

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

石油开发测井原理

Petroleum Production
Logging Principles

吴锡令 著

高等教育出版社

内容提要

本书系统地阐述了石油开发测井的物理基础、测量方法和应用技术,主要包括油气储集层和管流的物理性质、变化规律与分析方法,流量测井、温度测井、压力测井、流体识别测井、储层监视测井及电缆地层测试的测量原理、分析方法和应用技术,生产测井信息采集、处理、解释的方法和技术,并介绍了地球物理测井学科前沿的研究动态和发展趋势。

本书是教育部推荐的研究生教学用书,主要用作高等院校地球探测与信息技术专业以及地质资源与地质工程学科、石油天然气工程学科有关专业的研究生专业课教材,同时也可以作为油气以及其他能源开发行业工程技术人员的继续教育读本和技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

石油开发测井原理/吴锡令著. —北京:高等教育出版社, 2004. 3

ISBN 7-04-012997-3

I. 石... II. 吴... III. 测井-高等学校-教材
IV. TE151

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 124728 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-82028899		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷			
开 本	787×960 1/16	版 次	年 月第 1 版
印 张	24.75	印 次	年 月第 次印刷
字 数	460 000	定 价	38.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

策划编辑 徐丽萍
责任编辑 杨树东
封面设计 李卫青
责任绘图 尹 莉
版式设计 胡志萍
责任校对 尤 静
责任印制

前 言

石油开发测井是一门多学科交叉渗透的、综合性的技术学科。虽然作为一门观测学科,石油开发测井主要是应用物理学的方法和原理去研究解决有关地质和工程问题的,但是测量方法和应用技术不单有物理学基础问题,还涉及电子学、信息学以及地质工程学、石油工程学等多学科的知识。本书以石油开发测井的物理基础、测量方法、应用技术为主线,着力构建一个比较完整的知识系统,以使读者比较全面地了解 and 掌握石油开发测井。

石油开发测井类属于地球物理测井学科。为使读者首先对石油开发测井有一个概括认识,第一章绪论中概要介绍了测井的学科特点、研究范畴和技术概况,讨论了测井信息的演进流程,包括测井信息正演、反演和数据采集的有关问题。

石油开发测井的物理基础是由测量对象的物理性质和变化规律所决定的。只有对研究对象的物理性质和变化规律有所了解和认识,才可能从整体上理解和掌握石油开发测井的测量方法和应用技术。为此,本书第二、三章集中讨论储集层和管流的物理性质、变化规律和分析方法,为学习测量方法和应用技术提供必要的物理基础。

石油开发测井方法是研究解决有关问题的手段和依据,根据测量对象和应用领域的不同,本书第四章至第九章分别针对流量测井、温度测井、压力测井、流体识别测井、储层监视测井及电缆地层测试,详细介绍了各种测井方法的测量原理、分析方法和应用技术。

石油开发测井信息是对钻井内实际情况有条件的、间接的反映,必须将测井信息加工成地质信息或工程信息,才能达到认识问题和解决问题的目的。当今测井信息应用的发展趋势是综合有内在联系的多种资料,综合研究油气和其他资源开发中的有关生产和工程问题。本书第十、十一两章介绍生产测井信息采集、处理、解释、应用的方法和技术,着重讨论研究油气井流动剖面评价和油气藏生产动态分析的有关技术问题。

石油开发测井是一门仍在迅速发展的技术学科,伴随着油气等资源开发的难度加大和科学技术的快速发展,其测量方法和应用技术也在不断改进和提高。为使读者能对本学科的发展动态有所了解,书中有关章节介绍了地球物理测井学科前沿的研究概况和发展趋势,以供读者参考。

本书的内容主要是根据地球探测与信息技术学科研究生的专业课要求安排

的,并兼顾地质资源与地质工程学科和石油天然气工程学科有关专业研究生的学习需要。由于不同专业研究生的物理基础和知识背景有所差异,因此使用本书时的内容选取和学时安排也应该有所不同,授课时间以40~60学时为宜。对于地球探测与信息技术学科的研究生,本科阶段比较系统地学习过地球物理测井,因此授课速度可以快一些。对于石油天然气工程学科的研究生,本科阶段已学习过油层物理、流体力学、渗流力学等课程,因此教材中第二、三章可以略讲。而对于地质资源与地质工程学科其他专业的研究生,教材的全部内容可能都需要讲解。书中有关知识背景、研究动态和发展趋势的介绍,可以安排学生自学参考。

