

30-34

## 新型X射线荧光测井仪及其应用\*

p631.83

侯胜利 葛良全 程业勋 章 晔 王祝文

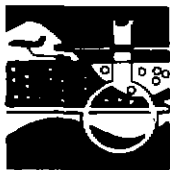
p624.7

(中国地质大学·北京·100083)

论述了新型X射线荧光测井仪的特点和克服井壁凹凸不平、井液影响、基体效应的方法技术以及用X射线荧光测井方法计算品位和线储量。仪器和方法在矿区的应用,得到了满意的结果。

关键词 X射线荧光 测井仪 基体效应 品位 线储量

探测, 储量, 测井



## 1 基本理论

假定被测介质分布均匀、表面光滑、且为一无限厚岩体,当探管置于井中测量时,探测器记录到的目标元素特征X射线的照射量率和目标元素在岩石中含量有如下关系<sup>[1]</sup>:

$$I_x = \frac{KC}{\mu_{0r} / \sin \alpha + \mu_{xr}} e^{-(\mu_{0a} / \sin \alpha + \mu_{xa})H} \quad (1)$$

式中,  $I_x$  为目标元素的特征X射线的照射量率;  $K$  为有关的常数;  $C$  为岩石中目标元素的含量;  $\alpha$  为源初始X射线相对于探管的出射角;  $\mu_{0r}$ ,  $\mu_{xr}$  分别为源初始X射线与特征X射线在岩体中的质量衰减系数;  $\mu_{0a}$ ,  $\mu_{xa}$  分别为源初始射线与特征X射线在井液吸收层中的质量衰减系数;  $H$  为井液的厚度。

(1)式表明,当被测介质基体成份不变( $\mu_{0r}$ ,  $\mu_{xr}$  为常数)、源样距  $H$  和井液吸收层的成分和厚度也不变时,则目标元素特征X射线的照射量率( $I_x$ )与目标元素的含量( $C$ )成正比。因此,用X射线荧光测井仪在井壁上准确测定目标元素特征X射线的照射

量率,即可对目标元素求取含量,进行“定量”计算。

## 2 新型X射线荧光测井仪的特点

1979年章晔等<sup>[2~4]</sup>研制成功中国第一台X射线荧光测井仪,其探管直径为60mm,使用闪烁计数器为探测器。近年由我们新研制的X射线荧光测井仪具有以下主要特点:

1)小口径。探管直径为42mm,保证了测井仪在各种井径的钻孔中都能下井测量。

2)高分辨率。正比计数管探测器与闪烁探测器相比,大大提高了X射线能量分辨率,可实现一次同时测量多元素。

3)局部探头贴壁紧。设计新颖的电控短臂局部贴壁装置,使探头部分最大推靠距离达200mm,保证了探测器即使在一些特殊情况(如:扩孔)下,仍能紧贴井壁测量。

4)快速稳定。供给正比计数管探测器的高压在开机后数分钟即可稳定,试验证明仪器在开机十分钟后整机即进入稳定状态,可以开始下井测量,大大缩短了开机预热的时间。

5)数字传输。在测井探管里探头与脉冲幅度分析器紧连,测井探管输出的信号经电缆以数字形式送入RS-232C微机接口,克

本文1996年10月收到,1997年7月改回,李翠华编辑。

\* 地质矿产部科技司“八五”重点科技项目,参加者包括:雷启福、姚安兵、王启国(重庆地质仪器厂,630033)、周四春、谢廷周(成都理工学院,610059)。

服了以前脉冲信号经长电缆后变宽及其衰减问题。

6)现场处理。地面主机配备便携式微机及数据处理软件程序,可以存储测井数据,也可在现场测井时即时处理数据,并给出测量目标元素的含量、矿层厚度和深度以及线值量值。本测井仪还可以同时测量井径。

