

文章编号:1673-5005(2008)02-0053-05

利用测井资料确定粘土矿物的方法对比

邢培俊^{1,2}, 孙建孟³, 王克文³, 李召成³, 吴金龙³

(1. 中科院 地质与地球物理所, 北京 100029; 2. 中石油 青海油田分公司, 甘肃 敦煌 736202;

3. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061)

摘要:为了准确计算粘土矿物的含量,在缺少自然伽马能谱资料的情况下,利用自然伽马、中子、密度、声波组合参数,通过多元回归建立了计算粘土矿物的三孔隙度模型,同时利用三孔隙度模型、阳离子交换能力与含氢指数比值(CEC/I_H)和自然伽马能谱资料 3 种计算粘土矿物含量的方法对 A 油田 3 口井的资料进行了处理,并对处理结果作了对比分析。结果表明,在缺少自然伽马能谱资料的情况下,可以利用自然伽马、中子、密度、声波测井资料,通过多元回归计算粘土矿物含量;与岩心资料相比, CEC/I_H 处理结果较差,三孔隙度模型的计算精度略高于自然伽马能谱资料的分析结果;相对于 CEC/I_H 交会分析和自然伽马能谱分析,三孔隙度方法简单、可靠,且适用范围较广。

关键词:粘土矿物; 自然伽马能谱; 中子密度交会; 阳离子交换能力; 含氢指数

中图分类号: TE 122. 2

文献标识码: A

Comparison of determination methods for clay minerals using log data

XING Pei-jun^{1,2}, SUN Jian-meng³, WANG Ke-wen³, LI Zhao-cheng³, WU Jin-long³

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang 736202, Gansu Province, China;

3. Faculty of Geo-Resource and Information in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China)

Abstract: In order to accurately calculate the clay minerals contents, a three-porosity calculation model of clay minerals contents without gamma spectrum data was presented based on the multiple regression of natural gamma, neutron, density, acoustic well log data. Well log data from three wells in A Oilfield were processed by the three-porosity model and other two traditional methods proposed respectively based on ratio of cation exchange capability and hydrogen index (CEC/I_H) and gamma spectrum data, and the results were compared. The results indicate that under the condition of lacking gamma spectrum data, the clay minerals contents can be calculated based on the multiple regression of the natural gamma, neutron, density, acoustic well log data. Compared with the core analysis results, the error based on CEC/I_H is the greatest, and the reliability based on three-porosity model is a little higher than that of the method based on gamma spectrum. The three-porosity method is easy to apply and its applicability is wider than that of the CEC/I_H and natural gamma spectrum analysis.

Key words: clay minerals; natural gamma spectrum; neutron density crossplot; cation exchange capability; hydrogen index

我国油田大部分井都没有自然伽马能谱资料,在这种情况下探索计算粘土矿物含量的方法对储层评价研究具有十分重要的意义。典型泥质碎屑储集岩和(或)页岩地层常含有数量不等、分布方式不同的各种粘土矿物,只有极少数含油和(或)含气砂岩储层基

本上不含粘土矿物^[1-3]。最常见的粘土矿物蒙脱石、伊利石、高岭石和绿泥石在化学成分、骨架密度、光电吸收截面、含氢指数、阳离子交换能力(CEC)、钾、铀和钍含量等基本特性上都显示出很大的差别,利用其测井特征差异可定量评价主要的粘土矿物。目前,用

收稿日期:2007-12-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40574030)

作者简介:邢培俊(1958-),男(汉族),山东安丘人,博士研究生,主要从事地质研究与管理工。

测井资料确定粘土矿物的主要方法是:(1)利用自然伽马能谱资料,通过多元回归的方法将铀、钍、钾含量与预测的粘土类型联系起来^[4,7]或直接应用钾-钍交会图进行分析;(2)利用干粘土的阳离子交换能力CEC与含氢指数 I_H 交会或用其比值来区分粘土矿物^[8-10]。但是我国老油田的许多井根本没有自然伽马能谱测井资料,在这种情况下计算粘土矿物含量十分困难。笔者探讨一种利用自然伽马、三孔隙度曲线建立粘土矿物计算模型的方法,利用实际资料与其他方法进行对比,以了解此方法的可行性。

