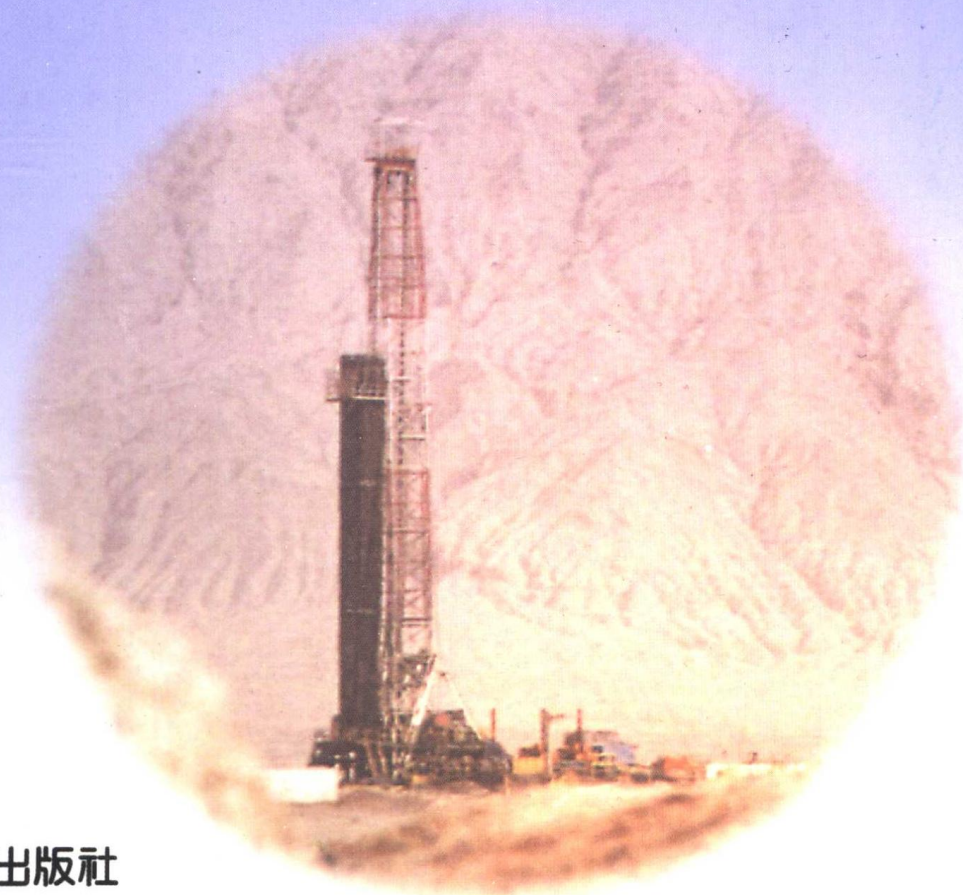


# 核测井原理

黄隆基 编著



石油大学出版社

# 核测井原理

(光子—中子—核磁)

黄隆基 编著

石油大学出版社

## 摘 要

书中包括 $\gamma$ 测井、中子测井和核磁测井三篇,共十章。重点讨论三大类测井方法的核物理和地质基础,而对仪器、测量方法和应用只作简要介绍。本书是为选择“应用地球物理理论方法与信息技术”为研究方向的研究生而编写的,也可作地质资源与地质工程专业本科高年级学生和核测井工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

核测井原理/黄隆基主编. —东营:石油大学出版社,  
2000.9  
ISBN 7-5636-1386-2

I. 核… I. 黄… II. 核测井 IV. P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 42594 号

### 核测井原理

黄隆基 主编

---

策 划:陆丽凤(电话 0546—8392565)

责任编辑:陆丽凤(电话 0546—8392565)

封面设计:傅荣治

---

出 版 者:石油大学出版社(山东 东营,邮编 257062)

网 址:<http://sunctr.hdpu.edu.cn/~upcpres>

电子信箱:[upcpres@sunctr.hdpu.edu.cn](mailto:upcpres@sunctr.hdpu.edu.cn)

印 刷 者:石油大学印刷厂

发 行 者:石油大学出版社(电话 0546—8392563)

开 本:787×1092 1/16 印张:13.5 字数:346 千字

版 次:2000 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

印 数:1-1000 册

定 价:16.50 元

# 前言

核测井在测井业中占有举足轻重的地位,并具有良好的发展前景和经济效益。核测井的发展过程有自身的规律,认识和尊重这些规律对我们进行技术创新的战略思考具有重要意义。核测井研究工作应把创建新方法作为长期奋斗目标,并及时用现代技术成果改造现有的各种方法,以使核测井技术的总水平能适应石油勘探与开发的需要。

核测井包括以核物理学和核物理技术为基础的一系列测井方法,分为 $\gamma$ 测井、中子测井和核磁测井三大类。独立的核测井方法有三十余种,能为石油勘探和开发提供近五十种参数。与其它方法相比,核测井具有下述优点:

1. 核测井揭示的是岩石的核物理性质,即岩石中各种核素微观特性的宏观表现,它深刻地反映着岩石的本质。
2. 对测量条件有广泛的适应性,能在含有各种井内流体的裸眼井、套管井中对各种不同类型的储层进行有效测量。
3. 能提供大量具有不同物理实质的参数,且大部分参数不可能用其它方法获得,即具有不可替代性。