### 3 X射线荧光测井的若干方法技术

#### 3.1 井壁凹凸不平影响的校正

在X射线荧光测井中,钻孔的井壁往往是凹凸不平的,特别是在含矿层段。理论和实践可以证明,井壁凹凸不平对特征X射线照射量率带来的影响,即相当于式(1)中 $H$ 值变化带来的影响。因此,在有井液的钻孔中,如果消除了不同井液厚度对X射线荧光测井的影响,也就消除了井壁凹凸不平的影响,这个问题将在下一部分讨论。下面仅研究消除或减小于孔中井壁凹凸不平对X射线荧光测井的影响。

同推导(1)式同样的思路,可得探测器记录到激发源放出的某一能量的初级X射线经井壁散射所产生的散射X射线照射量率( $I_s$ )为:

$$I_s = \frac{KI_0\sigma}{(\mu_{0r}/\sin\alpha) + \mu_v} e^{-(\mu_{0s} + \mu_v)H} \quad (2)$$

式中, $\sigma$ 为井壁岩石对源初级X射线的相干与非相干的总质量散射系数; $\mu_{sr}$ , $\mu_{sm}$ 分别为散射X射线在岩石和吸收层中的质量衰减系数。其它参数同(1)式。

将(2)式除以(1)式得:

$$\frac{I_x}{I_s} = \frac{K(\mu_{0r} + \mu_{sr}\sin\alpha)}{K(\mu_{0r} + \mu_{sr}\sin\alpha)} \times \frac{C}{\sigma} e^{-(\mu_{0s} + \mu_{sm})H} \quad (3)$$

上式中,由于 $\mu_{sa} - \mu_{sa} < \mu_{sa}$ ,故以特征X射线照射量率与散射X射线照射量率的比值( $I_x/I_s$ ) (简称特散比)为基本参数减弱了由吸收层对射线吸收和散射引起的特征X射线照射量率的变化。因此,以特散比( $I_x/I_s$ )

代替特征X射线照射量率( $I_x$ )作基本参数可大大降低因凹凸不平对X射线荧光测井带来的误差。

#### 3.2 井液影响的校正

井液影响的校正主要从仪器硬件和软件两方面采取措施。在仪器硬件方面采用局部贴壁装置,以保证井下探管的探测窗部位能紧贴井壁。软件的功能在实现探头局部贴壁的基础上,校正0.5mm~5mm厚的井液对X射线荧光测井的影响。对新型X射线荧光测井仪,可测矿种包括中等、高原子序数元素,对不同种类的矿种需要采用不同的探测器和激发源。根据国内普遍采用充气正比计数管的类型、放射性同位素源的种类和不同的矿种,提出了三种井液校正方法。

##### 3.2.1 双散射峰法

假定激发源放出两组能量的初级X射线,其能量分别为 $E_1$ , $E_2$ ,且 $E_1 > E_2$ 。显然,由于井壁的散射作用和井液的散射作用,在测得的谱线上都能形成其各自的散射X射线峰,其峰面积分别记为 $I_s^1$ , $I_s^2$ 。当井壁岩(矿)层中不存在K吸收限(或L吸收限)介于 $E_1$ 与 $E_2$ 之间的元素,且由岩层引起的多次散射可忽略或为常数时,可以证明, $I_s^1$ 、 $I_s^2$ 与井液厚度 $H$ 之间有如下关系式:

$$I_s^2 = A + BI_s^1 + CI_s^1H + DH$$

$$H = \frac{I_s^2}{D + CI_s^1} - \frac{A}{D + CI_s^1} - \frac{BI_s^1}{D + CI_s^1} \quad (4)$$

式中A,B,C,D为常数。

由(1)式知,将有井液吸收时的特征X射线照射量率 $I_x$ 修正到无井液时的修正因子为 $f(H) = e^{(\mu_{0s} + \mu_{sm})H}$ 。求得 $H$ 的值,即可将有井液吸收时的特征X射线照射量率 $I_x$ 修正到无井液时的特征X射线照射量率 $I_0$ 。式(4)中的系数,一般根据标样的测量结果由多元回归方法确定。

