

中子活化测井原位测定氟化钙 含量技术及应用

师立谱 王世传 徐风曾

(山东省地质矿产局物探队)

在萤石矿勘探工作中,因为萤石性脆,在钻探过程中易破碎,岩(矿)芯采取率难以达到要求。当萤石与硬岩石共存时,因选择性磨损,以及萤石分布不均匀等原因,使矿芯分析结果失去了代表性。中子活化测井工作的目的,是在钻孔中原位测定 CaF_2 含量,以弥补钻探取芯分析资料的不足,提高地质工作质量。

根据方法原理,研究了适应连续测井方式及定点测量方式的技术条件和资料解释方法。对萤石矿可达到三定(定矿层、定位置、定厚度)和计算 CaF_2 含量的目的,工作效率可达到常规测井水平,含量测定精度、灵敏度和准确度均可满足萤石矿地质普查、勘探的要求。

一、方法技术和模型井测试

(一) 方法原理

中子活化分析是基于稳定同位素(母体)受中子轰击后生成放射性同位素(子体),通过测量子体发射的射线性质来鉴别母体元素的一种分析方法。被测放射性核素种类和纯度是用测量射线能量(或半衰期)和强度来确定。因而可测定元素和测量待测元素的含量。

各种元素在热中子活化中产生(n、 γ)反应,在快中子活化中最常出现的是(n、p)、(n、d)、(n、n)、(n、2n)反应,这些反应只有在中子能量超过一定水平时方能产生。表1中列出了工作矿区易产生中子活化反应的几种元素的核反应参数。

从表1看出,当所用Am—Be中子源的最可几能域为2—4MeV时,10MeV以上的中子数目很少,所以 ^{16}O 反应甚微,同时 ^{14}N 丰度只有0.35%,因此只有 ^{19}F 的反应占绝对优势。所产生的 ^{16}N 放射的 γ 射线能量高达6.14MeV,容易与其他元素的活化放射性及天然放射性元素分开;而且 ^{16}N 的半衰期短,故可实现高速度的连续测井。

活化放射性强度由下式决定:

$$A_B = \varphi \sigma N_A (1 - e^{-\lambda t_1}) \cdot e^{-\lambda t_2} \quad (1)$$

式中: A_B —母体元素A被中子照射时间 t_1 和冷却时间 t_2 后的放射性强度; σ —元素A的活化截面; φ —中子通量; N_A —样品中元素A的量; $(1 - e^{-\lambda t_1})$ —饱和因子; λ —子体同位素的衰变常数。

式(1)说明,当中子源及 t_1 、 t_2 固定时,活化放射性强度 A_B 仅与样品中待测元素含量

N_A 有关。

表1 矿区主要元素核反应参数表

核 反 应	丰 度 (%)	中子能域 (MeV)	活化截面 (毫巴)	半衰期 (秒)	γ 射线能量 (MeV)	强度 (%)
$^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$	100	2—4	10	7.3	2.75 6.134 7.112	1 69 5
$^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$	99.7	10.2		7.3	同 上	同上
$^{15}\text{N}(n, \gamma)^{16}\text{N}$	0.35	热中子	20	7.3	同 上	同上
$^{138}\text{Ba}(n, \gamma)^{138\text{m}}\text{Ba}$	7.81	热中子	10	2.55分	0.662	85.1
$^{28}\text{Si}(n, p)^{28}\text{Al}$	92.2	2—4	4.7	2.3分	1.78	100
$^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{55}\text{Mn}$	100	热中子	13.3巴	2.6小时	0.85 1.81 2.11	99 30 15

用中子活化法求待测元素含量时，一般采用比较法，即在相同条件下照射、测量样品及标（准）样，用下式计算样品中待测元素的含量：

$$W_x = \frac{W \cdot N_x}{N} \quad (2)$$

式中： W_x —样品中某待测元素的含量； W —标（准）样中某元素的含量； N_x ， N —分别为样品及标（准）样中某元素的活化放射性强度。

（二）中子活化测井技术条件的选择

根据方法特点可供选择的技术条件有：测量能域、源距、电缆移动速度、仪器时间常数。

1. 测量能域

根据 ^{16}N γ 射线能量高的特点，以测量结果不受其它放射性干扰为原则，又有一定的积分范围，得到足够计数率，保证测量灵敏度。为此，测量范围应包括6.14MeV的硬 γ 射线及其产生的电子对效应的单、双逃逸峰全部和部分散射贡献。在工作中把能域下限选在4.3MeV，即只记录能量大于4.3MeV的 γ 射线。这样做既消除了其它放射性的干扰，计数率也得到了保证。

2. 源距

源距是指中子源至探测器的距离。其选择原则是：使测量结果不受瞬发 γ 射线（一般都是高能射线）的干扰和尽量缩短连续测井的冷却时间，以提高计数率。源距采用1.5米和2米即可满足工作要求。

3. 电缆移动速度

进行连续测井时，中子源和探测器相距一定距离（源距）同时下放，中子源在前先将地

层活化, 探测器在后测量其放射性。由此工作方式, 不难看出, t_2 和 T_0 (测量时间) 都由电缆移动速度来决定。由式(1)可知 t_1 、 t_2 决定着地层活化放射性强度的大小, T_0 决定放射性的积累量。测量结果由下式决定:

$$N = \int_0^{T_0} A(1 - e^{-\lambda t_1}) \cdot e^{-\lambda t_2} \cdot dt \quad (3)$$

式中: N —在 T_0 时间内的放射性积累数; A —是式(1)中 $\varphi \sigma N_A$ 的乘积。

由式(3)可以看出要获得高的计数 N , 需有较大的 t_1 和 t_0 , 较小的 t_2 。若要使 t_1 和 t_0 增大就必须减小电缆移动速度, 这样就会使 t_2 也跟着增大使 N 减小。由此可知, 电缆移动速度对测井结果的影响关系比较复杂。为求得恰当速度值, 我们在模型井中作了矿层异常面积与测井速度的关系试验, 其结果如图1所示。由此图可见, 当速度为500米/小时左右时, 测量结果最佳。

4、时间常数 (τ)

放射性测井定量解释对测井速度 V 的要求为: $V = H/3\tau$ (H 为矿层最小厚度)。

根据工作时探测矿层最小厚度 $H=0.5$ 米(试验中自定), 机动绞车的 $V=540$ 米/小时及手摇绞车 $V=300-400$ 米/小时, 则 τ 分别选取1秒和2秒。这样可把工作中所用技术条件列于表2。

