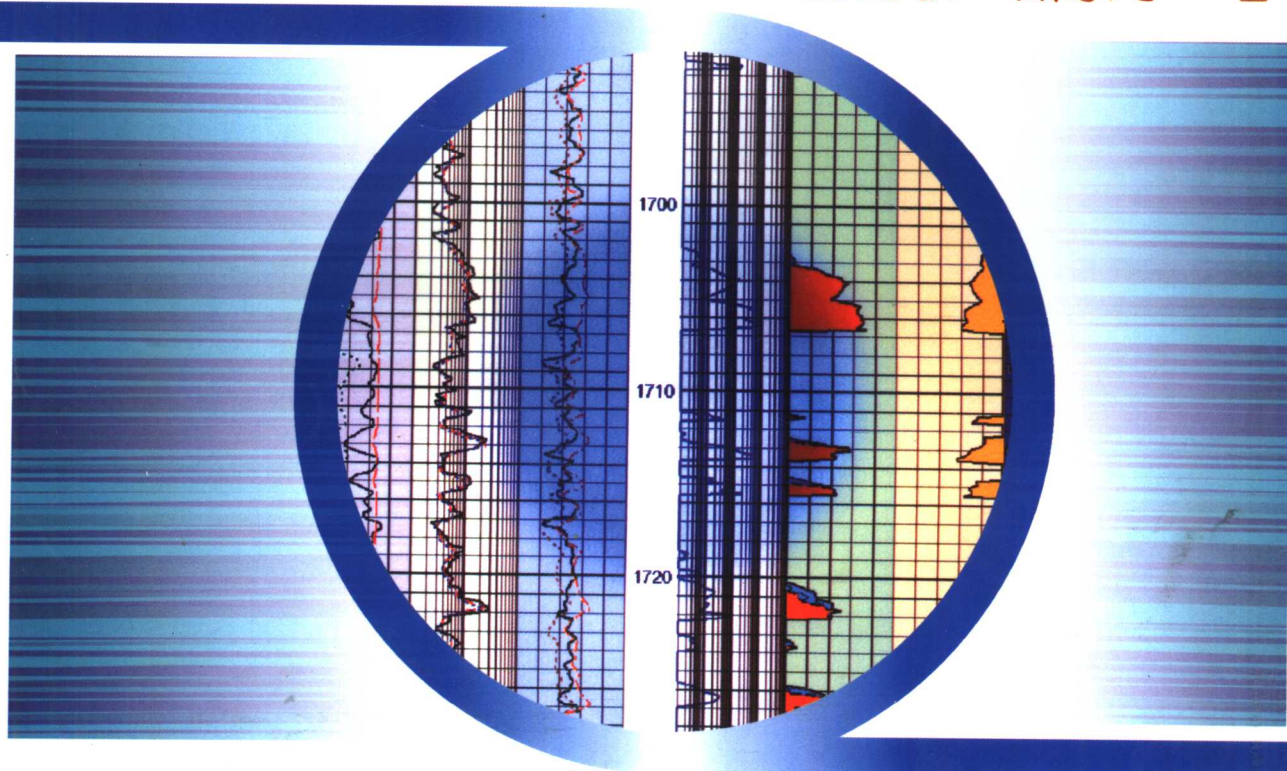


套管井地层参数测井

郭海敏 戴家才 著



TAOGUANJING
DICENG CANSHU CEJING

石油工业出版社

套管井地层参数测井

郭海敏 戴家才 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书阐述了中子测井的核物理基础以及热中子寿命测井和碳氧比测井,在此基础上系统介绍了RST储层饱和度测井仪、RMT储层监测仪、RPM储层监测仪以及PND脉冲中子衰减能谱测井仪等一系列套管井地层参数测井仪器的测量原理、解释处理技术及其在油气勘探与开发中的应用。

本书可供从事石油测井研究的科研人员以及相关专业的在校大学生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

套管井地层参数测井/郭海敏,戴家才著.

北京:石油工业出版社,2007.7

ISBN 7-5021-5883-5

I. 套…

II. ①郭…②戴…

III. 套管(钻孔)-中子测井

IV. TE15

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第156351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

发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2007年7月第1版 2007年7月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:16.75

字数:429千字 印数:1—2000册

定价:58.00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

序

地球物理测井是石油工业发展中的重要学科之一，长期以来在石油勘探开发中发挥着重要作用，勘探测井被称为寻找油气田的“眼睛”，生产测井被称为油气田开发的“医生”。生产测井是测井技术中的两个重要分支之一，主要用于对油田开发生产驱油效率的动态监测。监测方法是采集储层在二次、三次采油过程中的动态变化信息，并对所测得的信息进行综合分析，得到油气水的分布状态，由此了解整个油区的开发动态，从而为调整、优化开发方案及提高原油采收率提供科学依据。套管井地层参数测井是其中的一个重要应用，通常有两种方法可用于过套管储层饱和度监测，一种是测量热中子衰减时间的中子寿命测井（TDT），另一种是用非弹性散射伽马射线能谱测定法确定地层中碳和氧的相对含量的碳氧比能谱测井。因为氯元素的热中子俘获截面很大，所以 TDT 技术在高矿化度地层水的地区可以取得很好的效果。当地层水矿化度很低或矿化度未知时，碳氧比方法可以得到比较可靠的结果。而这两种方法的组合往往可以获得更好的效果。