核物理中 $\gamma$ 放射性、中子和核磁共振三大发现和核射线探测技术的进步,是上述三大类核测井技术产生和发展的基础。1896年Becquerel发现了自然放射性,随后发展了 $\gamma$ 射线探测仪器和探测技术,到1935~1939年自然 $\gamma$ 测井得到市场的确认,成为当时惟一的核测井方法。1932年Chadwick发现中子,随后科学界研究了中子与物质的相互作用和中子探测技术,1941年以后中子测井成为代表核测井技术的测井方法。1945年发现了核磁共振现象,1949年出现核磁测井技术,1988年研制出第一套MRIL样机,1990~1995年核磁测井得到市场的普遍确认。核测井的发展按上述顺序大致可分为三个时期,每一时期均由一种核测井方法代表当时的技术水平,如核磁测井是20世纪90年代核测井最有代表性的成果。

当前测井技术具有以下特点:

(1) 核磁测井是当前最有活力的核测井方法。其先进性主要表现为:①采用人工梯度磁场对氢核进行磁化,并用射频脉冲的频率选定激发区(工作区),为实现径向成像奠定了基础;②采用先进的天线和脉冲回波技术;③用多指数拟合确定 $T_2$ 分布;④用复杂孔隙分布模型,求取多种状态的流体饱和度。

(2)  $\gamma$ 测井得到稳步提高。由于 $\gamma$ 射线与物质的相互作用机理没有新的发现, $\gamma$ 源和探测器也未见重大创新,这限制了自然 $\gamma$ 和散射 $\gamma$ 测井的进步。但探测器的效率、仪器的稳定性、数据处理和解释方法均在稳步提高。代表当前水平的 $\gamma$ 测井方法是双晶自然 $\gamma$ 能谱测井和双 $P$ 、岩性密度能谱测井。

(3) 中子测井有望获得新的进步。目前已进入市场的,反映90年代水平的中子法是双晶碳氧比 $\gamma$ 能谱测井。研制中的伴随粒子飞行时间碳氧比能谱测井,可能会成为从本质上具有创新意义的测井方法。脉冲中子发生器和中子及 $\gamma$ 探测系统也均具有发展潜力。

在石油工业发展的初期,测井服务的市场几乎完全决定于勘探的内容和规模。划分岩性和确定孔隙度的市场需求,推动了自然 $\gamma$ 和中子孔隙度测井的发展。随着油田的大规模开发,套

管井的数量急剧增长,石油公司需要在套管井内实时监测地层油、气、水界面的移动和剩余油、气饱和度的变化。这就必须寻找一种隔着套管能够在地层中激发,并能在井中探测到的反映含烃饱和度的物理场。当脉冲中子源在测井中得到应用后,中子寿命测井首先进入市场,在地层水矿化度高且稳定的地区获得成功。但随着注水开发技术的普遍应用,孔隙流体的矿化度成为一种难以确定的参数,碳氧比 $\gamma$ 能谱测井就成了一种不可替代的套管井饱和度测井技术。

油气田开发对核测井的需求量很大,需要有新的技术完成下述任务:在套管井内监测储层剩余油饱和度的空间分布和随时间的变化;为生产测井提供新方法(持率、注入量、产能);井间监测(连通性、驱替速度、剩余油分布);工程测井和特殊钻采工艺条件下(特种钻井液、完井液;特种驱替剂及驱油方式;水平井及丛式井;随钻测井)的测井技术。油气田开发在测井市场中占的份额将会日益增长,这为核测井提供了新的发展机遇。而高技术含量与市场需求的统一,是核测井发展的关键。

一项核测井技术完整的开发过程,通常包括五个环节:

#### 1. 研究核物理、核技术成果转变为测井新技术的可行性

一项新的核物理、核技术成果能否转变为测井新技术,主要决定于岩石是否具有这种核物理性质,以及这种性质和岩性、储层参数及孔隙流体类型是否相关。核测井研究立项的主要依据是岩石核物理性质的研究成果,同时要考虑相关领域的技术条件及获取利润的潜力。核测井工作者的创新意识和创新能力,首先就表现在能否迅速和正确地对核物理新成果做出评价,判定它转化为测井新技术的可行性,并立即开展基础实验研究,获取知识产权和抢占技术市场。如1945年发现了核磁共振现象,美国的科学家很快就预感到这一发现用于测井的巨大潜力,并在1949年获得第一个核磁测井专利,最终垄断了除俄罗斯以外的全球市场。

#### 2. 研制射线源或信号源选定或激发地层的核物理场

如果选用自然场,如自然 $\gamma$ 射线场,就要研究其强度的能量和空间分布特征;若激发人工场,则需研制射线源或信号源(如脉冲中子源),研究如何在井眼中激发出主要决定于地层性质的核物理场。源的类型能决定在地层中激发出的核物理场的特点,决定强度、能量、时间和空间分布特征,从根本上决定一种方法的潜力。源的创新能引起核测井方法质的飞跃。如加速器中子源的出现使中子测井产生了划时代的进步。

