

# 利用电成像测井资料定量评价储层分选及渗透率研究

关叶钦, 徐锦绣, 陆云龙, 李志愿

(中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459)

**摘要:** 储层分选系数是评价碎屑岩沉积物分选的一个重要参数, 而地层颗粒粒度大小及分布特征是计算分选系数的基础, 沉积物的粒度通常是利用岩心样品在实验室中获取。当电成像测井资料分辨率足够高时, 其电阻率值与粒径大小有一定的相对关系, 那么电阻率频率分布曲线可以表示岩石粒度总体趋势分布, 通过电阻率频率分布曲线, 统计电阻率频率分布曲线上频率累积到 25%、50%、75% 处所对应的电阻率值的相对关系判断储层的分选性, 建立公式计算储层“分选系数”; 依据“分选系数”大小把储层划分为三种岩石物理相并建立渗透率评价模型。实际处理渤海油田 LD 井, 计算得到的“分选系数”与岩心实验室测量分选系数在趋势上吻合较好, 验证了该方法的可靠性与正确性, 建立基于岩石物理相约束下的渗透率模型, 提高了渗透率的计算精度, 为地质油藏评价提供了更可靠的物性参数。

**关键词:** 电成像测井; 频率分布; 分选系数; 岩石物理相; 渗透率

**中图分类号:** P631.81

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.05.10

## 0 引言

碎屑岩沉积物的粒度及其分布特征影响了储层品质, 包括孔隙度、渗透率、含油性等参数。粒度分析一般只能从岩心样品的实验室中测量得到, 在缺乏岩心样品的地层, 通过储层的粒度分析无法获取。岩石的分选是描述沉积物粒度直径的均匀程度, 分选系数是指岩石粒度累积曲线上, 75% 和 25% 处所对应的颗粒直径的比值, 常规分选系数的计算依赖于岩石颗粒的粒度分析数据<sup>[1]</sup>。

随着测井技术的发展, 高分辨率的电成像资料提供了非常全面的视觉地质信息, 其具有纵向分辨率高、横向测井信息丰富、井周覆盖面积大等特点。从电成像测井得到的沿井周分布的地层图像包括了岩石颗粒大小、分选、层理特征等信息, 同时国内外很多学者在岩性识别<sup>[2]</sup>、沉积相研究<sup>[3]</sup>、裂缝及孔洞

识别<sup>[4]</sup>、电成像孔隙度频谱分析<sup>[5]</sup>等方面进行了大量的研究<sup>[6]</sup>。在前人研究的基础上, 笔者利用电成像资料定量评价碎屑岩储层分选性, 这种方法类似于岩心的实验室粒度分析结果的统计方法, 虽然处理后得不到岩石颗粒的绝对尺寸大小, 但可以指示岩石颗粒的粗细大小变化<sup>[7]</sup>, 可以定量评价储层的“分选系数”, 并应用“分选系数”对储层划分岩石物理相, 建立了基于岩石物理相约束的渗透率评价模型, 提高了渗透率的评价精度。

## 1 应用电成像资料评价碎屑岩储层分选性的方法

电成像资料的纵向分辨率为 0.508 cm, 横向测量了 192 条电阻率曲线, 更多的是反映冲洗带的地质情况, 基本不受油气影响, 因此图像颜色分布的不均匀就反映了岩石导电能力的不同, 对于碎屑岩储

收稿日期: 2023-05-04

基金项目: 中海石油(中国)有限公司重大科技专项(CNOOC-KJ 135 ZDXM 36 TJ01TJ-GD 2020-02)

第一作者: 关叶钦(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事测井解释及研究工作, E-mail: guanyq4@cnooc.com.cn。

