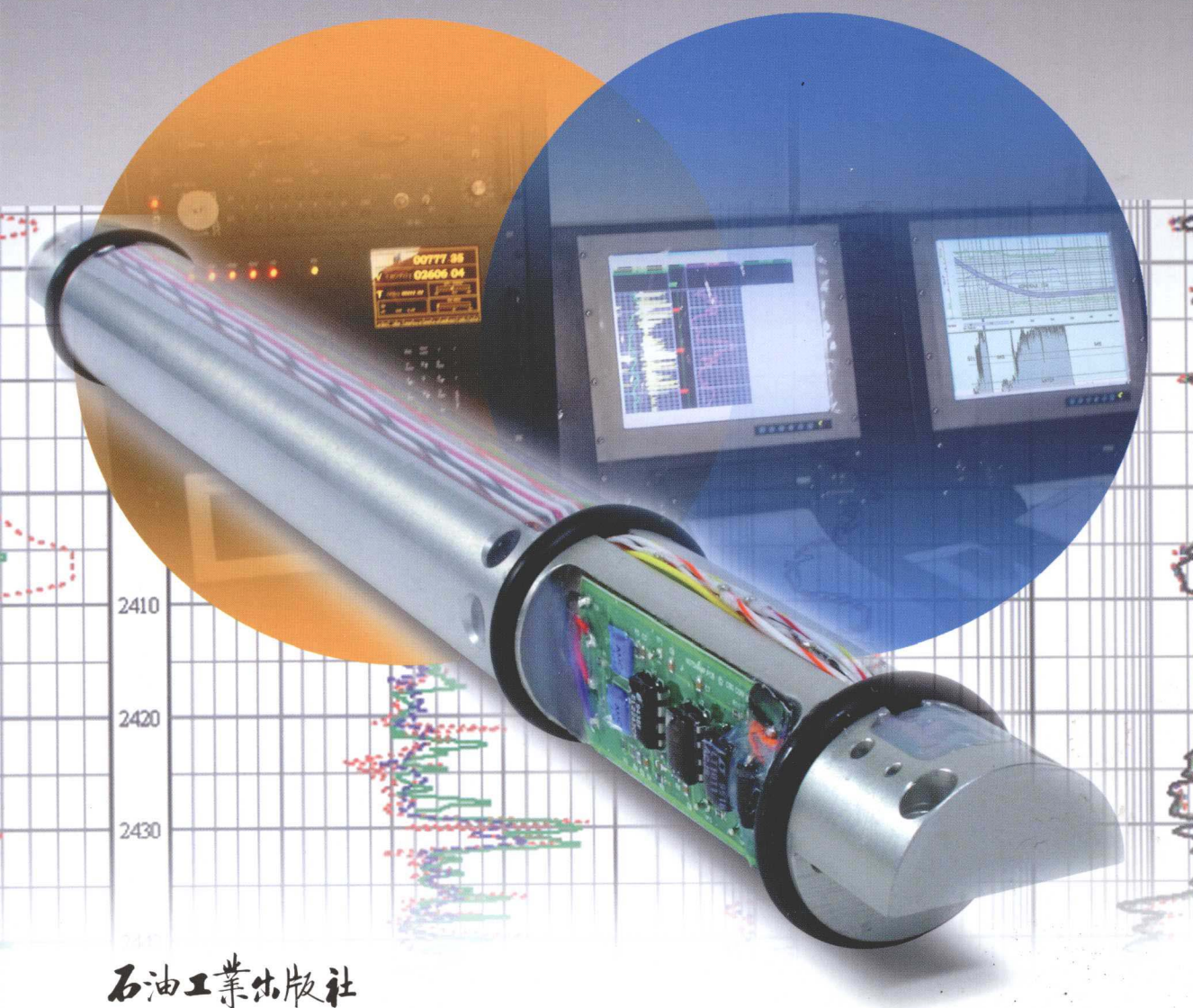


TANYANGBI CEJING YIQI YUANLI JI YINGYONG

碳氧比测井仪器 原理及应用

郭清生 罗正权 张爱娟 编著



石油工业出版社

碳氧比测井仪器原理及应用

郭清生 罗正权 张爱娟 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书共分五章, 主要介绍核测井、井下脉冲中子发生器、屏蔽体、仪器结构、半导体探测器的研制与开发等内容。全书注重从实际出发, 让读者看书时明白, 动手时更清楚, 有样本, 有思路。

本书是专为从事核测井仪器使用、生产、科研人员、在校学生编写的科普读物。

图书在版编目 (CIP) 数据

碳氧比测井仪器原理及应用 / 郭清生, 罗正权, 张爱娟编著.
北京: 石油工业出版社, 2012.2

ISBN 978-7-5021-8834-4

I . 碳…
II . ①郭…②罗…③张…
III . 测井仪
IV . TH763.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 253722 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523736 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2012 年 2 月第 1 版 2012 年 2 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 11.75

字数: 279 千字

定价: 50.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

本书是以笔者在 1969 年至 2007 年所取得的科研进展的基础上编写的，暗示了每个科研阶段核测井科研灵感产生的过程，展示了众多人百分之九十九的汗水，显示着一个团队坚韧不拔的毅力，伴随着大庆油田核测井事业的发展。编写本书的目的为：一、通过学习核测井的基本知识，培养核测井新人善于产生科研灵感、勇于创新的工作方法；二、学习核测井老团队不管道路如何曲折，为核测井奋斗一辈子始终如一的精神。

