

# 砂岩储层中粘土矿物二次参数定量 评价方法及其地质意义

师育新 雷怀彦

(中国科学院兰州地质研究所, 兰州 730000)

**摘要** 随着油气田的二次、三次开采,人们愈来愈认识到了砂岩储层中粘土矿物的重要作用。如,高岭石的速流性、蒙脱石的水敏性、伊利石的丝缕化障积性、绿泥石的酸敏性等,具有这些特性的粘土矿物以不同的方式堵塞和填积在储层孔隙喉道中,影响油气开采的效益和开采所选的工艺。基于上述粘土矿物的特性,它们在储层中矿物组成和含量的不同将会影响储层物性的孔隙形态和渗透力的大小,也会影响油气资源评价的准确性。因此,本文提出用粘土矿物的组成、含量、砂岩孔隙度和渗透率的数学模型来定量评价储层物性,称之为储层粘土矿物二次参数评价方法。

**关键词** 砂岩储层 粘土矿物二次参数 数学模型 定量评价

**第一作者简介** 师育新 女 32岁 助理研究员 沉积岩石学及矿物学

## 1 问题的提出

目前,在我国科研单位和油田产业部门对砂岩中粘土矿物的研究,一般采用扫描电镜、X-射线衍射或者显微镜等方法对粘土矿物的组合和含量进行定性分析,进而用X-射线衍射定量求取粘土矿物的相对含量和绝对含量,再进一步进行储层评价和确定开采工艺(赵杏瑗,1988)。但在油气田实际开采中却出现了许多新问题,如胜利油田的义3-7-7井伊利石含量高孤东12-8井的3倍,而孤东12-8井的蒙脱石含量高义3-7-7井3倍(表1),实际测算的结果孤南油田的义3-7-7井是低渗透性储层,堵塞严重、注水困难,按上述常规分析认为伊利石是主要影响因素,而忽略了含量仅有0.7%的蒙皂石的重要作用。事实上比义3-7-7井蒙皂石含量高3倍的孤东12-8井却没有造成堵塞,反而大量出砂(王秉海,1993)。这一现象说明仅用粘土矿物平均含量和相对含量不能解决这一复杂地质问题。众所周知,不同类型砂岩储层中的颗粒、孔隙和粒间杂基(包括胶结物)的组构特性差异较大,仅了解粘土矿物的种类和含量是不够的。还必须考虑粘土矿物所处储层的孔隙形态和渗透率(雷怀彦,1995),只有这样才能符合事物发展变化规律,才能认识事物发展变化的全部。如上述所说的生产实践已证实含量仅有0.7%的蒙皂石是造成堵塞的最主要的因素,显而易见,在评价储层粘土矿物的影响时不仅要考虑粘土矿物种类、含量“度”的界限,还要考虑储层的孔隙和渗透率才更具有现实意义。

表 1 渤海湾盆地粘土矿物含量及储层物性特征

Table 1 Clay mineral content and reservoir characteristics in Bohai bay Basin

| 井号      | 井段        | M(%) | I(%) | K(%) | Ch(%) | Por(%) | Prb( $\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ) |
|---------|-----------|------|------|------|-------|--------|--------------------------------------|
| Du-204  | 1801-1841 | 0.75 | 5.6  | 1.0  | 0.15  | 18.0   | 69                                   |
| Du-205  | 1915-1955 | 0.9  | 5.0  | 1.2  | 0.20  | 20     | 78                                   |
| La-163  | 1462-1502 | 3.0  | 1.8  | 1.5  | 0.35  | 36.2   | 4170                                 |
| 义 3-7-7 | 3188-3166 | 0.7  | 5.6  | 1.0  | 0.2   | 17.3   | 60.1                                 |
| 孤东 12-8 | 1214-1261 | 2.7  | 1.4  | 1.5  | 0.5   | 35.8   | 4159.0                               |

注: M. 蒙脱石 I. 伊利石 K. 高岭石 Ch. 绿泥石 Por. 孔隙度 Prb. 渗透率

## 2 二次参数的引入

我们把储层砂岩直接测定的各项值,如粘土矿物的含量、储层孔隙度、渗透率等称之为“储层粘土矿物一次参数”,上述提及到除了考虑储层粘土矿物一次参数外,还要考虑粘土矿物含量“度”的界限和储层孔隙度、渗透度,并将上面几个因素综合成不同数学模型,然后进行运算,运算得到的新数据称之为“储层二次参数”。以下介绍几个主要的二次参数:

### 2.1 膨胀指数(E)

众所周知,蒙脱石遇到淡水会发生膨胀,对储层孔隙和喉道有较大的堵塞作用。储层中蒙皂石含量越多,膨胀越厉害,相应储层孔隙度和渗透率越低,因此定义膨胀指数(Expansion factor)如下:

$$E = A_1 \times \log(Mc / \sqrt{\text{Por} \cdot \text{Prb}} + A_2) \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

式中  $A_1$ 、 $A_2$ ——常系数

Mc——蒙皂石绝对含量

Por——孔隙度

Prb——渗透率

成岩作用研究和实验分析统计结果表明,砂岩孔隙度在 1%—45% 之间,渗透率在 0.1—2000  $\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,所以  $\text{Por} \times \text{Prb}$  值在 0.001—9000 之间,大小相差  $9 \times 10^6$  倍;粘土矿物 X 射线衍射分析表明,粘土矿物的含量最小为 1%,其最大为 30%,粘土中蒙皂石的相对含量在 1%—100% 之间,因此蒙皂石的绝对含量(Mc)一般在 0.0001—0.30 之间,其最大和最小相差在 3000 倍以内,实际上  $\sqrt{\text{Por} \times \text{Prb}}$  的最小和最大值的差值也是在 3000 倍范围内。

$A_1$ 、 $A_2$  常系数是在常用对数 1—10 之间取值,确定的原则为在研究区选择具各类有代表性的砂岩,使其膨胀性最大的(Mc 最大, Por、Prb 最小)膨胀指数 E 接近于 10,而使其膨胀性最小的(Mc 最小, Por、Prb 最大)膨胀指数接近于 0,另外计算求得的 E 值应该和实验测得的 E 值接近,或者说更符合地质实际情况,  $A_1$ 、 $A_2$  是一个经验性的数值,不同的研究区应有适合本区的常系数。

### 2.2 高岭石迁移指数(M)

在疏松的砂岩孔隙或喉道中,高岭石常随高速流动的流体迁移,甚至在流动过程中产生新的高岭石,对储层的孔隙、喉道有一定的堵塞作用,称为高岭石迁移指数,用字母 M 表示,其

二次参数的数学模型为:

$$M = B_1 \times \log(K_c / \sqrt{Prb}) + B_2 \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

式中Kc——高岭石绝对含量

Prb——渗透率

B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>——常系数,取值方法同前

从式中可以看出迁移指数 M 与储层中高岭石绝对含量呈正相关,而与渗透率为负相关, B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub> 取值方法同 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>。

### 2.3 伊利石阻碍指数(R)

伊利石随着成岩环境的不同往往在储层孔隙喉道中以网状、片状、丝缕状晶体集合体分布,对油气在喉道中的运移造成极大的不利,把伊利石的这种阻碍作用用阻碍指数来表示:

$$R = C_1 \times \log(I_c \cdot Por / Prb) + C_2 \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

式中I<sub>c</sub>——伊利石绝对含量

Por、Prb 同前

C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>——常系数,取值方法同前

式中反映的地质意义为,伊利石的含量越多将会把孔喉分割的越细小,对油气运移就有一定的阻碍作用。

### 2.4 绿泥石酸敏指数(A)

为了二次、三次采油,需加一定的酸化剂来处理储层,使储层的砂岩溶解,孔喉增加,但加酸后绿泥石易沉淀在孔隙喉道中,对油气通过孔隙喉道很不利,故称之为绿泥石酸敏性,其数学定义式为:

$$A = D_1 \times \log(Chc / \sqrt{Prb}) + D_2 \dots\dots\dots \textcircled{4}$$

式中Chc——绿泥石绝对含量

Prb——渗透率

D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>——常系数,取值方法同前

### 2.5 松散指数(L)

松散指数是指储层在注水、酸化处理过程中溶解或崩坍出砂粒的特征指数。储层埋藏深度、胶结物成分及其含量,孔隙连通性,以及石油的性质都会影响溶出砂量,当然用不同的酸处理会得出不同的松散系数效果,其原因是用盐酸取代后,其灰质胶结物和碳酸盐矿物发生大量的溶解,将会增大储层的松散性;如果是用氢氟酸酸化处理,铝硅酸盐骨架类矿物发生大量溶解,同样会增大储层的松散系数,因此这里暂不考虑原油的性质,估且定义两个松散指数如下:

用盐酸酸化后的松散指数:

$$L_1 = E_1 \times \log(Por \cdot Prb \cdot Ca)h + E_2 \dots\dots\dots \textcircled{5}$$

用氢氟酸处理的松散指数:

$$L_2 = F_1 \times \log(Por \cdot Prb \cdot SI)h + F_2 \dots\dots\dots \textcircled{6}$$

式中: Por——孔隙度

Prb——渗透率

h——井深

E<sub>1</sub>、E<sub>2</sub>——常系数

Ca——灰质矿物含量

SI——硅酸盐矿物总含量

$F_1, F_2$ ——常系数

对以上 5 个指数,只需要每块样品有孔隙度、渗透率、粘土矿物含量分析数据,以及显微镜或扫描电镜分析的胶结物含量和组合方式,就可求得各项二次参数。

### 3 二次参数应用实例及其地质意义

对渤海盆地储层中的粘土矿物(见表 1)运用本文提出的粘土矿物二次参数进行评价,求得的二次参数见表 2。

表 2 渤海湾盆地砂岩储层粘土矿物二次参数

Table 2 Clay mineral secondary parameters of sandstone reservoir in Bohai bay Basin

| 井号      | 井段(m)     | E    | M    | R    | A    | $L_1$ | $L_2$ | P                   |
|---------|-----------|------|------|------|------|-------|-------|---------------------|
|         |           |      |      |      |      |       |       | $\frac{E+M+R+A}{4}$ |
| Du-204  | 1801-1841 | 6.92 | 7.53 | 5.05 | 5.21 | 1.42  | 1.75  | 6.18                |
| Du-205  | 1915-1955 | 7.12 | 7.65 | 5.10 | 5.10 | 1.38  | 1.80  | 6.24                |
| La-163  | 1462-1502 | 4.46 | 1.28 | 2.54 | 3.26 | 8.42  | 9.28  | 2.89                |
| Y3-7-7  | 3188-3166 | 6.81 | 7.30 | 4.92 | 5.08 | 6.31  | 1.80  | 6.03                |
| GD-12-8 | 1214-1261 | 4.32 | 1.20 | 2.41 | 3.11 | 8.20  | 9.14  | 2.76                |
| GD-14   | 1255-1379 | 5.0  | 2.6  | 3.2  | 4.1  | 6.9   | 7.8   | 3.7                 |
| G41-1   | 920-1321  | 1.9  | 8.2  | 7.7  | 8.1  | 0.1   | 3.3   | 9.0                 |
| Y13-21  | 1513-1529 | 7.8  | 4.0  | 2.5  | 3.8  | 4.0   | 6.7   | 4.5                 |

注: E. 膨胀指数 M. 迁移指数 R. 阻降指数 A. 酸敏指数  $L_1, L_2$ . 松散指数 P. 二次参数平均值

从表中可以看出所有的参数位于 0—10 之间。参数值在 5 左右的为中值,在 3 左右或低于 3 的为低值,在 7 左右或高于 7 的参数为高值。根据表中几个参数的组合特征可把渤海湾盆地储层划分为以下几个类型:

#### 3.1 高松散性储层

这些储层的特点是松散指数  $L_1$  和  $L_2$  都高于 7 以上,其它的几项指数都不高。它们以 GD-14 井、GD12-8 井、La-163 井为典型代表。第一松散指数都在 7 以上,说明不用酸化处理时,就会出大量砂。如果酸化处理,其第二松散指数就更高,大量出砂将成为新的问题,应值得注意。

#### 3.2 高膨胀、高松散性储层

这种类型储层中粘土矿物的膨胀指数很高,一般高于 6.5,甚至 7 以上,另外一个特征就是第一松散指数偏低,第二松散指数偏高,以 Y13-21 井为代表,其原因是由于储层孔渗指数高,同时又含较高的蒙皂石类矿物。对这类储层,若注淡水会造成堵塞,若酸化处理又会引起大量出砂。因此在开采中应在防砂措施的前提下进行酸化处理,否则会导致事倍功半的效果。

### 3.3 高P值储层

这里P值是指蒙皂石膨胀指数(E)、高岭石运移指数(M)、伊利石阻障指数(R)、绿泥石酸敏指数(A)四个指数之和的加权平均值。即  $P = \frac{E+M+R+A}{4}$ , 用它来反映储层的总体效应。如G41-1井和Du-204井的P值都在6以上,表示这类储层具有高膨胀、高阻障、高迁移、高酸敏、低松散特性,无疑是最差的储层。