表2 模型井和钻孔测量技术条件

技 术 条 件 测量 时 间 及 任 务		能 域 下 限	源 距	测 井 速 度	时 间 常 数	曲 线 横 向 比 例
		(MeV)	(米)	(米/小时)	(秒)	(脉冲/分/cm)
1984年	模 型 井 测 量	4.3	2	540	1	600
1984年	钻 孔	4.3	2	600—750	1	600
1985年	模 型 井 测 量	4.3	1.5	300—400 (手摇绞车)	2	600

(三) 模型井试验研究工作

1. 井径效应

由式(1)可知, 做定量计算时, 中子通量 ϕ 值应为常数, 但在钻孔及模型井测量时, 由于钻孔中井液(水或泥浆)的存在, 形成中子慢化层, 导致到达矿层的2—4MeV的快中子通量为井径(d)的函数 $C\phi = f(d)$ 。再者, 活化放射性同位素 ^{16}N 发射的 λ 射线也将因井径变化而改变散射条件, 使测量结果受影响。

为寻求活化测井结果随井径变化的规律, 利用模型井做了试验研究。考虑到实际钻孔可能遇到的情况, 使模型井井径变化范围为110—320毫米。测量时分两种情况, 一是中子源及探测器处于钻孔轴心, 二是中子源及探测器靠井壁。图2是 CaF_2 活化放射性强度与井径关系曲线。从该曲线来看, 活化放射性强度随井径的增大呈近似指数规律衰减, 与靠壁情况相比较, 居中时强度低, 下降亦快。

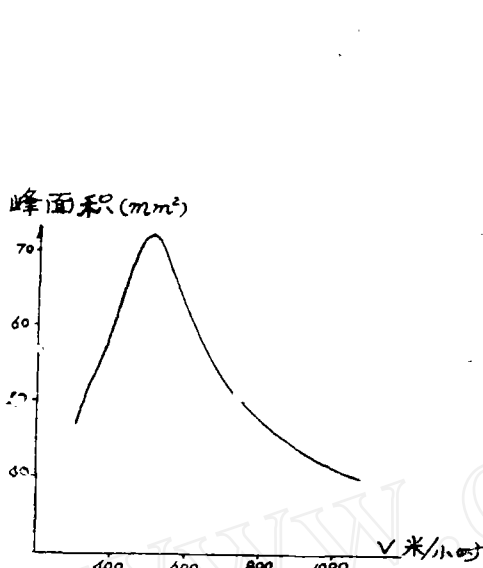


图1 异常面积与测速的关系

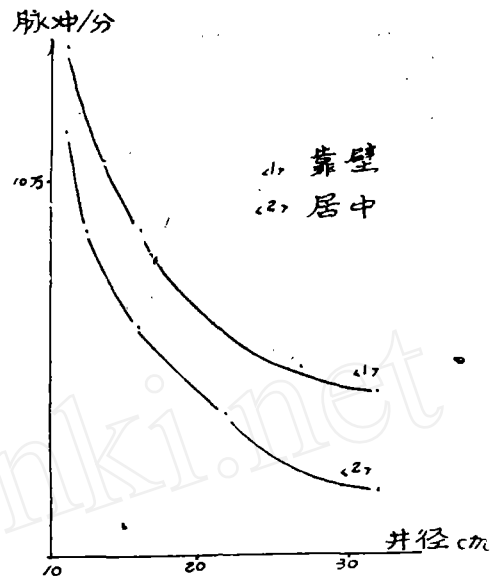


图2 中子活化强度与井径关系

为了求井径校正系数 (a), 设井径110mm的强度值为 N_{a0} , 任一井径的强度值为 N_a , 则有

$$a = N_{a0} / N_a$$

利用图2的放大曲线, 查出 N_{a0} 和 N_a 值所计算出的 a 值列于表3。

表3 井径校正系数 (a) 表

井径 (mm)	a	井径 (mm)	a	井径 (mm)	a	井径 (mm)	a
115	1.086	135	1.472	:	:	305	5.737
120	1.192	140	1.539	290	5.377	310	5.889
125	1.291	145	1.606	295	5.456	315	6.016
130	1.395	150	1.674	300	5.621	320	6.183

实际工作中, 对钻孔中子活化测井结果的井径校正, 可用井径曲线上对应矿层位置的井径值, 从表3中查出对应的 a 值, 由活化测井曲线量出矿层的强度值 (N), 其井径校正值 $N_{校} = A \cdot N$ (脉冲/分)。然后再用 $N_{校}$ 计算 CaF_2 含量。

2. 矿层厚度对活化测井结果的影响

由于在钻孔中矿层发射的射线的空间分布为: $I = I_0 e^{-\mu Y}$, 因此, 在探测器到达矿层之前和离开矿层之后一定距离内仍可测到, 这段距离称为探测半径。再者, 由于率表电路时间常数的存在, 故测得的异常幅度不仅与矿层待测元素的含量有关, 而且与矿层厚度有关。通过用 CaF_2 含量相同, 而厚度不同的矿层模型井实验, 研究了活化放射性强度的统计方法、界面划分原则和 CaF_2 含量的计算方法。试验结果列于表4。

表4 不同矿层厚度与异常面积比值计算表

矿层厚度 (Cm)	异常面积 (mm ²)	异常幅度 (脉冲/分)	异常面积/厚度
12.6	156	2760	12.4
22.6	328	4956	14.5
37.6	545	6468	14.5
57.6	688	6996	11.9
72.6	902	7440	12.4
82.6	1118	7200	13.5