##### 3.2.2 散射峰—逃逸峰法

对高原子序数元素(如:Sn, Sb, Ba, Sr)的X射线荧光测井,一般采用 $^{241}\text{Am}$ 做激发源,

主要利用它放出的 59.56keV 的 X 射线来激发元素使之产生特征 X 射线。利用充 Kr 正比计数管为探测器, 由于 Kr 的吸收限为 14.32keV, 因此可产生逃逸射线, 可采用散射峰—逃逸峰法对井液进行校正。

假设激发源放出的某一能量的初级 X 射线经井壁和井液的散射, 在谱线上形成的散射峰面积为  $I_s$ , 其逃逸峰峰面积为  $I_s^K$ , 并且当由井壁产生的多次散射可忽略(或者近似为一常数), 多次散射射线的照射量率的变化主要来自井液厚度的变化, 则有

$$I_s^K = K_1 I_s + K_2 I_s^m + K_3 \quad (5)$$

式中,  $I_s^m$  为能量位于逃逸峰谱段内由井液产生的多次散射 X 射线的总照射量率;  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  为与正比计数器探测效率有关的常数。

$I_s^m$  数学表达式的推导很复杂, 为此进行了不同水层厚度的散射实验。经实验发现, 随不同的水层厚度( $H$ )的变化,  $I_s^m$  呈现明显的指数增长规律,  $I_s^m$  随  $H$  变化的表达式为:

$$I_s^m = a' - b'e^{-c'H}$$

当  $H < 10\text{mm}$  时, 可近似为:

$$\begin{aligned} I_s^m &= a + bH \quad (6) \\ \frac{I_x - K_{Ax}(1 - e^{-K_{Bx}H})}{K_{x1}e^{-K_{x2}H}} &= \frac{I_s - K_{w1}(1 - e^{-K_{w2}H}) - K_{As}(1 - e^{-K_{Bs}H})}{K_{s1}e^{-K_{s2}H}} + \\ &\quad \frac{B_0}{K_{x1}} - \frac{A_0}{K_{x1}} = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

式中  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $K_{s1}$  和  $K_{x1}$  分别为与被测介质性质、特征 X 射线和散射 X 射线能量、激发源的活度、测量几何条件有关的常数, 可从实验获得。

### 3.3 基体效应的校正方法

在 X 射线荧光测井工作中, 井壁岩石矿物是由多种元素组成的, 它们彼此之间相互影响, 影响的结果使测得的目标元素的特征 X 射线照射量率  $I_x$  与其含量  $C_x$  之间的线性关系不再成立。因此, 对于新研制的 X 射线

将(6)式代入(5)式, 可得:

$$H = \frac{1}{bK_2} (I_s^K - K_1 I_s - aK_2 - K_3) \quad (7)$$

式中常数均与井壁介质无关, 通过测量标准样品在不同井液厚度下的各参数值后, 由多元回归法求得。同双散射峰法校正公式一样, 求得  $H$  的值, 即可将有井液吸收时的特征 X 射线照射量率  $I_x$  修正到无井液时的特征 X 射线照射量率  $I_0$ 。

#### 3.2.3 单散射峰法

当被测介质的基体成份不复杂, 且目标元素含量的变化不能引起被测介质有效原子序数的变化时, 理论和实验表明: 在有井液时, 井液对特征 X 射线照射量率和散射 X 射线照射量率的影响可用下式校正。

$$I_x^0 = \frac{I_x - K_{Ax}(1 - e^{-K_{Bx}H})}{e^{-K_{x2}H}} \quad (8)$$

式中:  $I_x^0$ ,  $I_x$  分别为无吸收层时和有吸收层时特征 X 射线的照射量率。  $H$  为吸收层厚度;  $K_{Ax}$ ,  $K_{Bx}$ ,  $K_{w2}$  分别是常数, 可由实验获得;  $I_x$ ,  $I_s$  以仪器谱上特征 X 射线和散射射线的净峰面积来表示; 井液厚度  $H$  由下式经迭代法给出:

荧光测井仪, 在校正井壁不平影响及井液吸收散射影响的基础上, 必需克服元素间基体效应的影响。要达到一次下井测量多个元素含量的目的, 单用“特散比”法难以达到目的。为此, 根据基体效应的产生机制, 针对中等及中等原子序数以上的元素, 在总结前人工作及经过多次试验的基础上, 考虑到多次荧光效应及元素间的交叉影响, 提出如下的校正方程:

$$C_i = \sum_{j=0}^n a_j I_j + I_i \sum_{j=1}^n a_{ij} I_j + I_i \sum_{\substack{j < k \\ j, k \neq i}}^n a_{ijk} I_j I_k \quad (10)$$

式中:  $C_i$ 、 $I_i$  分别为目标元素  $i$  的含量和特征 X 射线照射量率;  $I_j$  为元素  $j$  的特征 X 射线照射量率;  $\alpha_j$ ,  $\alpha_{ij}$ ,  $\alpha_{ijk}$  均为影响系数。

该校正模型称为影响系数法照射量率校正模型。它是以样品中目标元素的特征 X 射线照射量率  $I_i$  为基础而进行基体效应校正的。

### 3.4 计算含量与线储量表示方法

#### 3.4.1 含量解释法

根据含量标定模型逐点计算被测岩层中目标元素的含量,再以目标元素含量为参量的测井曲线求矿层的平均品位或线储量。

在点测测井中,第  $j$  矿层的平均品位和线储量分别表示为:

$$\bar{C}_j = \frac{S_j}{h_j}$$

$$\text{线储量} = \sum_{j=1}^m \bar{C}_j h_j = \sum_{j=1}^m S_j \quad (11)$$

式中,  $S_j$  为以目标元素含量为参量的测井曲线上在  $j$  矿层的面积;  $h_j$  为矿层的厚度,  $h$  值的大小由矿层的边界品位确定。 $m$  为钻孔中矿层的层数。

#### 3.4.2 基本参数解释法

根据基本参数值为参数的测井曲线上基本参数的解释值求矿层的平均品位和线储量。

在点测测井中,第  $j$  矿层的平均品位  $\bar{C}_j$  及矿层的线储量为:

$$\bar{C}_j = f(\bar{P}_{ij})$$

表1 ZK2895 孔 X 射线荧光测井与化学分析确定的矿层资料对比

| 矿层参数        | 岩芯化学分析    | X 荧光测井    | 对比误差(%) |
|-------------|-----------|-----------|---------|
| 矿层位置(m)     | 42.3~43.5 | 42.2~43.5 | -0.2    |
| 矿层厚度(m)     | 1.2       | 1.3       | 8.3     |
| 平均品位(SrO%)  | 18.437    | 17.916    | -2.8    |
| 线储量(SrO%·m) | 22.124    | 23.291    | 5.3     |

## 5 结论

新研制的 X 射线荧光测井仪及其相应软件,经过各项指标测试与检验以及野外测井

$$\text{线储量} = \sum_{j=1}^m \bar{C}_j h_j = \sum_{j=1}^m f(\bar{P}_{ij}) \quad (12)$$

式中,  $\bar{P}_{ij}$  为第  $j$  矿层第  $i$  测点的基本参数;  $h_j$  为矿层厚度;  $m$  为某钻孔矿层的层数。

对连续 X 射线荧光测井,一般采用基本参数解释法。若探管提升速度为  $V$ ,则在  $t_1 - t_2$  时间内,第  $i$  参数的解释值  $P_{ij}^{t_1-t_2}$  为:

$$P_{ij}^{t_1-t_2} = \frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_1}^{t_2} P_i(t) dt \quad (13)$$

式中  $P_i(t)$  为在  $t$  时刻第  $i$  基本参数值。

于是,第  $j$  矿层的加权平均品位  $\bar{C}_j$  和线储量表示为:

$$\bar{C}_j = f(P_{ij}^{t_1-t_2})$$

$$\text{线储量} = \sum_{j=1}^m \bar{C}_j v(t_2 - t_1) \quad (14)$$

式中  $m$  为矿层层数。

在实际测井工作中,总存在矿化不均匀问题,矿物颗粒大小的变化,一般不以每点的矿石品位来表示,而以线储量来表示。

## 4 锆矿野外测井试验

四川省兴隆锆矿区 Sr 和 Ba 均有富集,但 Ba 未达矿层品位。为了检验新型 X 射线荧光测井仪及研究的软件,在四川省兴隆锆矿区,进行了一次下井同时测量 Sr、Ba 两个元素含量的测井试验。(图1、表1)。图1及表1所列结果均表明 X 射线荧光测井结果与化学分析结果基本一致,说明 X 射线荧光测井的结果是准确和可靠的。