全书共分五章。第一章讲述核测井的基础知识。参考了郭余峰教授编写的《石油测井中核物理基础》、周介文教授编写的《放射性基础知识与放射性测井》、黄隆基教授编写的《放射性测井原理》。有些是段落摘抄，有些是根据自己理解编写。第二章讲述井下脉冲中子发生器。当初，最早接触的是西安石油仪器厂研究所提供的中子寿命脉冲中子发生器，因此西安仪器厂研究所的一些老同志是笔者的启蒙老师。在每个发展阶段，他们都给予了热情帮助。有些地方就是参考了他们的资料写成的。此外，东北师范大学原子核研究室的魏宝杰老师在自成靶中子管的研制和应用方面也给予了很大帮助。120kV 高压电源是在北京原子能科学院高压电源基础上改进的。第三章介绍了核测井仪器的结构设计。讲述了笔者在每个核测井发展阶段，依靠实践产生科研灵感推动项目发展的过程，以及众多人付出的巨大努力。一个人只有溶于集体团队之中，才能有个人创新。在地面与井下仪器数字化方面，北京核仪器厂、原子能科学院、北京航空航天大学通过项目合作，对核测井的发展都做出了很大贡献。第四章讲述核测井仪器井下几种伽马探测器。半导体探测器的基础知识笔者参考了吉林大学丁肇忠教授的讲课笔记。半导体探测器碳氧比测井资料是根据原子能科学院与地球物理研究所合作时的笔记整理写成。因笔者未参与该项目，也难免有不正确之处。在新探测器应用方面，始终得到吉林大学周介文等教授的帮助。有关光电倍增管的知识参考了厂家产品说明书，根据笔者的想法，说明如何应用。第五章给出了实验室内常用电子仪器小功率变压器的设计、估算公式，以及碳氧比测井人们比较关心的几种谱线、能段等，目的是为了给读者方便。对核测井的一些问题，谈了笔者的一些想法，目的是为了活跃学术气氛。

核测井方面的著作有《石油测井中的核物理基础》、《放射性测井原理》、《放射性基本知识及放射性测井》。这些著作重理论而实践较少，本书也算是对某些方面的实践吧。本书初稿成于 2008 年 3 月，其中最大的缺陷是未涉及地面仪器和井下仪器数字化问题，希望擅长于数字化测井的学者，特别是中青年碳氧比测井仪器和解释专家，能完善之。

本书参考了若干作者的著作或仪器说明书，在此一并表示衷心感谢。由于笔者精力、科研水平有限，书中存在的不足，敬请读者提出宝贵意见。

2011 年 5 月 11 日

目 录

第一章 核测井基础知识.....	1
第一节 中子源.....	1
一、核衰变	1
二、核测井常用中子源	2
三、人工可控中子源	3
四、快中子非弹性散射	4
五、中子的弹性散射	4
六、辐射俘获核反应	6
七、快中子对原子核的活化核反应	7
八、核反应截面	10
九、中子探测器应用的核反应	11
十、常用核物理概念和名词	11
第二节 伽马射线源.....	15
一、伽马射线源	15
二、伽马射线的三种效应截面	16
三、光电效应	17
四、康普顿效应	18
五、电子对效应	19
六、伽马射线的吸收	20
七、伽马射线探测的基本原理	21
八、伽马射线闪烁探测器	22
第二章 井下脉冲中子发生器.....	24
第一节 中子管.....	24
一、商品靶中子管	24
二、自成靶中子管	25
三、带阿尔法粒子探测器的中子管	27
四、中子管的检测	28
五、四种外形尺寸的中子管	28
六、中子管的使用与货架上保管	29
七、中子管的改进想法	31

第二节 中子管控制电路	31
一、热阴极中子管控制电路	31
二、NP-3 型点测碳氧比能谱测井仪器控制电路	35
三、NP-4 型连续测量碳氧比能谱测井仪器控制电路	37
四、NP-5 型中深井碳氧比能谱测井仪器控制电路	40
五、MZ-4 型碳氧比能谱测井仪器高中子产额阳极脉冲电路	44
六、数字化碳氧比能谱测井仪器阳极脉冲电路	47
七、中子寿命测井仪器井下中子发生器控制电路	49
八、碳氧比能谱测井仪、中子寿命综合测井仪中子发生器中子管离子源阳极脉冲 高压模块	50
九、变压器输出阳极脉冲锐截止的中子管控制电路	53
十、CLS 3700 系列 2727 碳氧比能谱测井仪器脉冲中子发生器控制电路	54
十一、双向液流脉冲中子氧活化测井仪器控制电路	55
十二、“悬浮中子管离子源”式脉冲中子发生器结构, 氙气贮藏器井下控制电路	57
十三、如何把控制电路做可靠的改进想法	58
第三节 中子管靶极 120kV 高压电源	59
一、NP-1 型、NP-2 型碳氧比能谱测井仪器井下 120kV 高压电源	59
二、NP-3 型点测碳氧比能谱测井仪器 120kV 高压电源	60
三、NP-4 型连续测量碳氧比能谱测井仪器井下 120kV 高压电源	62
四、NP-5 型中深井碳氧比能谱测井仪器 120kV 高压电源	63
五、MZ-4 型碳氧比能谱测井仪器 120kV 高压电源	65
六、数控碳氧比能谱测井仪器 120kV 高压电源	67
七、双向液流脉冲中子氧活化测井仪器 120kV 高压电源	68
八、120kV 高压电源输出电压高低的控制	72
九、高压倍加器	74
十、120kV 高压电源的调试	77
十一、中子管靶流的测试	78
十二、120kV 高压电源的改进建议	79
第四节 井下脉冲中子发生器	80
一、井下脉冲中子发生器的工作频率和打中子宽度	80
二、井下脉冲中子发生器电源	81
三、井下脉冲中子发生器	83
第三章 核测井仪器的结构设计	86
第一节 脉冲中子发生器结构	87
一、20 世纪 60 年代国产中子寿命测井仪脉冲中子发生器结构	87

