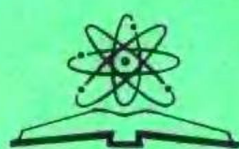


原子核物理

(1974年会议资料选编)



原子能出版社

原子核物理

(1974年会议资料选编)

原子能出版社

内 容 简 介

这是一九七四年底在上海召开的第二次原子核物理会议资料选编。其内容是：核物理实验与应用，核物理理论，核物理技术。本书可供从事这方面工作的人员及大专院校有关专业的师生参考。

原 子 核 物 理 (1974年会议资料选编)

☆

原子能出版社出版
北京印刷一厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售
(限国内发行)

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $33 \frac{3}{4}$ · 字数 810 千字 · 插页 1
1977 年 8 月北京第一版 · 1977 年 8 月北京第一次印刷
统一书号：15175·086
定 价： 3.45 元

前 言

这是一九七四年底在上海召开的第二次原子核物理会议资料选编，大致归纳为核物理实验与应用、核物理理论、核物理技术三个方面。这些成果反映出在毛主席无产阶级革命路线指引下，无产阶级文化大革命以来，广大从事原子核物理工作的同志在各单位党委的领导下，以阶级斗争为纲，坚持党的基本路线，抓革命、促生产，努力贯彻执行科学研究“为无产阶级政治服务，为工农兵服务，与生产劳动相结合”的方针，取得了新的成绩。为了使原子核物理研究及其应用进一步发展，更好地为社会主义革命和建设服务，我们编辑出版了本选编。它可供从事这方面工作的同志及大专院校有关专业的师生参考。

由于我们水平有限，本选编中缺点和错误在所难免，请读者批评指正。

目 录

一、核物理实验与应用

用中子活化分析法对制造器件用的半导体硅中 Na、Cu、Au 含量的分析	3
中子俘获 γ 能谱测井的室内试验	4
应用仪器质子活化分析测定半导体硅中痕量氧、氮和碳	12
$^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ 反应 γ 能谱和强度测量	20
NaI(Tl) 闪烁谱仪的单能 γ 谱丛和复杂 γ 谱的分析	41
碳离子束在锗单晶中的沟道效应与阻塞效应	57
质子、氦离子在硅单晶中的沟道效应	66
^6Li 、 $^7\text{Li}(\text{d}, \text{n})$ 反应中子能谱和角分布	74
3.70 MeV 氘核在 ^6Li 、 ^7Li 、 ^{12}C 、 ^{16}O 核上引起的反应	89
14 兆电子伏中子与 ^6Li 、 ^7Li 的三体反应	106
$E_d=0.5-2.5$ MeV 能量范围内 $^6\text{Li}(\text{d}, \text{x})$ 和 $^7\text{Li}(\text{d}, \text{x})$ 反应的研究	124
^{12}C 离子引起裂变的碎片角关联	155
$^{12}\text{C} + ^{197}\text{Au}$ 和 $^{12}\text{C} + \text{Pb}$ (天然) 反应中发射的 α 粒子能谱与角分布	164
核裂变碎片角分布与鞍点核形状	180
72.5 兆电子伏 $^{12}\text{C}-^{12}\text{C}$ 散射	191
$^{12}\text{C} + ^{197}\text{Au}$ 核子转移反应	199
铁、铜、铅的快中子弹性散射截面	212
快中子能区 ^{233}U 裂变截面的测量	229
$^{237\text{m}}\text{Pu}$ 裂变同质异能素半衰期和形成截面的测定	231
$^{240\text{m}}\text{Pu}$ 裂变形状同质异能态	235
中子测水	239

二、核物理理论

原子核内多个核子关联的一些子结构	251
高能质子与原子核的弹性和非弹性散射	257
高能质子引起的 $^{12}\text{C}(\text{p}, \pi^+)^{13}\text{C}$ 、 $^{16}\text{O}(\text{p}, \pi^+)^{17}\text{O}$ 和 $^{40}\text{Ca}(\text{p}, \pi^+)^{41}\text{Ca}$ 反应的理论分析	267
原子核的单粒位阱——非厄米选择	273
生成坐标方法与原子核集体运动	
II. 偶-偶原子核的多极激发和对激发	289
生成坐标方法及原子核对振动谱的非谐效应	307
偶偶核高速转动的简化模型	318
原子核元激发之间的耦合	
含有玻色变数及费米变数的严格理论	332
轻原子核性质的研究	340

$A \leq 208$ 核区矮共振成因及自旋同位旋偶极巨共振	348
关于裂变过程的一个模型理论	363
原子核裂变统计理论的微观计算	373
激发核 Γ_n/Γ_f 值的理论计算	387
重离子核反应机制	397
扰动角关联方法及其应用	417
入射反应道临界角动量的计算	442