#### 3. 研制新型探测器对已激发出的核物理场进行数据采集

探测器类型、布局(个数和排列)和工作模式的合理选择,能使测量系统尽可能多地采集到已激发出的有用信息,并便于解析。探测器的水平,决定能测到多少信息。新型探测器的出现,能在同类核测井中产生新的方法。如闪烁探测器进入测井市场就形成了各种 $\gamma$ 能谱测井。

源和探测器的类型和组成,决定了仪器对地层的响应,决定了这一测井方法的水平和潜力,从根本上确定了仪器的档次,所以研制下井仪器中的源和探测器组合是核测井技术发展的主攻方向。

#### 4. 研究信号处理方法

信号处理的目的在于将探测器测到的复杂信号进行解析与重组,并提高信噪比,而不是创造信息。研究工作包括算法研究(如 $\gamma$ 谱的解析和多指数拟合等)和软件开发。信号处理软件是这一阶段的主要产品。

#### 5. 建立参数转换的数学模型

信号处理得到的结果是每个深度点上的核参数值,要把核参数转变成地质参数还需要建立两者之间的转换关系,即建立模型。这种模型往往具有地区特点,常用半经验公式完成参数

的转换。这方面的研究对核测井的地质效果有重要影响。

与发达国家相比,我国核测井技术尚有明显差距。主要表现在对核物理、核技术的最新成就就不敏感,知识创新和技术创新能力差。直到 1999 年底,世界上已投入市场的核测井方法和重大技术措施还没有一项是中国人提出或实现的。其次是核元件、器件和核材料保障能力差,限制了新思想转变为新技术的速度。

学习和研究核测井的学生,首先需要加强对核物理新成果的跟踪和考察,密切注意核物理的新成果,及时考察其转变为测井新技术的可能性,以发现创新领域并及早起步。同时要研究和借鉴国外的经验与教训,了解市场的需求和技术条件,选择好研究方向。在今后若干年内,核磁测井、碳氧比能谱测井、井间示踪、高分辨率核测井等仍将是核测井研究的主要课题。

最后,向为本书编写提供过指导、帮助、数据和资料的专家、同事表示衷心感谢,并期望得到读者的批评和指正。

黄隆基

2000 年 1 月 14 日



# 目 录

## 第一篇 $\gamma$ 测井

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 第一章 $\gamma$ 测井的核物理基础 .....    | (1)  |
| 第一节 放射性和放射性衰变 .....            | (1)  |
| 一、放射性 .....                    | (1)  |
| 二、放射性衰变 .....                  | (2)  |
| 第二节 $\gamma$ 射线与物质的相互作用 .....  | (8)  |
| 一、 $\gamma$ 射线与物质相互作用的几率 ..... | (8)  |
| 二、光电效应 .....                   | (8)  |
| 三、康普顿效应 .....                  | (9)  |
| 四、电子对效应 .....                  | (11) |
| 五、 $\gamma$ 射线的吸收 .....        | (11) |
| 第三节 $\gamma$ 射线探测器 .....       | (13) |
| 一、概述 .....                     | (13) |
| 二、闪烁探测器 .....                  | (13) |
| 三、半导体探测器 .....                 | (18) |
| 第四节 核射线探测统计学概要 .....           | (20) |
| 一、核衰变数和计数的统计分布 .....           | (20) |
| 二、放射性测量的统计误差 .....             | (21) |
| 三、函数的统计误差 .....                | (21) |
| 第二章 自然 $\gamma$ 能谱测井 .....     | (25) |
| 第一节 岩石的自然 $\gamma$ 放射性 .....   | (25) |
| 一、铀、钍和钾的地球化学特征 .....           | (25) |
| 二、铀、钍和钾在岩石中的分布 .....           | (27) |
| 三、岩石中的放射性核素和 $\gamma$ 能谱 ..... | (30) |
| 四、岩石的自然 $\gamma$ 放射性 .....     | (34) |
| 第二节 地层的自然 $\gamma$ 辐射强度 .....  | (36) |
| 一、自然 $\gamma$ 能谱测井仪器 .....     | (36) |
| 二、地层自然 $\gamma$ 强度的空间分布 .....  | (40) |
| 第三节 地层的自然 $\gamma$ 能谱 .....    | (48) |
| 一、自然 $\gamma$ 仪器谱 .....        | (49) |
| 二、自然 $\gamma$ 标准谱 .....        | (49) |
| 三、自然 $\gamma$ 仪器谱的解析 .....     | (52) |
| 第四节 自然 $\gamma$ 能谱测井的应用 .....  | (57) |

|                                              |      |
|----------------------------------------------|------|
| 一、岩性识别和地层对比 .....                            | (57) |
| 二、识别粘土矿物 .....                               | (59) |
| 三、监测水淹层 .....                                | (60) |
| 四、研究生油层 .....                                | (60) |
| 五、其它用途 .....                                 | (60) |
| <b>第三章 散射 <math>\gamma</math> 能谱测井</b> ..... | (61) |
| 第一节 散射 $\gamma$ 能谱测井的核物理基础 .....             | (61) |
| 一、矿物和岩石的康普顿散射线性衰减系数 .....                    | (61) |
| 二、矿物和岩石的光电吸收系数及光电吸收指数 .....                  | (64) |
| 三、均匀地层点源的 $\gamma$ 辐射场 .....                 | (65) |
| 第二节 散射 $\gamma$ 能谱测井的关键技术 .....              | (68) |
| 一、散射 $\gamma$ 谱的数据采集和谱形特点 .....              | (68) |
| 二、泥饼对厚地层散射 $\gamma$ 射线的影响及其补偿原理 .....        | (70) |
| 三、 $P_e$ 的测量与计算 .....                        | (73) |
| 四、薄地层测井响应 .....                              | (74) |
| 第三节 散射 $\gamma$ 测井的应用 .....                  | (77) |
| 一、鉴别岩性 .....                                 | (77) |
| 二、求储集层孔隙度 .....                              | (80) |
| 三、其它用途 .....                                 | (81) |