本书写作和出版过程中,国务院学位委员会学科评议组的有关专家,石油行业的有关技术人员,高等教育出版社的有关编辑,给予了许多指导和帮助,在此谨致衷心谢意。

著 者

2003年12月

目 录

第一章	绪论	1
1.1	地球物理测井简述	1
1.2	石油开发测井概况	2
1.3	测井信息演进流程	4
1.3.1	测井信息正演	5
1.3.2	测井信息反演	8
1.3.3	测井数据采集	9
第二章	油层物理性质及渗流规律	14
2.1	储层流体的物理性质	15
2.1.1	流体的物理属性	15
2.1.2	油气的分类及相态	20
2.1.3	天然气的性质参数	23
2.1.4	地层原油的性质参数	28
2.1.5	地层水的性质参数	35
2.2	储层岩石的物理性质	38
2.2.1	孔隙度	39
2.2.2	含油饱和度	40
2.2.3	渗透率	41
2.2.4	毛细管性质	46
2.3	储层渗流规律及动态特性	51
2.3.1	油藏开采机制	51
2.3.2	径向流动方程	55
2.3.3	向井流动特性	59
第三章	管流力学基础及研究方法	66
3.1	流体运动的描述	66
3.1.1	流场及欧拉研究法	67
3.1.2	流线	69
3.1.3	流量	70
3.1.4	连续性方程	71
3.1.5	运动方程	75
3.1.6	机械能量方程	75
3.2	单相管流	79
3.2.1	层流和紊流	79

3.2.2	圆管中层流的速度分布	82
3.2.3	圆管中紊流的速度分布	83
3.2.4	发展成稳定流动所需的距离	86
3.3	多相管流	87
3.3.1	两相管流的流型	87
3.3.2	滞留效应和滑动速度	95
3.3.3	多相管流的压力梯度	98
3.4	油井内多相流动特性计算方法	101
3.4.1	流动模型处理方法	101
3.4.2	气液两相流动计算方法	102
3.4.3	油水两相流动计算方法	108
3.4.4	水平井和斜井多相流动分析方法	111
3.5	生产测井流动实验研究	116
3.5.1	流动相似原理	116
3.5.2	流动相似准则	118
3.5.3	流动实验研究方法	122
第四章	流量测井	127
4.1	涡轮流量计测井	127
4.1.1	涡轮流量计工作原理	128
4.1.2	敞流式涡轮流量计测井	132
4.1.3	导流式涡轮流量计测井	143
4.2	核流量计测井	145
4.2.1	核流量计测井原理	145
4.2.2	核流量计测井方法	146
4.3	放射性示踪测井	152
4.3.1	放射性示踪测井原理	152
4.3.2	放射性示踪测井应用	153
4.4	氧活化水流测井	157
4.4.1	氧活化测量水流原理	157
4.4.2	氧活化测量数据处理	160
4.4.3	氧活化水流测量应用	163
第五章	温度测井	168
5.1	岩石和流体的热学性质	168
5.1.1	油层岩石的热学性质	168
5.1.2	井下流体的热学性质	169
5.2	温度测井仪工作原理	170
5.2.1	电阻温度计	170
5.2.2	PN 结温度计	172

5.2.3	热电偶温度计	173
5.2.4	井内温度测量	175
5.3	温度测井曲线定性分析	175
5.3.1	确定地温梯度	176
5.3.2	划分注水剖面	176
5.3.3	判断生产层位	177
5.3.4	检查水泥串槽	178
5.3.5	评价酸化、压裂效果	179
5.4	温度测井资料定量解释	180
5.4.1	体积流量与温度的关系	180
5.4.2	流动井温资料解释示例	182
第六章	压力测井	184
6.1	油藏压力的成因	184
6.2	压力测井仪工作原理	186
6.2.1	应变压力计	186
6.2.2	石英压力计	189
6.3	稳定流动压力测井	191
6.3.1	流动压力测井应用	192
6.3.2	稳定试井压力分析	193
6.4	不稳定流动压力试井	194
6.4.1	不稳定压力分析的理论	194
6.4.2	压力恢复资料分析方法	202
6.4.3	流量和压力综合分析法	206
第七章	流体识别测井	213
7.1	压差密度计测井	213
7.1.1	测量方法原理	213
7.1.2	测井数据采集	214
7.1.3	测井资料解释	217
7.2	伽马流体密度计测井	219
7.2.1	测量方法原理	219
7.2.2	测井资料应用	220
7.3	电容法持水率计测井	221
7.3.1	测量方法原理	221
7.3.2	环空式持水率计测井	224
7.3.3	取样式持水率计测井	226
7.4	放射性持水率计测井	228
7.4.1	测量方法原理	228
7.4.2	测井资料应用	231