二、中子管“半调头”式脉冲中子发生器结构	88
三、中子管“调头”式脉冲中子发生器结构	88
四、“悬浮中子管离子源, 一正一负, 一推一拉”式脉冲中子发生器结构	89
五、“悬浮中子管离子源, 靶接地”式脉冲中子发生器结构	91
六、双向液流(WFL)脉冲中子氧活化测井仪器中子发生器结构	92
七、双向四探测器中子寿命测井仪器脉冲中子发生器结构	93
八、双探测器碳氧比、四探测器中子寿命同次测量综合(N、 γ 全谱) 仪器脉冲 中子发生器结构	93
九、六氟化硫绝缘气体	96
十、电气绝缘油	97
十一、电气绝缘固体材料及机械设计中常用几种高级合金钢	98
第二节 屏蔽体、金属杜瓦瓶	99
一、屏蔽体	99
二、20 世纪 70 年代碳氧比能谱测井项目室内实验数据	101
三、双探测器锗酸铋晶体碳氧比能谱测井仪器模型井刻度数据	102
四、碳氧比能谱测井的蒙特卡罗模拟计算	104
五、金属杜瓦瓶的设计	109
六、金属杜瓶内的吸热剂	110
七、金属杜瓦瓶的温度试验	111
第四章 伽马射线探测器	113
第一节 半导体探测器	113
一、半导体探测器的基础知识	113
二、PN 结型半导体探测器	118
三、同轴锗锂伽马射线探测器	119
四、电荷灵敏放大器	121
五、锗锂探测器碳氧比能谱测井室内试验	122
第二节 闪烁体探测器	124
一、闪烁体	124
二、碘化钠闪烁体	126
三、锗酸铋闪烁体	126
四、锗酸铋晶体的性能及应用	127
五、过氧硅酸钆晶体	133
六、其他几种闪烁体	133
七、在碳氧比能谱测井中使用过的几种闪烁体	134
第三节 光电倍增管	136

一、光电倍增管的基本原理和结构	136
二、光电倍增管的性能及参数	139
三、光电倍增管的分压器设计	144
四、光电倍增管的输出电路	149
五、光电倍增管的高压电源	151
第四节 中子探测器	153
一、中子闪烁探测器	153
二、三氟化硼正比计数管	155
三、氦三计数管	155
第五章 碳氧比测井基础知识与讨论	158
第一节 碳氧比测井基础知识	158
一、实验室内常用仪器小型变压器的设计	158
二、电子仪器的重要元件——电阻	161
三、助焊剂	163
四、高温高压电容的手工制作	163
五、碳氧比能谱测井曲线的能段	164
六、双探测器碳氧比能谱测井仪器的计算公式	171
七、中子寿命测井的基本公式	172
八、双向液流脉冲中子氧活化测井的基本公式	173
第二节 碳氧比测井的讨论	174
一、碳氧比测井目前存在的问题	174
二、套管井含油饱和度测井系列	177
三、水淹层特点	178
参考文献	180

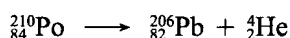
第一章 核测井基础知识

无论是现场利用核测井仪器进行测井的工作者，还是新核测井仪器研发者，譬如双向液流脉冲中子氧活化测井仪、双向四探测器中子—中子测井仪、双向地层饱和度测井仪（它是在中子管两端，一端放两个伽马射线探测器，测量碳氧比。另一端放两个氦三计数管，测量中子寿命），或是核测井曲线的解释工作者，掌握一些放射性基础知识都是十分必要的。掌握了这些基础知识，当研究新的测井方法、开发新的仪器时，就会选择放射源的类型、射线能量、射线强度，就能少走弯路或不走弯路，顺利完成生产和科研任务。

第一节 中 子 源

一、核衰变

放射性同位素的原子核自发地衰变，并放出放射性射线的性质称为放射性。在衰变过程中将放射出粒子，如 α 粒子、 β 粒子、 γ 射线，这种现象称为核衰变。在 1s 内，有 3.7×10^{10} 次核衰变称为 1Ci（居里）。例如：钋的原子核衰变：