层,可认为电阻率的高低反映了岩石颗粒大小的变化。把一定深度范围内的电阻率曲线采用类似于实验室粒度分析的统计方法排序,从而评价储层的分选性。

### 1.1 成像电阻率资料的形态分布

经过研究发现,电阻率数据的分布特征与沉积岩颗粒粒度的粒径分布相似,有多种分布形态<sup>[8]</sup>,如图 1(a)所示,单尖峰对称曲线,曲线为正态分布,反映颗粒分布集中,对应电阻率为数值集中,代表分选好;图 1(b)单宽峰对称曲线,反映颗粒分布变化较大,对应电阻率数值变化范围大,分选较差;图 1(c)曲线为不对称右偏态曲线,主峰偏向左侧,对应电阻率数据位于中位数值左边的比位于右边的多,反映颗粒以细组分为主,分选变差;图 1(d)曲线为不对称左偏态曲线,主峰偏向右侧,对应电阻率数据位于中位数值右边的比位于左边的多,反映颗粒以粗组分为主,分选也变差。

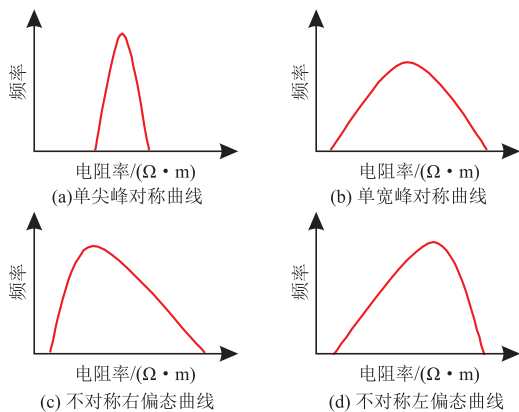


图 1 不同电阻率数据频率分布形态特征图

Fig. 1 Frequency distribution characteristics of different resistivity data

### 1.2 利用电成像资料建立电阻率频率分布

电成像数据是由多条电阻率数据组成,具有数据量大的特点,同时也受到测量环境的影响,包括井眼情况、地层倾角等,需要对数据进行简单处理;笔者选取渤海有电成像测井资料的系统取心井 LD 井,按下述方法对电成像资料进行处理:

1)电阻率数据的预处理。定义一个合理可接受的电阻率值范围,将那些极端及明显错误的数据移除。

2)电阻率刻度。已有研究表明,电成像测井中电流的聚集方式、电流路径及探测深度均与常规的浅侧向电阻率相似或相当<sup>[9-11]</sup>,刻度后的数据既具有很高的垂向、水平分辨率,又能反映与常规浅侧向

探测深度相当的地层电阻率信息,可用于薄层分析或各种定量计算等应用中<sup>[12]</sup>。

3)电成像测井纵向分辨率较高。在井筒附近的纵向上选  $5\text{ cm} \times 2.54\text{ cm}$  的窗长,如图 2 所示,获得这段窗口内的电阻率值。

4)电成像测井在横向上测量 192 条电阻率曲线。与上述选取窗口相似,将刻度后的电阻率曲线统一分割为 96 列,每 2 条电阻率曲线为一个窗口,并在窗口内进行标准化,包括平滑滤波、合并求均值等,以确保电阻率代表了粒径的总体分布大小。

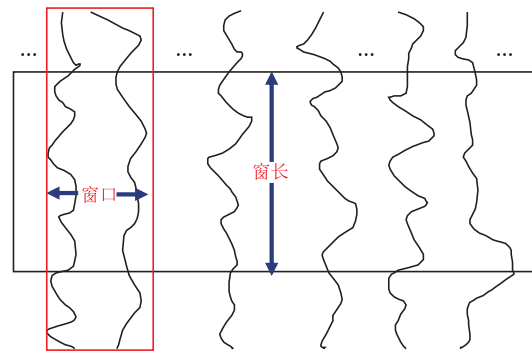


图 2 电成像资料电阻率曲线计算窗口图

Fig. 2 The figure of electrical imaging data resistivity curve calculation window