本书阐述了中子测井的核物理基础，介绍了热中子寿命测井和碳氧比测井，在此基础上比较系统地阐述了斯伦贝谢公司的 RST 储层饱和度测井仪、哈里伯顿公司的 RMT 储层监测仪、康谱乐公司的 PND-S 脉冲中子衰减能谱测井仪以及阿特拉斯公司的 RPM 储层监测仪这一系列过油管套管井地层参数测井仪器、测量原理、解释处理技术及其在油气勘探与开发中的应用。

国民经济的持续发展对石油资源的需求日益增长，除了寻找新的油气储量之外，更重要的是对老油区进行挖潜，提高储层的油气采收率，因此套管井地层参数测井技术无疑将会发挥越来越重要的作用，本书作者就该方面的新技术进行了系统全面的研究。希望本书的出版能为生产测井工作者提供分析问题、解决问题的新方法，新思路，也真心期待本书的出版能为我国石油工业的发展尽绵薄之力。

中国科学院院士

王铁冠

前 言

油田投产开发以后,如何在下套管井的地层中直接寻找油气层、监测剩余油变化、观测油层动态和确定储层的剩余油饱和度成为油田生产开发过程中一个十分重要的环节,同时如何解决未知地层水矿化度的地层和地层水矿化度变化很大的地层剩余油饱和度也成为油田开发过程中的一大难题,裸眼井测井资料提供了地层孔隙度、渗透率、含水饱和度等地层参数,但这些参数只反映了油井投产以前的情况。

产液剖面测井,可以在一定程度上解决一些问题,它在产出情况和井况较好的情况下,可以取得较好的测井原始资料,解释出分层产液量和油水产出情况,然后再通过间接的算法计算出各层剩余油饱和度,但在油稠、井况不好的情况下,特别是大斜度、水平井中基本不可操作,同时这种间接的算法增加了解释结果的不确定性;而放射性测井中的脉冲中子测井则具有很多优点,高能快中子的穿透能力强,可以穿透测井仪器的钢外壳、套管和水泥环而进入几十厘米深的地层中,与地层内元素的原子核发生反应,伴生的伽马射线承载了原状地层的种种信息,用于确定各种地层参数,碳氧比测井和油田中所有的其他中子测井方法都是利用中子的这一特性而进行测量的。

热中子寿命测井(Neutron Lifetime Log),也称热中子衰减时间测井(Thermal Decay Time Log),是最早投入市场的一种脉冲中子测井方法。测井时,用脉冲中子源向地层发射能量为 14MeV 的快中子,测量经地层慢化而又返回井眼内的热中子俘获伽马射线,根据计数率随时间的衰减,算出地层的热中子宏观俘获截面。通常情况下地层的热中子宏观俘获截面主要与地层含氯量有关。当岩石骨架中不包含热中子俘获截面大的矿物,地层水矿化度高且稳定时,水层与油气层的宏观俘获截面有明显差异,因此在高矿化度地层水地层、高孔隙度地层中找油具有很高的成功率,而在未知地层水矿化度的地层、地层水矿化度变化很大的地层或低矿化度地层水的地层中应用效果不好。

碳氧比测井方法突破了这一限制,为了确定地层中的油水含量,在碳氧比测井中,选取碳和氧两种元素分别为油和水的指示性元素,这是从地质和核物理两方面来考虑的。从地质上看,含油砂岩中碳的含量比含水砂岩中碳的含量多得多,而含水砂岩中氧的含量却多于含油砂岩;从核物理的角度考虑,当碳元素和氧元素与快中子发生反应时,都有较大的非弹性散射截面,且放出较高能量的伽马射线,而且两者的能量差较大,为进行伽马射线能谱分析提供了极为有利的条件。

早期的碳氧比测井仪测速较慢,仪器直径大,无法过油管测量,同时它受岩性和放射性测井统计涨落误差的影响较大。20 世纪 90 年代国外脉冲中子伽马能谱测井的主要技术进步是制成了有井眼补偿能力的过油管双源距碳氧比能谱测井仪,并与中子伽马时间谱测井功能相兼容,向空间—时间—能量信息综合采集方向发展,国外几家石油服务公司都研制了这类仪器,如斯伦贝谢公司的 RST 储层饱和度测井仪、哈里伯顿公司的 RMT 储层监测仪、康谱乐公司的 PND—S 脉冲中子衰减能谱测井仪以及阿特拉斯公司的 RPM 储层监测仪。本书系统地介绍了这一系列测井仪器结构、测量原理、解释处理方法及其在油气勘探与开发中的应用情况。

限于作者水平,书中存在的不妥之处,恳请读者批评指正。

目 录

第一章 中子测井的核物理基础	(1)
第一节 中子和中子源.....	(1)
第二节 中子与地层的相互作用.....	(6)
第三节 中子的探测.....	(15)
第四节 伽马射线与物质的相互作用.....	(17)
第五节 伽马射线的探测.....	(21)
第二章 中子寿命测井	(33)
第一节 中子寿命测井原理.....	(33)
第二节 中子寿命测井的显示方式与影响因素.....	(43)
第三节 中子寿命测井的应用.....	(48)
第三章 碳氧比能谱测井	(59)
第一节 碳氧比能谱测井的基本原理.....	(59)
第二节 碳氧比测井仪器.....	(66)
第三节 碳氧比能谱测井的影响因素.....	(71)
第四节 碳氧比值的测量.....	(86)
第五节 连续碳氧比测井的现场应用和解释技术.....	(88)
第六节 误差的一般概念和碳氧比测井的误差分析.....	(125)
第四章 RST 储层饱和度测井	(134)
第一节 碳氧比能谱解释油、气、水层.....	(134)
第二节 RST 测井仪概况	(139)
第三节 RST 测井仪的探测器	(144)
第四节 利用 RST 测井仪测量井筒多相流体持率的方法的提出	(147)
第五节 常规持水率测量.....	(151)
第六节 利用 RST 测井仪求持率的反演方法	(155)
第七节 反演法求持率方法的研究.....	(158)
第八节 四点法求持率方法的研究.....	(164)
第九节 实际应用和结果分析.....	(168)
第五章 RMT 储层监测	(176)
第一节 RMT 测井及解释技术	(176)
第二节 RMT 测井解释软件系统	(191)
第三节 实测资料解释与分析.....	(195)