三、核物理技术

15—20 兆电子伏医用电子直线加速器设计方案	457
200 千伏中子发生器	465
迴旋加速器 120° D 极的初步试验	476
用迴旋加速器 PIG 型离子源生产负氢离子的初步试验	484
高频型重离子源的研制	500
双等离子体离子源	516
离子注入法制造半导体硅探测器	524
同轴锗(锂) γ 射线探测器	534

一、核物理实验与应用

用中子活化分析法对制造器件用的 半导体硅中 Na、Cu、Au 含量的分析*

中国科学院原子能研究所硅材料活化分析组

反应堆中子活化分析, 由于有很高的灵敏度、选择性和相对抗污染能力, 自五十年代以来一直是半导体材料分析的一个重要手段。近年来, 由于高分辨 Ge(Li) γ 谱学的建立, 大大提高了这一方法的速度, 选择性和非破坏分析能力。目前, 在有利条件下, 对周期表中约 2/3 的元素探测极限可达 10^{-8} 克, 有的元素 (如 Au 等) 可达 10^{-13} 克。

近年来随着电子工业的发展, 半导体分析的重点已从“体分析”(整块材料中杂质的平均浓度分析) 转向了“表面分析”(经切、磨、抛、洗等处理后, 衬底表面上沾污的杂质分析) 和“分布分析”(氧化层或由扩散、外延、离子注入等工艺所形成的灵敏层剖面上杂质的分布分析)。在这后一方面, 活化分析的上述特点更显示了其优越性。

我们分析了以各种方法处理的半导体硅片表面和本体中 Na, Cu, Au 的含量, 以期寻找最佳工艺, 提高器件性能。

将含有已知量 Na, Cu, Au 的“标准”与硅样品放在同一个照射罐中, 在中子通量为 $(6-8) \times 10^{13}$ 中子/厘米²·秒的反应堆孔道中照射 10 小时。为使 ³¹Si 的放射性衰减至允许其它元素分析的水平, 冷却 20 小时后测 Na, Cu; 冷却 3 天后测 Au。测量是用相对效率为 16%, 分辨率为 2.6 千电子伏、峰康比为 30 的 Ge(Li) γ 谱仪进行的。分别以 ²⁴Na 的 1368 千电子伏、⁶⁴Cu 的 511 千电子伏(β^+ 湮没辐射)、¹⁹⁸Au 的 412 千电子伏 γ 射线全能峰鉴定 Na、Cu、Au, 并以样品中和相应“标准”中这些峰面积的比进行定量。为了进行表面分析, 照射后用 HF 洗 Si 片, 以洗涤液定表面 Na 沾污量。再以加有 Cu, Au 载体的王水煮 Si 片。以王水煮洗液和第一次的 HF 洗涤液中 Cu、Au 含量的和, 定表面 Cu、Au 沾污量。

在上述条件下, 对 Na、Cu、Au 探测极限的典型值分别为: 1.2×10^{-10} 克, 2.5×10^{-10} 克, 5.6×10^{-12} 克。

* 详见《原子能科学技术》1975 年第 2 期第 127 页。

中子俘获 γ 能谱测井的室内试验

四川石油地质科学研究所

四川大学原子核物理专业

一、引言

近年来, γ 能谱学在各方面得到了广泛的应用, 在地质、石油勘探中已开始用来直接确定地层元素。由于四川碳酸岩裂缝地层的具体条件, 其他测井方法受到一定的限制, 特别是不能明确地显示地层所含流体的性质。为了实现伟大领袖毛主席关于“备战、备荒、为人民”的号召, 我们一起协作研究用 γ 能谱学方法来直接确定地层元素, 进而区分地层中的油水层。

常用的 γ 能谱测井法中, 有测量地层天然 γ 射线的天然 γ 能谱测井法, 有测量快中子在地层中非弹性散射所产生的 γ 射线的非弹性散射 γ 能谱测井法, 有测量地层俘获中子放出的 γ 射线的中子俘获 γ 能谱测井法。由于四川碳酸岩地层水中矿化度高, 一般含氯离子浓度在几万到十几万 ppm 范围内, 同时由于氯元素的中子俘获截面大 (31.6 ± 1.0 靶), 因此, 我们决定试用观察地层中子俘获 γ 能谱的方法, 并以氯作为地层水的标识元素, 来区分地层流体的性质。整个工作分室内试验和现场试验两步, 现将室内试验的初步结果报道如下。