## 第二篇 中子测井

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| <b>第四章 中子测井的核物理基础</b> ..... | (82)  |
| 第一节 中子和中子源 .....            | (82)  |
| 一、中子、中子源的一般特性 .....         | (82)  |
| 二、同位素中子源 .....              | (85)  |
| 三、加速器中子源 .....              | (87)  |
| 第二节 中子与物质的相互作用 .....        | (88)  |
| 一、中子与原子核的相互作用 .....         | (88)  |
| 二、中子与岩石的相互作用 .....          | (93)  |
| 第三节 中子探测原理 .....            | (96)  |
| 一、中子探测器 .....               | (96)  |
| 二、中子通量的测量 .....             | (97)  |
| 第四节 中子作用过程的数学模拟 .....       | (98)  |
| 一、蒙特卡罗(Monte Carlo)方法 ..... | (98)  |
| 二、蒙特卡罗方法解题举例 .....          | (99)  |
| <b>第五章 同位素源中子测井</b> .....   | (102) |
| 第一节 中子通量的空间分布 .....         | (102) |
| 一、简单扩散理论和扩散方程 .....         | (102) |
| 二、分组扩散法 .....               | (106) |



|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| 第二节 同位素中子源中子测井方法·····                | (108) |
| 一、超热中子测井·····                        | (108) |
| 二、热中子测井·····                         | (112) |
| 三、中子孔隙度测井的刻度和地层的含氢指数·····            | (114) |
| 四、中子孔隙度测井的探测深度和环境影响·····             | (118) |
| 第三节 中子孔隙度测井的应用·····                  | (119) |
| 一、岩性识别和求孔隙度·····                     | (119) |
| 二、识别和评价气层·····                       | (123) |
| 第六章 热中子寿命测井·····                     | (125) |
| 第一节 岩石的热中子宏观俘获截面和寿命·····             | (125) |
| 一、单一化合物的热中子宏观俘获截面和热中子寿命·····         | (125) |
| 二、岩石的热中子宏观俘获截面和热中子寿命·····            | (127) |
| 第二节 热中子宏观俘获截面和寿命的测定·····             | (132) |
| 一、热中子密度和 $\gamma$ 射线强度分布·····        | (132) |
| 二、热中子宏观俘获截面和寿命的测量原理·····             | (136) |
| 第三节 应用·····                          | (141) |
| 一、双探测器寿命测井曲线的定性解释·····               | (141) |
| 二、双探测器寿命测井曲线的定量解释·····               | (142) |
| 第七章 碳氧比 $\gamma$ 能谱测井·····           | (147) |
| 第一节 脉冲中子源在地层中激发的 $\gamma$ 射线·····    | (147) |
| 一、快中子非弹性散射 $\gamma$ 射线·····          | (147) |
| 二、热中子俘获辐射 $\gamma$ 能谱·····           | (150) |
| 三、脉冲中子源在地层中激发的 $\gamma$ 射线的时间分布····· | (153) |
| 第二节 $\gamma$ 能谱的数据采集和处理·····         | (153) |
| 一、源距选择和谱数据的采集·····                   | (153) |
| 二、 $\gamma$ 能谱的解析·····               | (154) |
| 三、典型仪器(RST)简介·····                   | (155) |
| 第三节 应用·····                          | (155) |
| 一、碳氧比的计算和饱和度模型·····                  | (156) |
| 二、应用实例·····                          | (160) |

### 第三篇 核磁测井

|                   |       |
|-------------------|-------|
| 第八章 核磁测井物理基础····· | (164) |
| 第一节 原子核的磁矩·····   | (164) |
| 一、闭合电流的磁矩·····    | (164) |
| 二、原子核的磁矩·····     | (165) |
| 第二节 核磁共振·····     | (167) |
| 一、核磁共振的微观描述·····  | (167) |
| 二、核磁共振的宏观理论·····  | (170) |