由于成像仪器电极尺寸的限制,电阻率值与粒径大小之间没有直接关系,但是当成像数据分辨率足够高时,电阻率值与粒径大小有一定的相对关系:电阻率值越大,粒度越大,反之亦然。在一定条件下,电阻率频率分布曲线可以表示岩石粒度总体趋势分布。

图 3 是 LD 井某点电阻率值由低到高的频率分布曲线,图中颜色深浅代表电阻率值的低和高,统计代表该点电阻率频率分布曲线上频率累积到 25%、50%、75%处所对应的电阻率值的大小分别为  $P_{25}$ 、 $P_{50}$ 、 $P_{75}$ 。图 3 中红色、蓝色、绿色线与频率累积曲线的交点即为  $P_{25}$ 、 $P_{50}$ 、 $P_{75}$  曲线电阻率值。

图 4(a)是选取 LD 井中以细颗粒为主的储层某点的电阻率频率分布曲线,图 4(b)是该段岩心照片,从图中可以看出,在以砂质泥岩为主的地层中,电阻率分布偏向左侧,电阻率色标基本以暗色为主,同时  $P_{25}$  很小,随着岩石粒度变粗, $P_{25}$  会向右侧移动,也就是  $P_{25}$  曲线值变大。

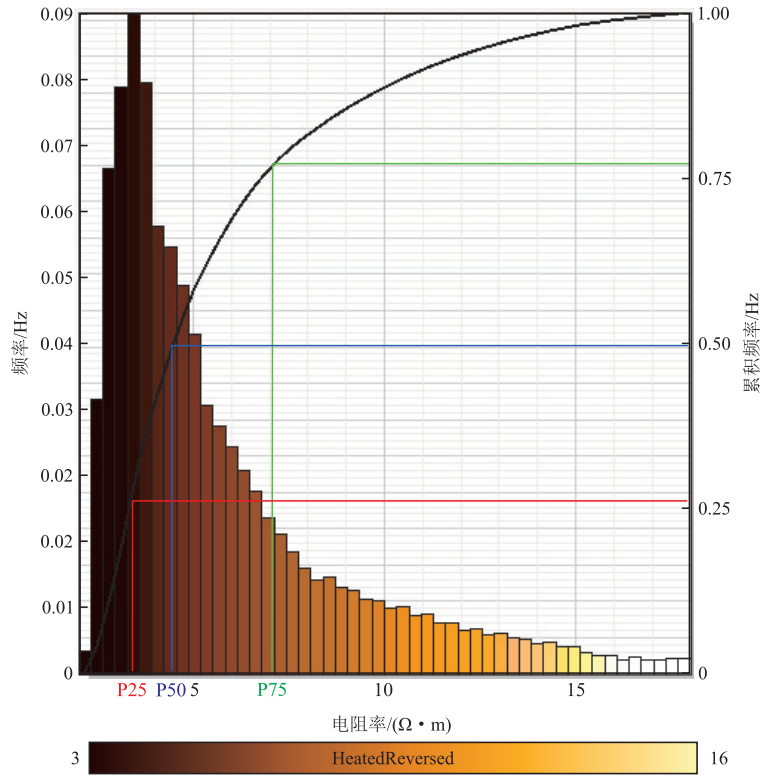
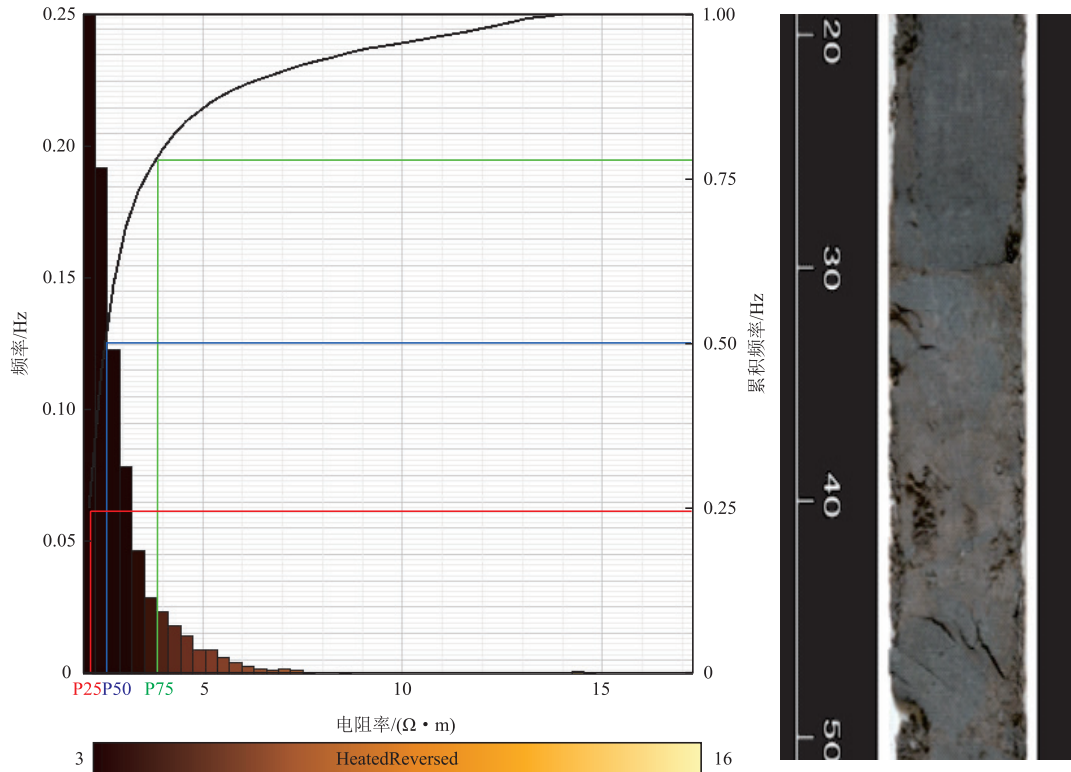