用表4数据可作出图3。图中曲线(1)表示曲线异常总面积与矿层厚度呈线性关系,从

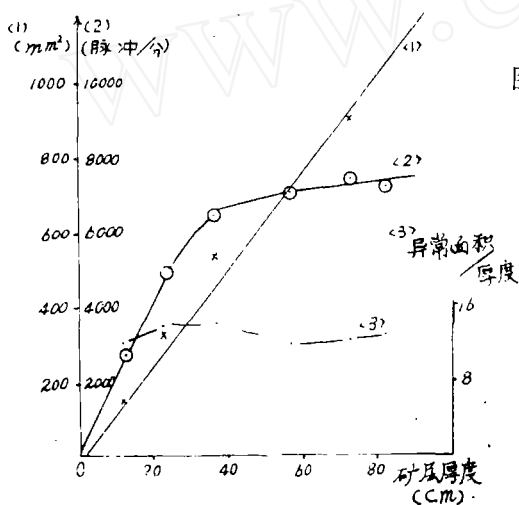


图3 中子活化测井结果与矿层厚度的关系

- (1) 异常面积与矿层厚度的关系曲线
- (2) 异常峰极大值与矿层厚度的关系
- (3) 异常面积比矿层厚度

而也说明活化放射性曲线包围的总面积和矿层中待测元素的总量有关;曲线(3)是矿层厚度为1厘米时的面积值,它近于常数。由此可以看出:矿层异常总面积与矿层厚度的比值和矿层待测元素的含量值密切相关。本试验结果与异常总面积对矿层厚度关系的理论计算结果相符。图中曲线(2)表示异常幅值与矿层厚度的关系,从曲线(2)可以看出:在实验工作所用技术条件下, $H \geq 0.5$ 米的矿层异常幅度才能达到最大值。关于矿层界面的划分,对于 $H \geq 0.5$ 米的矿层,可用二分之一幅值法划定,对于 $H < 0.5$ 米的矿层,亦参用二分之一幅值法划定,但准确度较差。

3. 中子活化法横向反应厚度的测定

在活化反应中,中子要逐次消耗掉自身的全部能量,因此,中子源在垂直于井轴的横向反应厚度是有限的。为了确定横向探测厚度(D),估计本方法的横向探测范围,利用图4所示的模型井做了试验。模型结构:孔径 $d = 110\text{mm}$,高 $H = 84\text{cm}$,厚 $D = 1.9 - 44.5\text{cm}$;模型材料用 CaF_2 含量均匀的萤石矿粉做成。测量结果列于表5。

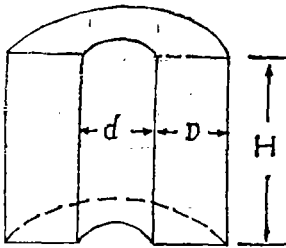


图4 D—横向厚度
H—模型高度
d—钻孔孔径

从表5所列数据表明，当D增至6.9—9.5厘米时，异常面积趋于恒定值，据此可知本方法横向反应有效厚度 $D \approx 8\text{cm}$ 。

通过以上模拟井试验，基本解决了如下四个问题：

(1) 井径对活化测井结果有影响，但存在一定的规律。求出井径校正系数a，可用校正的方法，消除井径变化对结果产生的影响。

(2) 矿层厚度H对异常幅值有影响，但曲线异常包围的面积（或称曲线的积分值）和矿层中待测元素的总量密切相关，矿层异常全面积与矿层厚度的比值和矿层 CaF_2 含量值

表5 横向厚度与异常面积关系表

横向厚度(Cm)	1.9	4.4	6.9	9.5	21.5	44.5
异常面积(mm ²)	66	83	100	112	102	111

密切相关。所以矿层厚度H是含量计算的重要参数。

(3) 本试验对确定厚度小于0.5米的薄矿层有困难，定量划定矿层的最小厚度为0.5米。对于小于0.5米的矿层尚须做进一步的研究。

(4) 若以井径为110毫米的钻孔为例，本方法的探测范围为：半径约13.5厘米的一个似园柱体，它测量范围的代表性优于岩芯取样分析。

(四) 标准模型井测量及资料解释方法

1. 模型井测量

置备了九个标准模型井，是用不同比例的萤石和重晶石矿粉通过水泥胶结而成，井孔直径110毫米。整个模型尺寸为：35×35×60厘米。

模型井的测量曲线所采用的技术条件和钻孔测井一样（见表2）。工作时对每个模型井要作数条曲线，观察重复测量误差和测量灵敏度（图5）。从图5所示曲线可以看出，九个模

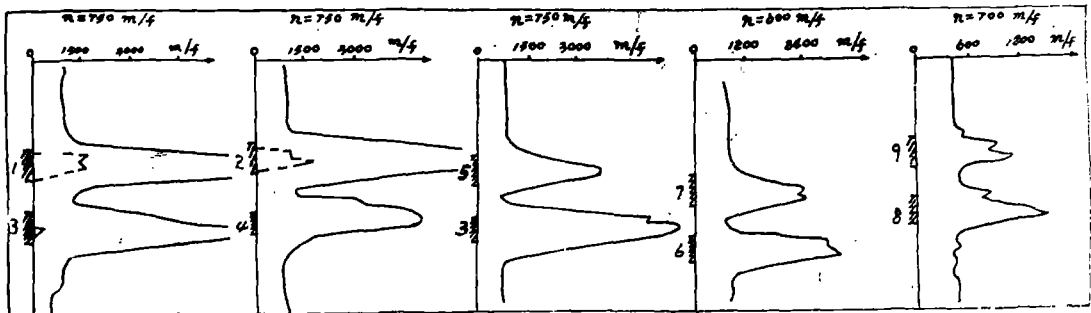


图5 模型井中子活化测井曲线图

CaF_2 含量：1. 51.6%；2. 46.1%；3. 37.3%；4. 34.2%；5. 27.8%；6. 21.8%；7. 16.6%；8. 11%；9. 4%

▨ 萤石矿模型号，技术条件 $V = 540\text{米/小时}$ ， $\tau = 1\text{秒}$

型井曲线的异常清楚，背景值稳定，可以满足定量解释的要求。

2. 数据处理方法及结果

矿层界面的划分采用二分之一幅值法。强度统计是在上下界面之间以10厘米间隔在曲线上取数（单位：脉冲/分），即 $N_{i1} \sim N_{in}$ ，矿层异常强度为 $\sum_{i=1}^n N_i / H$ （ H 为矿层厚度，单位“米”）。因为从试验结果已知 $\sum_{i=1}^n N_i / H$ 与矿层 CaF_2 含量关系密切。表6列出了九个模型井的重复测量结果。

表6 模型井的测量相对误差

模型号	CaF ₂ 含量 (%)	分次异常强度(脉冲/分/米)					平均值	相对误差 (±%)
一	51.6	54875	56783	55291	55250	55125 56875	55699	2
二	46.1	48708	48250	51125	52250		50083	4
三	37.3	39250	40500	42000	38500		40063	3.6
四	34.2	39500	36250	40625	39256		38906	5.5
五	27.8	27500	27250	30000			28250	5.8
六	21.8	21700	24600	20360			22220	9.0
七	16.6	18600	20100	15850	16500		17762	10
八	11.0	9050	14250	12833	12550		12171	15
九	4.0	6150	6100	4850	5450		5638	11