1 自然伽马、中子、密度、声波组合参数回归法

以胜利A油田为例,收集了3口井的岩心和粘土分析资料,在此基础上通过深入研究蒙脱石、伊利石、绿泥石/高岭石的基本特性(见表1),发现4类粘土矿物在中子、密度、自然伽马特性上具有较大差别,而且声波时差也在一定程度上受到粘土矿物的影响。因此,结合中子、密度、自然伽马、声波进行多

元非线性统计回归,建立了4种矿物的计算模型(简称三孔隙度法)。其步骤如下:

(1)首先用粘土矿物总量或某种主要类型的粘土矿物含量与自然伽马测井相对值曲线进行深度移动对比来实现深度归位。

(2)对原始数据进行归一化处理,可得到泥质含量(V_{sh})、中子孔隙度(φ_N)、密度孔隙度(φ_D)、声波孔隙度(φ_S)4个变量,并引入变量 φ_N/φ_D 、 φ_S/φ_D 、 φ_S/φ_N 。将中子、密度、声波测井值转化为中子孔隙度、密度孔隙度以及声波孔隙度,可将上述3类数据无量纲化,从而减小回归分析中因数据属性不同而产生的差异。中子、密度、声波测井值转化为相应孔隙度的方法分别为

$$\varphi_N = \frac{\Phi_N - \Phi_{Nma}}{\Phi_{Nf} - \Phi_{Nma}}, \varphi_S = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}}, \varphi_D = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (1)$$

式中, Φ_N, Φ_{Nma} 分别为流体、骨架中子归一化处理的孔隙度,%; $\Delta t, \Delta t_f, \Delta t_{ma}$ 分别为岩石、流体、骨架声波时差, $\mu s/m$; $\rho_{ma}, \rho_b, \rho_f$ 分别为骨架、岩石、流体密度, g/cm^3 。

表1 常见粘土矿物的基本特性(括号内为平均值)

名称	GR/ API	铀含量 $w(U)/10^{-6}$	钍含量 $w(Th)/10^{-6}$	钾含量 $w(K)/\%$	$w(Th)/$ $w(K)$	密度 $\rho/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	光电吸收截面 $P_e/(b \cdot 电子^{-1})$	声波时差 $\Delta t/$ ($\mu s \cdot m^{-1}$)	$I_H/$ %	CEC/[mmol · (100 g) ⁻¹]
蒙脱石	150~200	4.3~7.7	0.8~2	0~1.5 (0.22)	3.7~8.7	2~2.5 (2.29)	2.04	364.96	12	80~150 (114)
伊利石	250~300	8.7~12.4	10~25	3.51~8.3 (5.2)	1.7~3.5	2.7~2.9	3.45	172.41	12	10~40 (25)
高岭石	90~130	4.4~7	6~19	0~0.5 (0.33)	11~30	2.4~2.7 (2.60)	1.83	217.39	36	3~25 (9)
绿泥石	180~250	17.4~36	0~8	0~0.3 (0.2)	11~30	2.76	6.30	179.86	36	10~40 (25)

(3)对岩心分析数据及上述7个变量进行单相关性分析,构成相关系数矩阵,如表2。对每次引入的变量进行一次F检验,对相关系数矩阵进行一次

初等变换以及偏回归平方和计算,以决定变量的取舍,这样重复进行,直到对所有变量均检验一遍为止。

表2 粘土矿物与测井参数的单相关性分析结果

粘土矿物	V_{sh}	φ_D	φ_N	φ_S	φ_N/φ_D	φ_S/φ_D	φ_S/φ_N
蒙脱石	0.522 773	0.883 016	0.707 637	0.846 462	-0.583 58	-0.091 79	0.700 85
伊利石	-0.032 47	0.078 848	-0.204 73	0.053 697	-0.259 21	-0.113 54	0.331 928
高岭石	-0.508 76	-0.733 73	-0.525 62	-0.727	0.715 046	-0.128 81	-0.733 97
绿泥石	-0.272 06	-0.596 84	-0.365 54	-0.502 46	0.283 827	0.499 559	-0.461 62