图 3 LD 井某点电阻率频率分布曲线图

Fig. 3 Frequency distribution of resistivity at a point of well LD



(a)井细颗粒为主储层电阻率频率分布曲线

(b)岩心照片

图 4 LD 井细颗粒为主储层电阻率频率分布曲线与岩心照片

Fig. 4 Frequency distribution curve and core photos of resistivity in LD well with fine particles as the main reservoir

图 5(a)是选取 LD 井中以粗颗粒为主的储层某点的电阻率频率分布曲线,图 5(b)是该段岩心照片,从图中可以看出,在以砂砾岩为主的地层,电阻率分布偏向右侧,电阻率色标基本以亮色为主,同时  $P_{75}$  很大,随着岩石粒度变细, $P_{75}$  会向左侧移动,也就是  $P_{75}$  曲线值变小。

### 1.3 电成像资料定量评价储层分选

分选系数原本是表示沉积物分选程度的参数,它反映颗粒大小的均匀程度,或者说是表现围绕集中趋势的离散<sup>[12]</sup>,给出的分选系数公式为:

$$S_o = \frac{P_{25}}{P_{75}} \quad (1)$$

式(1)中  $P_{25}$  和  $P_{75}$  分别代表累积曲线上颗粒累积含量 25%和 75%处所对应的颗粒直径,通过借鉴实验室利用颗粒累积含量计算分选系数的思想,改进公式(1)通过电成像资料反映储层的分选性,因此建立利用电成像资料计算“分选系数”,公式为:

$$S_o = \frac{P_{75} - P_{25}}{P_{50}} \quad (2)$$

式(2)中  $P_{25}$ 、 $P_{50}$  及  $P_{75}$  分别代表了频率曲线上频率累积到 25%、50%和 75%处所对应的电阻率大小

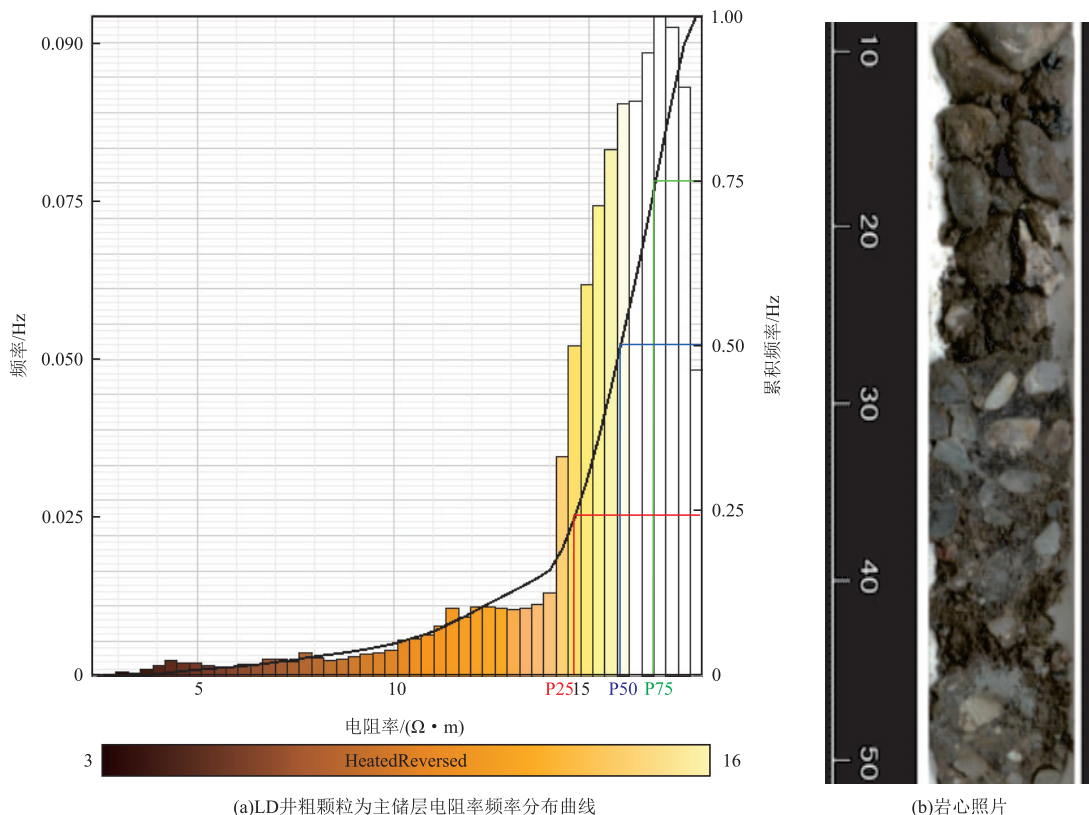
值。当  $P_{25}$ 、 $P_{75}$  值相差不大时,即电阻率值集中,说明  $S_o$  较小,则分选好;反之,当  $P_{25}$ 、 $P_{75}$  值相差很大时,即电阻率值分布离散,说明  $S_o$  较大,则分选差。

此方法计算得到的“分选系数”是独立于绝对电阻率值的,不会单纯的因储层电阻率高低而大或小,主要的影响因素是电成像中电阻率值的分布趋势,也就是说反映的是地层岩石颗粒的粗细及分布特征。

## 2 基于岩石物理相的渗透率研究

渤海油田 LD 井埋藏浅、岩性为疏松砂岩,在目的层明化镇组、馆陶组段进行了系统取心。根据岩心实验结果,储层非均质性较强,相同孔隙度对应的渗透率具有数量级的差异,因此常规孔渗关系的解释方法很难给出理想的渗透率精度。

一般来说,相同沉积环境中同一岩性地层具有一组特定的岩石物理参数,那么可以依据测井资料将储层划分为具有若干地质意义的岩石物理相,岩石物理相是岩石物理特征的综合反映,相同的岩石物理相具有类似的物性特点<sup>[13-14]</sup>,分选系数是定量