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 第三节 孔隙流体核磁共振弛豫机理·····    | (174) |
| 一、孔隙流体核磁共振弛豫机理分类·····    | (174) |
| 二、孔隙岩石中水、油和天然气的弛豫特性····· | (175) |
| 第九章 核磁测井技术与信号处理·····     | (179) |
| 第一节 核磁测井技术基础·····        | (179) |
| 一、含氢介质的磁化·····           | (179) |
| 二、核磁共振参数测量·····          | (179) |
| 第二节 核磁测井仪器·····          | (186) |
| 一、核磁共振成像测井仪·····         | (186) |
| 二、非成像核磁共振测井仪·····        | (188) |
| 第三节 核磁测井信号处理·····        | (190) |
| 一、奇异值分解法(SVD)·····       | (190) |
| 二、非线性最小二乘法·····          | (191) |
| 第十章 核磁测井的应用·····         | (194) |
| 第一节 核磁测井应用基础·····        | (194) |
| 一、孔隙度模型·····             | (194) |
| 二、渗透率模型·····             | (195) |
| 三、饱和度模型·····             | (196) |
| 四、采收率和可采储量·····          | (196) |
| 五、判定流体类型·····            | (197) |
| 第二节 核磁测井应用实例·····        | (198) |
| 实例 1: 识别低孔低渗油层·····      | (198) |
| 实例 2: 砂砾岩油藏储层评价·····     | (200) |
| 实例 3: 高含水稠油水淹油藏评价·····   | (200) |
| 实例 4: 差谱识别油、气层和油气界面····· | (200) |
| 实例 5: 粉砂岩低电阻率油层解释·····   | (200) |
| 参考文献·····                | (206) |

# 第一篇 $\gamma$ 测井

本篇将研究以岩石的  $\gamma$  放射性为基础的测井方法,即自然  $\gamma$  能谱测井和散射  $\gamma$  能谱测井。先介绍这两种方法共有的核物理基础,再分别研究各自的技术和应用。

## 第一章 $\gamma$ 测井的核物理基础

### 第一节 放射性和放射性衰变

#### 一、放射性

##### 1. 原子和原子核

原子是由原子核和核外电子组成的。原子的中心是原子核,核外电子按一定的轨道绕核运动。原子核的质量几乎等于整个原子的质量,但它只占着整个原子的极小的一部分几何空间。原子的直径约为  $10^{-8}$  cm,而原子核的直径仅有  $10^{-13} \sim 10^{-12}$  cm。所以在原子核和绕行电子之间,大部分空间是“空”的。由原子、分子组成的任何物质,如岩石、矿物都是可穿透和可探测的。

原子核是由质子和中子(两者统称为核子)组成的。质子和中子都能以自由状态存在,因此可以研究它们各自的性质。质子带有单位正电荷,实际上它就是氢的原子核,其质量为 1.007 58 u, u 为原子质量单位<sup>①</sup>。中子是不带电的中性粒子,其质量为 1.008 87 u。

原子核的质子数与核外电子数相等,它决定着原子的化学性质和在元素周期表中的位置,称为原子序数,并用  $Z$  表示。原子核中质子数  $Z$  与中子数  $N$  的和称为原子核的质量数,并用  $A$  表示,即  $A=Z+N$ 。

##### 2. 核素和同位素

一种核素是指原子核的质子数和中子数都相等并处于同一能态的同一类原子。核素由下列符号表示:

$${}^A_ZX$$

<sup>①</sup> 原子质量单位 u,等于一个<sup>12</sup>C核素的原子质量的 1/12,  $1\text{ u}=1.660\ 565\ 5\times 10^{-27}\text{ kg}$ 。

其中,  $X$  为元素符号(也是核素的名称),  $A$  和  $Z$  分别表示质量数和质子数。例如氚( ${}^3_1\text{H}$ )是一种核素, 它的原子核中有一个质子和两个中子。一种元素通常是由几种质子数(原子序数)相同的核素组成的, 这几种核素称为该种元素的同位素。例如氢( $\text{H}$ )元素是由三种核素组成的, 即 ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^3_1\text{H}$ 。由于元素符号本身已确定了原子序数  $Z$ , 所以这三种核素也可简写为 ${}^1\text{H}$ ,  ${}^2\text{H}$ ,  ${}^3\text{H}$ 。

某种核素在其天然同位素混合物中所占的原子核数目的百分比称为该核素的丰度, 如 ${}^1_1\text{H}$ 的丰度是 99.984 4%。一种元素的核物理性质是由该元素中包含的所有核素的核物理性质及其丰度决定的。

### 3. 放射性和放射性核素

1896 年, 法国物理学家贝可勒尔(A. S. Becquerel) 在研究铀矿石的荧光时, 发现铀能放射出一种看不见的射线, 它穿透力很强, 并能使照相底片感光。这就是人类第一次观察到的放射性现象。进一步研究确定, 这类射线是在原子核发生变化时发射出来的。原子核自发发射各种射线的性质统称放射性。

原子核能自发发生变化的核素称为放射性核素, 不能自发发生变化的核素是稳定核素。在氢的同位素中,  ${}^1\text{H}$ ,  ${}^2\text{H}$  是稳定核素, 而 ${}^3\text{H}$  是放射性核素。放射性元素中至少有一种或全部核素是放射性的。

### 4. 核射线

放射性物质发射的射线有三种, 即  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $\gamma$  射线。这三种射线的特性各不相同, 在核测井中有不同的用途。

(1)  $\alpha$  射线是高速运动的氦原子核( $\alpha$  粒子), 它的穿透能力最低, 但电离能力最强。在核测井中, 利用  $\alpha$  粒子与某些原子核的相互作用可制造中子源。

