

# 基于富有机质页岩复电阻率的几种导电模型的探讨<sup>①</sup>

李鹏飞, 黄 诚

(中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000)

**摘要:**利用 SI-1260 阻抗分析仪在室温常压下对南方页岩气探区中某井多块富总有机碳(TOC)含量的饱和页岩岩芯进行多次复电阻率扫频测量,最终选择一组数据分别使用单 Cole-Cole、双 Cole-Cole、Cole-Cole 乘 Brown 以及 Dias 模型对其复电阻率幅值以及相位进行频谱参数联合反演。反演结果表明双 Cole-Cole 和 Cole-Cole 乘 Brown 模型相对于其他模型具有较小拟合误差,能够很好地描述页岩岩芯的复电阻率以及相位曲线,且能从反演结果中较准确地得到各频谱参数。测试与分析结果表明高 TOC 的页岩岩样的宽频复电阻率参数表现为低频时的高极化率异常,总结出高 TOC 页岩储层具有低电阻率、高极化率的异常特征。其对使用时频电磁勘探技术和频谱激电法寻找富总有机碳含量的优质页岩储层以及页岩储层复电阻率测井方法的实现都具有重要的指导与借鉴意义。

**关键词:** 复电阻率; 相位; 频谱参数; 页岩岩芯; 总有机碳含量

**中图分类号:** P631.8

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2015)增刊 2-0240-07

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.增刊 2.0240

## Discussion of Several Conductive Models Based on the Complex Resistivity of Organic-Rich Shale

LI Peng-fei, HUANG Cheng

(Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Branch Company, PetroChina, Korla 841000, Xinjiang, China)

**Abstract:** Recently, shale gas entered our exploration area as an unconventional energy source. Geological study has shown that the shale in southern China has good qualities for exploration. Because of the unique storage conditions and continuous complicated accumulation patterns of shale gas, it is difficult to use conventional geophysical methods to predict sweet spots. According to geological deposition theory, the total organic carbon (TOC) is the basic element that controls the formation of pyrite in marine sediment under a deep water deposition environment. There is a close relationship between the TOC and pyrite in such deep water deposition environments. In this paper we have found that pyrite plays an important role in the prediction of TOC. Through laboratory measurement analysis and joint inversion of the complex resistivity and phase, the marine organic-rich shale samples showed low resistivity and high polarizability. We think that the induced polarization (IP) electromagnetic exploration method can evaluate shale gas formation effectively, and application has shown that IP results are in good agreement with the seismic prediction for sweet spots. With the growth in global demand for oil and gas resources, conventional oil and gas exploration and development potential is very narrow, but unconventional reservoirs are open. Recently, shale gas has become the new target of global oil and gas exploration and development. Exploitation of shale gas and tight oil has brought a major change to the world which is gradually

① 收稿日期: 2014-02-26

作者简介: 李鹏飞(1990-), 男, 四川资阳人, 硕士研究生, 主要从事物探解释、岩石物理研究。E-mail: 295196232@qq.com。

affecting the pattern of world energy supply and demand. It is estimated that there are rich marine shale gas resources in the south of China. Geologically, there are six sets of marine shale formations in Proterozoic-Paleozoic strata in southern China. Specifically, in the Silurian Longmaxi group (S11) and the Cambrian Qiongzhusi group ( $\in$ ln), the shale has a good quality of TOC and thickness, which indicate the huge potential reserves of unconventional gas. The seismic method is certainly the first choice to predict sweet spots, but unfortunately, it has run into difficulties in southern China because of rugged tomography and complicated geology. Because of the low resistivity and strong polarization of marine organic-rich shale compared with the surrounding rock, the IP electromagnetic exploration method, which has been considered as an effective supplementary method, can be used to do that. At room temperature and atmospheric pressure, the complex resistivity sweep measurement is obtained for a saturated shale core by the SI1260 impedance analyzer. Finally, the joint inversion of complex resistivity amplitude and phase is conducted using single Cole-Cole, double Cole-Cole, Cole-Cole multiply Brown, and Dias models. Inversion results indicate that the double Cole-Cole and Cole-Cole multiply Brown models can describe shale cores' complex resistivity and phase curves with smaller fitting errors than the other models. We can get accurate spectral parameters from each inversion. It is useful to find shale reserves by the IP method and to realize shale gas complex resistivity logging.