第六章 PND 脉冲中子衰减能谱测井 (204)

 第一节 PND 测井原理及解释方法 (204)

 第二节 PND 实测资料解释与分析 (221)

第七章 RPM 储层监测 (249)

结束语..... (257)

参考文献..... (260)

第一章 中子测井的核物理基础

第一节 中子和中子源

一、中子的一般概念

中子是 20 世纪 30 年代初期发现的，自那时起人们对它进行了深入的研究，对它的性质已有了较深的了解。

中子的静止质量为 1.00866520 原子质量单位（即 $1.674920 \times 10^{-24} \text{ g}$ ），电荷上限是 10^{-18} 电子电荷，可以认为中子是不带电的中性微粒。当它射入物质时，和核外电子几乎没有库仑力作用，主要是与原子核发生作用，因此中子和核作用的反应几率主要决定于核的性质。由于中子不需要克服库仑力的作用，因此能量很低的中子也能进入原子核内，引起各种核反应，反应几率往往很大。能量较高的中子（快中子）具有很强的穿透能力，它能射穿测井仪器的钢外壳、套管、水泥环，并能射入地层数十厘米深，引起各种核反应，这一特性对中子测井非常重要。

二、中子源

自由中子的平均寿命很短（半衰期为 11.7min），所以自然界几乎不存在自由中子。但是中子与质子结合在一起能够形成稳定的原子核。组成原子核的质子和中子，在核内受到很强的核力作用，被牢固地束缚在一起。要使一个核子（质子或中子）从原子核里释放出来，就必须供给一定的能量，这个能量被称为核子在核内的结合能。反之，当一个核子进入某个原子核时，也会释放出结合能。

每个核子在不同的核内结合能是不同的，它和原子的质量数 A 有关。 A 小的核，每一核子结合能较小，且变化甚大，有四个峰值出现在 ${}^4_2\text{He}$ 、 ${}^8_4\text{Be}$ 、 ${}^{12}_6\text{C}$ 和 ${}^{16}_8\text{O}$ 处。当 $A > 20$ 时，每个核子结合能的变化较小，从 8MeV 缓慢地增大到 8.6MeV 左右，然后又逐渐减小。当 $A = 238$ 时，每一核子结合能约为 7.5MeV，具体数据见表 1-1。

如果使原子核获得的能量大于中子结合能，中子就可能从核中被轰击出来。可以用 α 粒子、氘核 d 、质子 p 或 γ 光子轰击原子核，引起各种核反应，使中子从核内释放出来。这种产生中子的装置叫中子源。

经常选用一些轻的原子核作靶核，这是因为带电粒子轰击靶核时要受到核库仑力的排斥，它们与重的原子核的反应只有在能量较高时才能实现。测井用的中子源通常选用 ${}^9_4\text{Be}$ 和 ${}^3_1\text{H}$ 作为靶材料。

这种用高能粒子轰击靶核产生中子的核反应，可表示为：



并可简写为 $X(\alpha, n)Y$ 。

式中 α ——轰击粒子；

X ——被轰击的原子核，称为靶核或母核；

Y ——核反应所产生的终核，或称子核；

n——核反应放出的中子；

Q——反应能量。

按照轰击粒子的不同，产生中子的主要核反应有 (α, n) ， (d, n) ， (p, n) 及 (γ, n) 等，即用 α 粒子，氘核，质子及 γ 光子轰击靶核来获得中子。测井用的中子源主要是利用 (α, n) 和 (d, n) 反应产生中子。