原子序数为 84 以上的元素都有放射性。原子序数低于 84 的元素，只有某些元素具有自然放射性，如 ${}_{39}^{40}\text{K}$ 。

任何元素衰变时，它的数量按下述规律减少：

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

式中 N_0 ——放射性元素的原始含量；

t ——时间；

N ——经过 t 时间后的放射性元素含量；

λ ——衰变常数。

令放射性元素含量衰减一半，所需要的时间叫作半衰期 T ，即 $N = 1/2 N_0$ ， $t = T$ ，代入式 (1-1-1)，经整理得：

$$T = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda \quad (1-1-2)$$

显然， λ 越大，半衰期越短，放射性元素衰减的越快。

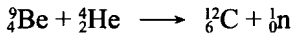
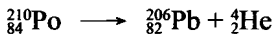
λ 的物理意义是 1s 原子核的衰变几率，不同种类的原子核的 λ 值是不同的。 λ 的倒数称为原子核的平均寿命，是指母体原子核在衰变前的平均生存时间，通常用 τ 表示。它与半衰变期 T 的关系如下式：

$$\tau = 1 / \lambda = T / 0.693 = 1.44 T \quad (1-1-3)$$

二、核测井常用中子源

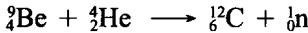
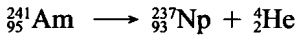
中子是由核反应产生的，在所有元素中除了氢的同位素 ^1_1H 之外，几乎全部原子核中都含有中子。当用 α 粒子、 p 质子、 ^3_1H 氚核、 ^3_2He 氦核及高能伽马量子轰击靶时，使靶生成激发态的复合核。如果激发能超过了复合核内的中子结合能时，中子就可以从原子核中分离出来，形成中子源。利用 (α, n) 核反应产生的中子源叫做放射性同位素中子源，即人工不可控中子源。

钋—铍中子源 ($^{210}_{84}\text{Po} + ^9_4\text{Be}$) 中，放射性同位素钋 ($^{210}_{84}\text{Po}$) 在衰变时放射出能量为 5.3MeV 的 α 粒子 (^4_2He)，半衰期为 138.3 天， α 粒子轰击 (^9_4Be) 产生中子，核反应式如下：



1Ci 的钋—铍中子源每秒辐射出的中子数为 2×10^6 。中子能量分布在 $1 \sim 11\text{MeV}$ 范围内，能谱主值位于 $3 \sim 5\text{MeV}$ 。这种中子源的优点是伴生的伽马量子少，平均每放射出 1 个中子，伴生的伽马量子为 10^{-5} ，因此对中子测量的读数干扰少；再者是价格便宜，缺点是半衰期短。

镅—铍中子源 ($^{241}_{95}\text{Am} + ^9_4\text{Be}$) 中，放射性同位素镅衰变时放出 α 粒子，去轰击铍产生中子。核反应式如下：



镅—铍中子源的半衰期为 433 年，中子的能量分布在 $0.1 \sim 11.2\text{MeV}$ 范围内，平均能量为 5MeV 。 1Ci 的镅—铍中子源每秒内辐射出的中子数为 $2.2 \times 10^6 \sim 2.7 \times 10^6$ ，伴生的伽马量子少。其伴生的伽马量子的能量，与碳元素被 14.1MeV 中子照射时，发生非弹性散射核反应产生的非弹性散射伽马量子的能量 (-4.43MeV) 相同。