**Key words:** complex resistivity; phase; frequency spectral parameter; shale core; TOC (total organic carbon)

## 0 引言

页岩气作为非常规能源之一,既是常规天然气的潜在替代能源,也是清洁环保能源。泥页岩作为页岩气的有利储存区,对其进行岩石物理实验是进行页岩气地球物理勘探和评价之前的首要任务。在泥页岩各种岩石物理参数研究中,本文主要研究其复电阻率特性。

在岩石的复电阻率的测试和模型研究方面,国内外学者做了大量实验工作,提出众复电阻率模型理论和经验公式。最为大家所熟知并且应用最广泛的是 20 世纪 40 年代初由 Cole-Cole 兄弟提出的 Cole-Cole 模型,并由此演变出较多其他模型,如将多个 Cole-Cole 模型相乘或相加等。也有许多学者提出完全不同于 Cole-Cole 模型形式的其他模型,如 Brown<sup>[1]</sup>、Dias<sup>[2]</sup>等模型。从 1959 年到 1979 年学者们提出了大致十余种导电模型,其中包括著名的 Wait<sup>[3-4]</sup>、Ward and Fraser<sup>[5]</sup>、Dias<sup>[2]</sup>、Multi-Cole-Cole<sup>[6]</sup>和 Wang<sup>[7]</sup>等模型。它们都是描述在一定频率信号下岩石的复电阻率模型<sup>[8]</sup>,使得对于不同研究目的以及针对不同矿物组分在岩石复电阻率模型的研究上具有更多的可选择性。

在岩石电性特征参数实验研究方面,Al-kaabi 和 Jing<sup>[9]</sup>等指出岩石导电机理非常复杂并提出了 GEM 模型。张塞珍等<sup>[10]</sup>论证了矿物成分对频谱参

数的影响。肖占山等<sup>[11-12]</sup>对频散特性机理以及不同岩石表现出的不同频散特性做了深入的实验研究。石昆法等<sup>[13]</sup>将岩石样品置于储层的高温高压条件下进行了大量的电性特征参数的实验研究。范宜仁等<sup>[14]</sup>对岩石频散现象也做了大量实验论证。柯式镇等<sup>[15]</sup>研究提出了一种新的复电阻率频散模型,并给出了该模型频谱参数的获取方法。

由于泥页岩本身结构以及组成成分的复杂多样性,因此对于其复电阻率模型的选择以及明确各频谱参数所代表的物理意义就变成了一个较为复杂的问题。这里选择单 Cole-Cole、双 Cole-Cole、Cole-Cole 乘 Brown 以及 Dias 模型来研究泥页岩复电阻率性质,对反演参数的情况进行研究分析,希望对勘探富总有机碳含量的页岩气储层具有一定的指导和借鉴意义。

## 1 岩电实验

使用 Solartron-1260A(以下简称 1260A)阻抗分析仪对泥页岩岩样在室温常压条件下进行频率从 0.01~10 kHz 变化总共 61 个频点的复电阻率扫频测量(图 1),整个过程使用电脑全自动控制。测量时选用对称四极测量装置,即 AB 供电、MN 测量的方式,1260A 阻抗分析仪利用其函数信号发生器为 AB 两极提供一定频率的交流电,然后通过 MN

端读取岩心标本阻抗的值。为了降低电极自身的极化效应,实验时所有的电极都使用铂金网不极化电极。测量时页岩岩心两端一直浸泡在饱和液中,以防止岩样中的部分饱和液在较长测量时间里挥发,改变岩样的电性特征。为尽可能地降低干扰和误差,对同一块岩样进行至少3次以上的测量,直到相邻两次测量结果基本不变且曲线较为光滑稳定为止。

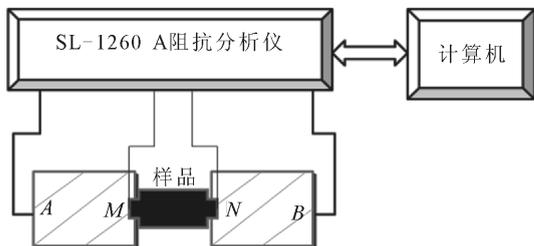


图1 测量装置示意图

Fig.1 Diagram of the measurement device

## 2 岩(矿)石导电模型

### (1) 单 Cole-Cole 模型

Cole-Cole 模型参数广泛地应用于解释电磁法勘探数据中。图2为 Cole-Cole 模型等效电路示意图,它微观地模拟了岩石的导电情况。根据 Cole-Cole 模型可以计算出岩石标本在整个测试频段上的振幅以及相位。

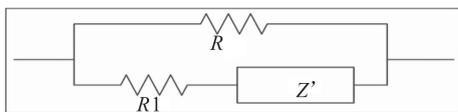


图2 Cole-Cole 模型等效电路示意图

Fig.2 The equivalent circuit diagram of Cole-Cole model

Pelton 等<sup>[6]</sup>基于对岩石样品、矿物标本和露头的大量测量结果认为,对岩石和矿物由激电效应引起的复电阻率随频率的变化可以用 Cole-Cole 模型表示为:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m \left[ 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\} \quad (1)$$