二、实验设备

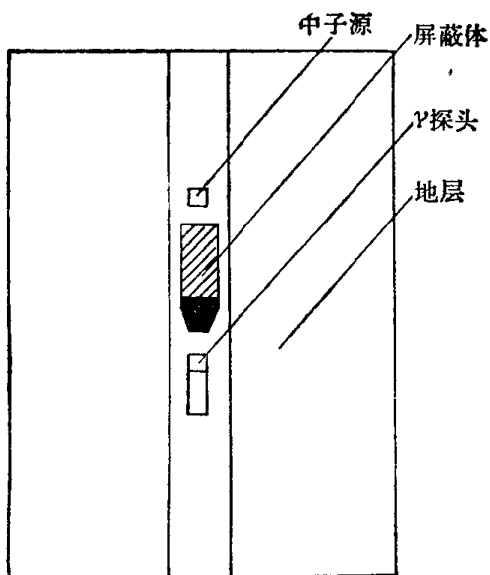


图 1 模型井结构示意图

室内试验的主要目的是在实验室内模拟实际测井情况, 摸索测量的工作条件, 影响测量的各种因素及其规律性, 为现场试验作设备和方法的准备。

整个测量工作是在模型井的条件下进行的, 模型井的结构 (如图 1) 为一圆桶容器, 桶的直径 90 厘米, 高 120 厘米, 中间有直径为 12 厘米的井眼, 测井仪器置于井眼中。测井仪器包括中子源, 屏蔽体和闪烁 γ 探头。

中子源由三个镅-铍中子源组成, 总产额为 1.76×10^7 中子/秒, 置于一个特制的铝盒中, 可以通过提升装置来控制其位置。

屏蔽体是用来屏蔽由中子源产生的中子和 γ 射

线直接射入闪烁探头的，它是由直径为 8.5 厘米、高 15 厘米的铜和高 7 厘米的铅圆柱体构成，中间垫有 0.3 毫米厚的镅片，总长度为 22 厘米，下端作成圆锥体。

γ 探头是用来探测地层元素俘获中子而发射的 γ 射线的，它包括 $\phi 5 \times 5$ 厘米的 NaI(Tl) 闪烁体、53 AVP 型光电倍增管和射极跟随器。探测到的信号通过电缆传输到 SAT-256 型 256 道脉冲幅度分析器进行分析。

考虑到现场工作时使用的方便， γ 谱仪的能量刻度是在特制的刻度装置内进行的。它是用石蜡做成的，中间夹有一段钢管，中子源和 γ 探头放在装置的中央，它们之间有石蜡屏蔽（图 2）。这样，在进行能量刻度时，中子源发出的 γ 射线、石蜡中氢的中子俘获 γ 射线以及铁的中子俘获 γ 射线都能探测到，利用上述 γ 射线便可进行 γ 谱仪的能量刻度。谱仪的能量刻度谱线见图 3，其中包括铁的 7.64 MeV 俘获 γ 射线的全能峰、单逃逸峰（7.13 MeV）和双逃逸峰（6.62 MeV）；中子源发生的 ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ 反应 ${}^{12}\text{C}^*$ 退激产生的 4.43 MeV 的 γ 射线全能峰、单逃逸峰（3.92 MeV）和双逃逸峰（3.41 MeV）；氢的中子俘获 γ 射线的全能峰（2.23 MeV）。谱仪对于 ${}^{137}\text{Cs}$ 的 0.662 MeV 的 γ 射线能量分辨率为 9.8%。

