

储层物性参数与其微观孔隙结构的内在联系

马旭鹏

(中国石油化工股份有限公司华东石油局测井站, 江苏扬州 225007)

摘要:储层的微观孔隙结构指的是储集岩中孔隙和喉道的几何形状、大小、分布及其相互连通关系。准确掌握储层的孔隙结构信息,对于正确评价储层的储集性能和开采价值,搞清楚孔隙结构的差异对储层宏观地球物理特性的影响作用,进而更有效地从各种地球物理资料中去伪存真、去粗取精的提取含油饱和度等地球物理参数以提高油气解释精度,都具有十分重要的意义。从 Kozeny-Carmon 方程入手,通过进一步理论推导并借助函数单调性的分析方法深入剖析了储层宏观物性参数与其微观孔隙结构的内在联系。通过对大量岩石物理数据的归一化相关对比分析,进一步验证了理论分析所得结论,即储层品质指数是定量表征储层微观孔隙结构的最佳宏观物性参数。该结论为探索利用宏观地球物理测井资料连续定量表征储层微观孔隙结构的应用奠定了基础。

关键词:经典渗透率方程;孔隙结构;归一化相关对比分析;储层品质指数;流动层带指数;渗孔比

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

储层的微观孔隙结构指的是储集岩中孔隙和喉道的几何形状、大小、分布及其相互连通关系^[1]。实验室研究岩石孔隙结构的方法归纳起来可分为两大类:一类为直接观测法,包括岩心观测、铸体薄片法、图象分析法和扫描电镜法等;另一类为间接测定法,主要是压汞毛管压力法^[1]等。其中,压汞毛管压力法提供的喉径均值、分选系数、均质系数、歪度、排驱压力、中值压力、最大孔喉半径和中值孔喉半径等众多压汞参数常被用来定量表征岩心样品所在深度的储层微观孔隙结构特征。

储层的宏观物性参数主要指孔隙度、渗透率及它们的若干种组合,如储层品质指数(R_{QI})、地层流动带指数(F_{ZI})及渗孔比等。孔隙度反映储集空间的大小;渗透率反映储层渗流能力的强弱;渗孔比、地层流动带指数及储层品质指数是渗透率与孔隙度的组合参数,与储层孔隙结构相关,可用于划分岩石物理相^[2]。Chopra 等曾尝试利用渗孔比划分储层的岩石物理相^[3,4],而 Amaefule 等则利用地层流动带指数来区分具有不同岩石物理相特征的地层流动单元^[5]。本文从理论和实际资料两个方面来分析储层物性参数与微观孔隙结构间的关系。

1 Kozeny-Carmon 方程的理论分析

Kozeny-Carmon 方法在孔隙空间为毛管束的假设条件下,给出了渗透率的经典表达式^[2]:

$$K = \frac{\varphi_e^3}{(1 - \varphi_e)^2} \cdot \frac{1}{F_s \tau^2 S_{gv}^2} \quad (1)$$

式中: K 为渗透率,单位为 μm^2 ; φ_e 为有效孔隙

度,%; F_s 为形状因子,无量纲; τ 表示弯曲度,无量纲; S_{gv} 为单位骨架体积的孔隙表面积,单位为 μm^{-1} ; $F_s \tau^2$ 称为 Kozeny 常数。储层品质指数定义式为

$$R_{QI} = \sqrt{K/\varphi_e} \quad (2)$$

地层流动带指数定义式为

$$F_{ZI} = \frac{1}{\sqrt{F_s \tau S_{gv}}} \quad (3)$$

孔隙体积与骨架体积之比记为 φ_z , 即

$$\varphi_z = \varphi_e / (1 - \varphi_e) \quad (4)$$

式(1)、式(2)、式(3)和式(4)联立,得

$$R_{QI} = F_{ZI} \cdot \varphi_z \quad (5)$$

为便于分析和理解,我们假设:岩石样品的体积为单位 1,其毛管束由 n 个半径为 r 、长度为 L 的毛管组成,所占体积为 φ_e ,骨架体积为 $1 - \varphi_e$ 。在此假设基础上,对式(3)、式(4)和式(5)作进一步的理论推导和分析。