表 1-1 核子结合能

核素	核子结合能 (MeV)	核素	核子结合能 (MeV)	核素	核子结合能 (MeV)
${}^2_1\text{H}$	1.11	${}^{21}_{10}\text{Ne}$	7.97	${}^{96}_{42}\text{Mo}$	8.26
${}^3_1\text{H}$	2.83	${}^{22}_{10}\text{Ne}$	8.07	${}^{100}_{44}\text{Ru}$	8.61
${}^3_2\text{He}$	2.57	${}^{23}_{11}\text{Na}$	7.84	${}^{102}_{44}\text{Ru}$	8.61
${}^4_2\text{He}$	7.07	${}^{24}_{12}\text{Mg}$	8.26	${}^{106}_{49}\text{Pd}$	8.58
${}^6_3\text{Li}$	5.33	${}^{25}_{12}\text{Mg}$	8.21	${}^{108}_{49}\text{Pd}$	8.54
${}^7_3\text{Li}$	5.60	${}^{26}_{12}\text{Mg}$	8.33	${}^{110}_{48}\text{Cd}$	8.54
${}^8_4\text{Be}$	7.06	${}^{26}_{14}\text{Si}$	8.44	${}^{112}_{48}\text{Cd}$	8.53
${}^9_4\text{Be}$	6.46	${}^{32}_{16}\text{S}$	8.49	${}^{178}_{72}\text{Hf}$	8.09
${}^{10}_5\text{B}$	6.47	${}^{50}_{22}\text{Ti}$	8.65	${}^{184}_{74}\text{W}$	8.00
${}^{11}_5\text{B}$	6.92	${}^{52}_{24}\text{Cr}$	8.77	${}^{192}_{79}\text{Os}$	7.94
${}^{12}_6\text{C}$	7.67	${}^{54}_{26}\text{Fe}$	8.73	${}^{196}_{78}\text{Pt}$	7.82
${}^{13}_6\text{C}$	7.46	${}^{56}_{26}\text{Fe}$	8.62	${}^{198}_{80}\text{Hg}$	7.86
${}^{14}_7\text{N}$	7.47	${}^{58}_{28}\text{Ni}$	8.80	${}^{200}_{80}\text{Hg}$	7.90
${}^{15}_7\text{N}$	7.69	${}^{66}_{30}\text{Zn}$	8.70	${}^{204}_{82}\text{Pb}$	7.88
${}^{16}_8\text{O}$	7.97	${}^{72}_{32}\text{Ge}$	8.74	${}^{208}_{82}\text{Pb}$	7.87
${}^{17}_8\text{O}$	7.75	${}^{82}_{34}\text{Se}$	8.68	${}^{232}_{90}\text{Th}$	7.61
${}^{18}_8\text{O}$	7.76	${}^{84}_{39}\text{Kr}$	8.71	${}^{238}_{92}\text{U}$	7.57
${}^{19}_9\text{F}$	7.77	${}^{86}_{38}\text{Sr}$	8.70		
${}^{20}_{10}\text{Ne}$	8.03	${}^{94}_{40}\text{Zr}$	8.66		

三、中子源的主要特性

1. 中子源的强度

中子源最重要的参数之一是其强度，即单位时间里发射的中子数目。对于每次核反应只释放一个中子的过程，中子源强度就等于单位时间内靶物质中所发生的核反应数目。

每个轰击粒子在靶上产生的中子数称为靶的产额。对于加速器中子源，通常把单位强度束流（微安或微库）在靶上产生的中子数称为产额；而对于同位素中子源，习惯上把每居里放射性物质所产生的中子强度称为产额。产额的定义并不严格，而是随情况而定的。

2. 中子的能量

中子源的另一个重要参数是所发射中子的能量。中子的速度不同即能量不同，它与物质相互作用的行为就大不相同。因而中子源发射中子的方式及其能量，决定了这些中子在地层中所能发生的核反应的类型，从而也就决定了中子测井的类型。

通常所说中子的能量是指它的动能

$$E_n = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1-2)$$

式中, m 是中子质量。 E_n 常用电子伏 (eV) 或百万电子伏 (MeV) 作单位。习惯上把 0.5MeV 以上的中子叫做快中子, 把 1 keV 以下的中子叫慢中子, 介于其间的叫中能中子。0.01eV 左右的中子, 由于相当于与分子、原子、晶格处于热运动平衡的能量, 所以又叫做热中子。比热中子能量更低的叫冷中子。而比热中子能量高的慢中子叫超热中子。中子测井是用快中子轰击地层, 测量经过减速而迁移到探测器并与探测器产生核反应的热中子或超热中子。

热中子的能量与环境温度有关。若中子能量 E_n 用电子伏做单位, 温度 T 用绝对温度做单位, 则

$$E_n = 8.6171 \times 10^{-5} T \quad (1-3)$$

对于标准热中子, $T = 293.58\text{K}$, $E_n = 0.025\text{eV}$ 。

中子的能量也可用它的速度 v 表示出来。此时

$$E_n = 5.22695 \times 10^{-9} v^2 \quad (1-4)$$

式中, v 的单位是 m/s, E_n 的单位是 eV。因而标准热中子的速度是 2200m/s, 即 $2.2 \times 10^5 \text{cm/s}$ 。

具有单一能量的中子叫单能中子, 或称单色中子。具有连续能量分布的中子叫连续谱中子。

一般中子源发射的中子初始能量多在百万电子伏级。同位素中子源中子能量为几个百万电子伏, 而加速器中子源中子能量为十几个百万电子伏。

3. 中子源的半衰期

同位素中子源还有一个重要参数为源的半衰期, 源的半衰期是指发射轰击粒子的放射性同位素的半衰期。设同位素出厂时的强度为 Q_0 , 经时间 t 后的强度将减少为 Q , 则

$$Q = Q_0 e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t} \quad (1-5)$$

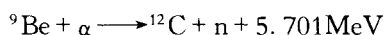
四、同位素中子源

利用放射性同位素核衰变放出的高能粒子去轰击某些靶物质, 实现发射中子的核反应, 这样的源称之为同位素中子源或放射性中子源。同位素中子源的主要特点是体积小, 制备简单, 使用方便, 故在中子测井中得到广泛应用。

同位素中子源分为 (α, n) 和 (γ, n) 两类, 某些人造重元素具有很强的自发裂变中子发射率, 可以用作中子源, 虽然它们产生中子的机理与前两类不一样, 通常也将其列入同位素中子源中。

1. (α, n) 中子源

铀、钍、镭衰变系中有不少天然的 α 发射体, 放出的 α 粒子的能量从 4 到 6MeV, 许多人造重元素衰变时发生的 α 粒子也在这个能量范围内。这些放射性同位素均可用于 (α, n) 中子源。主要的 (α, n) 中子源几乎都用铍作靶材料, 因为在所有轻元素中, 铍的 (α, n) 中子产额最高, 这个核反应式为