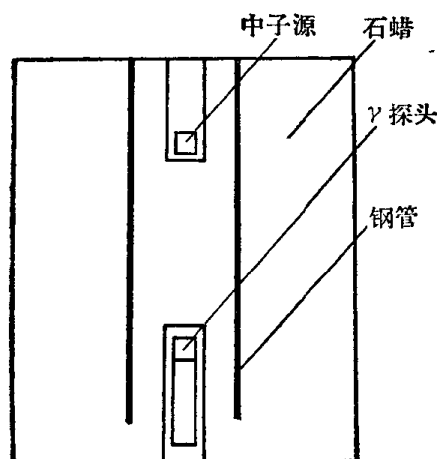


图 2 谱仪能量刻度装置示意图

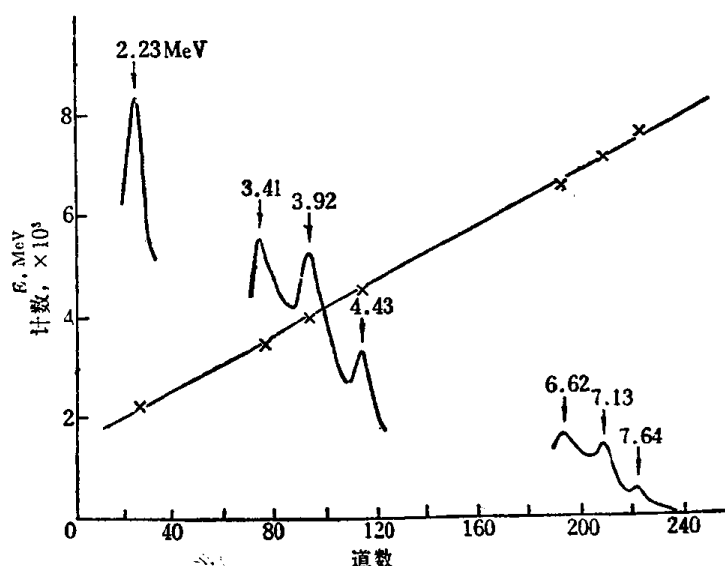


图 3 γ 谱仪的能量刻度

三、实验步骤和结果

1. 原油和矿化水的中子俘获 γ 能谱

首先，考虑到碳和氧的中子俘获截面比氢的小得多，在室内试验中，用淡水代替原油测量的中子俘获 γ 能谱之差别是很小的，而给整个实验带来很大的方便。为此，我们在模型井井眼周围分别充满原油和淡水的情况下，将中子源、屏蔽体和 γ 探头放入井眼中，测量的 γ 能谱如图 4 所示，发现它们的差别的确很小，因此，在以后的实验中，均以淡水模拟原油来进行测量。

为了明显地显示原油和矿化水的中子俘获 γ 能谱的差异和了解它们的特点，我们在模型井井眼周围没有地层介质而分别充满原油和矿化水的情况下，进行了测量，结果如图 5

所示，在原油的中子俘获 γ 能谱中只显示 ^1H 的2.23 MeV俘获峰，而在矿化水的 γ 能谱中，除了 ^1H 的俘获峰外，还显示出 ^{35}Cl 的中子俘获 γ 能谱，根据文献[1]，它们可以被解释为7.42 MeV (14%)；6.64 MeV (14.4%)和6.11 MeV (21.4%)的结果。