由假设及 S_{gv} 的定义可得:

$$S_{gv} = \frac{2n\pi rL}{1 - n\pi r^2 L} = \frac{2n\pi L}{\frac{1}{r} - n\pi L r} = \frac{2n\pi L}{f(r)} \quad (6)$$

式中: $f(r)$ 随 r 的增大而减小,故 S_{gv} 随 r 的增大而增大。

地层流动带指数(F_{ZI})的定义式(3)变形为

收稿日期: 2010-03-04; 改回日期: 2010-04-12。

作者简介: 马旭鹏(1978—),男,工程师,2000年毕业于中国石油大学(华东)资源系应用地球物理专业,现从事仪器维修和测井方法研究工作。

$$F_{Zl} = \frac{1}{2n\pi} \frac{1 - n\pi r}{\sqrt{F_s} \tau} \quad (7)$$

由上式可知,当孔喉更加弯曲时,曲折度 τ 增大,导致地层流动带指数减小;而当储集空间增大(毛管半径 r 增大, φ_e 增大)、骨架体积减小时($1 - \varphi_e$ 减小),此时地层流动带指数亦减小。故地层流动带指数与储层孔隙结构之间并不是简单的单调函数关系,地层流动带指数的减小对应两种可能情况,一种是由于喉道十分弯曲而导致的孔隙结构变差的情况,另一种是由于毛管半径增大,储集空间增大,骨架体积减小而导致的孔隙结构变好的情况。或者也可以这样说:当储层孔隙结构变差的主导因素是曲折度增大时,地层流动带指数减小(τ 增大所致);当储层孔隙结构变差的主导因素是毛管半径减小、孔隙空间减小时,地层流动带指数增大。

公式(4)中, φ_z 是孔隙度 φ_e 的单调函数,即 φ_z 随 φ_e 的增加而增加,随 φ_e 减小而减小。故当储集空间增大(φ_e 增大)时, φ_z 增大,极限情况是孔隙体积为 1,骨架体积为 0,此时孔隙结构极好, φ_z 趋于无穷大;当储集空间减小(减小)时, φ_z 减小,极限情况是孔隙体积为 0,骨架体积为 1,此时孔隙结构极差, φ_z 趋于 0。因此, φ_z 是一个对储集空间大小反映十分灵敏的参数,与孔隙结构之间呈单调函数关系,当孔隙结构变差的主导因素是其储集空间减小时, φ_z 减小。

根据前面的假设,式(4)还可以做如下变形

$$\varphi_z = \frac{n\pi r^2 L}{1 - n\pi r^2 L} \quad (8)$$

将式(7)与式(8)代入式(5)中,经过推导得

$$R_{Ql} = \frac{r}{2\sqrt{F_s}\tau} \quad (9)$$

式(9)揭示了储层品质指数这一宏观物性参数的微观物理意义,即当孔喉更加弯曲时,曲折度 τ 增大,导致储层品质指数减小;当毛管半径 r 减小、储集空间变小时,储层品质指数亦减小。所以,储层品质指数与孔隙结构之间呈单调函数关系,当孔隙结构由于曲折度增大或毛管半径减小而变差时,储层品质指数随之减小;当孔隙结构由于曲折度减小或毛管半径增大而变好时,储层品质指数随之增大。