用表6中数据可作出强度平均值与CaF₂含量关系曲线（如图6）。从图6可以看出：活化放射性强度与模型井矿石CaF₂含量呈线性关系。其相关系数达到0.998，从图中曲线计算的CaF₂含量系数 $b = 1066$ 脉冲/分/米/1%。CaF₂在解释测井曲线时，矿层CaF₂含量

$$g = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \frac{1}{H} \cdot \frac{1}{b}$$

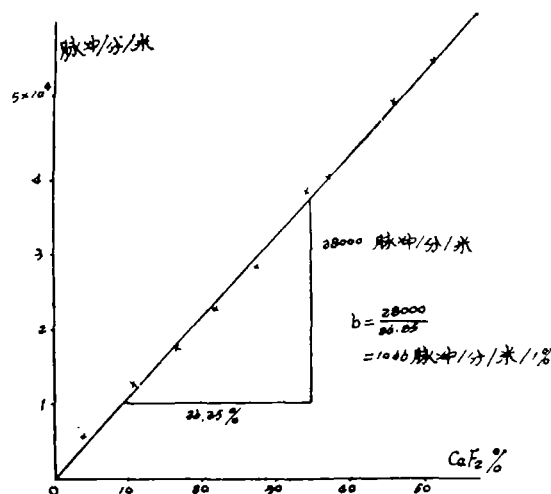


图6 中子活化测井曲线异常数放射性强度与模型井CaF₂含量关系曲线

从表6所列数据还可以看出：在目前采用的仪器设备和技术条件下，测量 CaF_2 灵敏度下限定为5%，重复测量相对误差小于或等于 $\pm 10\%$ （当 CaF_2 含量大于10%时），或小于 $\pm 15\%$ （当 CaF_2 含量小于或等于10%时）。

4. 关于异常取值方法的讨论

在前面讨论中，对异常取值方法采用的是全面积法，其值如图7， $A + B_1 + B_2$ 。这里采用了二分之一幅值法，其值为图7中的A部分。从模型井测量结果看，这两种统计方法，具有相同的结果。故本次试验对活化测井曲线的解释均用二分之一幅值法。对于 $H > 0.5$ 米的单一矿层来说，用二分之一幅值法求含量与全面积法解释结果一致；对于复合矿层，二分之一幅值法计算的含量稍有偏高，但经对所测资料进行统计，其差值都在允许误差范围之内；对于 $H < 0.5$ 米的矿层，因厚度 H 值不易划准，所计算的含量值亦不准确。而全面积法无论厚度划定的准确与否，解释结果之 CaF_2 总量是对的。从而说明全面积法解释结果比较合理，其缺点是尾翼影响大，对于薄矿层，若矿层界面不清楚，则解释结果偏高。

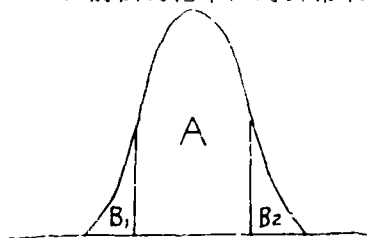


图7 曲线取值方法示意图

二、野外钻孔中子活化测井结果

（一）矿区地质、地球物理特征

1. 地质情况简述

矿区中部出露太古界泰山群山草峪组黑云斜长片麻岩，其两侧为中生界侏罗系蒙阴组分水岭亚组之黄绿色页岩、钙质砂岩、砂砾岩及白垩系王氏组砂岩、砂砾岩。

矿区内有两条断层分别控制着I号矿脉和II号矿脉。其产状大致相同，总体走向为 $280^\circ - 290^\circ$ ，倾向 NNE ，倾角变化在 $60^\circ - 80^\circ$ 之间。

矿床受 NWW 向构造控制，其产状和断层产状一致。矿体由石英、萤石、重晶石和矿化角砾岩组成。

矿石品位： BaSO_4 — $34.01 \sim 57.98\%$ ， CaF_2 — $12.48 \sim 41.53\%$ ， SiO_2 — $12.64 \sim 38.38\%$ 。 SiO_2 和 BaSO_4 互为消长关系。

矿石类型有两种，即含石英的萤石—重晶石矿石和含角砾岩重晶石矿石。二者均呈块状构造。

2. 岩、矿层的地球物理特征

（1）视电阻率性质：各种岩、矿层的视电阻率值列于表7。

由于每种岩层本身视电阻率值变化较大，难以靠视电阻率法区分岩、矿层。

（2）天然放射性：各岩、矿层的天然放射性有一定的差别，如矿层放射性最低，并且 BaSO_4 及 CaF_2 含量越高其放射性越低。中生界侏罗系地层放射性强度高于太古界泰山群地层。同一时代的不同岩性则没有明显差别。

（3）密度特征：据邻县重晶石矿的41块小体重样品称重结果，矿石平均密度为

表7 不同岩石—视电阻率值表

岩 石 名 称	视 电 阻 率 值($\Omega \cdot m$)
萤 石、重 晶 石 矿	3000~4000
黑 云 斜 长 片 麻 岩 类	2500~14000
构 造 角 砾 岩、砾 岩 类	2000左右
砂 页 岩	<1000

3.26克/厘米³。矿石密度与BaSO₄加CaF₂含量成正比关系。一般岩石密度为2.6克/厘米³左右。密度测井曲线在矿层处出现明显的低值。

(4) 矿石主要元素的中子活化特征：矿石矿物主要有重晶石(BaSO₄)、萤石(CaF₂)、石英(SiO₂)。其主要组成元素F、Ba、Si对中子活化反应的核参数已列于表1。在方法原理中并提出对氟元素可以用连续测井方式测量。野外钻孔试验，在山东省郯城县房庄重晶石矿六个钻孔中作了中子活化测井，在其中三个钻孔中做了2—3次重复测量，效果良好。

(二) 中子活化测井结果

六个钻孔的中子活化测井结果表明，测井与钻探所划分矿带结果基本一致，但所测定的CaF₂含量值有所差别。多数情况下，中子活化原位测定的CaF₂含量高于矿芯分析结果。在厚层重晶石萤石矿段，萤石矿贫富相间分布，两种方法所得结果很少一致。其原因一是岩芯采取率低；二是整理岩芯过程中有上下颠倒；三是采样间距一般为一米一个样，致使薄层富矿贫化；四是有的肉眼难以辨认。