式中: $\omega = 2\pi f$  为圆频率; $\rho(\omega)$  为频率为  $\omega$  时的复电阻率; $\rho_0$  为频率为 0 Hz 时的电阻率; $m$  为极化率,取值范围 0~1; $\tau$  为时间常数,大于零; $c$  为频率相关系数,取值范围为 0~1。其中  $m$  主要与矿物成分、含量、结构等有关, $\tau$  与矿物颗粒大小以及连通情况等有关, $c$  主要与矿物颗粒尺寸以及不均匀度有关。四个参数中只有  $\rho_0$  和  $m$  得到较为广泛的实

际应用, $\tau$  与  $c$  还没有被充分利用。

### (2) 双 Cole-Cole 模型

双 Cole-Cole 模型是众多复 Cole-Cole 模型中应用最广泛的,常用的有基于双 Cole-Cole 模型相减以及相乘的形式,本文选择相乘的形式:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m_1 \left[ 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau_1)^{c_1}} \right] \right\} * \left\{ 1 - m_2 \left[ 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau_2)^{c_2}} \right] \right\} \quad (2)$$

式中各变量物理意义与式(1)相同,角标 1,2 分别代表激发极化效应以及电磁感应耦合效应存在的不同频段。

### (3) Cole-Cole 乘 Brown 模型

由于测量频率范围较宽,最高频率达到 10 kHz,考虑在高频阶段不排除会存在电磁感应耦合效应,为单纯地研究泥页岩岩芯的激发极化效应,选择描述激电谱的 Cole-Cole 模型和描述电磁谱的 Brown 模型相乘的形式作为总谱[式(5)]的表达式<sup>[1,16-18]</sup>:

$$\rho^{IP}(\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m_1 \left[ 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau_1)^{c_1}} \right] \right\} \quad (3)$$

$$\rho^{EM}(\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m_2 \left[ 1 - \frac{1}{1 + i\omega\tau_2} \right] + i\omega\tau_3 \right\} \quad (4)$$

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m_1 \left[ 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau_1)^{c_1}} \right] \right\} * \left\{ 1 - m_2 \left[ 1 - \frac{1}{1 + i\omega\tau_2} \right] + i\omega\tau_3 \right\} \quad (5)$$

式中: $\rho^{IP}$  代表描述激电效应的 Cole-Cole 模型; $\rho^{EM}$  代表描述电磁感应耦合效应的 Brown 模型。其中式(3)中各变量物理意义与式(1)一样,式(4)中  $m_2$ 、 $\tau_2$ 、 $\tau_3$  分别表示极化率(无量纲)、时间常数(s),它们是反应耦合效应的参数。

### (4) Dias 模型

Dias 模型是 Dias<sup>[2]</sup>在 1972 年提出的一种新的激发极化模型,并且在 2000 年对该模型中各个参数的物理意义进行了明确的说明。相对于其他模型,Dias 模型中各参数具有更加明确的岩石物理及电化学意义,且 Dias 模型主要用于对含金属颗粒的岩石的复电阻率进行描述<sup>[19]</sup>。

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m \left[ 1 - \frac{1}{1 + i\omega\tau' \left( 1 + \frac{1}{u} \right)} \right] \right\} \quad (6)$$

式中: $u = i\omega\tau + (i\omega\tau'')^{1/2}$ ;  $m$  代表极化率; $\tau$ 、 $\tau'$ 、 $\tau''$  表示不同的弛豫机制,反应极化单元的平均尺度<sup>[20]</sup>。

### 3 反演方法与结果

#### 3.1 反演算法的选择

反演时采用最小二乘算法,对其初始值选取的讨论可参照文献[12],文献中论述该方法的精确性、稳定性与唯一性。该方法具有对复电阻率幅值曲线以及相位曲线拟合较好、不易陷入局部极小值的特点,克服了较为盲目选取初始值而对结果带来的不良影响。

为比较该算法相对于其他反演算法的优越性,本文选择递推反演算法对以上实验数据进行反演<sup>[22]</sup>,从 61 个频点中抽取 4 个频点的数据参与计算,选择的四个频点分别为:0.01 Hz、0.05 Hz、7 943.287 Hz 和 10 000 Hz,结果见图 3 和表 1。