(4)根据单相关性分析结果,采用与粘土矿物相关性最大的若干变量进行多元回归,建立各类粘土矿物的计算模型。蒙脱石含量 V_M 、伊利石含量 V_I 、高岭石含量 V_K 、绿泥石含量 V_C 的计算公式如下:

$$V_M = 59.791 81 + 0.594 432 \varphi_D - 1.859 36 \varphi_N + 3.605 829 \varphi_S - 58.961 1 \varphi_S/\varphi_N, r = 0.9; \quad (2)$$

$$V_I = 8.380 174 - 0.360 19 \varphi_N + 0.859 819 \varphi_N/\varphi_D + 25.222 4 \varphi_S/\varphi_N, r = 0.8; \quad (3)$$

$$V_K = 47.594 - 0.459 82 V_{sh} + 0.759 43 \varphi_D + 3.227 896 \varphi_N - 7.353 74 \varphi_S + 8.228 841 \varphi_N/\varphi_D + 129.086 1 \varphi_S/\varphi_N, r = 0.866; \quad (4)$$

$$V_C = 11.666 15 + 0.426 382 \varphi_D - 1.215 33 \varphi_S + 45.009 4 \varphi_S/\varphi_D - 26.368 3 \varphi_S/\varphi_N, r = 0.84. \quad (5)$$

式(2)~(5)中的样本数 $N=87$ 。

从回归分析结果可以看出,单因素分析的相关系数低于多因素分析的相关系数,这是由于粘土含量与各单因素均有关系,且存在不同的相关关系。

2 阳离子交换能力与含氢指数交会法

2.1 粘土矿物含量计算模型

粘土矿物伊利石和绿泥石的 CEC 值相似,但绿泥石的含氢指数 I_H 是伊利石的 3 倍。另一方面,干粘土中高岭石的 CEC 值最低, I_H 值最高,而蒙脱石的 CEC 值最高, I_H 值最低。因此,用粘土的 CEC 值及干粘土含氢指数 I_H 交会的方法能够识别粘土类型(见图 1)。参考表 1,高岭石对应最大的含氢指数 I_H ,伊利石—蒙脱石连线对应最小的含氢指数 I_H ,蒙脱石点对应最大的 CEC 值。绿泥石的 CEC 值、 I_H 值与高岭石接近,因而可先将高岭石、绿泥石放在一起处理。按线性关系,假定粘土矿物含量之和为 100%,那么高岭石与绿泥石的总含量为

$$V_{K+C} = \frac{I_H - I_{H,\min}}{I_{H,\max} - I_{H,\min}} \quad (6)$$

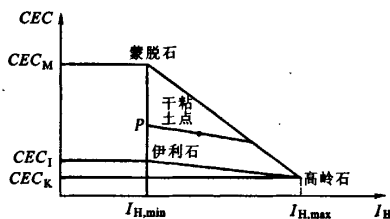


图 1 识别粘土类型的 $CEC-I_H$ 交会图

根据交会图的解释原理,蒙脱石含量线是一组平行于 $I-K$ 连线的平行线,那么根据几何知识可求出 P 点的 CEC_P 值,其表达式为

$$CEC_P = CEC + (I_H - I_{H,\min}) \frac{CEC_I - CEC_K}{I_{H,\max} - I_{H,\min}} \quad (7)$$

蒙脱石含量为

$$V_M = \frac{CEC_P - CEC_I}{CEC_M - CEC_I}$$

伊利石含量为

$$V_I = 1 - V_M - V_{K+C}$$

由于高岭石和绿泥石的密度差异较为明显,因此可用密度来区分高岭石、绿泥石含量。根据测井体积模型,可估算粘土矿物的平均密度为

$$\rho_{ave} = \frac{\rho_b - \rho_{ma}(1 - \varphi - V_{sh}) - \varphi \rho_f}{V_{sh}}$$