通过活化测井能清楚地确定萤石在矿层中的分布，计算出矿层CaF₂含量，有效地校验萤石矿的位置及厚度，查明地质丢失的矿层。现以ZK13孔、ZK10孔为例说明如下：

1. 15线ZK13孔测井结果

本孔采用的测井方法有中子活化法、天然放射性、视电阻率法和井径测量(见图8)。天然放射性曲线以低放射性异常明显地反映出矿层位置；中子活化测井曲线反映出矿带中萤石矿(CaF₂)的分布规律、萤石矿位置及CaF₂含量特征，有效地校正了萤石矿的位置及CaF₂含量。

本孔钻探见矿一层，34.9—52.52米，其中34.9—38.01米为重晶石萤石矿，从矿芯分析结果看，该段CaF₂含量为12.81%；46.61—52.52米CaF₂含量平均18.85%。从图9可以看出：中子活化测井曲线在矿芯分析CaF₂含量高的位置都出现了高的异常，但矿层的具体位置和含量值与钻探资料则有差别。中子活化测井曲线出现了三段异常。第一段在36.61—37.61米，对应地质剖面的34.9—38.01米一段重晶石萤石矿。两者位置相当，厚度相差2.11米。从图中所标数据可知，该段矿芯采取率在70%以上。为查明两者差异的原因，对矿芯进行了复查，发现这段三个矿芯样皆为不足玉米粒大小的岩芯碎屑，在岩芯箱中摆了三米，这

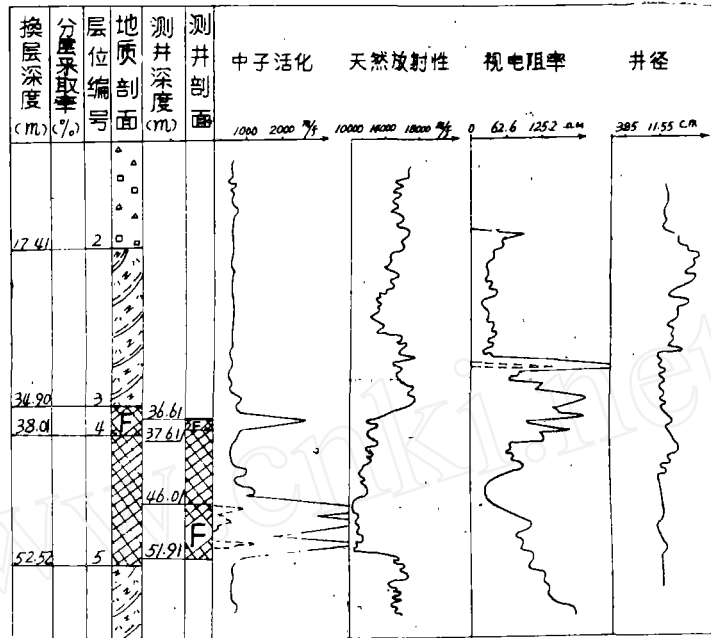
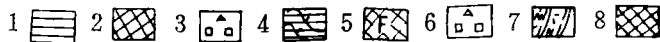


图8 15线ZK13孔中子活化测井曲线图



1. 页岩; 2. 重晶石矿; 3. 砂砾岩; 4. 重晶石营石矿; 5. 构造角砾岩;
6. CaF_2 含量曲线; 7. 碎裂状页岩; 8. 角闪斜长片麻岩

表明取芯率数据是不真实的, 分析结果也没有代表性。而天然放射性和中子活化测井曲线反映的界面位置一致, 足以说明测井结果是正确的。第二段在41.91—45.11米, 中子活化测井曲线出现三个较低的异常, CaF_2 含量在5%左右, 总厚度为2.4米, 其位置和地质剖面42.44—44.61米一段相对应。该段 CaF_2 含量低, 厚度小, 测井划分矿层有所加厚。对这样的矿, 可确定为萤石矿化。第三段在46.01—51.91米, 中子活化测井曲线反映为一个高强度异常群, 用平均含量法以一个样段计算 CaF_2 含量为25.72%。从曲线上还可以了解矿层 CaF_2 含量的分布形态。该段异常对应地质剖面的46.61—52.52米一段, 矿芯分析 CaF_2 含量平均为18.85%。该段地质取样六个, CaF_2 含量变化特征和测井曲线反映特征不尽一致, 这主要是矿芯采取率不足造成的(见图9)。

总之, 中子活化测井在本孔校正了矿层位置, 对整个矿层而言, 其上界面下移了1.71米, 下界面上移了0.61米, 测出了萤石在矿层中的分布位置, 并求出了 CaF_2 含量。纠正了因钻探取芯造成的分析结果的不真实。

2. 8线ZK10孔测井结果

本孔采用的测井方法有: 中子活化法、天然放射性、密度($\gamma-\gamma$)、视电阻率法和井径测量(图10)。天然放射性测井曲线反映两段低放射性异常带, 即204.60—210.34米和225.04—240.39米。其位置和地质钻探确定的两层矿, 即205.81—210.38米和224.12—240.46