(2)  $\beta$  射线是高速运动的电子流, 它的穿透能力较  $\alpha$  射线强, 但电离能力较  $\alpha$  射线弱。在核测井中, 能发射  $\beta$  粒子的某些核素, 可做井间监测示踪剂。

(3)  $\gamma$  射线是波长很短的电磁波, 它的贯穿能力最强, 但电离能力最弱。 $\gamma$  射线能穿透几十厘米的地层、水泥环、套管和下井仪器的外壁而被探测器接收到, 是核测井的主要探测对象。

## 二、放射性衰变

### 1. 核衰变

核衰变有下列几种方式:

#### (1) $\alpha$ 衰变

原子核自发发射  $\alpha$  粒子( ${}^4_2\text{He}$  核)转变成另一种原子核的放射性现象称为  $\alpha$  衰变。 $\alpha$  衰变过程可表示为



式中  ${}_Z^AX$ ——母核;

${}_Z-2^{A-4}Y$ ——子核;

${}_2^4\text{He}$ ——发射出的  $\alpha$  粒子。

例如



由  $\alpha$  衰变产生的子核可处于不同的分立的能级, 它可以处于基态, 也可以处于较高的能级, 即处于激发态, 然后放出  $\gamma$  光子再回到基态。子核的激发能越高, 对应的  $\alpha$  粒子的能量越低, 退激

时放出的  $\gamma$  光子的能量就越高。 $^{228}_{90}\text{Th}$  经  $\alpha$  衰变产生的  $^{224}_{88}\text{Ra}$  可处于基态、第一激发态、第二激发态、第三激发态,退激时可产生 6 组能量不同的  $\alpha$  射线。在地层中有几十种天然放射性核素, $\gamma$  射线的能量组成是很复杂的。

## (2) $\beta$ 衰变

原子核自发地放射出负电子、正电子或俘获一个轨道电子而发生的转变,统称为  $\beta$  衰变。细分之,可分别称为  $\beta^-$  衰变、 $\beta^+$  衰变和轨道电子俘获。

1)  $\beta^-$  衰变 母核  $^A_Z\text{X}$  经  $\beta^-$  衰变到子核  $^A_{Z+1}\text{Y}$  表示为



其净过程为



式中  $\bar{\nu}$  是反中微子( $\nu$  是中微子),它是质量几乎等于零的中性粒子。由于有中微子参与, $\beta^-$  粒子的能量谱是连续的。

$\beta^-$  衰变的本质是原子核中的一个中子转变成质子。当母核原子质量大于子核原子质量时,可以发生  $\beta^-$  衰变。例如  $^3\text{H}$ (氚)的  $\beta^-$  衰变可表示为



$^3\text{H}$  的半衰期为 12.33 a。

2)  $\beta^+$  衰变 当母、子核原子质量之差大于电子质量 2 倍时,可发生  $\beta^+$  衰变。 $\beta^+$  衰变可表示为



$\beta^+$  衰变是原子核中的一个质子转变成中子,其净过程为



例如



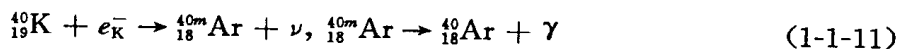
3) 轨道电子俘获(EC) 当母、子核原子静止能量之差大于壳层电子结合能时可发生轨道电子俘获,其衰变式为



过程的实质是核内的一个质子俘获一个轨道电子而转变成中子,即



例如  $^{40}\text{K}$  可发生 K 层电子俘获,生成激发态的氩,再放出一个能量为 1.46 MeV 的  $\gamma$  光子而回到基态,核衰变式为



它还能通过  $\beta^-$  衰变生成基态的  $^{40}\text{Ca}$ , 衰变式为



只有(1-1-11)式表示的衰变方式能产生光子,衰变的分支比为 11%。这意味着,若有 100 个  $^{40}\text{K}$  核衰变,大约只有 11 个能发生 K 层电子俘获并发射  $\gamma$  射线。 $^{40}\text{K}$  发射的能量为 1.46 MeV 的  $\gamma$  射线,是自然  $\gamma$  能谱测井的测量对象。

轨道电子俘获产生的原子,内层电子缺少了一个。例如 K 层有一个电子被俘获,邻近的 L 层电子就会有一个跳到 K 层来填补空位,多余的能量将以特征 X 射线的形式发射出来。

4)  $\gamma$  跃迁和内转换 由  $\alpha$ 、 $\beta$  衰变产生的子核往往处于激发态,而后可通过发射  $\gamma$  射线或

内转换电子释放多余的能量而退激到基态。激发态的原子核通过发射  $\gamma$  射线而退激到较低能级或基态的过程,称为  $\gamma$  跃迁,或称  $\gamma$  衰变。而激发态的原子核,退激时若将能量传递给某个壳层电子(如  $K$  壳层电子)使电子(内转换电子)发射出去,则称为内转换。

例如  $^{137}\text{Cs}$  经过  $\beta^-$  衰变转变成  $^{137}\text{Ba}$  的激发态  $^{137m}\text{Ba}$ ,而后  $^{137m}\text{Ba}$  可以经过两种方式退激:①发射能量为 0.662 MeV 的  $\gamma$  射线;②把能量传给  $K$  层或  $L$  层电子,使它们发射出去。