式中, φ 为总孔隙度,可由三孔隙度曲线得到。

应用前一步估算出的 V_I , V_M 和 V_{K+C} , 根据经验

公式^[11], 可先估算绿泥石的含量为

$$V_C = \frac{\rho_{ave} + 0.32V_M + 0.1V_I - 2.61}{0.16}$$

然后从 V_{K+C} 中扣除 V_C 得到 $V_K = V_{K+C} - V_C$ 。

2.2 阳离子交换能力与含氢指数的计算

(1) 阳离子交换能力 CEC 。Hill (1979) 试验证明,当地层水含盐量稳定时, CEC 与粘土水化水质量和含盐量之间的关系为

$$CEC = \frac{100B_{wt}}{(0.0848P_i^{-0.5} + 0.22)\rho_{cl}(1 - \varphi)} \quad (8)$$

其中

$$B_{wt} = \frac{\rho_{maci} - \rho_{cl}}{\rho_{maci} - 1}$$

式中, P_i 为地层水矿化度,通过地层水分析资料获取,也可以由自然电位测井资料计算得到^[12], mmol/cm³; ρ_{cl} 为纯粘土点密度值, g/cm³; ρ_{maci} 为干粘土密度,取固定值 2.91 g/cm³; B_{wt} 为粘土点的束缚水含量。

(2) 粘土含氢指数 I_H 。

$$I_H = N_{cl} - B_{wt} \quad (9)$$

式中, N_{cl} 为纯粘土中子值,由试验分析值得到,或取经验值 28。

(3) 粘土点 (ρ_{cl} , N_{cl}) 的确定。斯伦贝谢利用中子、密度及自然伽马能谱来计算粘土点参数,但是过程非常繁琐,这里提出一种利用粘土含量反求粘土点的方法。假设粘土点为 (φ_{Ncl} , φ_{Dcl}), 根据中子密度交会图可以得到任一深度点的有效孔隙度及粘土含量,其表达式为

$$\varphi_{ND} = \frac{|\varphi_{Dcl}\varphi_N - \varphi_{Ncl}\varphi_D|}{|\varphi_{Dcl} - \varphi_{Ncl}|} \quad (10)$$

$$V_{cl} = \frac{|\varphi_N - \varphi_D|}{|\varphi_{Ncl} - \varphi_{Dcl}|} \quad (11)$$

式中, φ_{ND} 为任一深度点的有效孔隙度; φ_{Ncl} , φ_{Dcl} 分别为粘土点的中子、密度孔隙度; V_{cl} 为任一深度点粘土含量。

根据式(10)和(11),可以反求 φ_{Ncl} , φ_{Dcl} ; 根据体积物理模型得到粘土点的密度值 ρ_{cl} 和中子值 N_{cl} , 然后计算每个深度点上的 CEC 和 I_H 值,便可确定出所存在粘土矿物的类型。

3 自然伽马能谱资料回归法

粘土矿物类型不同,其放射性元素铀、钍、钾的含量也不同。图 2 为斯伦贝谢粘土矿物分析图版。根据图 2 中粘土矿物的自然伽马能谱等放射性测井

响应的差异,可以确定出粘土矿物的类型和含量。

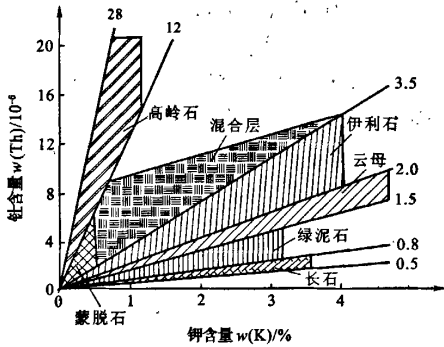


图2 斯伦贝谢粘土矿物分析图板

首先将粘土矿物分析资料采用粘土总量与自然伽马测井相对值曲线进行深度移动对比的方法实现深度归位,然后结合自然伽马能谱资料进行逐步线性回归,本文中对某区的具体回归结果为

$$V_M = 60.47w(K) - 11.076w(Th) + 19.78w(Th)/w(K) - 60.7879, r = 0.84;$$

$$V_I = 36.1141w(K) + 7.71w(Th) - 6.3482w(Th)/w(K) + 42.89961, r = 0.71;$$

$$V_K = 25.901w(K) + 4.729868w(Th) -$$

$$10.558w(Th)/w(K) + 80.06443, r = 0.84;$$
$$V_C = 1.542842w(K) - 1.36421w(Th) -$$
$$2.87375w(Th)/w(K) + 37.82381, r = 0.73.$$