7.5	流动成像测井	231
7.5.1	流动成像测量原理	232
7.5.2	流动成像测井方法	233
7.5.3	流动成像测井研究	236
第八章	储层监视测井	237
8.1	储层岩石物理性质监测	237
8.1.1	储层监视测井方法	237
8.1.2	套管井测井探测特性	238
8.2	脉冲中子测井	240
8.2.1	次生伽马能谱测井	241
8.2.2	热中子衰减时间测井	254
8.2.3	含油饱和度监测	266
8.3	井间示踪监测	272
8.3.1	井间示踪监测原理	273
8.3.2	井间示踪监测技术	274
8.3.3	示踪资料分析应用	275
第九章	电缆地层测试	281
9.1	电缆地层测试器	281
9.1.1	测试原理	281
9.1.2	预测试显示	284
9.1.3	流体取样	284
9.2	流体样品分析与应用	287
9.2.1	确定地层流体性质参数	287
9.2.2	判断储层生产流体的性质	288
9.2.3	预计油气层产能	288
9.3	预测试压力资料定性分析	290
9.3.1	静液柱压力分析	290
9.3.2	判断地层渗透性	291
9.3.3	判别油藏流体性质及垂向连通性	292
9.3.4	分析油藏生产动态	294
9.3.5	分析裂缝层的生产特征	295
9.4	压力测试数据定量解释	297
9.4.1	压力传播模式	297
9.4.2	压力下降分析	299
9.4.3	球形压力恢复分析	304
9.4.4	柱形压力恢复分析	307
9.4.5	快速直观解释方法	310
9.4.6	压力分析结果讨论	311

第十章	生产测井数据采集与处理	321
10.1	油藏动态监测方法	321
10.2	生产测井数据采集	323
10.2.1	注入剖面测井组合	323
10.2.2	产出剖面测井组合	325
10.3	生产测井数据处理	327
10.3.1	生产测井数据处理系统	327
10.3.2	生产测井数据处理技术	331
第十一章	生产测井资料解释与应用	339
11.1	流动剖面测井解释方法	339
11.1.1	流动剖面测井定性分析	339
11.1.2	流动剖面测井定量解释	343
11.2	多相流动测井解释技术	349
11.2.1	气液两相流动测井解释	349
11.2.2	油水两相流动测井解释	359
11.2.3	油气水三相流动测井解释	371
11.3	非稳定流动测井解释方法	374
11.3.1	抽油井内流体非稳定流动机理	374
11.3.2	非稳定流动测井响应特征	375
11.3.3	非稳定流动测井分析方法	376
参考文献	380

第八章 储层监视测井

今天,世界上差不多所有的石油和天然气都产自于储层岩石的孔隙空间。聚集在单位储层岩石体积中的油、气数量等于其孔隙度与含油气饱和度之积。储层的产能取决于岩石的渗透率,并与地层压力和温度有关。虽然在勘探阶段裸眼测井已经求得地层的有关性质参数,但只能说明储集层的静态情况。油田投入开发后,储层性质随着油气的产出和其他流体的注入而不断变化,无论是开发方案的调整,二次采油或是三次采油,都需要了解储层生产性质和能力的变化,特别是需要监视储层含油性、渗透性和地层压力的变化。

地球物理测井是监视油气田开发动态的主要技术手段。调整井、加密井内裸眼条件下进行的测井,测量目的、测井方法和评价技术与勘探阶段基本相同。在下有钢铁质套管的开发井内,由于测量目的和测井环境都大不相同,测井方法和评价技术也迥然不同。本章主要讨论开发过程套管井中储层物理性质的监测技术,重点介绍脉冲中子测井、电缆地层测试、井间示踪监测及其应用。