2 岩石物理数据的相关对比分析

以上从 Kozeny-Carmon 方程入手,通过进一

步理论推导及深入分析后发现,储层品质指数、地层流动带指数与孔隙结构密切相关。特别是储层品质指数,它随孔隙结构变差而减小,随其变好而增大,二者之间有非常好的对应关系。而地层流动带指数与孔隙结构之间的关系则较为复杂,当孔隙结构变差时,地层流动带指数可能增大也可能减小。下面以 X 油田 Y 工区的岩心数据为例,通过对 28 块岩石物理数据(包括物性及压汞数据)的精细分析,逐一考察孔隙度、渗透率、渗孔比、地层流动带指数及储层品质指数等宏观物性参数在定量表征孔隙结构方面的能力,进一步验证理论分析所得结论。

2.1 物性参数与毛管压力曲线的对比

根据排驱压力将该区岩心的孔隙结构分为好、中、差三类(I、II、III),其孔渗交会图如图 1 所示。

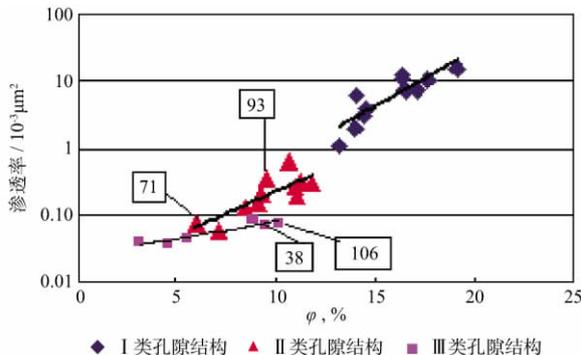


图 1 X 油田 Y 井区岩心孔渗交会分析

从图 1 可以看到,有些样品孔隙度相近但渗透率存在明显差异(如 93 号和 38 号样品);有些则渗透率相近而孔隙度却有一定差异(如 71 号、38 号和 106 号岩心)。这种物性关系的差异,必然是由岩心的微观孔隙结构所控制。图 2 和图 3 进一步说明了这一点。

从图 2 可以看出,93 号与 38 号岩心样品相比,分选性好,歪度也偏粗,所以二者虽然孔隙度相同,但 93 号的渗透率明显高于 38 号,如图 3 所示。

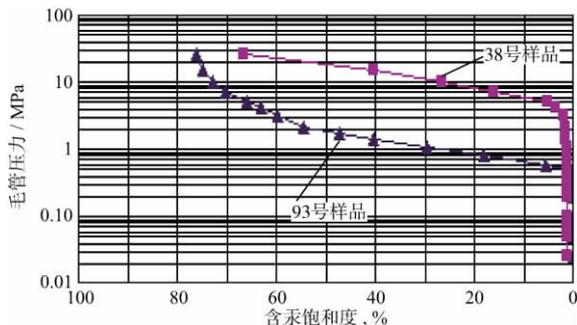


图 2 93 号和 38 号样品毛管压力曲线对比

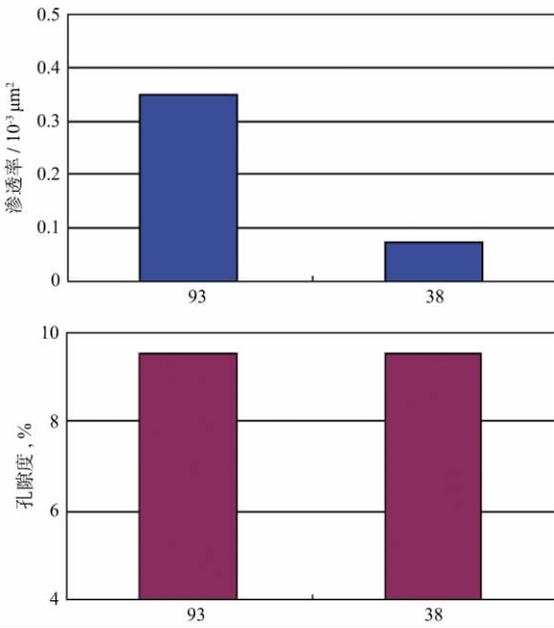


图 3 93 号和 38 号样品孔隙度及渗透率对比

进一步分析岩心数据发现,“渗透率与孔隙度之比”这一参数与孔隙结构有很好的对应关系,其值越大,孔隙结构越好。从图 2 可知,93 号与 38 号岩心相比,93 号的孔隙结构好于 38 号,其渗透率与孔隙度之比值也大于 38 号(图 4)。93 号、38 号、71 号和 106 号样品的岩石物理实验数据如表 1 所示。