与轨道电子俘获相似,在发射内转换电子后,原子壳层出现了空位,外壳层电子就会来填补,伴随发射特征 X 射线和俄歇电子。

## 2. 核衰变基本规律

原子核发生  $\alpha$  或  $\beta$  等衰变后,原来的原子核数随时间推移会逐渐减少。如果用  $N(t)$  表示时刻  $t$  存在的原子核数,那么在时刻  $t$  到  $t+dt$  之间发生衰变的原子核数  $-dN(t)$  就应当和  $N(t)$  及  $dt$  成正比,即

$$-dN(t) \propto N(t)dt \quad (1-1-13)$$

把比例式改为等式并引进比例常数  $\lambda$ (即衰变常数)则得

$$-dN(t) = \lambda N(t)dt \quad (1-1-14)$$

此式的积分形式是

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-1-15)$$

式中,  $N_0$  为  $t=0$  时的原子核数。

衰变常数  $\lambda$  的物理意义是:一个原子核在单位时间内发生衰变的几率。放射性原子核数经衰变减少一半所经过的时间,称为该种核素的半衰期,通常用  $T_{1/2}$  表示,它等于  $0.693/\lambda$ 。而原子核的平均寿命  $\tau=1/\lambda$ 。

一个放射源在单位时间内发生衰变的原子核数称为它的放射性活度<sup>①</sup>(或称衰变率)。放射性活度的国际单位是贝可勒尔(Becquerel),简称贝可(Bq),其定义为

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1} \quad (1-1-16)$$

即放射源每秒产生一次衰变为 1Bq。它和原有的放射性活度单位居里(Ci)的关系为

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} \quad (1-1-17)$$

目前居里(Ci)仍可和贝可(Bq)并行使用。应当特别注意,若两种放射源活度相同,只表明在单位时间里它们的核衰变数相同,并不表明在单位时间里它们发射的粒子( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ )数也相同。例如,每个  $^{60}\text{Co}$ (钴-60)原子核衰变时,发射一个  $\beta$  粒子和两个  $\gamma$  光子,而每个  $^3\text{H}$ (氚)原子核衰变时,只发射一个  $\beta^-$  粒子。

## 3. 连续放射性衰变

### (1)放射系

式(1-1-15)是一种放射性核素单独存在时所遵循的衰变规律,实际上往往有很多放射性核素会一个接一个地连续发生衰变,一般可表示为

$$A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow \dots \quad (1-1-18)$$

即放射性核素  $A$  经衰变生成核素  $B$ ,核素  $B$  也是放射性核素,经衰变生成核素  $C$ ,...,这就是连续衰变。连续衰变时放射性原子核所构成的系列称为放射系,天然放射系有三个,即钍系、铀系和锕系。这三个放射系的第一代核素都具有很长的半衰期,和地球年龄同数量级或者更长,因而经过漫长的地质年代后还能够在地层中保存下来。锕系对岩石的天然放射性贡献很小,下

<sup>①</sup> 放射性活度过去也称放射性强度。

面只介绍钍系和铀系。

1) 钍系 钍系是从 $^{232}\text{Th}$ (钍-232)开始的,它的半衰期是 $1.41 \times 10^{10} \text{ a}$ ,这大约是地球年龄的6倍,这样长的半衰期使得 $^{232}\text{Th}$ 和它的衰变产物能够遗留在地壳中, $^{232}\text{Th}$ 和它的各代子体之间的衰变关系见图1-1-1。图1-1-1中的横坐标代表原子序数 $Z$ ,纵坐标代表质量数 $A$ , $^{232}\text{Th}$ 和它的衰变产物在图1-1-1中用实线的圆圈表示,圆圈中的符号是这种核素的名称。各核素间的衰变关系在图中用实线表示。根据位移定则,发生 $\alpha$ 衰变时,电荷数少2,质量数少4,所以箭头指向左下方;发生 $\beta$ 衰变时,电荷数增加1,而质量数不变,箭头就水平地指向右。实线旁的数字是该种核素的半衰期。

