

郭余峰 等编 石油工业出版社

石油测井中的 核物理基础



42240



00285681

石油测井中的核物理基础

郭余峰 等编

5366/20



200312991

石油工业出版社

责任编辑：司徒丽丽

封面设计：李 辛 海

内 容 提 要

本书系统地阐述了与放射性测井有关的核物理基础知识，主要内容包括：原子核的基本性质和结构，放射性的特点和基本规律，核衰变的类型，射线与物质的相互作用，原子核反应，以及中子物理等。同时，还专门论述了与测井有关的核物理实验方法，这些内容都是学习和研究放射性测井所必备的知识。为了便于读者更好地掌握本书的内容，各章均配有适量的习题及答案。

本书可作为石油院校地球物理测井专业的教学用书，也可供从事核测井技术人员与研究人员参考。

石油测井中的核物理基础

郭余峰 等编

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京顺义燕华营印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 32开本 13印张 286千字 印1—1,800

1990年3月北京第1版 1990年3月北京第1次印刷

科技新书目：214—173

ISBN 7-5021-0345-7/TE·335

定价：3.65元

前 言

本书是为石油院校地球物理测井专业学习核物理基础而编写的，它力求紧密结合测井专业的特点，深入浅出地阐述各种放射性测井（也称核测井）方法的核物理基础，并介绍了与放射性测井有关的核物理实验方法。对于涉及到的一些测井方法及仪器等，本书仅做了简单叙述。想了解这一部分内容的读者可参考有关的专业书籍。

本书在内容选择方面，主要放在放射性测井的基础理论上。同时，适当地反映了当前最新的核测井技术的原理及进展情况。为了使读者能够更好地理解和掌握本书的内容，各章均配有适量的习题，并且在书后选编了一些附录，供读者参考和使用。

本书的第一、二、八章由郭余峰编写，第三、四章及附录由单秀兰编写，第五章由何思孝编写，第六、七章由李振方编写，牛超群高级工程师对本书进行了审校。

本书在编写过程中，曾得到复旦大学原子核科学系、大庆油田生产测井研究所、大庆油田测井公司等单位的热情支持和大力帮助。韩德旺教授、黄隆基副教授、罗正昶教授认真地阅读了本书的初稿，并提出宝贵的意见。在此，我们一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者提出宝贵意见，以便再版时进行修改。

郭余峰

1988年12月

目 录

绪论	(1)
第一章 原子核的基本性质和结构	(6)
§1.1 原子核的电荷、质量和半径	(6)
一、原子核的电荷	(6)
二、原子核的质量	(7)
三、原子核的半径	(10)
§1.2 原子核的结合能	(12)
一、质量和能量的相互关系	(12)
二、质量亏损	(14)
三、结合能	(17)
四、比结合能和原子核的稳定性	(17)
五、最后一个核子的结合能	(20)
§1.3 原子核的自旋和磁矩	(22)
一、原子核的自旋	(22)
二、原子核的磁矩	(24)
三、核磁共振	(26)
四、核磁测井的基本原理	(30)
§1.4 原子核的电四极矩	(33)
§1.5 原子核的宇称和统计性	(36)
一、原子核的宇称	(36)
二、原子核的统计性	(37)
§1.6 核力	(39)
§1.7 原子核的液滴模型和结合能半经验公式	(41)
一、原子核的液滴模型	(41)