所有的 (α , n) 中子源所发射的中子都具有连续变化的能谱。习惯上用居里 (Ci) 做这类源强度的单位, 1Ci 的中子源是指中子源中产生轰击粒子的放射性同位素的强度为 1Ci, 或者说它每秒钟核衰变的次数是 3.7×10^{10} 次。居里数相同的源, 由于发射轰击粒子的放射性同位素不同, 以及靶材料的不同, 单位时间里发射的中子数并不同。表 1-2 中列出了常用的 (α , n) 中子源及其特性。

表 1-2 常用的 (α , n) 中子源

源	半衰期	中子平均能量 (MeV)	中子产额 [10^6 中子/ (s · Ci)]	γ 强度
$^{210}\text{Pb}-^9\text{Be}$	22a	4.5~5.0	2.3~2.5	9
$^{210}\text{Po}-^9\text{Be}$	138.4d	4.2	2.3~3.0	>0.1
$^{226}\text{Ra}-^9\text{Be}$	1600a	3.9~4.7	10.0~17.1	60
$^{227}\text{Ac}-^9\text{Be}$	21.8a	4.0~4.7	15~26	8
$^{228}\text{Th}-^9\text{Be}$	1.913a		17~20	30
$^{238}\text{Pu}-^9\text{Be}$	86a	5.0	2.2~4.0	<1
$^{239}\text{Pu}-^9\text{Be}$	24400a	4.5~5.0	1.5~2.7	<1
$^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$	458a	5.0	2.2~2.7	1
$^{242}\text{Cm}-^9\text{Be}$	163d		3.0~7.0	<1
$^{244}\text{Cm}-^9\text{Be}$	18.0a		6.0	<1
^{252}Cf	2.65a	2.3	4400	

1) 镭铍 ($^{226}\text{Ra}-^9\text{Be}$) 中子源

以天然镭作为 α 发射体, 以 ^9Be 作靶材料制成的中子源。镭和铍的重量比为 1 : 5。均匀混合后压制成小圆柱体, 用两层金属密封。由于它半衰期很长 (1600a), 中子强度几乎不随时间变化, 所以常被用来作为标准中子源, 其主要缺点是有很强的伴生 γ 辐射。

2) 钋铍 ($^{210}\text{Po}-^9\text{Be}$) 中子源

^{210}Po 为镭的子代产物, 半衰期为 138.4 天, α 粒子的能量为 5.305MeV。国产的钋铍中子源, 为双层不锈钢密封, 直径为 16.5mm、高为 18.5mm 的圆柱体。

钋铍中子源的优点是伴生伽马辐射特别弱, 其缺点是半衰期短。它的性能虽不及 $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ 或 $^{238}\text{Pu}-^9\text{Be}$ 源, 但因其价格便宜, 购置方便, 在测井工作中仍在使用。

3) 镅铍 ($^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$) 中子源

镅铍源具有伴生伽马强度低和半衰期长等优点, 最适宜在测井工作中使用。但比钋铍中子源价格贵, 体积较大。

4) 钚铍 ($^{238}\text{Pu}-^9\text{Be}$ 或 $^{239}\text{Pu}-^9\text{Be}$) 中子源

早期钚铍源以 ^{239}Pu 为 α 发射体, 但现已被 ^{238}Pu 所取代。这类中子源在测井中不如镅铍源用的普遍。

5) $^{242}\text{Cm}-^9\text{Be}$ 和 $^{228}\text{Th}-^9\text{Be}$ 中子源

和 $^{210}\text{Po}-^9\text{Be}$ 源一样, 可制成体积小、强度大的中子源。

2. 自发裂变中子源

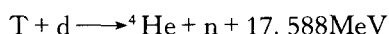
在所有的重核中,利用钷 (^{252}Cf) 作为中子源最合适。它的半衰期为 2.65 年,自发裂变中子产额等于 2.31×10^{12} 中子/ (s · g)。它的中子发射率是任何其他同位素源远不能比的。

五、加速器中子源

测井用的井下中子发生器是一种加速器中子源。

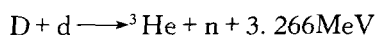
加速器使用人工方法使带电粒子获得较高能量的装置。利用各类加速器所加速的带电粒子去轰击某些靶核,可以引起发射中子的核反应。与同位素中子源比较,这类中子源有下列特点:(1) 强度高;(2) 可以在广阔能区获得单色中子;(3) 可以产生脉冲中子;(4) 加速器不运行时,没有很强的放射性。

井下中子发生器是用氚 (T) 靶,根据 $\text{T}(\text{d}, \text{n})^4\text{He}$ 反应做成的中子发生器。其核反应方程为



释放出的能量分给中子和氦核。中子能量随着轰击氚核能量 E_d 和中子发射角度 θ 而变化。当氚核的能量 $E_d = 0.126\text{MeV}$ 时,核反应截面达到最大值。 E_d 在 $0.1 \sim 0.2\text{MeV}$ 时,中子能量平均为 14MeV 。而当 E_d 达到 3.71MeV 时, 0° 方向的中子能量可略大于 20MeV 。井下中子发生器是将氚核加速到略大于 0.126MeV 的能量。当这些氚核进入靶物质发生核反应之前再损失一些能量,而当发生核反应时,正好有最大的截面,且发射的中子基本上是单能的,即能量为 14MeV 。