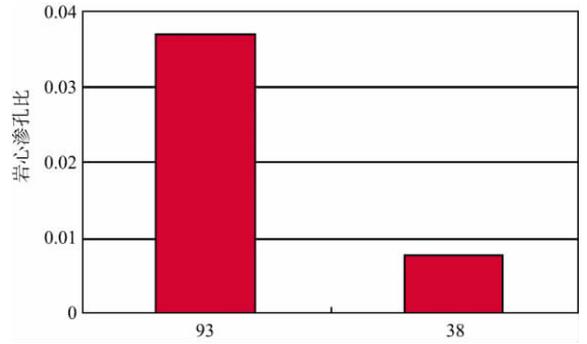


图 4 93 号和 38 号样品渗孔比对比

表 1 岩石物理实验数据

分类	样品号	孔隙度, %	渗透率/10 ⁻³ μm ²	排驱压力/MPa	中值压力/MPa	平均孔喉半径/μm
I	71	6.0	0.076	3.300	7.267	0.106
II	93	9.5	0.350	0.540	1.861	0.421
III	38	9.5	0.074	6.900	18.772	0.045
	106	10.2	0.078	7.000	22.870	0.044

2.2 物性参数与压汞参数的归一化相关对比

对 X 油田 Y 工区的岩心物性参数及对应压汞参数归一化,然后作相关对比分析,计算物性参数与压汞参数之间的相关系数。归一化及相关系数计算方法归纳如下。

假设参数 X 的样点值为 $x^i (i=1, 2, \dots, n)$, 参数 X 的样点值的归一化结果为 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$, 则本文所采用的归一化公式为

$$X_i = \frac{x_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

式中:

$$X_{\min} = \min_{i=1}^n \{x_i\} \quad (11)$$

$$X_{\max} = \max_{i=1}^n \{x_i\} \quad (12)$$

假设参数 Y 和参数 Z 的样点值分别为 Y_i 和 $Z_i (i=1, 2, \dots, n)$, 这两列样点值的相关系数设为 R_c , 则相关系数计算公式如下所示:

$$R_c = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i Z_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n Z_i^2}} \quad (13)$$

相关系数计算结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,宏观物性参数(岩心渗孔比、地层流动带指数、储层品质参数等)与表征储层微观孔隙结构的压汞参数(如排驱压力倒数、中值压力倒数及平均孔喉半径等)之间存在很强的相关性,在归一化后,它们的变化趋势吻合较好,相关系数较高。特别是,储层品质指数与压汞参数之间的相关性最高,这一结论与上节理论分析结果一致。

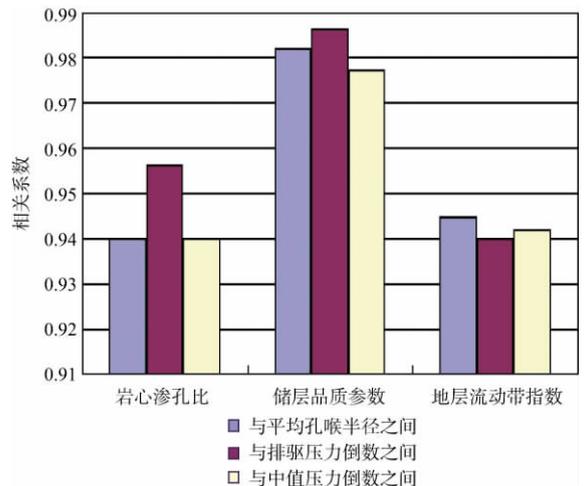


图 5 X 油田 Y 工区物性参数与压汞参数之间的相关系数柱状统计

这一规律一方面揭示了储层微观孔隙结构与其宏观物性的内在联系;同时也提醒我们:如果物性资料准确,我们可以利用储层品质指数或者其平方值即“渗透率与孔隙度的比值”等参数来综合衡量储层孔隙结构的好坏。