为便于比较，现将几种类型中子源的数据列于表 1-1-1。图 1-1-1 和图 1-1-2 分别为两种中子源的能量谱线。

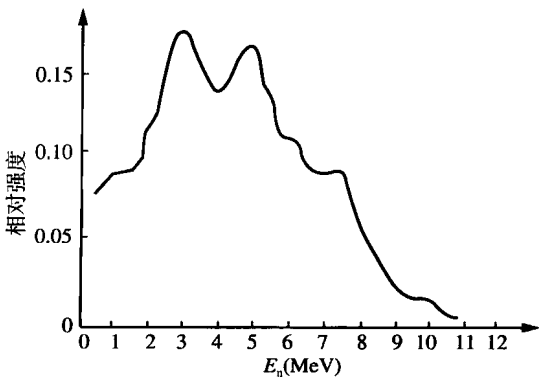


图 1-1-1 钋—铍中子源中子能量谱线

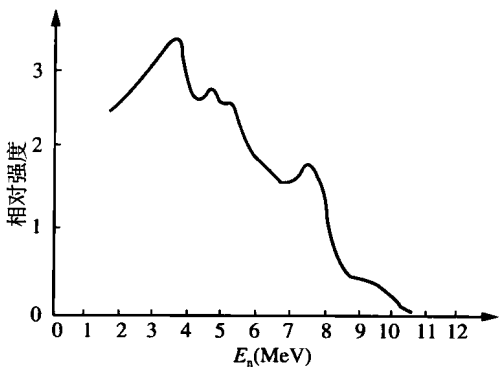


图 1-1-2 镅—铍中子源中子能量谱线

表 1-1-1 常用 (α, n) 中子源及其特性

中子源名称	半衰期 <i>T</i>	中子平均能量 (MeV)	中子产额 (10 ⁶ s ⁻¹ Ci ⁻¹)	伽马本底 (10 ⁻⁶ mR·h ⁻¹ ·m ⁻¹)
²¹⁰ Pb - ⁹ Be	22.3a	2.5 ~ 5.0	2.3 ~ 2.5	9
²¹⁰ Po - ⁹ Be	138.38d	4.2	2.3 ~ 3.0	< 0.1
²²⁶ Ra - ⁹ Be	1600a	3.9 ~ 4.7	10.0 ~ 17.1	60
²²⁷ Ac - ⁹ Be	21.773a	4.0 ~ 4.7	15 ~ 26	8
²²⁸ Th - ⁹ Be	1.9131a		17 ~ 20	30
²³⁸ Pu - ⁹ Be	87.74a	5.0	2.2 ~ 4.0	< 1
²³⁹ Pu - ⁹ Be	2.41 × 10 ⁴ a	4.5 ~ 5.0	1.5 ~ 2.7	< 1
²⁴¹ Am - ⁹ Be	433a	5.0	2.2 ~ 2.7	< 1
²⁴² Am - ⁹ Be	162.8d		3.0 ~ 7.0	< 1
²⁴⁴ Cm - ⁹ Be	18.11a		6.0	< 1

自发裂变中子源钷 (²⁵²Cf) 在所有重核中, 以钷作为中子源最合适, 它的半衰期为 85.5a, α 衰变半衰期为 2.64a。中子产额 $2.31 \times 10^{13}\text{s}^{-1}\text{Ci}^{-1}$, 中子平均能量 2.2MeV。

按中子能量通常分为特快中子、快中子、中能中子、慢中子。

特快中子其能量在 10 ~ 50MeV 之间, 这类中子与原子核作用时, 除发生弹性散射和非弹性散射之外, 还可以发生放射两个或两个以上的粒子核反应。快中子其能量在 0.5 ~ 10MeV 之间, 这类中子与原子核的作用的主要形式是弹性散射和非弹性散射。中能中子其能量在 1keV ~ 0.5MeV 之间, 这类中子与原子核作用的主要形式是弹性散射。慢中子其能量在 0 ~ 1keV 之间, 这类中子与原子核作用的主要形式是 (n, n) 和 (n, γ) 核反应。

慢中子包括热中子、冷中子、超热中子和共振中子。

热中子能量为 0.025eV, 冷中子能量低于热中子, 超热中子能量大于等于 0.5eV, 共振中子能量在 1 ~ 1000eV 之间。共振中子与原子核作用时, 能够产生强烈的共振吸收, 吸收截面很大。

三、人工可控中子源

通常用粒子加速器将 p、d、α 等带电粒子加速到一定能量, 然后用它们去轰击原子质量比较低的靶核产生 (p, n)、(d, n) 和 (α, n) 核反应。这种类型的中子源叫作加速器中子源。模仿这种中子源, 制成了测井中子管, 中子管由加速电极、加速空间、离子源组成, 实质上是一个小型加速器。

测井应用这种中子管制成人工可控中子源叫作井下中子发生器, 由中子管、离子源控制电路、120kV 高压电源组成。它的工作方式, 可以做成像同位素中子源一样连续放射源, 也可以做成脉冲式放射源。正因为有了井下脉冲中子源, 才有了脉冲中子测井。

中子管内部发生两种核反应 :

(1) 氘-氘核反应式。 ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \longrightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + 17.59\text{MeV}$

(2) 氘-氚核反应式。 ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \longrightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + 3.269\text{MeV}$

氘-氚核反应中, 入射氘粒子能量达到 0.126MeV 时, 反应截面最大, 中子产额最高,

发射 14.1MeV 中子。

氘—氘核反应中，入射粒子能量达到 2MeV 时，反应截面最大，中子产额最高，发射 2.23MeV 中子。

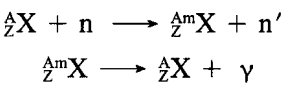
由于氘—氘核反应需要能量为 2MeV，中子管靶极电压必须非常高，但是井下仪器只有 120kV，所以该反应中子产额非常低。因此主要是氘—氘核反应产生 14.1MeV 的中子。

关于井下脉冲中子发生器，将在以后的章节中做详细讲述。

四、快中子非弹性散射

快中子撞击到原子核上被靶核吸收，靶核形成复合核，复合核放射出一个能量较低的中子，余核仍处于激发态，余核通过放出伽马射线方式释放出激发能而跃迁到基态，这种核反应称为非弹性散射。由此反应产生的伽马射线，叫作非弹性散射伽马射线。

