 自然伽马测井仪的刻度	(23)
1.4.1 铀矿勘探中的总量伽马测井仪的刻度方法	(24)
1.4.2 非铀矿勘探中总量伽马测井仪的刻度方法	(25)
1.5 铀矿勘查中自然伽马测井资料的解释	(26)
1.5.1 反褶积分层解释法	(26)
1.5.2 平均含量解释法	(31)
1.6 自然伽马测井的其他应用	(33)
复习与思考题	(38)
第 2 章 自然伽马能谱测井	(40)
2.1 自然伽马能谱测井原理	(40)
2.1.1 自然伽马能谱	(40)
2.1.2 自然伽马能谱测井仪测量原理	(43)
2.1.3 自然伽马能谱的解析	(45)
2.2 自然伽马能谱测井仪器刻度	(49)
2.3 自然伽马能谱测井的应用	(50)
2.3.1 自然伽马能谱测井工作方法	(50)
2.3.2 自然伽马能谱测井的影响因素	(51)

2.3.3 自然伽马能谱测井的常见应用	(52)
复习与思考题	(60)
第3章 伽马-伽马测井	(61)
3.1 伽马-伽马测井的核物理基础	(61)
3.1.1 伽马射线与物质的相互作用	(61)
3.1.2 岩石的真密度、电子密度、电子密度指数和视密度	(66)
3.1.3 散射伽马射线与岩石密度的关系	(68)
3.1.4 γ 射线通过物质时谱成分的变化规律	(71)
3.2 密度测井(FDC)的基本测量方法及补偿密度测井原理	(72)
3.2.1 密度测井的基本测量方法	(72)
3.2.2 补偿密度测井原理	(74)
3.2.3 密度测井仪的刻度	(75)
3.3 密度测井的应用	(76)
3.4 选择 γ - γ 测井	(82)
3.4.1 基本原理	(82)
3.4.2 选择 γ - γ 测井仪器	(83)
3.4.3 选择 γ - γ 测井方法技术	(85)
3.4.4 选择 γ - γ 测井的应用	(86)
3.5 岩性密度测井(LDT)	(87)
3.5.1 岩性密度测井原理	(87)
3.5.2 岩性密度测井方法(LDT)	(88)
3.5.3 岩性密度测井的应用	(89)
复习与思考题	(93)
第4章 X射线荧光测井	(94)
4.1 概述	(94)
4.2 X荧光测井基本原理	(94)
4.2.1 X荧光测井定性分析原理	(95)
4.2.2 X荧光测井定量分析原理	(96)
4.3 常用X荧光测井仪的基本构成及其工作原理	(97)
4.3.1 X荧光测井仪的基本构成	(97)
4.3.2 X荧光测井仪器的基本工作原理	(99)
4.4 X荧光测井仪设计的关键技术与主要特点	(99)
4.4.1 测井仪源-样-探的优化设计	(99)
4.4.2 贴井壁装置	(101)
4.4.3 管体和探测窗的设计原则	(103)
4.4.4 X荧光测井仪的显著特点	(104)
4.5 X荧光测井主要影响因素及校正措施	(104)