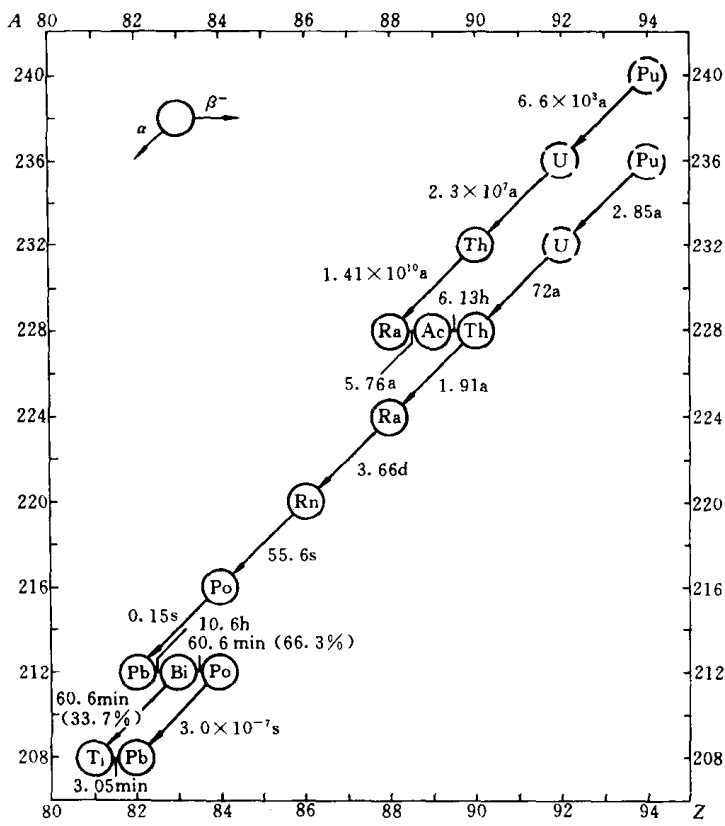


图 1-1-1 钍系<sup>[1]</sup>

系中有些核素能按几种方式衰变,例如 $^{212}\text{Bi}$ (铋-212),既能通过 $\alpha$ 衰变变为 $^{208}\text{Tl}$ ,又能通过 $\beta$ 衰变变成 $^{212}\text{Po}$ ,这种现象叫分支衰变。对分支衰变,核素的总衰变常数 $\lambda$ 为各分支衰变常数 $\lambda_i$ 的代数和,而分支衰变常数 $\lambda_i$ 与总衰变常数 $\lambda$ 之比称为分支比。圆括号内的数字33.7%和66.3%,表明 $^{212}\text{Bi}$ 发生 $\alpha$ 衰变的分支比为33.7%,而通过 $\beta$ 衰变的分支比为66.3%。图1-1-1中用虚线的圆圈表示用人工方法制造的和天然放射系相连的核素。钍系中各个放射性核素质量数 $A$ 都等于4的整数倍。

2) 铀系 铀系从 $^{238}\text{U}$ (铀-238)开始,到 $^{206}\text{Pb}$ 结束, $^{238}\text{U}$ 的半衰期是 $4.47 \times 10^9 \text{ a}$ ,各代子体之间的衰变关系见图1-1-2,这一系列核素的质量数是 $4n+2$ 。

(2)放射性平衡

为讨论方便,设某一放射性衰变序列只有两个环节,即 $A \rightarrow B \rightarrow C$ ,其中放射性核素 $B$ 不断





此式表示  $B$  核素原子核数  $N_2(t)$  随时间变化的规律。

为讨论方便,现将(1-1-22)式改写为

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{-\lambda_1 t} [1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}] \quad (1-1-23)$$

可以看出:母体和子体的平衡关系是由  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的相对大小确定的,并可分为三种情况:

1) 不成平衡( $\lambda_1 > \lambda_2$ ) 若  $\lambda_1 > \lambda_2$ ,即母体比子体衰变得快,(1-1-23)式可改写为

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} N_{10} [e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}] \quad (1-1-24)$$

当  $t=0$  时,子体的数量为零,而后随着母体的衰变而逐渐增加,在某一特定的时间达到极大值,以后就会越来越小。当  $t$  足够大时,必然会有

$$e^{-\lambda_2 t} \gg e^{-\lambda_1 t} \quad (1-1-25)$$

此时将(1-1-24)式括号中的第二项略掉,得

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} N_{10} e^{-\lambda_2 t} \quad (1-1-26)$$

可见,当时间足够长时,子核将按它单独存在时的规律来衰减,母体和子体不可能实现任何平衡。

2) 暂时平衡( $\lambda_1 < \lambda_2$ ) 若  $\lambda_1 < \lambda_2$ ,即母体比子体衰变得慢,但如果  $\lambda_1$  还不够小,就只能建立暂时平衡。当  $t$  足够长时,有

$$e^{-\lambda_1 t} \gg e^{-\lambda_2 t}$$

此时

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{-\lambda_1 t} \quad (1-1-27)$$

当时间足够长时,有

$$\frac{N_2(t)}{N_1(t)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (1-1-28)$$

此后子体和母体的核数比为一常数,这种现象称之为暂时平衡。

3) 长期平衡( $\lambda_1 \approx 0, \lambda_1 \ll \lambda_2$ ) 当  $\lambda_1 \approx 0$  和  $\lambda_1 \ll \lambda_2$  时,(1-1-24)式可简化为

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10} [1 - e^{-\lambda_2 t}] \quad (1-1-29)$$

当  $t$  足够长时,有

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10} \quad (1-1-30)$$

此后子核数不再随时间变化,子体的放射性活度恒等于母体的初始放射性活度,即

$$\lambda_1 N_{10} = \lambda_2 N_2(t) \quad (1-1-31)$$

这种情况称之为长期平衡。

对更长的系列,可以推出第  $n$  个核素的原子核数为

$$N_n(t) = N_{10} [C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + \cdots + C_n e^{-\lambda_n t}] \quad (1-1-32)$$

系数  $C_1, C_2, \cdots, C_n$  是与第  $n$  个核素以前的各个核素的衰变系数有关的常数。对于多代子体的放射性系列,只要母体  $A$  是长寿命的,则当时间足够长时,整个放射系都会达到长期平衡,这时各代子体的原子核数都不再随时间变化,它们的放射性活度将彼此相等,即

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \cdots \quad (1-1-33)$$