8.1 储层岩石物理性质监测

油气田开发过程中,储集层岩石的电磁学性质、核物理性质、声学性质、力学性质、热学性质等都将发生变化。虽然在钻开调整井、加密井的裸眼条件下也会进行测井,但主要是通过套管井中测量这些岩石物理性质特征,监视储集层的物性、含油性及其产能的变化规律。

8.1.1 储层监视测井方法

储层岩石物理性质监测的重点是测量地层含油性、渗透性以及压力的变化。如果在生产井段用玻璃钢套管代替钢铁质套管,可以采用与裸眼测井基本相同的方法监测储集层。但是由于玻璃钢套管代价太高,几乎所有油井内都是用的钢铁质套管。这时,由于钢铁质套管是电的良导体,给电阻率测井求地层含油气饱和度带来了极大困难。近几年过套管电阻率测井有了长足进展,可以在有利条件下测量地层电阻率,但是目前主要是采用脉冲中子测井方法,评价套管井的地层含油性。测量评价套管井内地层的岩性和物性法同样受到许多限制,只有在水泥胶结良好的有利条件下,才可以采用岩石密度测井和全波列声波测井求

地层的孔隙度。

电缆地层测试可以测取地层压力传播数据,采集地层流体样品,从而对储层的有效渗透率、生产率、衰竭情况等作出评价,为制订最佳的开发方案提供依据。用于套管井内的电缆地层测试器是对裸眼井内仪器作某些改进后制出的,主要区别是仪器尺寸比较小,能下入套管内,并且必须采用聚能射孔弹射孔取样测试,然后通过一个挤水泥装置再及时封堵射孔孔眼。相对于裸眼井而言,套管井电缆地层测试有几个明显的优点:一是测试和取样结果不受泥浆侵入影响,解释和分析结果更加可靠;二是套管壁比裸眼井壁规则,仪器密封容易实现,很少出现问题;三是根据接箍定位,可以更精确地控制深度;四是测试过程可以在完整的水动力控制条件下进行,因而更加安全。

上述测井方法都是测量单井内的信息,油田注水、注气开采以及注聚合物三次采油,还需要了解油层横向上连通情况和非均质性。井间示踪监测利用放射性同位素或化学剂作为示踪剂,追踪注入流体在地层内的运移和分布,从而了解油层非均质特征和注入开发机理,为调整挖潜和三次采油提供依据。

8.1.2 套管井测井探测特性

在套管井内测井时,仪器周围介质可以视为由四个单独区域组成,这四个区域与井眼同轴,如图8-1所示。区域I是套管内部部分,由井内流体组成。区域II是套管,一般是钢铁质的。区域III是套管-地层环带,通常填满水泥。区域IV才是地层。毫无疑问,储层监测的主要探测对象应该是地层。但是,大部分测井仪不只是反映其主要测量区的的信息,同时也反映其他区域的信息。

为了明确套管井测井的探测特性,可以对各种测井方法的主探区用“1”表示、次探区用“2”表示,引出表8-1作为参照。就其应用目的而言,需要知道次测量区的的信息影响测量数据的方式,并在可能时对其进行补偿或校正。如果井眼环境影响因素未予说明,不知道或无法知道时,就会造成错误的解释结论,其结果导致花费时间和资金去解释并不存在的故障。近几年测井方法的改进,一个重要方面是提高对井眼环境的认识程度。下面仅就自然伽马测井、补偿中子测井和全波列声波测井,简要讨论

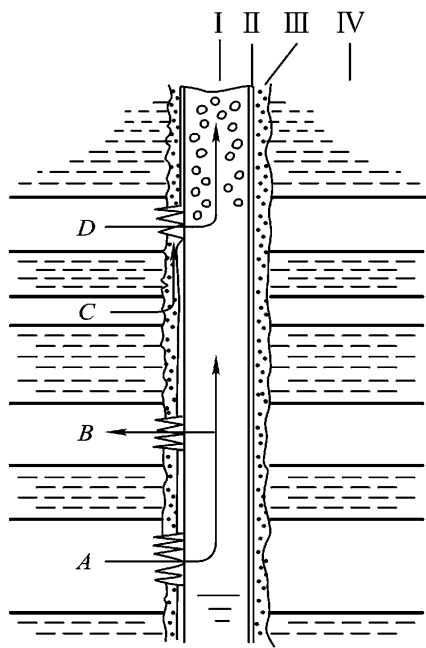


图8-1 套管井测井环境

下面仅就自然伽马测井、补偿中子测井和全波列声波测井,简要讨论

在套管井条件下测量的影响因素。

表 8-1 测井方法及探测区域

测井方法	探测区域			
	I	II	III	IV
自然伽马		2	2	1
脉冲中子	2	2	2	1
补偿中子			2	1
声波全波	2	2	2	1
过套管电阻率		2	2	1
电缆地层测试			2	1
井间示踪监测				1