4.5.1	探测窗杂质的影响	(104)
4.5.2	井液的影响与校正	(105)
4.5.3	基体效应的影响与校正	(106)
4.5.4	井壁不平度效应及其校正	(108)
4.5.5	矿化不均匀效应	(108)
4.5.6	泥饼和粉尘的影响	(108)
4.6	X 荧光测井工作方法	(108)
4.6.1	X 荧光测井仪器的刻度	(108)
4.6.2	X 荧光测井前仪器准备与测井工作流程	(109)
4.6.3	X 荧光测井资料整理	(110)
4.6.4	X 荧光测井资料解释方法	(110)
4.7	X 荧光测井应用实例	(113)
4.7.1	X 荧光测井在天青石矿勘查中的应用	(113)
4.7.2	X 荧光测井在铜矿勘查中的应用	(114)
4.7.3	X 荧光测井在多金属矿勘查中的应用	(117)
4.7.4	X 荧光测井在金矿勘查中的应用	(119)
	复习与思考题	(120)
第 5 章	中子测井的核物理基础	(122)
5.1	中子与中子源	(122)
5.1.1	中子的分类和性质	(122)
5.1.2	中子源	(123)
5.1.3	中子源的分类	(125)
5.2	中子与地层的相互作用	(131)
5.2.1	中子与原子核相互作用的机理	(131)
5.2.2	中子与地层相互作用的形式	(132)
5.2.3	中子截面	(136)
5.3	中子在地层中的慢化	(137)
5.3.1	中子的能量损失	(137)
5.3.2	岩石的慢化能力	(139)
5.3.3	岩石中快中子的慢化长度	(141)
5.4	中子在地层中的扩散和被俘获	(141)
5.4.1	热中子在岩石中的扩散及其寿命	(141)
5.4.2	岩石中热中子的扩散长度	(142)
5.4.3	岩石对热中子的俘获	(142)
5.5	中子的探测	(143)
5.5.1	中子探测方法	(143)
5.5.2	核反应法中子探测器	(144)

5.6 中子在地层中的空间分布	(146)
5.6.1 中子通量密度	(146)
5.6.2 中子扩散的斐克定律	(146)
5.6.3 单能中子扩散方程	(147)
5.6.4 无限均匀介质中热中子点源扩散方程的解	(149)
5.6.5 分群扩散理论	(150)
复习与思考题	(150)
第6章 中子测井	(152)
6.1 中子-热中子测井原理	(152)
6.1.1 热中子通量密度的空间分布	(152)
6.1.2 热中子密度与源距的关系	(153)
6.1.3 补偿中子测井原理	(154)
6.2 中子-热中子测井方法技术	(155)
6.2.1 地层的含氢指数	(155)
6.2.2 补偿中子测井仪	(158)
6.2.3 热中子测井的刻度	(160)
6.2.4 热中子测井的探测深度和环境影响	(162)
6.3 中子-超热中子测井	(164)
6.3.1 超热中子测井原理	(164)
6.3.2 超热中子测井方法	(167)
6.4 中子-伽马测井	(168)
6.4.1 中子-伽马测井原理	(169)
6.4.2 中子-伽马测井方法	(172)
6.5 中子测井的应用	(173)
6.5.1 中子测井的应用基础	(173)
6.5.2 确定地层孔隙度	(174)
6.5.3 识别岩性	(178)
6.5.4 识别和评价气层	(180)
6.5.5 划分油水界面	(182)
复习与思考题	(183)
第7章 其他测井方法简介	(184)
7.1 中子活化测井	(184)
7.1.1 中子活化测井的基本原理	(184)
7.1.2 中子活化测井的影响因素	(187)
7.2 脉冲中子伽马能谱测井	(188)
7.2.1 脉冲中子伽马能谱测井原理	(188)
7.2.2 脉冲中子伽马能谱测井的应用	(190)

7.3 中子寿命测井	(192)
7.3.1 中子寿命测井的基本原理	(192)
7.3.2 中子寿命测井的应用	(197)
7.4 铀矿裂变中子测井	(199)
7.4.1 测井原理	(200)
7.4.2 缓发裂变中子测井的特点	(202)
7.4.3 瞬发裂变中子测井特点	(203)
7.4.4 裂变中子测铀应用	(204)
7.5 地球化学测井	(206)
7.5.1 地球化学测井仪的结构	(206)
7.5.2 地球化学测井的基本原理	(206)
7.5.3 地球化学测井的应用	(208)
7.6 核磁共振测井简介	(211)
7.6.1 核磁共振测井物理基础	(212)
7.6.2 核磁共振测井仪工作原理及结构	(214)
7.6.3 核磁共振测井仪的应用	(215)
复习与思考题	(217)
参考文献	(218)
附录1 一些物质的 γ 射线质量衰减系数(μ/ρ)表	(221)
附录2 e^{-x} 、 $\phi(x)$ 和 $F(x)$ 函数表	(222)
附录3 $G(x, y, u)$ 函数表	(225)
附录4 元素的 K 吸收限与 K 系特征X射线表	(226)
附录5 元素的 L 吸收限与 L 系特征X射线表	(229)
附录6 中子活化分析核参数表	(232)
附录7 中子-伽马分析核参数表	(233)