二、结合能半经验公式	(42)
三、原子核稳定性的经验规律	(45)
§1.8 原子核的壳层模型	(48)
一、壳层模型的实验基础	(48)
二、建立壳层模型的基本思想	(50)
三、自旋-轨道耦合	(51)
四、壳层模型的应用	(53)
习题	(55)
第二章 放射性	(59)
§2.1 放射性的一般现象	(59)
一、放射性的发现	(59)
二、射线的种类和性质	(61)
三、放射性现象的特点	(62)
§2.2 放射性衰变的基本规律	(62)
一、卢瑟福的氢核衰变实验	(62)
二、原子核衰变的基本规律	(63)
三、衰变常数、半衰期和平均寿命	(65)
四、核衰变规律的统计性	(67)
§2.3 放射性活度及其单位	(68)
一、放射性活度	(68)
二、放射性活度的单位	(68)
三、比放射性活度	(71)
§2.4 两次连续衰变和放射性平衡	(73)
一、两次连续衰变	(73)
二、长期平衡	(75)
三、暂时平衡	(76)
四、不成平衡	(78)
五、短寿命同位素发生器	(79)
§2.5 多次连续衰变和放射系	(83)
一、多次连续衰变	(83)

二、放射系·····	(87)
§2.6 岩石的自然放射性 ·····	(95)
一、岩石中放射性核素的分布·····	(96)
二、自然伽马测井·····	(96)
三、自然伽马能谱测井·····	(98)
习题·····	(100)
第三章 α衰变和β衰变 ·····	(104)
§3.1 α 衰变的能量 ·····	(104)
一、 α 衰变的条件·····	(104)
二、 α 粒子的能量与 α 衰变能的关系 ·····	(105)
§3.2 α 能谱的精细结构与核能级 ·····	(107)
一、 α 能谱的精细结构与核能级的关系 ·····	(107)
二、衰变纲图·····	(110)
§3.3 α 衰变的实验规律 ·····	(111)
一、 α 衰变能与 Z 和 A 的关系 ·····	(111)
二、 α 衰变能与同位素的关系·····	(113)
三、 α 衰变能与衰变常数 λ 的关系 ·····	(114)
§3.4 β 能谱的特点 ·····	(116)
一、 β 谱的连续性·····	(116)
二、 β 衰变与能量守恒定律的“矛盾” ·····	(118)
三、中微子假说·····	(119)
四、中微子的性质·····	(121)
§3.5 β 衰变的三种形式 ·····	(123)
一、 β^- 衰变 ·····	(123)
二、 β^+ 衰变 ·····	(124)
三、轨道电子俘获(EC) ·····	(125)
四、 β 衰变理论简介 ·····	(128)
习题·····	(129)
第四章 γ跃迁 ·····	(132)
§4.1 γ 跃迁中的能量·····	(132)

一、 γ 射线的性质	(132)
二、 γ 跃迁中的能量及其分配	(133)
三、 γ 能谱	(135)
§4.2 内转换	(136)
一、内转换现象	(136)
二、内转换电子的能量	(137)
三、内转换系数	(138)
§4.3 同质异能态	(139)
一、同质异能态和同质异能素	(139)
二、同质异能素岛	(140)
§4.4 穆斯鲍尔效应	(141)
一、 γ 射线的共振吸收	(141)
二、穆斯堡尔效应	(143)
习题	(147)
第五章 射线与物质的相互作用	(149)
§5.1 α 粒子与物质的相互作用	(149)
一、电离和激发	(149)
二、阻止本领	(154)
三、 α 粒子在物质中的射程	(155)
§5.2 β 射线与物质的相互作用	(157)
一、电离损失	(157)
二、辐射损失	(158)
三、散射和反散射	(162)
四、正负电子的湮灭	(163)
五、 β 射线的射程和吸收	(164)
§5.3 γ 射线与物质的相互作用	(165)
一、 γ 射线与物质相互作用的一般特性	(166)
二、光电效应	(167)
三、康普顿效应	(170)
四、电子对效应	(175)