4 方法对比分析

应用上述3种方法对A油田3口井的资料进行了实际处理,计算中只考虑伊利石、蒙脱石、高岭石、绿泥石4类矿物,伊-蒙混层、绿-蒙混层按照相应的混层比转化为各类粘土矿物。处理结果表明,利用三孔隙度方法得到的粘土矿物模型与岩心分析资料具有更好的相关性。

图3为利用3种方法计算的粘土矿物对比成果图。其中第五道为模型计算值与岩心分析值对比,可以看出,利用自然伽马能谱法与利用三孔隙度法计算得到的各类粘土矿物含量与岩心分析结果吻合都比较好,三孔隙度法的平均相对误差为13.7%,自然伽马能谱法的平均相对误差为15.1%。因此,这两种方法都可以简单有效地确定粘土矿物的含量,但是三孔隙度方法在缺少自然伽马能谱资料的情况下仍然可以使用。

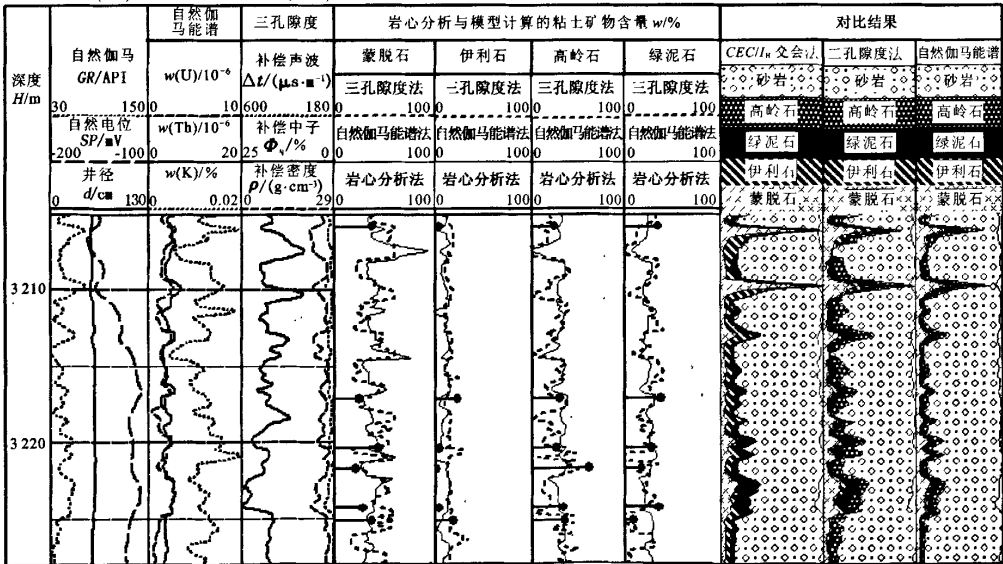


图3 3种粘土矿物计算方法对比成果图

此外,从图中还可以看出,利用CEC与 I_h 交会方法处理结果比较差,而且由于在处理时将高岭石与绿泥石看作一个点来处理,所以只能求出两种矿物含量之和,无法确定各自的相对含量。最近有人引入光电吸收截面 P_e 来确定两者的相对含量是一种较好的方法。

总之,通过对比分析可以看出,利用自然伽马能谱资料进行多元回归的方法相对简单、可靠,但没有自然伽马能谱测井资料时将无法使用。利用CEC- I_h 交会法来确定粘土类型,虽然在理论上较为可行,但是由于高岭石和绿泥石的响应特性相似,无法把两者区分开,而且实际处理时粘土点(ρ_d, N_d)的