绪 论

地球物理测井,是利用岩石的物理、化学性质,通过测量其电、声、核参数来研究沿井孔剖面的地球物理勘探方法。核测井,是地球物理测井中的重要的一类测井方法。

核测井,又称放射性测井,是以岩石及其孔隙流体的核物理性质为基础,利用辐射与物质相互作用的各种效应,或岩石本身的放射性,研究井地质剖面、地层物理性质以及井下技术参数,勘探石油、天然气、煤、铀、金属与非金属矿藏的一类地球物理方法。

测井是记录钻入地壳的一口井中岩石或流体混合物不同的物理、化学、电子或其他性质的过程(见图 0-1)。一次测井是一次行程的记录,类似于一条航船的航海日志。在这种情况下,航船是某种类型的一支测量仪器,而行程是下入和取出井眼的过程。

核测井技术的起源可以追溯到 20 世纪 30 年代。

1930 年前后,美国的测井公司(Well Surveys Company)和工程实验公司(Engineering Laboratories Company)开始进行自然伽马测井的理论研究、仪器研制与实验。1933 年,苏联地球物理学家 Г. Б. 格尔史科夫、А. Г. 格拉玛科夫等人也提出了自然伽马测井的设想,并开展了

理论研究。1939 年 11 月至 1940 年 4 月前后,美国测井公司与工程实验公司的地球物理工作者在 J. L. 加特纳指导下,先后在美国的多个油田上开展了自然伽马测井实验,获得众多试验井的自然伽马测井曲线。这些试验结果,为制定自然伽马测井有关技术规范奠定了坚实的基础。1949 年 5 月 1 日,自然伽马测井方法在美国正式投入商业应用。

1941 年,苏联 Б. 邦切尔科尔根据岩石中元素的原子核俘获中子时产生 γ 射线的物理过程,提出了中子-伽马测井的设想。1946 年,А. А. 科尔日夫提出了中子活化测井的设想。与此同时,美国的地球物理学家们也积极开展中子测井研究。1950 年,美国率先将中子-伽马测井方法投入商业应用。20 世纪 50 年代初期,东欧的一些地球物理学家提出了伽马-伽马测井的设想,并开始开展理论研究。60 年代,国际上先后开展了天然伽马能谱测井、碳-氧比能谱测井、X 射线荧光测井、核磁测井、中子-中子测井等核测井方法的研究,并逐步将其投入商业应用。从 20 世纪 70 年代以来,核测井技术的发展更为迅速,应用范围也更加扩