非弹性散射核反应式：



非弹性散射又称为 (n, n') 核反应，其特点是反应前后的总动能不守恒，有一部分动能反应后转变为余核的激发能。中子的能量必须大于靶核的最低激发能级才能发生非弹性散射，即：

$$E_0 = E_\gamma \times (M + m) / M \tag{1-1-4}$$

式中 E_0 ——入射中子的能量；
 E_γ ——放出的伽马射线的最低能量；
 M ——反冲原子核的品质；
 m ——中子的能量。

一个快中子与一个靶核发生非弹性散射的几率叫做非弹性散射截面，单位是巴 (b)，即 10^{-24}cm^2 。非弹性散射截面随着中子能量增大及靶核质量数的增加而增大。脉冲中子发生器发射 14.1MeV 的中子射入地层后，在最初 $10^{-8} \sim 10^{-7}\text{s}$ 的时间间隔内，中子的非弹性散射占支配地位，发射的伽马射线几乎全部为非弹性散射伽马射线。如果在 中子发射 $10^{-8} \sim 10^{-7}\text{s}$ 的间隔内，选择记录由 ^{12}C 、 ^{16}O 元素产生的非弹性散射 4.43MeV 及 6.13MeV 的伽马射线，就能得到反映井下地层剖面中含碳量和含氧量的测井曲线。表 1-1-2 列出几种核素的快中子非弹性散射截面。根据碳和氧一定能量段计数率的比值，用来区分油、水层的测井方法叫做碳氧比能谱测井。

五、中子的弹性散射

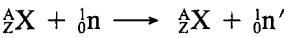
弹性散射是中子与原子核作用的最简单形式，也是中子通过物质时能量损失的重要方式。中子源发射的高能中子，在最初极短的时间里，经过一二次非弹性散射损失了大部分能量。此后，中子已没有足够的能量再同原子核发生非弹性散射，只能通过弹性散射而继续减速并损失能量。

弹性散射是指中子与原子核碰撞后，它们的总动能不变，中子损失的能量全部转变为

表 1-1-2 几种核素的快中子非弹性散射截面

核 素			相对含量 (%)	中子初始能量 (MeV)	(n, n') 反 应截面 (b)	γ 光子能量 (MeV)	γ 光子的相对 强度
符号	Z	A					
¹² C	6	12	98.892	14	0.3	4.43	
¹⁶ O	8	16	99.758	14	0.104	6.13	
				14	0.52	5.20	
				14	0.52	3.80	
				14	0.52	3.30	
Mg	12	24	78.6	2.56	0.75	1.39	1.0
		25	10.11	2.80	0.75	6.97	0.3
				2.56	0.75	1.62	
				2.8	0.75	1.92	
				2.8	0.75	2.30	0.2
		26	11.29	2.56	0.75	1.82	
Al	13	27	100	2.56	0.63	0.17	
				2.56	0.63	0.84	0.6
				2.56	0.63	1.02	1.0
				2.8	0.63	1.8	0.8
				2.56	0.63	2.16	0.7
				14	1.7	1.7	
						4.5	
						5.4	
Si	14	23	92.7	14		1.78	

反冲核的动能，而反冲核仍然处于基态。中子和原子核发生弹性散射时，反应前后动能守恒。其核反应如下式：



简化为 (n, n')，反应截面用 σ(n, n') 表示。反应截面大小和中子的能量及靶核的质量有关。弹性散射都发生在中子能量在几个 MeV 以下的情况，对快中子和慢中子来说，反应截面均较大，并随着中子能量的降低而增大，它和靶核质量数的关系是质量越小，截面越大。

每次弹性碰撞后，快中子能量的损失与靶核质量数、入射中子的初始能量 E，以及散射角有关。由动量守恒和能量守恒定律可导出一次碰撞后和碰撞前的中子动能之比：

$$E_2/E_1 = (1/2)mM_2^2/[(1/2)mM_1^2] = [1/(m+M)^2](m^2+M^2+2mM\cos\theta) \tag{1-1-5}$$

式中 E₁——碰撞前的中子动能；
E₂——碰撞后的中子动能；
m——中子质量；
M——靶核质量；
M₁——碰撞前靶核质量；

M_2 ——碰撞后靶核质量。

由式 (1-1-5) 看出, 中子碰撞后的动能 E_2 随散射角 θ 而变。

当 $\theta = 0$ 时, $E_2 = E_1$ 即中子动能没有损失。

当 $\theta = 180^\circ$ 时, 即对头碰撞情况, 中子的动能损失最大。

这时, $E_2/E_1 = (M - m)^2 / (M + m)^2$

令

$$\alpha = (M - m)^2 / (M + m)^2 \approx [(A - 1) / (A + 1)]^2 \quad (1-1-6)$$

式中 A ——靶核的质量数;

α ——表征质量数为 A 的核素使中子慢化的能力。

引入 α 参量之后得到:

$$E_{2\min} = \alpha E_1 \quad (1-1-7)$$

$$\Delta E_{\max} = (1 - \alpha) E_1 \quad (1-1-8)$$

$$E_2/E_1 = 1/2 [(1 + \alpha) + (1 - \alpha) \cos\theta] \quad (1-1-9)$$

因此, 在一般情况下, 一次碰撞以后, 中子的动能应处于 αE_1 和 E_1 之间, 即:

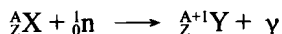
$$\alpha E_1 \leq E_2 \leq E_1 \quad (1-1-10)$$

例如, 对氢核来说, $A = 1$, 因而 $\alpha = 0$, 于是有 $E_2 = 0$ 、 $\Delta E_{\max} = E_1$ 。这就是说, 中子与氢核发生正碰撞时, 中子就失去全部动能。对碳来说, $A = 12$, 因而 $\alpha = 0.715$, 于是有 $E_{2\min} = 0.716E_1$ 、 $\Delta E_{\max} = 0.284E_1$ 。