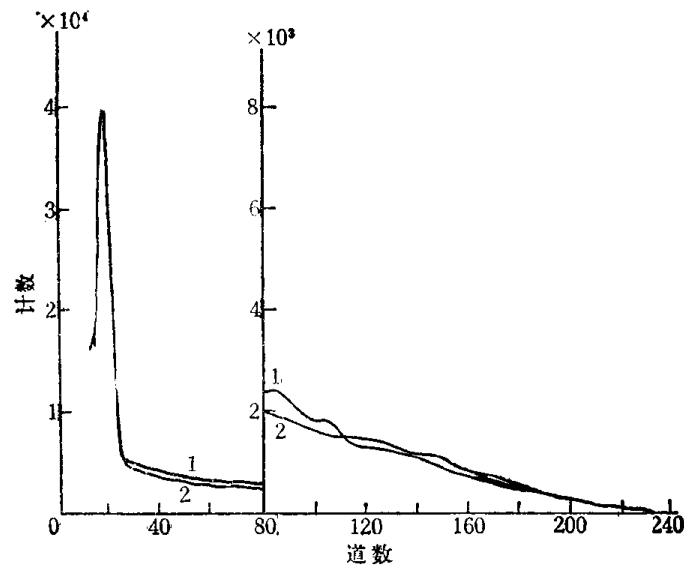


图 4 原油与淡水的中子俘获 γ 能谱
1——原油；2——淡水。

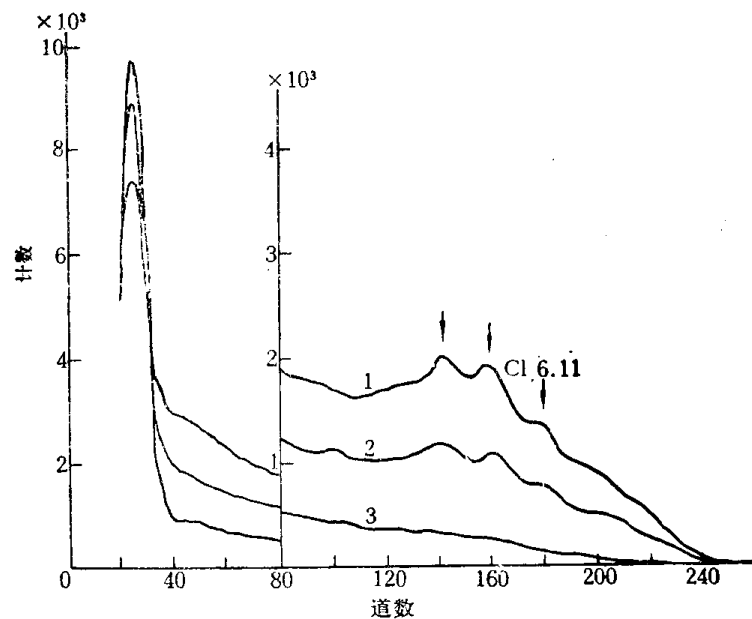


图 5 原油与矿化水的中子俘获 γ 能谱
1——矿化水， Cl^- 浓度 34700 ppm；2——矿化水， Cl^- 浓度 12200 ppm；3——原油。

2. 饱含原油和矿化水的石灰岩之中子俘获 γ 能谱

在模型井井眼周围填满石灰岩碎块，再分别充满原油和矿化水时，测得的 γ 能谱如图6所示。在饱含原油的石灰岩之 γ 能谱中，在6.4 MeV，5.9 MeV和5.4 MeV处有明显的峰，根据文献[1]，可以认为是 ^{40}Ca 俘获中子所产生的6.41 MeV γ 射线的全能峰、单逃逸峰和双逃逸峰。而在饱含矿化水的石灰岩之 γ 能谱中，则可看出除了 ^{40}Ca 俘获中子所产生

的 γ 射线外, 还有 ^{35}Cl 的中子俘获 γ 能谱, 并且随着矿化度的增加, ^{35}Cl 的中子俘获 γ 能谱越明显。与此同时, 在 4.4 MeV 到 7 MeV 范围内, γ 积分计数率也明显增加。

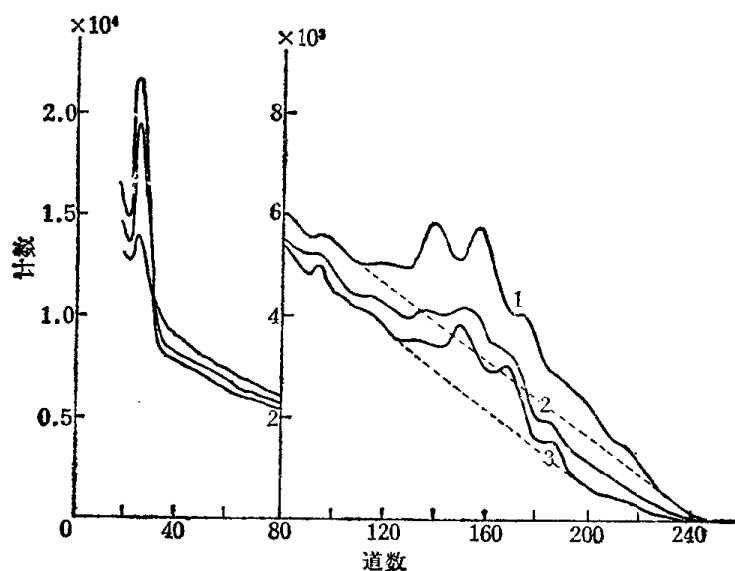


图 6 饱含原油和矿化水的石灰岩之中子俘获 γ 能谱
1——矿化水, Cl^- 浓度 127000 ppm; 2——矿化水, Cl^- 浓度 15300 ppm; 3——原油。

3. 不同孔隙度的石灰岩的中子俘获 γ 能谱

为了观察石灰岩的孔隙度对能谱的影响, 并考察这一方法测量的灵敏程度, 我们对四种不同孔隙度 (43.3%; 32.7%; 23.7%; 19.3%) 的石灰岩进行了测量。在饱含原油时测量的结果如图 7 所示, 它们都明显地显示出 ^{40}Ca 俘获中子所产生的 6.41 MeV γ 射线, 并且随着孔隙度的降低, 计数率增高。在饱含矿化水时, γ 能谱中除了有 ^{40}Ca 的贡献外, 还叠加有 ^{35}Cl 的俘获 γ 。