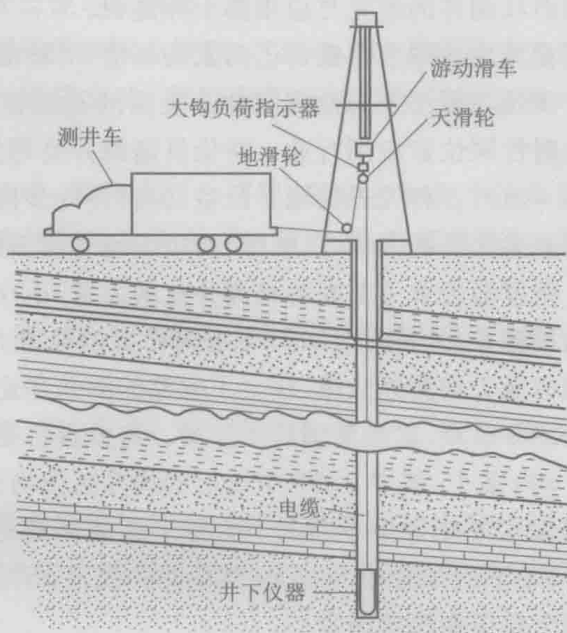


图 0-1 测井示意图

大。各种高性能核测井仪器不断涌现:双(多)探头中子寿命测井、密度测井、岩性密度测井、中子活化测井、缓发与瞬发裂变中子测井等先后在不同国家投入商业性应用。

到目前为止,核测井技术经历 80 余年的发展,已日趋成熟,它与声学测井、电学测井一起构成了三大支柱测井技术。

相比其他两大测井,核测井具有自己的独特优点,迄今为止,是唯一能在井下原位快速分析和确定岩石及其孔隙流体中某些化学元素含量的有效方法。此外,不少核测井方法不受井内介质的限制,可以在裸眼井和套管井中,在充满淡水或高矿化度泥浆、石油或油基泥浆、天然气或空气井内开展测量。从大类来说,核测井是目前唯一可以在套管井内进行地层评价的测井方法。核测井在油气藏、铀、煤、金属与非金属矿藏的勘探与开发中,甚至在工程地质工作中,都起着十分重要的作用,它是不能由其他测井所代替的。因此,世界发达国家对核测井的研究与应用都十分重视。

世界发达国家根据自己国家的国情,对核测井的发展与应用各有侧重。

美国主要注重石油核测井。美国的石油核测井行业是美国国内仅次于核医学的第二大放射性同位素应用行业。斯伦贝谢测井公司是当今世界最大的油气测井跨国公司,拥有世界一流的各种先进核测井设备,为世界许多国家提供测井服务。20 世纪 80 年代以来,该公司就多次到我国华北、新疆、四川等地的油田提供测井服务,取得良好效果。

俄罗斯传承了苏联的核测井技术力量,不仅注重石油测井,也注重煤田、金属与非金属矿的核测井,尤其在金属与非金属矿上的核测井技术一直居国际领先水平。在苏联时期,就拥有庞大的测井队伍,建立了完整的测井理论与方法,确立了自己的测井体系,取得过良好的测井效果,这是美国所不及的。有关资料表明,苏联解体前,全国拥有的测井队已经达到 1 600 多个,其中 1 000 个以上的测井队伍均开展不同的核测井工作。在油气田上,主要采用伽马测井与中子测井,年测井总进尺超过 20 000 km。在金属矿上,X 荧光测井占 70%,中子活化测井占 15%,其他测井仅占 15%。此外,前苏联是世界上最早将核测井工作应用于煤田勘探的国家。

英国的核测井技术在煤田上处于领先水平,其成立于 1970 年的 BPB 公司是世界上唯一的煤田测井公司。

我国的核测井工作是 1956 年在玉门油田开始的。最初的主要工作是利用苏联测井仪器进行试验研究。1964 年,我国西安石油仪器厂(现西安石油勘探仪器总厂)研制成井下脉冲中子发生器。20 世纪 70 年代,我国测井技术开始向数字化迈进。现在,我国的核测井技术有了长足的发展,除西安石油仪器厂外,重庆地质仪器厂、上海地质仪器厂(现上海昌吉地质仪器有限公司)、渭南地质仪器厂都开发了多种核测井设备,成为国内主要的核测井仪器生产厂家,为开展各种核测井工作提供了仪器上的保证。目前,我国油气资源勘查与开发中广泛应用着核测井技术,大的油田,几乎都建设有自己的测井公司,并广泛开展了自然伽马、伽马能谱、密度、岩性-密度、中子-中子、中子活化、中子寿命等核测井工作。在煤田勘查与开发中,自然伽马、密度、选择伽马-伽马成为主要核测井方法。在铀矿勘探开发中,自然伽马成为基本测井手段。而在金属与非金属(固体)矿勘查中,我国在 20 世纪 80 年代末期就提出,要积极推广 X 射线荧光测井与伽马能谱测井等核测井方法。目前,我国成都理