此外,利用氘 (D) 靶上的 $\text{D}(\text{d}, \text{n})^3\text{He}$ 反应,可提供能量为 2.7MeV 的单色中子,核反应式为



氘核的能量 $E_d = 2\text{MeV}$ 是反应截面有最大值,但在中子测井中未采用。

氚靶或氘靶有气体靶和吸附靶两种。井下中子发生器用吸附靶。吸附靶是用导热性能良好的物质如铜、银、钼、铂或钨等制成的薄片做底衬,在底衬表面蒸发上薄的锆或钛层,经过去气后,在氘或氚气中加热到 400°C ,然后慢慢冷却,这样每个锆或钛原子能吸附 $1 \sim 2$ 个氘或氚原子,这种靶在 200°C 以下不会发生释气现象。也有用铒 (Er) 和钇 (Y) 作吸附层的,它们具有更好的热稳定性,例如氚—铒靶在 400°C 时还不释气,但在氘束轰击下靶的寿命比氚—钛靶短,吸附靶的最大缺点是寿命较短。

$$\text{靶寿命} = \frac{\text{离子流 (mA)} \times \text{中子产额降至原来一半的时间 (h)}}{\text{靶面积 (cm}^2\text{)}}$$

氚—钛靶的平均寿命约为 $2.7\text{mA} \cdot \text{h/cm}^2$,最高为 $4\text{mA} \cdot \text{h/cm}^2$ 。

中子发生器必须包括三个基本组成部分:(1) 氚靶或氘靶;(2) 氘离子源;(3) 加速系统。把它们组装进一个玻璃管中就构成中子管。

图 1-1 是冷阴极中子管的结构图。氚储存器是用海绵状钛丝做成的,氚与钛化合为氢化钛,这个反应是可逆的,当温度升高时,氚就被释放出来,而温度降低时氚又被钛吸收并以氢化钛的形式储存起来。用一套气压控制电路,调控钛丝的加热电流,就能使氚的平衡气压保持在中子管的工作气压范围之内(十几至几十微米汞柱)。所以这一系统也叫钛气压调

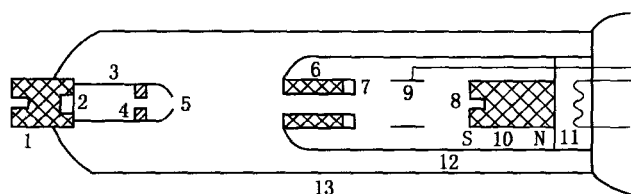


图 1-1 冷阴极中子管结构示意图

- 1—靶座；2—氘靶（1~100kV）；3—二次电子抑制磁环；
4—散焦筒；5—加速空间；6—永久磁环；7—底阴极；
8—前阴极；9—阳极（2kV 脉冲电压）；10—永久磁铁；
11—氘贮存器；12—离子源罩；13—玻璃壳

进行，在离子源中形成一束密集的放电等离子体。由于在阳极上加有 2kV 的正脉冲电压，因而形成的离子流也是脉冲式的。

由于在靶极上加有 100kV 的高压，离子源中一部分氘离子在电场的作用下从引出孔中导出，并在加速空间获得很高的动能，射入散焦筒内，以发散束的形式均匀地轰击氘靶，产生 $T(d, n)^4He$ 反应，放出能量为 14MeV 的中子束。

国产中子寿命测井仪使用的中子管就是上面介绍的这种冷阴极中子管。由于用氘束轰击氘吸附靶，使靶中氘被氘稀释，寿命比较短。如果在密封中子管中对靶和离子源同时采用氘氦混合物，即将钛气压调节器中由原来只储存氘气而改为储存氘氦混合物，使离子源和靶中氘和氦能维持恒定的比例，消除了靶中氘被稀释的影响。这样改变后虽使中子最大产额减少一半，但使用寿命却能延长很多。

图 1-2 所示的密封中子管与图 1-1 略有不同。它的离子源由外加的高频振荡线圈来激发产生等离子体，并由磁场线圈在轴向产生 $100 \times 10^{-4} T$ 的磁场，来加强轴线附近的等离子体密度。用蒸发在钨底衬上的钨层作靶，靶的有效直径是 28mm。加速能量 120keV，束流 12mA，输出中子强度为 10^{11} 中子/s。管子本身由玻璃和金属组成，直径 5.5mm，长 40cm。使用时将管子置于充油的容器中，以防止外部高压击穿。这种中子管在使用较厚的钨层做靶时，运行 100h 后中子强度下降小于 10%。目前一般密封中子管的寿命为 200~500h，中子强度达 $10^{10} \sim 10^{11}$ 中子/s。由于它结构紧凑、体积小，便于携带和使用简便，是一种很实用的中子源。

用作测井仪器的中子管可以做得很小，不仅在裸眼井的大直径仪器中采用，而且在从油管下井的小直径仪器中也可采用。其强度（产额）为 $10^8 \sim 10^9$ 中子/s。

节器。

当管内建立起一定的氘气压之后，若在阳极上加 1~2kV 的电压，离子源中由自然放射性等原因形成的极少量离子，在电场作用下被加速射向阴极并溅射出二次电子。电磁环与磁柱建立起来的磁场强迫这些二次电子在从阴极飞向阳极的路径上以螺旋轨迹运动，与离子源中的中性氘气分子碰撞并使其电离产生出更多的离子。此作用过程反复