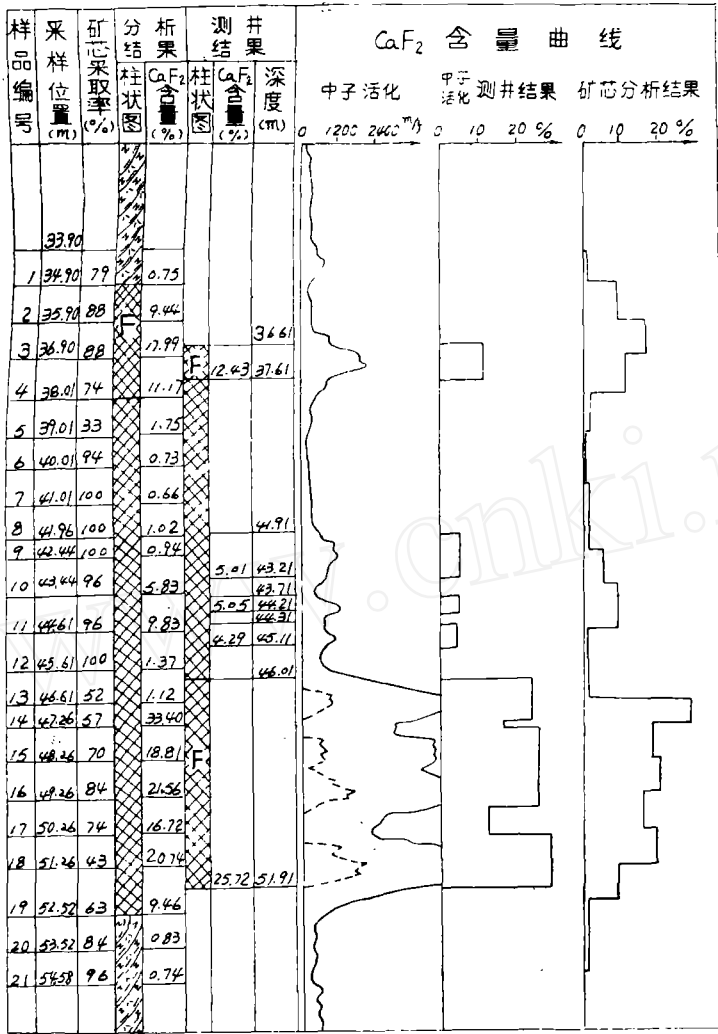


图9 15线ZK13孔中子活化测井成果图 比例尺 1:150

米相对应。其中232.05—234.05米处出现相对较高的放射性异常，它和地质划定的231.39—234.0米的构造角砾岩相对应。密度曲线反映的低值高密度异常，对划分矿层不象天然放射性曲线那样清晰，它与矿层BaSO₄含量关系密切。视电阻率曲线在矿层处表现为明显的高阻异常，与天然放射性曲线对应良好。

中子活化测井曲线明显地反映出萤石矿的分布特征，并据此计算了CaF₂含量。从图11分析，第一层矿（204.6—210.34米），钻探资料相应位置是205.81—210.38米，其上界面两者相差1.21米，说明此处钻探取芯不准而丢矿。在206.81—207.81米矿芯分析CaF₂含量为3.58%，而矿芯采取率仅7%；此处中子活化测井曲线无矿异常反映。从密度曲线看出，此处破碎扩径，表明地质分析结果无代表性。在岩性描述中认为该段为重晶石矿，未提到萤石；但从该段七个样品的分析结果来看，BaSO₄含量最高只有2.73%，而CaF₂含量可达61.93%，故推测岩性描述有误。矿芯分析与测井结果出现大的差异，可能是钻探取芯率低

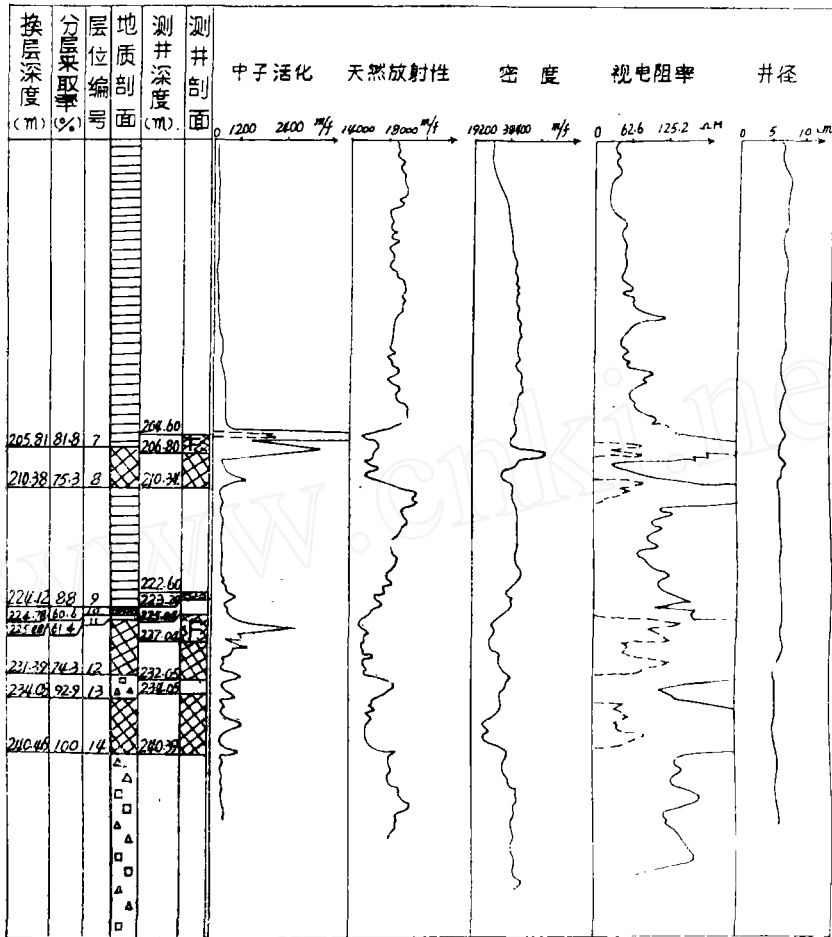


图10 8线ZK10孔中子活化测井曲线图 比例尺 1:600

造成的。利用中子活化测井曲线对第二层矿计算的 CaF_2 含量，从总的规律看和矿芯分析结果基本一致，但含量值测井结果高于矿芯分析结果，这是由于矿芯采取率低和矿芯分析结果平均后造成的。

本孔通过测井工作，从曲线特征和 CaF_2 含量计算结果认为：第一层矿，204.6—206.8米没有重晶石矿的特征，应为萤石矿。206.8—210.34米也不应定为重晶石矿，天然放射性异常是萤石、方解石等矿物引起的。