工大学已经成功研制了达到国际先进水平的基于 Si-PIN 半导体探测器的 X 射线荧光测井仪, X 射线荧光测井技术也在部分地区得到应用。

由于我国核测井工作起步较晚, 除个别核测井方法(如 X 射线荧光测井)外, 与国外发达国家的核测井技术水平相比, 我国核测井整体水平落后约 10~15 年。

据统计, 我国从 20 世纪 50 年代以来, 生产各种核测井仪器约 4 000 多套。其中油田核测井仪器约 1 000 多套, 主要为自然伽马、中子-伽马、热中子、伽马-伽马、中子寿命、碳氧比能谱等测井仪器, 主要应用于大庆、四川、华北、江汉等油田; 煤田上的测井设备约 1 000 多套, 主要是自然伽马、密度、选择伽马-伽马测井仪器; 铀矿上的核测井设备约 1 500 套, 主要为自然伽马测井仪。

目前, 核测井的主要应用在 5 个方面:

- 1) 进行地层评价。如研究和确定地层的岩性与孔隙度。
- 2) 进行油气田勘探与开发。与电法等测井资料综合解释, 可对油、气、水层作出完善的地层评价; 研究生油层、评价地层压力、进行地层对比, 研究沉积环境及油气的运移与富集等。
- 3) 进行煤田的勘探与开发。在煤田勘探中, 可准确划分煤层, 确定各种品位的煤层的深度、厚度与结构; 作地层对比, 研究沉积环境和解决有关水文地质问题; 与其他资料综合, 可以定量计算煤的灰分、水分和含碳量。
- 4) 寻找与放射性有关的矿藏。如铀、钾、钼、锰、铍、硼等的勘查, 评价矿体品位, 确定其埋深与厚度等。
- 5) 勘探金属与非金属矿藏。如铜、铁、锡、锑、铅、钨、钼, 天青石、重晶石、萤石等, 划分矿层, 确定矿石品位与储量。

核测井方法很多, 目前已达数十种。每种方法都以研究岩石及其孔隙流体的某种核物理性质为基础。根据使用的放射源或测量的放射性类型以及所研究的岩石的核物理性质, 可以将核测井方法大致分为四类:

- 1) 伽马测井。以研究伽马辐射为基础的核测井方法, 包括自然伽马测井、伽马能谱测井、密度测井、选择伽马-伽马测井以及各种放射性同位素示踪测井等。
- 2) X 荧光测井。以研究 X 射线与岩石的相互作用为基础的核测井方法, 广泛用于各种金属与非金属矿藏品位评价。
- 3) 中子测井。以研究中子与岩石及其孔隙流体相互作用为基础的核测井方法, 主要包括超热中子测井、热中子测井、中子伽马测井、脉冲中子非弹性散射伽马能谱测井、脉冲中子俘获伽马能谱测井、中子寿命测井以及中子活化测井等。

- 4) 核磁测井。利用核磁现象研究地层自由流体含量的测井方法。

每种核测井方法都有其探测特性与适用范围。因而, 应根据具体的地质条件、勘探与开发任务以及现有技术条件, 适当地选用相应的各种核测井方法, 以达到预期的目的。

这里需要特别强调两点:

- (1) 地质理论是测井资料正确解释和应用的基础

测井是为地质工作服务的, 而地质体本身是特别复杂的, 没有相关的地质理论, 想对测

井资料作出正确的解释是困难的。所以,要学好测井理论与技术,就应该不断地根据需要进行学习并掌握相应的地质理论。当然,也需要充分掌握测井钻孔的地质资料。

(2) 测井资料的综合应用是取得良好找矿效果的前提

随着找矿工作的不断深入,找矿难度越来越大,靠单一方法找矿的成功率也越来越低。为此,利用综合方法找矿和解决相关地质问题,已经成为地学界的共识。作为地球物理工作者,应该建立起应用综合方法找矿和解决地质问题的思想,不断研究各种方法技术间的相互弥补与融合问题,通过获取信息间的互补与相互验证,提高地质工作的效果。