自然伽马测井响应反映的是探测范围内总的自然伽马放射性。套管井自然伽马测井的主要应用之一是深度校正,不仅套管井内各次组合下井测量的曲线之间需要由自然伽马曲线对齐深度,并且套管井测井曲线与裸眼井测井曲线以及射孔深度之间的校准,也常依自然伽马显示特点确定。但是,套管井内的自然伽马测井响应特性和应用特点与在裸眼井条件下的测量有显著不同。裸眼井内,自然伽马测井主要反映地层中的泥质含量,可以用于划分岩性。在调整井、加密井内,储层自然放射性的变化是由于地层水或注入水进入地层的孔隙空间引起的。在产油层水淹的初始阶段,原始油水过渡带中的水组成驱油阵面的前部,其放射性浓度一般比油高 1~2 个数量级,随着这个前缘的移动,可观察到地层的放射性明显增大。油水过渡带中水的放射性增加,一般认为是由于随水的矿化度升高和变质程度增高,从围岩中淋漓出来的镭的同位素额外富集造成的。在驱液阵面的放射性前缘之后,一般是放射性很低的注入水,于是此后可观察到的地层放射性又有降低。如果地层中饱和油的层段未被注入水触及,则开发过程中其放射性会保持不变。套管井内的自然伽马测井响应,不仅取决于进入地层孔隙空间中水的放射性的变化,还受井身结构、套管技术状态、水泥环和井下所安装设备的影响。由于向地层中注入地表水及其与地层水的混合,会使地层中水的硫酸根离子浓度升高,并导致放射性重晶石的微晶颗粒呈悬浮态和形成胶体溶液。当这些水涌入井筒时,放射性重晶石的颗粒沉积在水泥环的表面上以及套管、电潜泵和压缩泵的泵管上。这样,正对水淹产油层的水泥环表面上的

放射性重晶石沉淀,是记录到的自然放射性增加的附加因素,有助于判断含油层的水淹层段。

补偿中子测井响应反映的是探测范围内总的含氢量。补偿中子测井仪采用双探测器和定向装置,测井记录两个探测器记数率的比值,经过处理给出中子孔隙度线性刻度读数,从而大大减少了井眼参数的影响,可以定量应用。但是,套管井内的补偿中子测井,还受到水泥环和地层泥质含量的不利影响,在应用时需要注意。因此,补偿中子测井在只含油和水的纯地层中,可以反映地层的总孔隙度。当地层含气时,测井读数变小,将中子测井孔隙度与声波孔隙度或岩心分析孔隙度比较,可以区分气层。但当地层含泥质时,由于泥质骨架含有大量氢元素,中子测井只能反映地层的视孔隙度,必须结合其他测井曲线对泥质含量进行校正后,才能求出地层孔隙度。当泥质地层含气时,往往由于泥质影响不易识别气的存在。

套管井测量地层的声波传播时间(或时差)必须用长源距声波仪或阵列声波仪,并且井眼内充满流体,套管与地层之间水泥胶结良好,起码要求对应目的层的部分水泥胶结牢固。这两种仪器都可以用距发射探头 2.45 和 3.05 m(8 和 10 ft)或者 3.05 和 3.99 m(10 和 12 ft)的接收探头接收信号求出地层的纵波和横波时差。若套管与地层胶结很差,则探头接收不到地层信号。套管井地层声波时差曲线主要用于确定地层的孔隙度,也可以和中子测井曲线重叠判断气层。

8.2 脉冲中子测井

热中子衰减时间测井和次生伽马能谱测井的物理基础是中子与物质的相互作用,其研究的是中子的暂态分布,而不像普通中子那样研究稳定状态的中子分布。它们使用的是脉冲中子源,通常又称为脉冲中子测井。