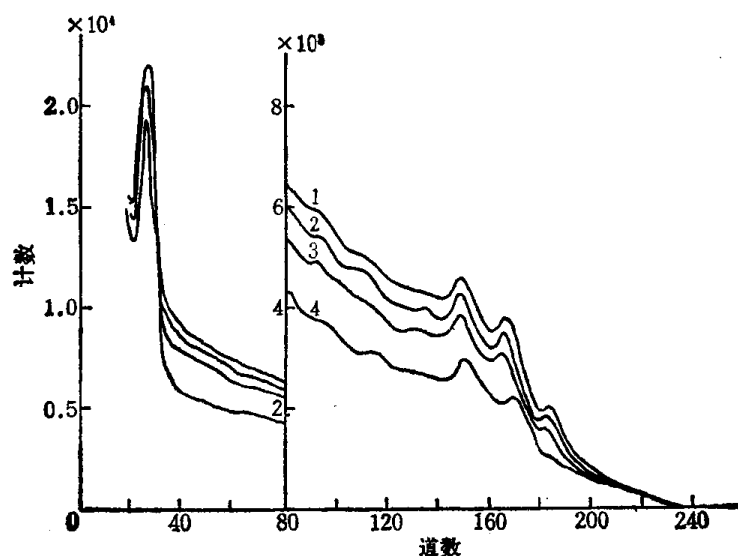


图 7 不同孔隙度的石灰岩的中子俘获 γ 能谱
1——孔隙度, 19.3%; 2——孔隙度, 23.7%; 3——孔隙度, 32.7%; 4——孔隙度, 43.3%。

4. 不同岩性地层的中子俘获 γ 能谱

为了观察不同岩性地层对能谱的影响, 我们测量了饱含原油和矿化水的白云岩 (其主要成分为 $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$) 和石膏 (CaSO_4) 之中子俘获 γ 能谱。部分结果如图 8 和图 9 所示。由于镁的中子俘获截面很小, 白云岩的 γ 能谱与石灰岩的很相似, 而在石膏的俘获 γ 能谱中, 除了 ^{40}Ca 的贡献外, 还显示了 ^{32}S 的 5.43 MeV 俘获 γ 。

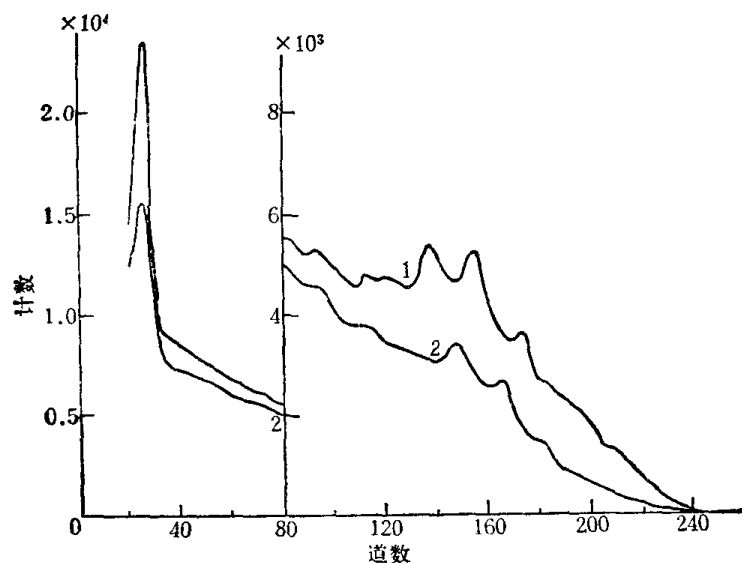


图 8 饱含原油与矿化水的白云岩之中子俘获 γ 能谱
1——矿化水, Cl^- 浓度 80000 ppm; 2——原油。

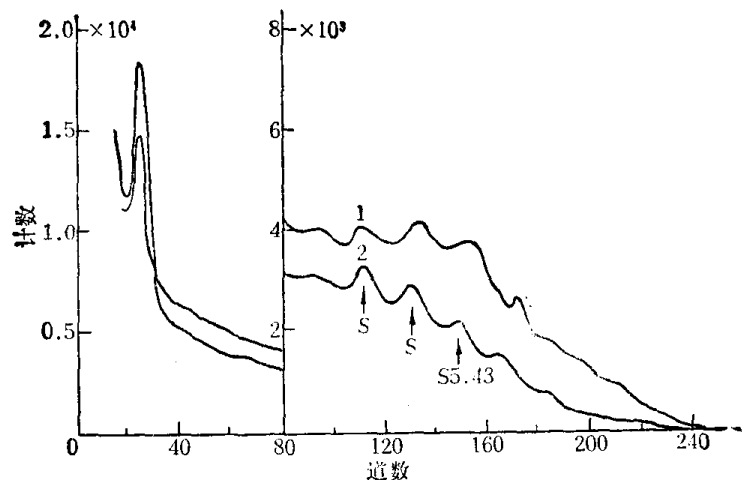


图 9 饱含原油与矿化水的石膏之中子俘获 γ 能谱
1——矿化水, Cl^- 浓度 71600 ppm; 2——原油。

5. 在有铁套管时的中子俘获 γ 能谱

在实际测井中, 有时是在下了套管的井眼中进行的, 为了考察铁套管对测量的影响, 我们在模型井中加上了直径为 15 厘米的铁套管一段, 在其他条件不变的情况下, 进行了测量, 结果如图 10 所示。其中可以看出 ^{56}Fe 的 7.64 MeV 和 5.97 MeV 俘获 γ 的影响。