(a)LD井粗颗粒为主储层电阻率频率分布曲线

(b)岩心照片

图 5 LD 井粗颗粒为主储层电阻率频率分布曲线与岩心照片

Fig. 5 Frequency distribution curve and core photos of resistivity in LD well with coarse particles as the main reservoir

表征储层的微观孔隙结构的参数之一,与渗透率关系密切<sup>[15]</sup>,可以利用成像测井资料得到的“分选系数”表征储层品质,对储层进行岩石物理相划分,基于划分结果建立渗透率模型,提高渗透率的评价精度。

表 1 是按分选系数的大小划分的分选等级,笔者按照这种等级划分方法将电成像资料得到的“分选系数”进行划分,从而将储层划分为三种岩石物理相。

表 1 按分选系数大小划分的分选等级

Tab. 1 Classification by the size of the sorting factor

分选系数 $S_o$	分选等级
1.0—2.5	分选好
2.5—4.0	分选中等
>4.0	分选差

根据划分的三种岩石物理相,把 LD 井的岩心分析孔、渗数据进行分类(图 6),建立以岩石物理相约束的渗透率评价模型(表 2)。

### 3 应用实例

应用上述计算方法,对 LD 井电成像数据进行

表 2 LD 井基于岩石物理相约束的渗透率计算模型

Tab. 2 Permeability calculation model based on rock physical phase constraint of well LD

岩石物理相类别	渗透率计算模型	相关系数( $R^2$ )
相 1	$K = 20.565 * \text{EXP}(0.169 * \phi)$	0.72
相 2	$K = 2.278 * \text{EXP}(0.211 * \phi)$	0.86
相 3	$K = 0.326 * \text{EXP}(0.238 * \phi)$	0.79

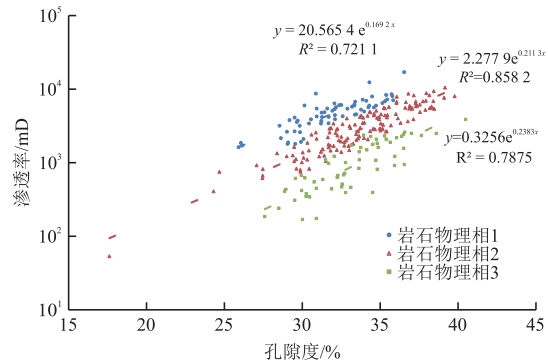


图 6 LD 井岩心分析孔渗按岩石物理相分类图

Fig. 6 Image of core analysis porosity and permeability classified by Petrophysical facies of well LD

处理(图 7),图中第五道中红色曲线为电成像资料计算得到的“分选系数”,黑色圆点为岩心实验室化验分析得到分选系数,从图中可以看出,两者在数值上虽然存在一定差异,可能是由分辨率和深度误差