脉冲中子源发射出的 14 MeV 高能中子流,具有很强的穿透能力,可以穿过仪器外壳、井液、套管、水泥环,射入地层数十厘米深。当用 14 MeV 中子去轰击地层时,快中子除和地层发生 (n, n') 、 (n, n) 反应外,还有热中子的 (n, p) 反应,以及 $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{mN}$ 、 $^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{mC}$ 等活化反应。快中子射入地层的最初 $10^{-8} \sim 10^{-7}\text{s}$ 里,主要和地层元素发生 (n, n') 反应,同时放出非弹性散射 γ 射线。一个中子只要经过一、二次 (n, n') 反应后,由于能量降低便不能再产生非弹性碰撞了。在以后的 $10^{-6} \sim 10^{-3}\text{s}$ 时间里,中子因和地层发生弹性碰撞 (n, n) 而减速,直到转化为热中子为止。一般中子在地层中经过几个微秒便热化了,热化后的中子一方面通过 (n, n) 反应在地层中扩散,另一方面通过 (n, γ) 反应被地层吸收,同时放出俘获 γ 射线。热中子在地层中能持续存在 1 000 μs 或更长时间,

当其被地层吸收完后,俘获 γ 射线也就停止辐射了,此时地层中就只有自然 γ 射线和少数活化 γ 射线了。脉冲中子源形成的各种 γ 射线的发射时间分布如图8-2所示。

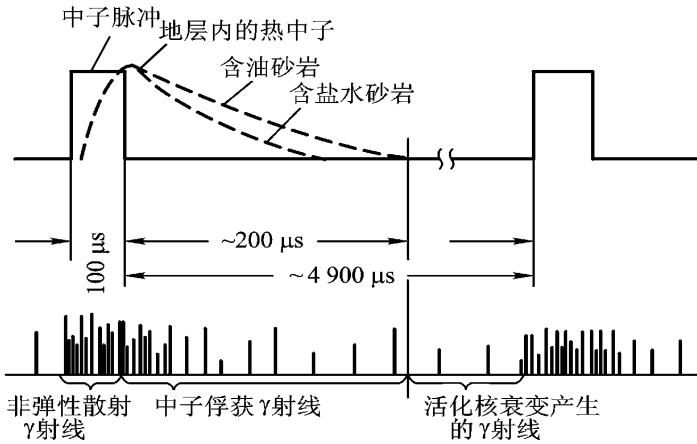


图8-2 脉冲中子源形成的 γ 射线发射时间分布

脉冲中子测井早期有两种仪器,一种是次生伽马能谱测井仪,专门对非弹性散射 γ 射线进行测量;另一种是热中子衰减时间测井仪,针对俘获 γ 射线进行测量。目前先进的脉冲中子测井已组合为一支仪器,又称之为油藏检测仪,具有两种测井模式,采用非弹性模式对次生 γ 射线进行测量,而采用俘获模式对俘获 γ 射线进行测量。由于这两种仪器或两种模式的测井方法和资料应用均不相同,下面分别讨论次生伽马能谱测井和热中子衰减时间测井。

8.2.1 次生伽马能谱测井

次生伽马能谱测井是利用地层对脉冲中子源发射出的快中子的散射特性,来测量地层中碳、氧、硅、钙等元素的相对含量的。快中子与地层中某种元素发生非弹性碰撞的概率以及放出的非弹性散射 γ 射线的能量,都与被碰撞元素的核结构有关。同一种原子核在同快中子发生(n, n')反应中,所放出 γ 射线的能量和数量都是一定的,地层中常见元素的非弹性散射 γ 射线能谱如图8-3所示,各自的非弹性散射截面见表8-2。对地层中不同元素的核在(n, n')反应中所放 γ 射线的能谱进行分析,便可确定地层中存在哪些元素,它们的含量是多少。