相比之下,核测井还是一门年轻的科学技术。尽管其测速低、技术较复杂、成本较高、需专门的核防护装置,在理论、仪器、方法及实验研究方面也还有许多急待解决的问题,但国内外的广泛应用表明,这种技术是有很大大发展潜力的。随着核物理学、核电子学的发展和计算机技术的广泛应用,核测井必将有更大的发展,在矿产资源勘探与开发中将发挥越来越重要的作用。

第 1 章 自然伽马测井

1.1 岩石的放射性

1.1.1 岩石中的放射性核素

自然伽马测井所直接测量的是单位质量地层岩石每秒发射的伽马射线的总数。而岩石的自然放射性(伽马射线)是由岩石中赋存的放射性核素及其含量决定的。

目前已知自然界有 3 个放射性系列(^{238}U 起始的铀系、 ^{232}Th 起始的钍系和以 ^{235}U 起始的锕系)及 60 余种不成系列的放射性核素。通过理论计算可以知道,一般情况下,不成系列核素及锕系的伽马放射性比铀、钍系和 ^{40}K 的放射性低 $10^3\sim 10^7$ 倍,故岩石的伽马放射性可以看做是由铀、钍系和 ^{40}K 决定的。这种近似带来的误差仅 $0.1\%\sim 1\%$ 。因此,岩石的伽马射线总量,可以看做是岩石中铀、钍和钾含量的线性函数:

$$A=A_{\text{U}}\cdot q_{\text{U}}+A_{\text{Th}}\cdot q_{\text{Th}}+A_{\text{K}}\cdot q_{\text{K}} \quad (1-1)$$

式中: A_{U} ——同衰变产物处于平衡的 1 克铀每秒钟发射的伽马光子数;

A_{Th} ——同衰变产物处于平衡的 1 克钍每秒钟发射的伽马光子数;

A_{K} ——每克钾每秒钟发射的伽马光子数。

$A_{\text{U}}、A_{\text{Th}}、A_{\text{K}}$ ——分别称为平衡铀、平衡钍和钾的自然伽马放射系数;

A ——岩石的自然伽马放射系数(或称“比放射性”、“放射性比度”);

$q_{\text{U}}、q_{\text{Th}}、q_{\text{K}}$ ——分别为平衡铀、平衡钍和钾元素的百分含量。

钍系由 ^{232}Th 开始,经 6 次 α 衰变、4 次 β 衰变,到生成稳定核素 ^{208}Pb 结束(见表 1-1)。

表 1-1 钍系

核 素		衰变形式	半衰期
Th	^{232}Th	α	$1.42\times 10^{10}\text{ a}$
MsTh ₁	^{228}Ra	β	6.7 a
MsTh ₂	^{228}Ac	β	6.13 h
RdTh	^{228}Th	α	1.91 a
ThX	^{224}Ra	α	3.64 d
Tn	^{220}Rn	α	51.5 s
ThA	^{216}Pb	α	0.16 s
ThB	^{212}Pb	β	10.6 h
ThC	^{212}Bi	$\alpha、\beta$	60.5 min

续表

核 素		衰变形式	半衰期
ThC'	²¹² Po	α	0.3 μs
ThC''	²⁰⁸ Tl	β	3.1 min
ThD	²⁰⁸ Pb	稳定	

注：引自黄隆基,《放射性测井原理》。

钍系中可观察到 60 余条伽马射线谱线。对伽马测井来说,由于能量小于 100 keV 的光子被地层和井下仪器外壳强烈吸收,因此,有贡献的只是大于 100 keV 的光子。把钍系中各核素每次衰变产生光子率大于等于 0.05、能量大于 100 keV 的光子数相加,可得平衡钍的自然伽马放射系数:

$$A_{Th}=1.0\times10^4 \text{ 光子}/(\text{秒}\cdot\text{克})$$

从表 1-2 中可见,贡献最大的是²²⁸Ac(MsTh₂)、²¹²Pb(ThB)、²¹²Bi(ThC)、²⁰⁸Tl(ThC'')。

表 1-2 自然界几种重要放射性物质的伽马能谱

核 素	伽马射线能量/MeV	光子数/每次衰变
²¹⁴ Pb(RaB)	0.242	0.11
	0.295	0.19
	0.352	0.38
²¹⁴ Bi(RaC)	0.609	0.47
	0.769	0.05
	1.120	0.17
	1.238	0.06
	1.379	0.05
	1.764	0.18
²²⁸ Ac(MsTh ₂)	2.204	0.05
	0.336	0.11
	0.790	0.06
	0.908	0.25
	0.984	0.20
²¹² Pb(ThB)	1.587	0.12
	0.239	0.40
²¹² Bi(ThC)	0.729	0.08
	0.830	0.06
²⁰⁸ Tl(ThC'')	0.511	0.11
	0.583	0.28
	2.614	0.35
⁴⁰ K	1.460	0.11

注：引自黄隆基,《放射性测井原理》。

沉积岩中， ^{232}Th 含量约为 $1.1\times 10^{-3}\%$ 。
铀系由 ^{238}U 开始，经 8 次 α 衰变、6 次 β 衰变，最后生成稳定核素 ^{208}Pb (见表 1-3)。

表 1-3 铀系

核 素		衰变形式	半衰期
UI	^{238}U	α	$4.51\times 10^9\text{ a}$
UX ₁	^{234}Th	β	24.1 d
UX ₂	^{234}Pa	β	1.18 min
UZ	^{234}P	β	6.66 h
UII	^{234}U	α	$2.48\times 10^5\text{ a}$
Io	^{230}Th	α	$8.0\times 10^4\text{ a}$
Ra	^{226}Ra	α	1 620 a
Rn	^{222}Rn	α	3.825 d
RaA	^{218}Po	α 、 β	3.05 min
RaA'	^{218}At	α 、 β	约 2 s
RaA''	^{218}Rn	α	1.3 s
RaB	^{214}Pb	β	26.8 min
RaC	^{214}Bi	α 、 β	19.7 min
RaC'	^{214}Po	α	$1.6\times 10^{-4}\text{ s}$
RaC''	^{210}Tl	β	1.32 min
RaD	^{210}Pb	β	19.4 a
RaE	^{210}Bi	α 、 β	5.01 d
RaF	^{210}Po	α	138.4 d
RaF'	^{206}Tl	β	4.2 min
RaG	^{206}Pb	稳定	

注：引自黄隆基，《放射性测井原理》。

铀系中可观察到约 80 条伽马谱线。按求平衡钍自然伽马放射系数方法，可求出：
 $A_{\text{U}}=2.8\times 10^4\text{ 光子}/(\text{秒}\cdot\text{克})$

对铀自然伽马放射系数贡献最大的是 ^{214}Pb 与 ^{214}Bi (见表 1-2)，两个核素发射的伽马射线占全系的 80% 以上。

^{238}U 在沉积岩(页岩、片岩)中的含量约为 $3.2\times 10^{-4}\%$ 。

^{40}K 衰变时放出的 β 粒子能量为 1.32 MeV (分支比为 89%)，伽马光子能量为 1.46 MeV (分支比 11%)，每次衰变产生伽马光子数为 0.11。依据自然界 ^{40}K 的丰度 (0.012%)、半衰期 ($1.25\times 10^9\text{ a}$)，可算出钾的自然伽马放射性系数为：

$$A_{\text{K}}=3.4\text{ 光子}/(\text{秒}\cdot\text{克})$$

钾在沉积岩中平均含量为 2.28%。

表 1-4 中给出钍系、铀系和钾发射的伽马射线能谱成分(不包括小于 100 keV 的谱线)。