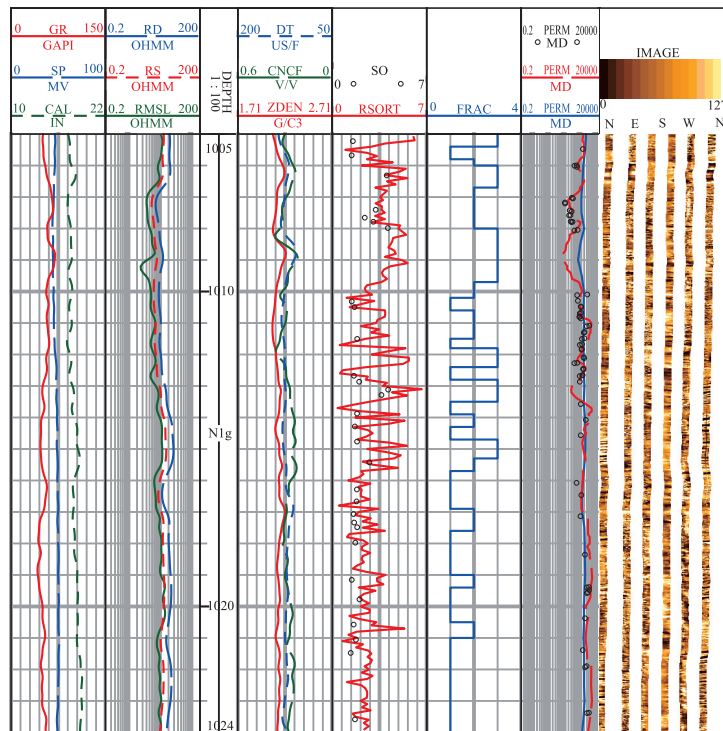


图 7 LD 井电成像资料定量评价分选性及渗透率计算成果图

Fig. 7 Image of sorting and permeability calculation results for quantitative evaluation of electrical imaging data

引起,但圆点与红线的变化趋势较为一致,认为电成像资料评价储层分选性是合理可行的。

第六道蓝色曲线是根据“分选系数”大小划分岩石物理相(值 1、2、3 代表相 1、2、3)的结果,同时应用岩石物理相约束的渗透率模型对 LD 井储层渗透率进行了计算,图中第七道中结果显示基于岩石物理约束模型计算的渗透率更接近岩心实测值,从取心段渗透率小层平均结果来看,常规方法技术算的渗透率误差为 25.6%~46.2%,而基于岩石物理相约束的渗透率模型计算的渗透率误差为 9.8%~21.1%,明显提高了计算精度。

## 4 结论

1)电成像测井资料评价储层的分选性适用于砂泥岩、砂砾岩等具有明显沉积结构和构造的碎屑岩储层,电阻率值的大小能够反映岩石颗粒的粗细。

2)利用电成像资料得到的地层“分选系数”,基本能反映地层分选的差异,对在未取心井中开展储层分选的分析及扩展电成像资料的地质应用,具备实用价值。

3)实际处理渤海油田 LD 井,通过“分选系数”划分建立的岩石物理相的约束下,建立的渗透率模型,明显提高了渗透率的计算精度,为地质油藏评价提供了更可靠的物性参数。

### 参考文献:

- [1] VISHNER G S. Grain size distributions and depositional processes [J]. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 1969, 39: (3):1074-1106.
- [2] 王敏,王永诗,刘学锋,等. 砂砾岩储层岩石粒径定量估算新方法[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(1): 208-213.  
WANG M, WANG Y S, LIU X F, et al. New method for quantitative estimation of grain size in sand conglomerate reservoir [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(1): 208-213. (In Chinese)
- [3] 赖富强,孙建孟,于华伟,等. 电成像测井资料在东营凹陷北带砂砾岩体沉积相分析中的应用[J]. *石油天然气学报*, 2009, 31(5): 90-94.  
LAI F Q, SUN J M, YU H W, et al. Application of FMI in sedimentary facies analysis in the northern of Dongying depression[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(5): 90-94. (In Chinese)
- [4] 钟广法,祁兴中,马勇,等. 电成像测井资料在裂缝成因分析中的应用[J]. *物探与化探*, 2005, 29(2):

116-118.

ZHONG G F, QI X Z, MA Y, et al. The application of borehole micro resistivity image logs to analyzing the origin of fracture structures: A case study of Tarim Basin, Northwest China[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2005, 29(2): 116-118. (In Chinese)