### 3.4 中高P值储层

一般P值在5—6.5之间,而且诸参数中有2—3个指数都比较高。如Y3-7-7井的膨胀指数和阻障指数都很高,对具有这种特性的储层,应该采取相应的具体措施。

除了上述四种类型储层之外,还有一些储层的指数不包括在上述之列,但又具备油气开采的条件,这些储层的共同特点是没有特别高的指数,但P值却较高。这类储层应视具体存在的问题,进行具体分析。

另外,把表1与表2进行对比,可以明显的看出二次参数的地质意义,如蒙皂石在低渗透的Y3-7-7井储层中绝对含量为0.7%,评价该井储层粘土矿物时,很难引起人们重视,但引入二次参数后,该井储层的粘土矿物膨胀指数E为6.81(表2),属于高值范围,说明蒙皂石粘土矿物在该井储层中起着很重要的作用。而高渗透的GD-12-8井蒙皂石含量为2.7%(明显高于前者),但其膨胀指数E仅为4.32(表2),属于中值偏低范围,说明该井中蒙皂石粘土矿物对孔隙喉道的堵塞作用不太大。另外,在Y3-7-7井储层中伊利石的含量很高,但该井储层孔隙指数低,两个方面因素造成伊利石的阻障指数R相当高( $R=7.30$ ),说明伊利石对该井储层的影响作用最大,并造成该井为高阻储层特征。而GD12-8井储层中伊利石的含量为1.4%,这一含量并不算很低,但该井的孔渗指数较高,用二次参数求得的阻障指数R为2.41,属于低值范围,说明伊利石矿物对该井储层的影响可以不予考虑。

以上这些实例分析充分说明了引入粘土矿物二次参数评价储层要比一次参数和传统方法有着明显的优势,而且比较切合地质实际,是值得推广的一种新方法。

## 4 结 论

储层粘土矿物二次参数是快速、准确评价储层的一种好方法,与一次参数和其它方法相比较具有较切合地质事实、快速、准确的优势。但这个方法仅仅是初肯尝试,有待在实践中进一步提高和改进。另外,这个方法有一定局限性,它是建立在静态考虑储层中粘土矿物的含量和孔渗结构的基础上;但实际上,成岩作用过程和酸化处理过程中粘土矿物是随流体介质性质的改变而发生转化,粘土矿物转化的结果会导致在储层中形成新的粘土矿物组合和孔渗结构,从而要求在油气开采过程中对储层粘土矿物进行动态评价(Eslinger,1988)。所以说,在评价方法上也要考虑这些动态因素。

收稿日期:1995年6月15日

### 参 考 文 献

- (1)罗蛰潭、崔秉荃、黄思静、单钰铭,1991,粘土矿物对碎屑岩储层评价的控制理论探讨及应用实例,成都地质学院学报,18(3):1—12。
- (2)王秉海、沈娟华、颜捷先,1993,胜利油区开发与实践,石油大学出版社,172—305。

[3]赵杏琰、陈洪起,1988,粘土矿物与防止地层损害,石油勘探与开发,(4)。

[4]雷怀彦、师育新、房玄,1995,铝硅酸盐矿物成岩演化对形成过渡带气的影响,沉积学报,13(2):22—32。

[5]Eslinger E et al., 1988, Clay minerals for petroleum geologists and engineers. SEPM short course, No. 22.

## Quantitative Evaluation and Geological Significance of Secondary Parameters of Clay Minerals in Sandstone Reservoir

*Shi Yuxin and Lei Huaiyan*

(Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

### Abstract

It is realised that clay minerals in sandstone reservoir have important effect with the second, and the third exploitation of oil and gas fields. For instance, Kaolinite has the property of rapid flow, and montmorillonite of water-sensitive, illite of resistance, but chlorite has the property of acid-sensitive. They fill in the throats of pore through different ways and affect the beneficial result and the technology of oil and gas exploitation. These properties and the differences in composition and content of the clay minerals will influence the pores shape and percolating force, as well as the accurate appreciation of oil and gas resources. Therefore, a mathematical model that was built by using the composition, content, porosity and permeability of the clay minerals is adopted within this paper to evaluate the sandstone reservoir quantitatively. This method is called the evaluation of the secondary parameters of the clay minerals.

**Key words:** Sandstone reservoir Secondary Parameters of clay minerals Mathematical model Quantitative evaluation