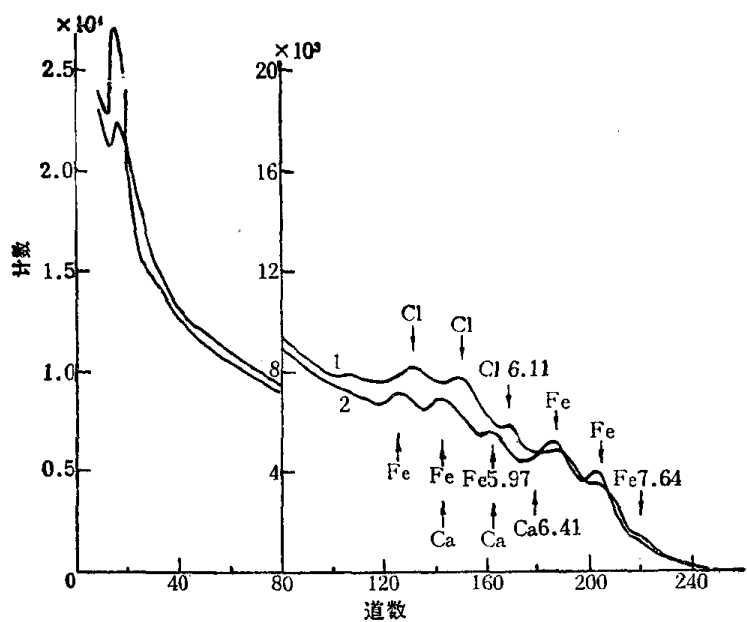


图 10 有铁套管时石灰岩的中子俘获 γ 能谱
1——矿化水, Cl^- 浓度 97600 ppm; 2——原油。

四、讨 论

在上述实验结果中,均显示出饱含原油和饱含矿化水的地层之中子俘获 γ 能谱的差异,但是由于一些因素的影响,使这些差异还不够明显,我们认为这些因素是:

1. γ 射线能量的衰减 由于镅-铍中子源发射的中子其能谱大约在 1 到 11 MeV 范围内^[2],在地层介质中,其分布大约可达 50 厘米远,在远离 γ 探头处发生的俘获 γ 射线,必须穿过相当长距离的介质层,才能入射到探头中去,因此能量损失较大,这种能量的衰减就在实际测量的 γ 能谱中,造成一个低能端高、高能端低的连续分布,从而使能谱分析变得困难起来。

2. 散射中子在闪烁体中所引起的脉冲 中子源所发出的中子,除了被地层元素俘获外,一部分经过地层介质的散射,有的又进入 γ 探头的闪烁体中,这些散射中子和闪烁体发生作用,也会产生一种幅度连续分布的脉冲^[3]。

上述连续的脉冲分布,特朗布卡(Trombka)等^[4]认为遵从 E^n 变化的规律, n 可由实

表 1 饱含原油和矿化水的石灰岩之积分计数率比较

孔 隙 度, %	131—190 道积分计数率		
	原 油	矿 化 水 (I)	矿 化 水 (II)
19.3	991	1335	2123
23.7	1042	1440	2072
32.7	939	1230	2287
43.3	720	1426	2348

注: 矿化水 (I) 为 Cl^- 浓度 15000—30000 ppm,
矿化水 (II) 为 Cl^- 浓度 120000—150000 ppm。

验确定。为了排除上述因素的影响，我们把这种连续分布作为本底予以扣除。如果粗糙地认为这种分布是随能量增高而线性地减少的话（参看图 6），则扣除后的谱形如图 11 所示。这样，经过处理后的饱含原油和饱含矿化水的地层之 γ 能谱，差异就更明显了。