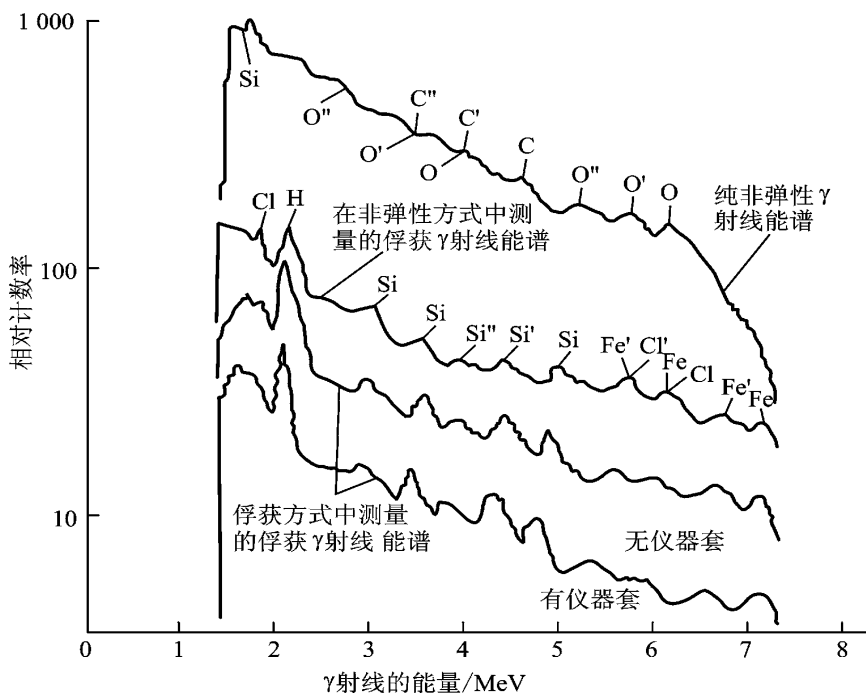
图 8-3 实验室地层中的非弹性和俘获 γ 射线能谱

表 8-2 地层中常见元素的非弹性散射截面和俘获截面

元素	(n, n') 核反应截面 10^{-24} cm^2	非弹性散射伽马光子能量 MeV	热中子俘获截面 10^{-24} cm^2
H	—	—	0.33
C	0.3	4.33	0.003 4
O	0.2	6.13	0.000 2
	0.52	5.2	
	0.52	3.8	
	0.52	3.0	
Si	0.13	1.78	0.16
S	0.38	2.23	0.51
Cl	—	—	35.55
Ca	?	0.51	0.42

续表

元素	(n, n') 核反应截面 10^{-24} cm^2	非弹性散射伽马光子能量 MeV	热中子俘获截面 10^{-24} cm^2
Ca	?	0.77	
	?	3.74	
	?	3.90	
Fe	0.77	1.46	2.53
	1.1	0.84	
	0.79	1.2	
	0.33	1.70	

8.2.1.1 测井数据采集与处理

早期的碳氧比能谱测井是在中子脉冲的持续时间里采用能窗法测出计数率,例如选 6.34 ~ 4.86 MeV 作为碳窗,仪器直接用碳窗和氧窗计数率的比值来表示这两种被测元素的相对浓度。由于只求出 C/O 比无法区分所测得的碳信号是来自地层孔隙中的油气还是来自地层骨架中的碳,因此还同时非弹性谱上和俘获谱上测量硅窗和钙窗的计数率,以获得硅钙比,指示地层的岩性。这类仪器各能窗所取的能量范围除取决于元素的特征 γ 射线能量外,还与仪器的性能有关,如探测器的类型、能量分辨率的大小等,其 C/O 响应与孔隙度、含油饱和度的关系,只适用于自身仪器,不能在其他类型的仪器之间通用,并且对油水变化的灵敏度也比较低。我国大庆油田研制的 NP 型 C/O 能谱测井仪,虽然也是采用的能窗法,但在信号处理单元中采用了减本底技术,消去中子脉冲期间及前一个周期里产生的俘获 γ 射线影响,然后再计算出 C/O 和 Si/Ca。

近期的次生伽马能谱测井是采用能谱拟合法进行分析的,仪器采用 0 ~ 8 MeV 的 256 道伽马能谱仪,对扣除本底后的非弹性谱和俘获谱,运用加权最小二乘法进行拟合分析,求得对能谱有贡献的各种元素 C、O、H、Cl、Si、Ca、Fe 和 S 的相对产额,进一步可求得各元素的含量。这样处理的结果求得的各元素比值与地层中根据理论计算的结果非常一致,从而大大提高了对各元素含量变化的灵敏度。

以斯仑贝谢公司的次生伽马能谱仪 GST 为例,该仪器有 T 形俘获伽马和非弹性两种计时方案。在 T 形俘获伽马测量方式中(图 8-4),伽马能谱是在俘获门期间被积累的,为了减小井眼的影响,该门在发射中子脉冲后延迟一定时间才打开。基本计时单位是随着同时测量的地层热中子寿命而连续变化的,能够使