可见, 氢是所有元素中最强的减速剂, 这是中子测井方法测定地层含氢量及解决与含氢量有关各种地质问题的依据。

六、辐射俘获核反应

原子核俘获热中子后变为处于激发态的复合核, 复合核放出一个或几个伽马射线, 而回到基态, 这种核反应称为辐射俘获, 其反应方程式为:



简称为 (n, γ) 反应。中子管发射中子 $5 \mu s$ 后, 快中子被井周围物质元素的原子核开始慢化为热中子, 并被俘获放出伽马射线, 俘获伽马射线存在的时间是 $1000 \mu s$ 。如果碳氧比能谱测井打中子频率为 1 kHz , 测量非弹散射伽马射线时就不用减俘获伽马射线本底; 若是用频率为 10 kHz 、 20 kHz 打中子就必须减 $20\% \sim 25\%$ 的本底。由此得出, 中子寿命测井的打中子频率, 最高是 1 kHz , 最低是十几赫兹, 即在 $10 \sim 1 \text{ kHz}$ 之间选取。

地层中 Si 、 Ca 、 H 、 Fe 、 Cl 等元素的原子核俘获一个热中子后, 就会放出代表它们本身特征的伽马射线。例如: 氯核俘获一个中子的核反应可表示为 ${}^{35}\text{Cl} (n, \gamma) {}^{36}\text{Cl}$; 氢核俘获一个中子的核反应可表示为 ${}^1\text{H} (n, \gamma) {}^2\text{H}$ 。

中子和原子核发生辐射俘获反应的截面可用 $\sigma(n, \gamma)$ 表示, 反应截面大小和中子能量 E_n 及质量数 A 有关, 它随着中子能量的增加而减小, 随着靶核质量数 A 的增大而增大。当低能中子和重核发生作用时, 主要是发生 (n, γ) 反应。而快中子的 (n, γ) 反应几率

很小。在各种元素的 (n, γ) 反应中，氢的 (n, γ) 反应几率并不大，因此在 (n, γ) 反应中氢核并不起主要作用。在地层的常见元素中，氯的反应截面比其他元素均要大得多，因此在 (n, γ) 反应中，氯起着十分重要的作用。表 1-1-3 列出几种常用核素热中子俘获截面。

表 1-1-3 常用核素热中子俘获截面

元 素	总 截 面 (b)	吸收截面 (b)	散射截面 (b)	放出 γ 射线能量 (MeV)
H	20 ~ 80	0.32	20 ~ 80	2.23
He	1.56	0.008	1.55	
Be	6.9	0.009	6.9	
B	722	718	3.8	
C	4.8	0.0045	4.8	4.95 , 4.05 , 3.05
N	12.8	1.5	11.2	
O	4.2	< 0.0009	4.2	
Na	4.5	0.46	4.0	
Al	1.6	0.22	1.35	7.72 , 3.02
Si	1.86	0.16	1.7	6.4 , 4.95
P	10.9	0.3	10.6	
S	1.6	0.47	1.1	5.43 , 4.89
Cl	43	33	10	7.77 , 7.42
Ca	4.4	0.42	4.0	6.42 , 5.89
Fe	13.5	2.5	11.0	7.64
Mg		0.06		8.16 , 3.92
Ni	22	4.5	17.5	
Zr	8.4	0.4	8.0	
Gd	3500	3500	6.5	
In	193	191	2.2	
Pb	8.5	0.2	8.3	

注：摘自西安石油仪器厂《碳氧比能谱测井仪器》。

七、快中子对原子核的活化核反应

快中子与物质元素原子核发生 (n, α) 、 (n, p) 、 (n, γ) 核反应，产生不稳定的新原子核，新原子核按一定的半衰期衰变，放射出 β 或 γ 粒子，这种新原子核叫做活化核，