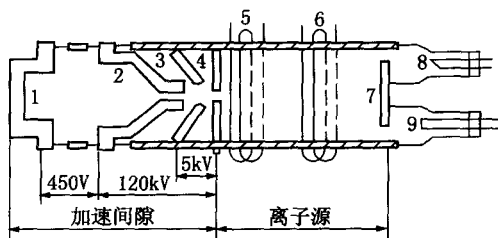


图 1-2 密封中子管结构示意图

- 1—靶；2—抑制极；3—引出极；4—离子源电极；
5—磁线圈；6—高频线圈；7—电子收集器；
8—皮喇尼计；9—气压调节器

第二节 中子与地层的相互作用

中子与地层的相互作用是中子测井的物理基础。加速器中子源发射的中子能量为

14MeV，同位素中子源发射的中子能量为几百万电子伏特。这些中子射入地层，会与地层物质发生一系列核反应。下面分别加以讨论。

一、快中子非弹性散射

快中子先被靶核吸收形成复核，而后再放出一个能量较低的中子，靶核仍处于激发态，即处于较高的能级。这种作用过程叫非弹性散射，或称 (n, n') 核反应。这些处于激发态的核，常常以发射伽马射线的方式释放出激发能而回到基态。由此产生的伽马射线称为非弹性散射伽马射线。以中子的非弹性散射为基础的测井方法，叫快中子非弹性散射伽马法，如碳氧比测井就是测定快中子与 ^{12}C 及 ^{16}O 核经非弹性散射而放出的伽马射线。

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。非弹性散射的阈能为

$$E_0 = E_r \frac{M+m}{M} \tag{1-6}$$

式中， E_r 是放出的伽马射线的最低能量， M 是反冲原子核的质量， m 是中子的质量。

一个快中子与一个靶核发生非弹性散射的几率叫非弹性散射截面，单位是“巴 (b)”，即 10^{-24}cm^2 。表 1-3 中给出一些核素的快中子非弹性散射截面。非弹性散射截面随着中子能量增大及靶核质量数的增大而增大。同位素中子源发射的中子能量低，超过阈能的中子所占的比例很小，引起非弹性散射核反应的几率小，所以总的来说这种核反应的效果可以忽略不计。但中子发生器发射的 14 MeV 的快中子射入地层后，在最初的 $10^{-8}\sim 10^{-7}\text{s}$ 的时间间隔里，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。如果在中子发射后 $10^{-8}\sim 10^{-7}\text{s}$ 的时间间隔里选择记录由 ^{12}C 、 ^{16}O 和中子非弹性散射造成的 4.43MeV 及 6.13MeV 的伽马射线，就能记录到反映井剖面中含碳量和含氧量的测井曲线，根据反映碳和氧的一定能谱段计数率的比值来区分油水层的测井方法叫碳氧比测井。

表 1-3 快中子非弹性散射截面

符号	Z	A	丰度 (%)	中子初始能量 (MeV)	(n, n') 反应截面 (b)	伽马光子能量 (MeV)	伽马光子 相对强度
C	6	12	98.892	14	0.3	4.43	
	8	16	99.758	14	0.2	6.13	
O				14	0.52	5.20	
				14	0.52	3.80	
				14	0.52	3.00	
Mg	12	24	78.6	2.56	0.75	1.39	1.0
				2.80	0.75	6.97	0.3
		25	10.11	2.56	0.75	1.62	
				2.8	0.75	1.92	0.2
				2.8	0.75	2.30	
		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

续表

符号	Z	A	丰度 (%)	中子初始能量 (MeV)	(n, n') 反应截面 (b)	伽马光子能量 (MeV)	伽马光子 相对强度
Al				2.56	0.63	2.16	0.7
				14	1.7	1.7	
						4.5	
						5.4	
Si	14	28	92.27	14		1.78	
Ca	20	40	96.97	2.6		0.51	
				2.56		0.77	
				2.56		3.74	
				2.56		3.90	
		44	2.06	2.56		1.15	
				2.56		0.03	

二、快中子对原子核的活化

快中子除与原子核发生非弹性散射外，还能与某些元素的原子核发生 (n, α)、(n, P) 及 (n, γ) 核反应。其中，由快中子引起的 (n, γ) 反应截面非常小，在放射性测井中没有实际意义。而 (n, α) 和 (n, P) 的反应截面都比较大，并且中子的能量越高反应截面越大。由这些核反应产生的新原子核，有些是放射性核素，以一定的半衰期衰变，并发射 β 或 γ 粒子。活化核衰变时放出的伽马射线称为次生活化伽马射线。

对测井有实际意义的活化核反应有：²⁸Si (n, p)²⁸Al、²⁷Al (n, p)²⁷Mg 等。

1. 硅活化核反应

快中子引起硅活化核反应方程为



发生这一核反应的截面随中子能量的增大而增大（表 1-4）。

反应产物²⁸Al 是放射性核素，半衰期为 2.3min，发射能量为 1.782MeV 的伽马射线。衰变类型为 β 衰变



表 1-4 ²⁸Si (n, p)²⁸Al 的反应截面

母核	子核	中子能量 (MeV)	(n, p) 核反应截面 (b)
²⁸ ₁₄ Si	²⁸ ₁₃ Al	1	0.004
		4~12	0.045
		14.5	0.220

利用这一反应的测井方法叫硅测井，它是识别岩性的一种测井方法。

2. 铝活化核反应

快中子引起的铝活化核反应为



生成产物 ${}_{12}^{27}\text{Mg}$ 是放射性同位素，半衰期为 9.5min，衰变时放出能量为 0.84MeV 及 1.015MeV 的伽马射线。