3 结论

储层微观孔隙结构与其宏观物性之间存在必然的因果关系。

1) 在理论基础方面,本文从 Kozeny-Carmon 方程入手,通过进一步的理论推导并借助函数单调性的分析,深入剖析了多种宏观物性参数与储层微观孔隙结构的内在联系。结果表明,储层品质指数与喉道半径成正比,与曲折度成反比。与其它参数相比,其数值的大小变化对孔隙结构的优劣变化反映最灵敏。

2) 在实际资料方面,本文首先综合对比岩心样品的物性参数数值特征及其毛管压力曲线形态特征,结果表明,渗孔比越大,孔隙结构特征越好;然后对大量样品的各种宏观物性参数与其各种孔隙结构参数作归一化的相关对比分析,结果表明,

与其它参数相比,储层品质指数与孔隙结构参数的相关性最高。

总之,理论推导及对实际资料的分析均表明,储层品质指数最能反映微观孔隙结构的变化特征,是划分岩石物理相、定量表征储层孔隙结构的最佳宏观物性参数。这一结论为探索利用宏观地球物理测井资料连续定量表征储层微观孔隙结构的方法奠定了坚实基础。

参 考 文 献

- 1 吴胜和,熊琦华. 油气储层地质学[M]. 北京:石油工业出版社,1998. 113~122
- 2 谭成仟,段爱英,宋革生. 基于岩石物理相的储层渗透率解释模型研究[J]. 测井技术,2001,25(4):287~290
- 3 Chopra A K, Stein M H, Ader J C. Development of reservoir description to aid in design of EOR project [J]. SPE,1987,16370
- 4 Chopra A K. Reservoir Description via pulse[J]. SPE, 1988,171~187
- 5 Amaefule J O, Altunbay M, Tiab D, et al. Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic(flow)units and predict permeability in uncored intervals/wells[J]. SPE,1993,206~207

(编辑:任 鹏)

(上接第 215 页)

5 结束语

本文利用元素俘获谱测井结合 CIPW 标准矿物思想实现了火成岩中元素到矿物的转化。将标准矿物依据 QAPM 矿物分类,结合常规测井计算得到了 4 类矿物的物性参数,将其代入测井响应方程中得到了孔隙度。本文方法在松辽盆地南部深层火成岩储层实际资料处理中得到了较好的效果。

参 考 文 献

- 1 王拥军,冉启全,童敏,等. ECS 测井在火山岩岩性识别中的应用[J]. 国外测井技术,2006,21(1):13~16
- 2 Pan B Z, Xue L F, Huang B Z. Evaluation volcanic reservoirs with “QAPM mineral model” using genetic al-

gorithm[J]. Applied Geophysics,2008,5(1):1~8

- 3 潘保芝,薛林福,李舟波,等. 裂缝性火成岩储层测井评价方法与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2003. 3~8
- 4 李舟波,王祝文. 科学钻探中的元素测井技术[J]. 地学前缘,1998,5(1/2):119~130
- 5 邱家骧,林景任. 岩石化学[M]. 北京:地质出版社,1991. 30~40
- 6 吴庆岩. 测井解释常用岩石矿物手册[M]. 北京:地质出版社,1998. 15~116
- 7 韩琳. 元素俘获谱测井(ECS)在火成岩岩性识别与储层评价中的应用研究[D]. 吉林长春:吉林大学,2009
- 8 潘保芝,李舟波,付有升,等. 测井资料在松辽盆地火成岩岩性识别和储层评价中的应用[J]. 石油物探,2009,48(1):48~56

(编辑:戴春秋)