- [5] 刘瑞林,谢芳,肖承文,等. 基于小波变换图像分割技术的电成像测井资料裂缝、孔洞面孔率提取方法[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(12): 4945-4955.  
LIU R L, XIE F, XIAO C W, et al. Extracting fracture-vug plane porosity from electrical imaging logging data using dissection of wavelet-transform-based image[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(12): 4945-4955. (In Chinese)
- [6] 侯振学,于雪娴,李东旭,等. 电成像测井处理新技术在储层评价方面的应用[J]. *地球物理学进展*, 2020, 35(2): 573-578.  
HOU Z X, YU X X, LI D X, et al. Application of new processing technology of electrical imaging logging in reservoir evaluation[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(2): 573-578. (In Chinese)
- [7] NEWBERRY B M, PERRETT T. A method for analyzing textural changes within clastic environments utilizing electrical borehole images[J]. *Gulf Coast Association Geological Societies Transactions*, 2004(54): 531-539.
- [8] FOLK R L, WARD W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1): 3-26.
- [9] 张守谦. 成象测井技术及应用[M]. 北京:石油工业出版社, 1997.  
ZHANG S Q. Imaging logging technology and its application [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997. (In Chinese)
- [10] 石油测井情报协作组. 测井新技术应用:成象测井核磁共振测井岩电研究[M]. 北京:石油工业出版社, 1998.  
Petroleum Logging Intelligence Collaboration Group. Application of new logging technology: Imaging logging, nuclear magnetic resonance logging and petroelectricity research [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998. (In Chinese)
- [11] YANG S, AVIANTARA A, DELIUS H, et al. Continuous microfacies analysis in clastic environments utilizing pseudo grain size distribution from electrical borehole images [C]//Day 2 Tue, September 27, 2016. September 26-28, 2016. Dubai, UAE. SPE,

- 2016;SPE-181477-MS.
- [12] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京:石油工业出版社,2003.  
JIANG Z X. Sedimentation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003. (In Chinese)
- [13] 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.  
YONG S H, ZHANG C M. Logging data processing and comprehensive interpretation[M]. China University of Petroleum Press, 1996. (In Chinese)
- [14] 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.  
TAN C Q, DUAN A Y, SONG G S. On the permeability models based on the petrophysical facies[J]. Well Logging Technology, 2001, 25(4): 287-290. (In Chinese)
- [15] 武鑫,吉林,吴伟,等. 基于复杂孔隙结构分析的低渗砂岩储层分类与表征[J]. 西北大学学报(自然科学版),2020,50(4):615-625.  
WU X, JI L, WU W, et al. Classification and characterization of low permeability sandstone reservoir based on complex pore structure analysis[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2020, 50(4): 615-625. (In Chinese)

### Study on quantitative evaluation of reservoir sorting and permeability using Micro-electric imaging logging data

GUAN Yeqin, XU Jinxiu, LU Yunlong, LI Zhiyuan

(CNOOC China Limited, Tianjin Branch, Tianjin 300459, China)

**Abstract:** The reservoir sorting coefficient is an essential parameter for evaluating clastic sediment sorting, and the grain size and distribution characteristics of formation particles are the basis for calculating the sorting coefficient. The grain size of sediments is usually obtained by using core samples in the laboratory. When the resolution of the electro-imaging logging data is high enough, the resistivity value has a specific relative relationship with the particle size. Then the resistivity frequency distribution curve can represent the overall trend distribution of rock particle size. Through the resistivity frequency distribution curve, The relative relation of the resistivity values corresponding to the frequencies accumulated to 25%, 50%, and 75% on the resistivity frequency distribution curve was calculated to judge the sorting property of the reservoir, and a formula was established to calculate the "sorting coefficient" of the reservoir. According to the "separation coefficient", the reservoir is divided into three kinds of rock physical phases and the permeability evaluation model is established. In the actual treatment of the LD well in Bohai oilfield, the calculated "separation coefficient" is in good agreement with the separation coefficient measured in a core laboratory, which verifies the reliability and correctness of the method. The permeability model based on the constraint of the rock physical phase is established, improving the permeability calculation accuracy and providing more reliable physical parameters for geological reservoir evaluation.

**Keywords:** micro-electric imaging log; frequency distribution; sorting coefficient; petrophysical facies; permeability