利用这一反应可测定 Al 的含量。单独测 Al 含量的测井方法叫铝活化测井，与硅测井组合可构成硅铝比测井，用以识别岩性和测定泥质含量。

三、快中子的弹性散射及其减速过程

1. 快中子的弹性散射

中子源发射出高能中子，在发射后的极短时间内，经过一、二次非弹性碰撞而损失掉大量的能量。此后，中子已没有足够的能量再发生非弹性散射或 (n, p) 核反应，只能经弹性散射而继续减速。所谓弹性散射，是指中子和原子核发生碰撞后，系统的总动能不变，中子所损失的动能全转变成反冲核的动能，而反冲核仍处于基态。弹性散射一般发生在 14MeV 的中子进入地层以后 $10^{-6} \sim 10^{-3}\text{s}$ 之间。至于同位素中子源发射的中子，因其能量只有几个百万电子伏特，所以其减速过程一开始就是以弹性散射为主。

每次弹性碰撞后，快中子损失的能量与靶核的质量数 A 、入射中子的初始能量 E_0 以及散射角 ϕ 有关。当 ϕ 为 180° 时，即发生正碰撞时中子损失的能量最大。一次弹性碰撞，中子可能的最大能量损失为

$$\Delta E_{\max} = \left[1 - \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2 \right] E_0 \quad (1-10)$$

令 $\alpha = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2$ ，上式可写成

$$\Delta E_{\max} = (1 - \alpha) E_0$$

对氢核来说，质量数 $A=1$ ，因而 $\alpha=0$ ， $\Delta E_{\max}=E_0$ 。也就是说，中子与氢核发生正碰时，中子就失去其全部动能。对于碳核来说， $A=12$ ， $\alpha=0.716$ ，因而中子与碳核发生正碰时，中子可能损失的最大能量是 $0.284E_0$ 。对于质量数 $A=100$ 的靶核，中子一次碰撞可能损失的最大能量只占碰撞前中子能量的 4%。

用数学方法推得，中子在每次弹性碰撞时平均的能量损失 $\overline{\Delta E}$ 为

$$\overline{\Delta E} = \frac{2A}{(A+1)^2} E_0 \quad (1-11)$$

当中子与氢核碰撞时，每次碰撞平均会减少一半能量。而与碳碰撞时，每次弹性碰撞平均只损失 14% 的能量。

在核物理中还用平均对数能量减缩 (ξ) 来表示物质对中子的减速能力。 ξ 的定义为每次碰撞前后中子能量自然对数的差的平均值，即

$$\xi = \overline{\ln E_0 - \ln E} = \ln \frac{E_0}{E} \quad (1-12)$$

ξ 与 A 的关系为

$$\xi = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1} \quad (1-13)$$

当 $A > 10$ 时，此式可近似写成

$$\xi = \frac{2}{A + 2/3} \quad (1-14)$$

用这一公式计算时，即使 $A = 2$ ，误差也只有 3.3%。由此式可见， ξ 值与中子的能量无关，并且散射核的质量数 A 越大， ξ 的数值就越小。

在表 1-5 中给出了中子在某些元素中的 ξ 值。

表 1-5 ξ 值及热化碰撞次数

靶核	质量数	ξ	热化碰撞次数, $E_0 = 2\text{MeV}$ $E_t = 0.025\text{eV}$
H	1	1.00	18
He	4	0.425	42
Li	7	0.268	67
Be	9	0.209	86
C	12	0.158	114
O	16	0.120	150
Mg	24	0.075	226
Al	27	0.070	243 ($E_0 = 1\text{MeV}$, $E_t = 0.04\text{eV}$)
Si	28	0.070	244 ($E_0 = 1\text{MeV}$, $E_t = 0.04\text{eV}$)
Ca	40	0.050	340 ($E_0 = 1\text{MeV}$, $E_t = 0.04\text{eV}$)
U	238	0.038	

中子从初始能量减速为热中子 (0.025eV) 所需平均碰撞次数叫热化碰撞次数。计算公式为

$$\text{热化碰撞次数} = \frac{\ln(E_0/0.025)}{\xi} \quad (1-15)$$

式中， ξ 表示每次碰撞前后中子能量自然对数差的平均值， E 为碰撞后的能量。

如果 $E_0 = 2\text{MeV} = 2 \times 10^6 \text{eV}$ ，则

$$\text{热化碰撞次数} = \frac{\ln(2 \times 10^6 / 0.025)}{\xi} = \frac{18.2}{\xi} \quad (1-16)$$

当靶核分别为 C、O 时， ξ 分别为 0.158 和 0.12，计算结果为 114 次和 150 次的碰撞即与 C 和 O 分别作用时，经过大约 114 次和 150 次的碰撞即变为热中子。

中子在岩石中每次碰撞的平均对数能量减缩 $\bar{\xi}$ 可用下式计算

$$\bar{\xi} = \frac{\sum_{i=1}^n \xi_i N_i \delta_{si}}{\sum_{i=1}^n N_i \delta_{si}} \quad (1-17)$$

式中 ξ_i ——中子对第 i 种核素的每次碰撞平均对数能量减缩；

N_i —— 1cm^3 岩石中第 i 种原子核数；

δ_{si} ——第 i 种核的微观散射截面；

n ——岩石中原子的种数。

砂岩、石灰岩、白云岩骨架的 $\bar{\xi}$ 值分别为 0.105、0.122 和 0.130。