计算十分困难。利用伽马、中子、密度、声波组合参数进行多元回归的方法,不仅脱离了对自然伽马能谱的依赖,而且具有较好的应用效果,它弥补了无能谱测井资料的缺陷。

5 结 论

(1)在缺少自然伽马能谱资料的情况下,可利用伽马、中子、密度、声波测井资料通过多元回归计算粘土矿物含量。

(2)应用三孔隙度方法计算粘土矿物含量的精度高于自然伽马能谱分析的结果;利用 $CEC-I_H$ 交会分析的结果精度最低。

(3)相对于 $CEC-I_H$ 交会分析和自然伽马能谱分析,三孔隙度方法简单、可靠,且适用范围较广。

参考文献:

- [1] 钱峥,李淳,李跃,等. 济阳拗陷深层砂岩储层成岩作用及其阶段划分[J]. 石油大学学报:自然科学版, 1996,20(2):6-11.
QIAN Zheng, LI Chun, LI Yue, et al. Diagenesis of deep sandstone reservoir and the stage diving in Jiyang depression [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1996,20(2):6-11.
- [2] 孙建孟,陈钢花,杨玉征,等. 低阻油气层评价方法[J]. 石油学报,1998,19(3):83-88.
SUN Jian-meng, CHEN Gang-hua, YANG Yu-zheng, et al. Evaluation of low-resistivity[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998,19(3):83-88.
- [3] 曾文冲. 油气层储集层测井评价技术[M]. 北京:石油工业出版社,1991.
- [4] 孙建孟,李召成. 用测井确定储层敏感性[J]. 石油学报,1999,20(4):35-38.
SUN Jian-meng, LI Zhao-cheng. Evaluation of reservoir sensitivity using logging data[J]. Acta Petrolet Sinica, 1999,20(4):35-38.
- [5] 孙建孟,李召成. 应用自然伽马能谱测井确定粘土矿物类型和含量[J]. 石油大学学报:自然科学版,1999, 23(4):29-32.
SUN Jian-meng, LI Zhao-cheng. Clay types and contents from gamma spectrum data[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1999, 23(4):29-32.
- [6] 张振城,孙建孟. 利用测井资料预测大港油田储集层敏感性[J]. 石油勘探与开发,2004,31(5):66-70.
ZHANG Zhen-cheng, SUN Jian-meng. Predict the reservoirs sensitivity of Dagang Oilfield using logging data[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5):66-70.
- [7] 石强. 利用自然伽马能谱测井定量计算粘土矿物成分方法初探[J]. 测井技术,1998,22(5):349-352.
SHI Qiang. Preliminary investigation on quantitative analysis of the composition of clay minerals using NGS log [J]. Well Logging Technology, 1998,22(5):349-352.
- [8] WALTER H Fertl, GEPRGE V Chilingarian. Type and distribution models of clay minerals from well logging data [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1990,3(4):321-332.
- [9] 李琴英,朱学清,罗熙. 粘土含量和粘土矿物成分识别在焉耆盆地的应用[J]. 国外测井技术,2003,18(1):52-56.
LI Qin-ying, ZHU Xue-qing, LUO Xi. Application of clay minerals types and contents in Yanzhe Basin [J]. World Well Logging Technology, 2002,18(1):52-56.
- [10] 熊同旭,秦欣,李金柱,等. 泥质砂岩地层的粘土性质分析[J]. 测井技术,2003,27(增刊):25-28.
XIONG Tong-xu, QIN Xin, LI Jin-zhu, et al. Components and physicochemical properties of clay in shaly sand formation [J]. Well Logging Technology, 2003, 27(sup):25-28.
- [11] FERTL W H, CHILINGARIAN G V. Type and distribution modes of clay minerals from well logging data [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 1989, 3(4):321-332.
- [12] 雍世和,张超谟. 测井数据处理与综合解释[M]. 东营:石油大学出版社,1996.

(编辑 刘艳荣)