§5.4 γ 射线的吸收	(177)
一、 γ 射线通过物质时被吸收的规律	(178)
二、半吸收厚度	(180)
三、几种不同能量的 γ 射线通过物质时的吸收	(184)
§5.5 密度测井	(186)
一、地层密度测井	(186)
二、岩性密度测井	(189)
三、混合流体的平均密度及含水率的测定	(192)
习题	(195)
第六章 原子核反应	(198)
§6.1 人工核蜕变的发现	(198)
一、人工核蜕变的基本思想	(198)
二、卢瑟福人工核蜕变实验	(199)
三、卢瑟福人工核蜕变实验的两种解释	(199)
§6.2 核反应及其分类	(200)
一、实现核反应的途径	(200)
二、核反应的一般表示	(201)
三、核反应中的守恒定律	(203)
四、核反应的分类	(204)
§6.3 核反应中的能量	(206)
一、反应能	(206)
二、Q方程	(208)
三、实验室坐标系和质心坐标系	(210)
四、核反应的阈能	(212)
§6.4 核反应截面	(214)
一、反应截面	(214)
二、微分截面	(215)
三、核反应产额	(217)
§6.5 核反应过程与核反应机制	(224)
一、核反应过程的三阶段描述	(224)

二、核反应机制.....	(226)
习题.....	(226)
第七章 岩石的中子特性.....	(230)
§7.1 中子的分类和性质	(230)
一、中子的分类.....	(230)
二、中子的性质.....	(231)
§7.2 中子源	(234)
一、放射性同位素中子源.....	(234)
二、加速器中子源.....	(240)
三、反应堆中子源.....	(246)
§7.3 中子与地层的相互作用	(247)
一、快中子的非弹性散射.....	(247)
二、快中子对原子核的活化.....	(250)
三、快中子的弹性散射.....	(251)
§7.4 中子的慢化	(253)
一、中子与核连续碰撞的能量损失.....	(253)
二、慢化本领和减速比.....	(256)
三、快中子的慢化距离与慢化长度.....	(258)
§7.5 热中子在岩石中的扩散和被吸收	(259)
一、热中子的扩散.....	(259)
二、辐射俘获核反应.....	(262)
§7.6 中子通量的空间分布	(262)
一、中子通量和中子密度.....	(263)
二、中子扩散方程.....	(263)
三、无限均匀介质中的点源.....	(266)
§7.7 中子测井	(270)
一、一般中子测井.....	(270)
二、中子寿命测井.....	(273)
三、脉冲中子伽马能谱测井.....	(275)
习题.....	(278)

第八章 核物理实验方法	(280)
§8.1 放射性计数的统计分布	(280)
一、统计涨落现象.....	(280)
二、泊松分布.....	(281)
三、高斯分布.....	(285)
§8.2 放射性测量的统计误差	(288)
一、统计误差的概念.....	(288)
二、标准误差.....	(289)
三、统计误差的运算规则.....	(291)
四、最佳测量条件的选择.....	(291)
§8.3 γ 射线的探测.....	(295)
一、 γ 射线探测的基本原理	(296)
二、正比计数器和G-M计数器	(296)
三、闪烁计数器.....	(302)
§8.4 γ 射线强度和能量的测量	(307)
一、NaI (Tl) 单晶 γ 谱仪	(307)
二、 γ 射线强度和能量测量的一般考虑	(308)
三、能量刻度和能量的确定.....	(313)
四、全能峰法确定 γ 射线强度	(314)
§8.5 γ 射线能谱分析.....	(315)
一、简单 γ 能谱分析	(315)
二、岩石样品自然伽马能谱的分析.....	(319)
三、复杂 γ 能谱的自动分析	(322)
§8.6 中子的探测	(331)
一、中子探测的基本原理.....	(331)
二、常用的中子探测器.....	(334)
习题.....	(336)
习题答案	(338)
附录1 原子核物理发展大事记	(344)
附录2 常用物理常数	(348)

附录3 正态分布概率积分表	(350)
附录4 常用核素表	(351)
参考文献	(404)

绪 论

20世纪以来，现代科学正在向着两个方面发展。一方面，一些学科按其固有的规律和特点向纵深发展，并且不断地揭示新的规律和创立新的理论；另一方面，各学科之间已经开始相互渗透和相互结合，因而形成了一些独具特色的边缘学科。