除了上述谱形的差异外，由于 ^{35}Cl 的俘获截面较大，饱含矿化水的石灰岩地层之俘获

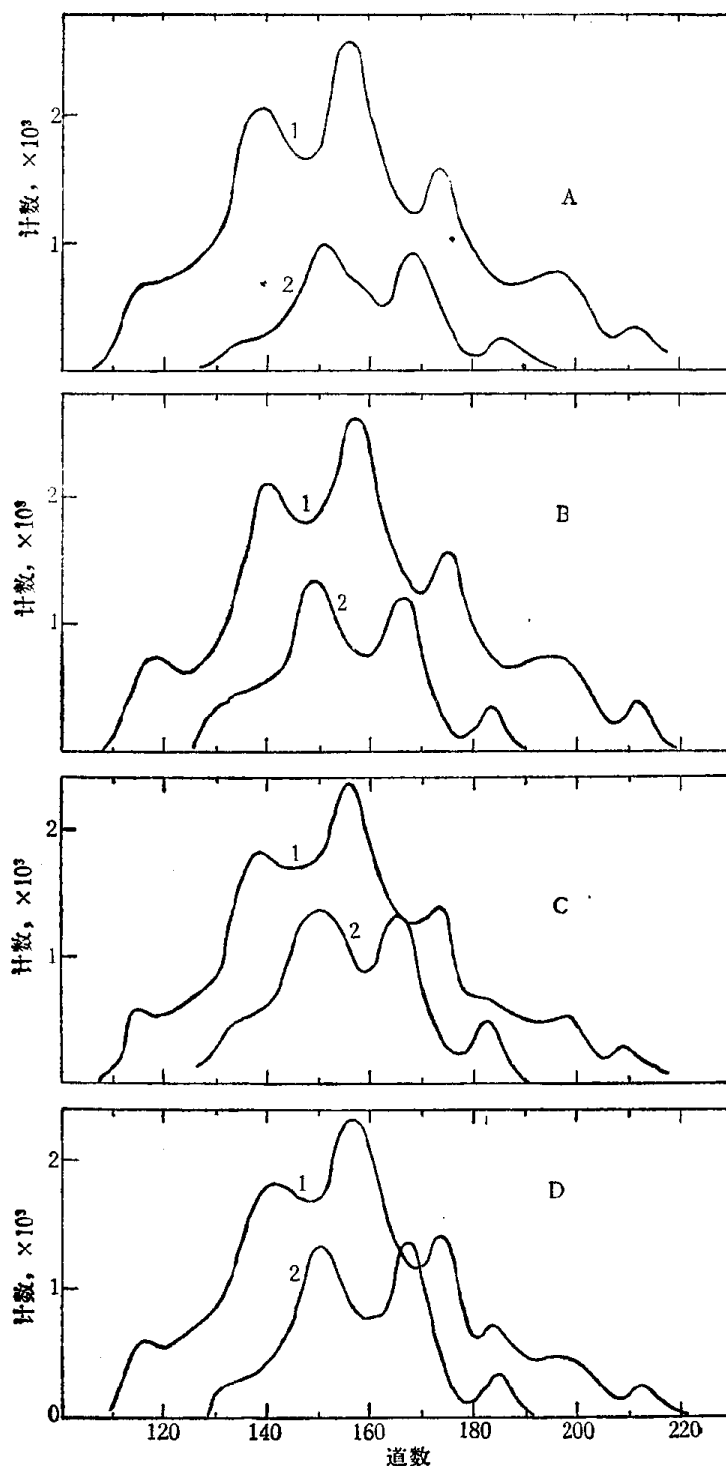


图 11 扣除本底后不同孔隙度的石灰岩的中子俘获 γ 能谱

- A. 孔隙度 43.3%，1——矿化水， Cl^- 浓度 141000 ppm，2——原油；
 B. 孔隙度 32.7%，1——矿化水， Cl^- 浓度 150000 ppm，2——原油；
 C. 孔隙度 23.7%，1——矿化水， Cl^- 浓度 150000 ppm，2——原油；
 D. 孔隙度 19.3%，1——矿化水， Cl^- 浓度 112000 ppm，2——原油。

γ 积分计数率也较高, 表 1 中列出了饱含原油和饱含矿化水石灰岩的积分计数率的比较, 从中也可以明显地看出它们之间的差异。

从上面的初步结果可以看出:

(1) 对于地下水矿化度较高的石灰岩地层, 在实验室条件下, 可以用观察中子俘获 γ 能谱的方法, 来判断地层所含流体的性质。

(2) 这一方法所使用的中子源, 可以是连续源, 也可以是脉冲源。

(3) 随着地层孔隙度的降低, 这一方法的灵敏度也降低, 对于探测极限的问题, 还有待于配合现场实验作进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] L. V. Groshev, et al., Atlas of Gamma Ray Spectra from Radiative Capture of Thermal Neutrons, 1959.
- [2] K. W. Geiger, et al., *Nucl. Phys.*, **53** (1964) 204.
- [3] S. M. Shafromh, Scintillation Spectroscopy of Gamma Radiation, vol. 1, p. 143, 1967.
- [4] J. I. Trombka, et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **87** (1970) 37.