初步试验,可得下述结论:

(1)新型 X 射线荧光测井仪工作性能可靠,特别是其短臂贴井壁装置的设计和研制具创新性。实际贴井壁效果良好,为克服并

液影响起到了关键性的作用。

(2)利用新型 X 射线荧光测井仪及相应资料处理方法,可以在泥浆孔中,一次下井同时测量铈、钡两个元素。并且 X 射线荧光测井和化学分析两种方法所得结果基本一

致,可以满足实际生产的要求。

(3)X 射线荧光测井可在现场快速确定矿层位置、矿层厚度、平均品位及线储量,因而可以大大提高工作效率,缩短勘探周期,节省资金。

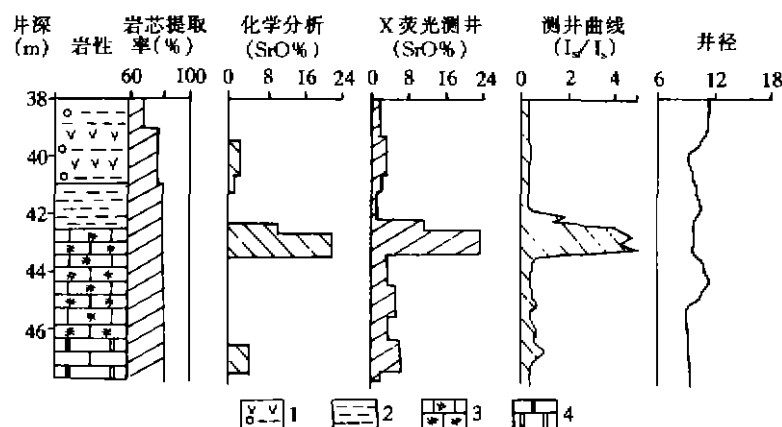


图1 ZK2895 孔 X 射线荧光测井解释成果曲线图

1—岩溶角砾岩;2—泥岩;3—菱铈矿化白云岩;4—白云岩

(4)X 射线荧光测井可连续获得结果,而化学分析由于需要取岩芯未取样部位或岩芯提取率太低,无法显示结果,这就发挥了 X 荧光测井的优势。

(5)X 射线荧光测井及资料处理方法可应用于铈矿和其它矿种的测井,同时能测量两个或两个以上的元素。

#### 参 考 文 献

- 1 章晔,谢庭周,梁致英,等.放射性同位素 X 射线荧光测井仪.核仪器与方法,1981(1):1~9

- 2 章晔,谢庭周,曹利匡,等.X 射线荧光探矿技术.北京:地质出版社,1984
- 3 Seldiakov P Y. Bore - Hole Apparatus for X - ray fluorescence analysis. Nuclear techniques in the exploration and exploitation of energy and mineral resources. IAEA, VIENNA, 1991 45
- 4 Lubecki A, Doekele R and Herrman. Direct uranium logging using X - ray fluorescence technique. Symposium on "Uranium exploration method". Review of the NEA / IAEA R&D Programme PARIS, 1992, 1st - 4th, June, 821 ~ 835

## NEW - TYPE X - RAYS FLUORESCENCE LOGGER AND ITS APPLICATION

Hou Shengli, Ge Liangquan, Chen Yexun, Zhang Ye, Wang Zhuwen

The characteristics of the new-type X-rays fluorescence logger and the technique to overcome the unevenness effect, the influence of the hole liquid and the matrix effect were studied. The method to calculate ore grade and linear reserves was presented. Its application to fields was a success.

**Key words** X-rays fluorescence, logger, matrix effect, ore grade, linear reserves