由以上叙述的二个孔的测井结果，足以说明中子活化测井测定萤石矿的有效性。对于其它钻孔的测量结果在此不一一赘述。

三、中子活化测井方法的精度、灵敏度和准确度

(一) 测量精度和灵敏度

1. 衡量方法

测量精度是根据模型井多次重复测量，用实际钻孔重复测量曲线分别计算矿层 CaF_2 含

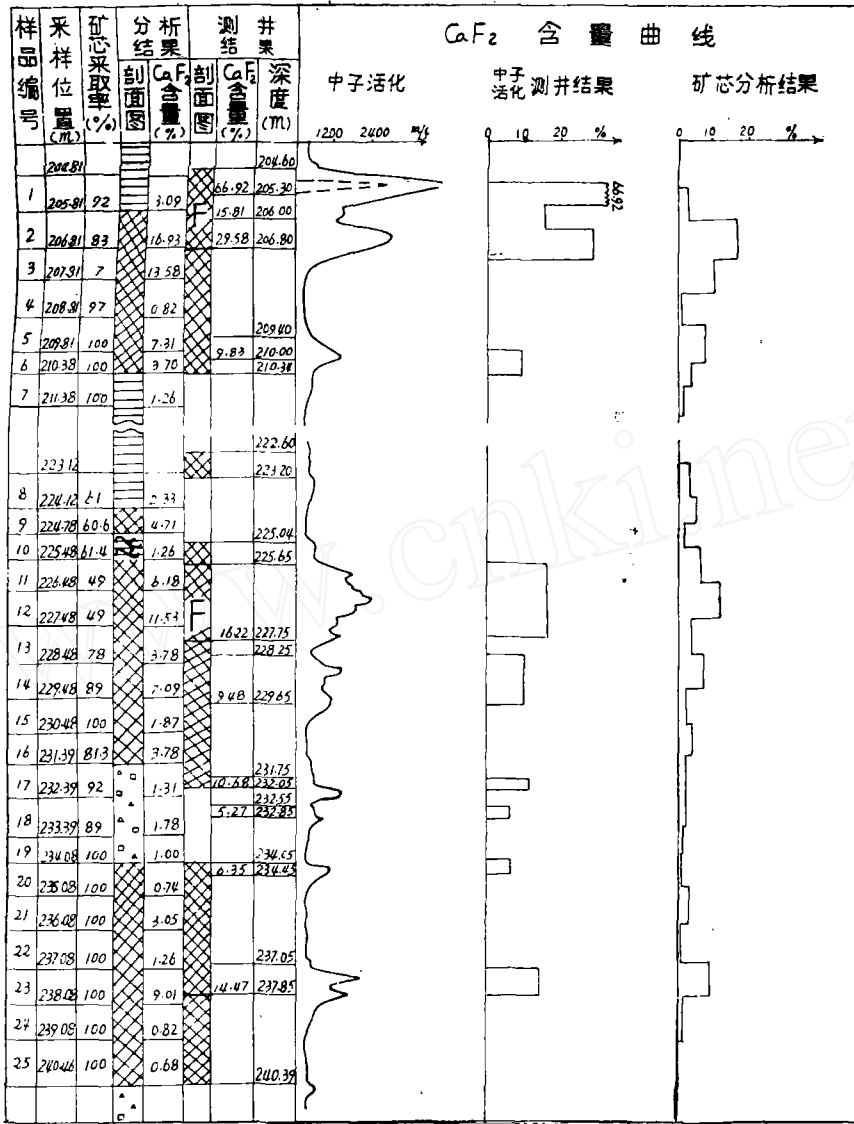


图11 8线 ZK 10孔中子活化测井成果图 比例尺1:150

量来计算重复测量相对误差。按定量分析要求，采用计算公式如下：

$$\sigma = \frac{a - b}{a}$$

测量灵敏度确定的原则有二：（1）曲线幅值大于三倍均方差的（异常下限）；（2）符合矿区勘探和满足测量精度的要求。符合这两个条件的最低异常反映的 CaF₂含量值为灵敏度下限。

2. 试验工作达到的技术指标

在模型井测量中给出表 6 所列数据就可计算模型井的重复测量误差（用σ表示）。当 CaF₂含量 > 10% 和 < 10% 时，σ 分别为 < ±10% 和 < ±15%。钻孔中的σ测量结果见表 8，

表8 各钻孔中子活化测井曲线基本和重复测量结果及相对误差

钻孔号	曲线号	矿层号	矿层厚度(米)	CaF ₂ 含量(%)	相对误差(%)	备注
ZK10	1	1	2.2	37.1	0.27	相对误差计算公式 $\sigma = \frac{a-b}{a}$
	2	1	2.2	37.2		
ZK8	1	1	1.3	23.3	5.74	
	2	1	1.3	22.0		
	3	1	1.2	22.4		
ZK8	1	2	2.0	25.8	9.27	
	2	2	2.0	26.2		
	3	2	2.0	28.5		
ZK44	1	5	0.7	19.1	6.29	
	2	5	0.7	20.3		
ZK10	1	3	2.1	16.2	8.63	
	2	3	2.0	14.8		
ZK8	1	7	0.8	11.0	15.91	
	2	7	0.6	13.1		
ZK10	1	4	1.4	9.48	0.1	
	2	4	1.5	9.47		
ZK10	1	2	0.6	9.83	16.2	
	2	2	0.9	11.7		
ZK10	1	7	0.4	6.35	8.98	
	2	7	0.3	5.78		
ZK44	1	7	0.6	7.50	11.1	
	2	7	0.4	8.44		
ZK8	1	6	0.6	6.10	22	
	2	6	0.7	7.7		

亦达到了模型井的水平。 CaF_2 测量灵敏度下限当为5%。如改变技术条件，还可减少误差，提高测量灵敏度，如表9所列模型井测量结果(源强30居里，源距1.5米， t 为2秒， $V = 300-400$ 米/小时)， CaF_2 含量从4%—51.6%，其6都小于 $\pm 10\%$ 。

表9 模型井连续测量结果及相对误差表

模型号	CaF_2 含量 (%)	异常强度 ΣN (脉冲/分)					ΣN	相对误差 ($\pm\%$)
一	51.6	23220	26580	25860			25220	7.93
二	46.1	20940	20500	21300	21480		21055	2.64
三	37.3	17580	16620	16020			16740	4.78
四	34.2	14940	13260	14460	14040	15060	14352	7.25
五	27.8	11820	13080	12360	11760	12780	12360	5.5
六	21.8	10680	11840	11440	10520	11000	11096	6.28
七	16.60	7400	7560	6880	7640		7370	6.65
八	11.0	4280	4580	4220			4360	4.80
九	4.0	2180	2320	1920			2140	10.0

定点测量方式测量模型井，点距10厘米，以矿层总计数观察测量误差。技术条件：中子源30居里，照射时间60秒，冷却时间15秒，测量时间30秒。由测量结果(见表10)可知，定点测量重复测量相对误差仅有 $\pm 5\%$ ，对 CaF_2 测量灵敏度下限为4%。测井效率为每小时可测两米矿层。测定矿层最小厚度为0.2米。

图12是O线ZK8孔低品位段中子活化测井定点测量、连续测量结果和矿芯分析结果对比图。从图上可以看出：(1)两种测井方式的曲线形态基本一致；定点测量比连续测量灵敏

表10 模型井定点测量结果及相对误差表

模型号	四	五	六	七	八	九
CaF_2 含量%	34.2	27.8	21.75	16.6	10.95	4.0
总计数	41941	33611	25365	16965	11608	4952
	39143	33789	24953	16927	12927	5072
重复误差	4	0.15	0.8	0.1	5	1.2