原子核物理学是20世纪初开始建立的一门近代物理理论，其传统目标在于明确建立核内运动形态，以及核子与核子之间基本相互作用力的关系。就其理论深度，人们从研究原子核的结构及性质开始，已经深入到物质结构的更深层次。1932年，查德威克(J. Chadwick)发现了中子，这在核物理发展史上是一个里程碑。由于中子不带电，用它轰击原子核时不存在库仑斥力，更容易引起核反应，从而大大推动了核反应机理的研究。更为重要的是，中子的发现是原子核结构认识上的一个转折点，它使人们认识到原子核是由中子和质子(统称核子)所组成。

从本世纪40年代起，由于各种粒子加速器能量的提高，使人们有可能用高能量的粒子去轰击原子核及核子。当粒子的能量达到一定数值后，核子已不再是基本单元了，它们将转变为其它重子，同时放出各种介子、轻子和光子等，这些粒子统称基本粒子。到50年代末期，已发现的和理论上预言其存在的各种重子、介子、轻子及它们的反粒子，再加上光子，总共达三十多种。60年代，由于建成大型高能加速器，

人们又发现了大批的寿命极短(平均寿命只有 $10^{-23}\sim 10^{-24}\text{s}$)的一些共振态粒子,它们都是强子,其种类已达三百多种。关于强子内部结构的研究,又导致“夸克”或“层子”模型的出现。

把需要探明的这些微观世界的客观规律有机地贯串起来,将会给我们提供一幅关于物质结构的崭新的物理图象,使我们更深入地认识微观世界物质存在的形式,物质和运动以及物质与时间和空间的辩证关系。

原子核物理学的另外一个重要研究领域就是核技术的应用。自从1896年贝克勒尔(H. Becquerel)发现天然放射性现象开始,人们就从事放射性衰变规律以及各种射线性质的研究。

为了探测射线,鉴别其种类并测定其能量等,一些核探测器开始问世并得到发展。1908年,盖革(H. Geiger)首次发明探测 α 粒子的气体放电管。1928年,盖革和米勒(W. Miller)又制成G-M计数管,它具有灵敏度高、脉冲幅度大、稳定性好以及使用方便、成本低廉等优点,这些仪器至今还在沿用,并且得到了发展。1947年,卡尔曼(H. Kallmann)和科尔特曼(W. Coltman)发明了可以探测各种核辐射的闪烁计数器。本世纪50年代初出现了光电倍增管,以后,又发展了相应的电子记录仪器,使用闪烁探测器有了蓬勃的发展。60年代发展了半导体探测器,这种探测器体积小、分辨率高、线性范围宽,目前已得到了越来越广泛的应用。

人们对放射性射线的最早应用,首先是它对人体某些疾病的治疗作用。1934年约里奥·居里(J. Curie)夫妇发现人工放射性,开辟了放射性同位素应用的新篇章。目前,放射性同位素已广泛用于医疗卫生、工农业生产、科学研究等

部门。

1938年,哈恩(O.Hahn)和施特拉斯曼(F.Strassmann)发现了核裂变现象。1942年,费米(E.Fermi)建立了世界上第一个链式反应堆,这是人类掌握核能源的开端。核能是具有很大发展潜力的一种新能源,截止1983年底,世界上已运行的核电站有224座,装机总容量达120GW($120 \times 10^9 \text{W}$);正在建设的核电站有238座,装机总容量为220GW;预计到2000年全世界的核电站可达900座左右,占总发电量的45%。

为了适应核物理高层次的研究,以及制备各种人工放射性同位素,人们对粒子加速器的能量提出了越来越高的要求。1930年,劳伦斯(O.Lawrence)发明了回旋加速器,可把质子加速到几百万电子伏,而目前最大的高能加速器能量为500GeV(美国费米实验室)。