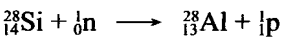
这种核反应叫做活化核反应。表 1-1-4 为活化核反应特性参数表。

目前测井应用快中子照射硅、铝、氧、钙元素，并把它们的原子核变为活化核，利用活化核放出的特征伽马射线进行活化测井。

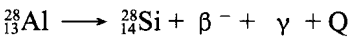
表 1-1-4 活化核反应特性参数表

核 素 X	C_x (%)	E_n (MeV)	核反应	中子吸收 截面 (b)	活化核 Y	半衰期 T	E_γ (MeV)
$^{16}_8\text{O}$	99.8	14.1	(n, p)	—	$^{16}_7\text{N}$	7.13s	6.05 6.13 7.11
$^{23}_{11}\text{Na}$	100	热中子	(n, γ)	0.63	$^{24}_{11}\text{Na}$	15.1h	2.75 1.37
$^{24}_{12}\text{Mg}$	11.1	热中子	(n, γ)	0.26	$^{25}_{12}\text{Mg}$	9.5min	0.84 1.015
$^{27}_{13}\text{Al}$	100	热中子	(n, γ)	0.21	$^{28}_{13}\text{Al}$	2.3min	1.77
		快中子	(n, p)	—	$^{27}_{12}\text{Mg}$	9.5min	0.84 1.15
$^{28}_{14}\text{Si}$	92.3	1.0	(n, p)	0.004	$^{28}_{13}\text{Al}$	2.3min	1.78
		4 ~ 12	(n, p)	0.045	$^{28}_{13}\text{Al}$	2.3min	1.78
		14.5	(n, p)	0.220	$^{28}_{13}\text{Al}$	2.3min	1.78
$^{36}_{16}\text{S}$	0.01	热中子	(n, γ)	—	$^{37}_{16}\text{S}$	5min	2.75
$^{37}_{17}\text{Cl}$	24.6	热中子	(n, γ)	0.137	$^{38}_{17}\text{Cl}$	37min	2.12 1.6
$^{41}_{19}\text{K}$	5.6	热中子	(n, γ)	0.067	$^{42}_{19}\text{K}$	12.44h	1.51
$^{55}_{25}\text{Mn}$	100	热中子	(n, γ)	12.6	$^{56}_{25}\text{Mn}$	2.59h	2.06
							1.77
							0.82
$^{56}_{26}\text{Fe}$	91.68	14.1	(n, p)	—	$^{56}_{25}\text{Mn}$	2.59h	2.06 1.77 0.82
$^{58}_{26}\text{Fe}$	0.28	热中子	(n, γ)	10^{-3}	$^{59}_{26}\text{Fe}$	47.1d	1.098 0.191
$^{40}_{20}\text{Ca}$	0.185	热中子	(n, γ)	0.004	$^{40}_{20}\text{Ca}$	8.8min	3.10
							4.05
							4.68
							4.11
$^{136}_{56}\text{Ba}$	7.81	热中子	(n, γ)	—	$^{137}_{56}\text{Ba}$	2.6min	0.66

快中子照射硅产生的硅活化核反应，如下式：



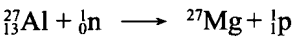
其反应截面随中子能量增大而增大。新的活化核 ^{28}Al 半衰期为 2.3min，属 β 衰变，发射能量为 1.78MeV 的伽马射线：



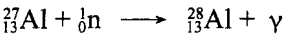
利用这一核反应的测井方法叫做硅测井。由于砂岩的骨架主要是二氧化硅组成，碳酸盐岩地层基本上不含硅，所以硅测井能有效地区分砂岩和碳酸盐岩。在页岩中能划分出粉

砂岩夹层，夹层可能就是天然气层。

快中子和热中子都能使铝产生新的活化核。快中子照射铝产生的铝活化核反应，如下式：



新的活化核镁的半衰期为 9.5min，衰变时放射出能量为 0.84MeV 及 1.015MeV 的伽马射线。铝吸收热中子引起的(n, γ)核反应，如下式：

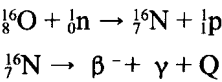


式中，伽马射线是俘获辐射，生成的 ${}^{28}\text{Al}$ 是活化核。

利用铝活化核反应的测井方法叫做铝测井，可测定地层的铝含量。在石油测井中与硅测井组合使用，确定泥质含量。泥岩中硅与铝的质量含量为 2：1 到 4：1，而纯砂岩铝的含量极低，硅与铝的比值非常高。对于一个层段的泥质含量进行分析统计，可求出它的硅铝比值，进而计算出砂岩中泥质含量与硅铝比值的关系曲线。

实际分析证明，铝是泥质中比较稳定的成分，三氧化二铝的平均含量在砂岩中为 4.8%，石灰岩中为 0.8%，泥岩中为 15%～21%。因而用测定铝含量的方法确定泥质含量是比自然电位和自然伽马更为直接的方法。

中子管放射的 14.1MeV 快中子照射氧原子核，使氧核转化成氮的活化核，氮核通过 β⁻ 衰变放射出伽马射线而回到基态。其核反应如下式：



放射性氮同位素的半衰期是 7.13s，衰变之后放射出伽马射线，其中主要是能量为 6.13MeV 的射线，占 ${}^{16}\text{N}$ 衰变的 69%， ${}^{16}_8\text{O}(\text{n}, \text{p})$ 反应的阈能是 10.2MeV，这对井下 14.1MeV 中子发生器来说是最合适的。由于能量高，6.13MeV 的伽马射线可以穿透几英寸井眼物质，如井内液体、油管、套管、水泥环等。

β 衰变分为 β⁺、β⁻ 衰变，β⁺ 衰变产生的 β 射线带正电子 e⁺，β⁻ 衰变产生的 β 射线带负电子 e⁻，也就是说，β 射线是一种带电粒子流。表 1-1-5 为 β 射线在几种常见物质中的射程。

表 1-1-5 β 射线在几种常见物质中的射程 (cm)

名 称	β 0.05MeV	β 0.51MeV	β 5.1MeV	β 51MeV
空 气	3.9	155	2200	15000
水	0.0047	0.18	2.60	19
铝	0.0025	0.085	1.115	7.8
铅	0.001	0.031	0.33	1.25

β⁺ 衰变是一个质子变成一个中子： $\text{p} \longrightarrow \text{n} + \text{e}^+ + \nu$ ；
β⁻ 衰变是一个中子变成一个质子： $\text{n} \longrightarrow \text{p} + \text{e}^- + \bar{\nu}$ ；
 $\text{p} + \text{e}^- \longrightarrow \text{n} + \nu$ ，称为轨道电子俘获。