度高，分层细；(2)两种测井方式求得的 CaF_2 含量值相差不大；(3)连续测量具有效率高、分层细的特点。对含量高的矿层(CaF_2 含量 $> 10\%$)可采用连续测井方式，若任务要求对 CaF_2 含量低于10%的矿层作精确测定，可采用定点方式测量。

(二) 中子活化测井结果的准确度

以往的习惯是以钻探取芯化验资料为标准与测井结果相比较，以衡量测井结果的准确度，如果两者一致就认为测井结果可靠，否则就不可靠。我们认为，中子活化分析方法本身就具有准确度好的优点，原位测定又避免了矿物分布不均，钻探岩芯采取率低等缺点。因此，

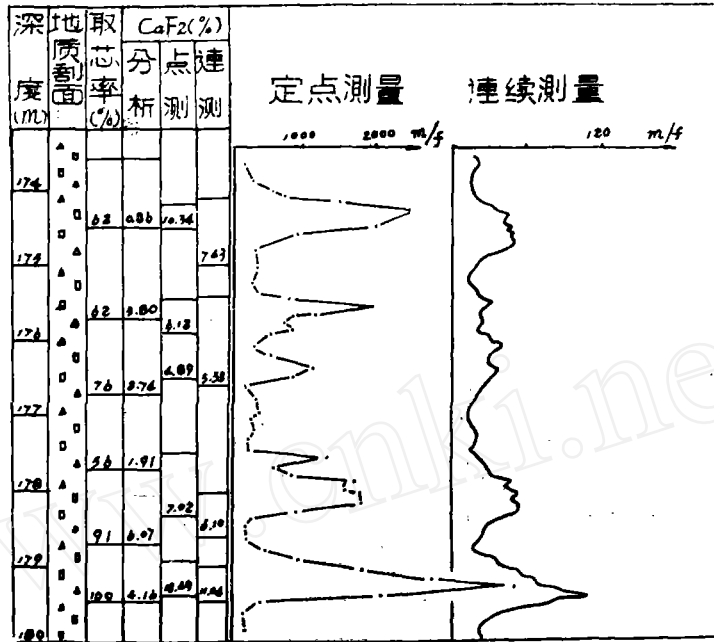


图12 ZK8孔活化测井点测、连续测量和地质分析结果对比图
比例尺 1:100

用此种观点来评价中子活化测井结果是不正确的。实际上两种方法都是从不同侧面去认识地下矿体这一客观事物，就宏观上讲两者可比，但在微观上就要看是否具备可比的条件，对比时应具备以下条件：（1）矿层待测元素分布均匀；（2）钻探取芯率真正达到100%，无选择性磨损；（3）岩（矿）芯无上下颠倒现象；（4）所采用的分析方法有可比性。实际上这些条件不能全部满足。

我们认为，研究中子活化测井准确度可用模型井测定来实现。具体作法是：（1）取未知含量的粉砂状原矿，做成模拟矿层，用钻孔中的相同技术条件进行测量，求出CaF₂的含量；（2）然后取粉砂状原矿样品，用测定样品的方法分析其CaF₂的含量，两者相比较求出相对误差。以该相对误差做为中子活化测井的准确度。

粉砂状原矿模拟矿层与模型井的结构形态、湿度、密度等完全不同，在这种条件下衡量准确度是严密的。

具体测量时，取一、二、三号模型井分别为原矿1、2、3的刻度标准，定出原矿1、2、3的CaF₂含量。测量结果见表11（定点测量方式）和表12（连续测量方式）。表中“CaF₂含量”项是用样品测定方法计算的结果，被称为“真值”，“计算含量”项是用测井方式求得的CaF₂含量值。原矿1、2、3的CaF₂含量“真值”与“计算含量”相对误差都小于10%，足以说明中子活化测井结果是准确可靠的。

四、结束语

经过近两年的试验，总结出了一套定量测定氟化钙含量的中子活化测井工作方法，测井

表11 中子活化测井定点测量方式准确度结果表

模 型 号	CaF ₂ 含量 (%)	总 计 数 ΣM		$\bar{\Sigma M}/H$	计 算 含 量 (%)	相 对 误 差 (%)
一	51.6	21550	22120	36392		
原 矿 ₁	56.39	15014	15232	37808	53.61	4.93
二	46.1	19586	19288	32395		
原 矿 ₂	42.0	10757	11159	27359	38.93	7.31
三	37.3	17847	17544	29493		
原 矿 ₃	28.09	8211	8078	20363	25.75	8.33

效率可达常规测井的水平，已达到的测定精度、灵敏度完全能满足萤石矿勘探规范的要求，也是国内首次试验成功的方法。其特点是灵敏度高、精度好、准确度可靠，所用仪器设备简单，方法易于掌握，是实现钻孔中原位测定氟化钙含量的好方法。应在萤石矿普查勘探中推广应用，能保证地质工作质量，降低勘探成本，提高勘探速度。

表12 中子活化测井连续测量方式准确度结果表

模 型 号	CaF ₂ 含量 (%)	异常总计数 $\bar{\Sigma M}$	$\bar{\Sigma M}/H$	计 算 含 量 (%)	相 对 误 差 (%)
一	51.6	329000	548333		
原 矿 ₁	56.39	246333	615833	57.95	2.77
二	46.1	304000	506667		
原 矿 ₂	42.0	171000	472500	38.89	7.40
三	37.3	272400	454000		
原 矿 ₃	28.09	124000	310000	25.47	9.83

**NEUTRON ACTIVATION LOGGING TECHNIQUE FOR DETERMINING THE
CaF₂ CONTENT IN ROCKS IN DRILLS AND ITS APPLICATION**

Shi Lipu, Wang Shichuan and Xu Fengzeng
(The Geophysical Exploration Brigade, Shandong
Bureau of Geology and Mineral Resources)

Abstract

The neutron activation logging technique which is an advanced nuclear logging technique was discussed in this paper. The technical requirements and conditions for determining the fluorite (CaF₂) content of rocks in drills, the factors which influence the use of the technique and the correction approaches were described in detail. The calculations of the CaF₂ content in the rocks from the measurements, the sensitivity of the logging, the precision and accuracy of the measurements were discussed as well.

Two examples were presented to illustrate the application of the technique.