此外,核物理的发展使一些新的核技术不断涌现,如核磁共振、穆斯堡尔效应、质子X光荧光分析等,这些核技术已经广泛应用于国民经济和科学研究的各个领域。可以认为,核技术的普遍应用是科学技术现代化的重要标志之一。

利用放射性进行地球物理测井始于本世纪30年代末期,由美国和苏联首先采用自然伽马测井法评价地层和区别岩性。50年代,放射性测井得到了迅速的发展,相继出现了中子伽马测井和放射性同位素示踪测井等。60年代以后,自然伽马能谱测井得到了应用。随之,岩性密度测井及脉冲中子诱发次生伽马能谱测井等方法也相继开始进行现场试验,并且逐步投入使用。近年来,随着计算机技术的进步,能谱测井方法又得到了迅速的发展,并成为今后若干年内世界各国放射性测井的发展方向。

放射性测井方法有许多种，每种方法都是以研究岩石及其孔隙流体的某种核物理性质为基础的。到目前为止，主要的放射性测井方法可分为三类：

1) 伽马测井。这是以研究地层的自然放射性，以及伽马射线与地层相互作用为基础的测井方法。主要包括自然伽马测井、自然伽马能谱测井、补偿密度测井(伽马-伽马)、流体密度测井及三相含水率-密度测井等。

2) 中子测井。这是以研究中子与岩石及其孔隙流体相互作用为基础的测井方法。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、中子寿命测井和活化测井等。

3) 放射性同位素示踪测井。这是利用放射性同位素作为示踪物质，将其掺入流体中，并注入到井内，通过流体在井内的流动而使同位素分布到各种孔隙空间。利用探测器对示踪物质进行追踪测量，确定流体的运动状态及其分布规律，从而解决完井、油井生产和分层注水等各种问题。

放射性测井方法有许多优点，既能在裸眼井中探测地层参数，又能在套管井中探测地层参数，并且也能在生产井中测量流体性质及管外施工状况。因此，放射性测井在石油、天然气、煤及其它矿藏的勘探与开发中起着重要的作用，并将得到更为广泛的应用和推广。

随着核物理学、核电子学及电子计算机技术的发展，放射性测井方法也在不断地深入和发展，今后放射性测井的发展趋势有以下几个方面：

1) 超高能次生伽马能谱测井。将中子发生器发射中子的能量由14MeV提高到200MeV以上，用超高能中子轰击地层中的化学元素的原子核，将会产生一些新的核反应，使微

量元素测井成为可能。超高能中子测井信息，可用于确定油气藏岩石孔隙度、饱和度、矿化度、渗透率、粘土含量及岩石的矿物成分，使得识别油气层和确定剩余油气饱和度的精度大大地提高。

2) 化学键测井。测量岩石孔隙流体碳氢化学键和氢氧化学键的结合力信息，可用于直接勘探油气藏。

3) 碳同位素测井。测量岩石中的碳同位素 ^{14}C 的信息，可用于鉴定油气藏岩石的地质时代和年龄。

4) 核磁测井。利用原子在交变磁场中的核磁共振现象，测量油气藏岩石中的自由流体孔隙度信息，可用于确定岩石渗透率和束缚水饱和度。

随着原子核物理学学科的深入发展，核物理学已经派生出一些分支学科，例如粒子物理、中子物理、高能物理、反应堆物理等。这些分支学科既保持同核物理的联系，又相对地独立于核物理的研究方法和研究范畴。实际上，这正是现代科学的一个特点。

随着科学技术的发展，原子核物理学几乎已经渗透到自然科学的各个领域，并且产生了一些具有生命力的边缘学科。核物理与医学的结合建立了核医学；核物理与电子学结合建立了核电子学；核物理与化学相结合建立了放射性化学；核物理与核电子学、核地质学以及电子计算机等科学相结合，建立了现代的放射性测井技术。可以相信，放射性测井技术同其它边缘学科一样，将在石油、天然气、煤及其它矿藏的大规模勘探和开发中发挥越来越重要的作用。