表 1 不同反演算法结果比较

Table 1 Results comparison of different inversion algorithms

算法	反演模型	均方根误差(RMSE)
递推反演	单 Cole-Cole	4.18
最小二乘(随机选取初始值)	单	1.086

从图 3 和表 1 中可以清晰地看见:随机选取初始值的最小二乘算法相对于递推反演算法在多频点的频谱参数反演中具有明显优势。这是因为递推反演算法只考虑了其中 4 个频点数据,在测量时难免

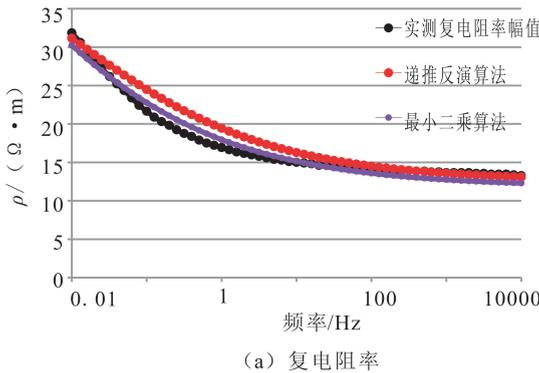
会存在干扰,对反演结果产生巨大的影响;相反最小二乘则是对整个频点的综合估计,个别差质量数据点将不受影响,且采用随机选取初始值的方法,因此该算法是反演估算岩石频谱参数的较好选择。

#### 3.2 最小二乘反演结果

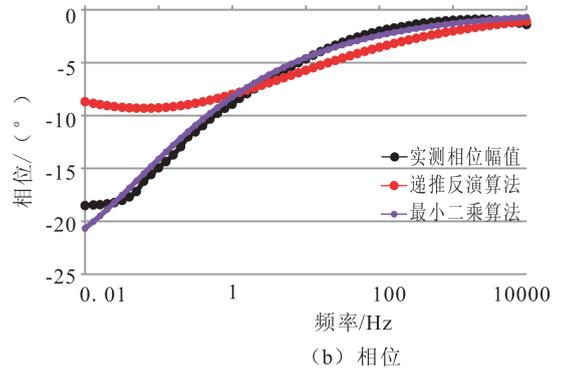
采用随机选择初始值的最小二乘算法对以上四个导电模型进行反演计算,结果表明它们都能较好地拟合复电阻率以及相位曲线。本次反演复电阻率幅值单位取欧姆米,相位单位取度。目标函数为:

$$\Delta = A \sum_{i=1}^N [\rho_{si}(\omega) - \rho_{li}(\omega)]^2 + B \sum_{i=1}^N [\phi_{si}(\omega) - \phi_{li}(\omega)]^2 \quad (7)$$

式中: $\rho_{si}(\omega)$ ,  $\phi_{si}(\omega)$  分别代表频率为  $\omega_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, N$ ) 时实际测量的岩石复电阻率幅值和相位值;  $\rho_{li}(\omega)$ ,  $\phi_{li}(\omega)$  分别代表频率为  $\omega_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, N$ ) 时理论计算的岩石复电阻率幅值和相位值。如果取  $A=1, B=0$ , 则只有复电阻率幅值参与计算; 同样取  $A=0, B=1$ , 则只有相位参与计算。从上式可以清楚地看到在没有噪声干扰的情况下  $\Delta$  越接近 0, 表示最终整体拟合效果越好。由于篇幅有限, 本文只给出其中某块岩芯拟合结果(图 4)。



(a) 复电阻率



(b) 相位

图 3 不同反演算法结果比较

Fig.3 Results comparison of different inversion algorithms

图 4 中(a)、(b)、(c)、(d)所对应复电阻率和相位曲线拟合的均方根误差(RMSE)分别为:1.086, 0.426, 0.896, 1.085。就此块页岩岩芯而言:双 Cole-Cole 模型拟合误差最小, Cole-Cole 乘 Brown 模型次之, 单 Cole-Cole 模型和 Dias 模型拟合较差。单 Cole-Cole 模型在高频(>100 Hz)对复电阻率拟合效果较差, 这可能与在高频阶段存在电磁感应耦合效应有关, 因此单 Cole-Cole 模型不适合于在整个宽频范围内对测量数据进行拟合。对于 Dias 模型

表达式中各个频谱参数都有非常明确的物理含义, 如  $\eta = \frac{\sqrt{\tau^n}}{\tau}$  反映的是极化电流与感应电流的相对大小;

$$\sigma = \frac{1}{1 + \frac{\tau'}{\tau}(1-m)}$$

表示页岩空隙中受极化影响的部分。但是其对相位拟合效果较差, 可能与 Dias 模型主要描述含金属矿物颗粒的复电阻率特性有关, 而该块岩石所含金属颗粒稀少, 因此拟合效果较差。结果是否属实需进行岩石矿物分析以论证。Cole-

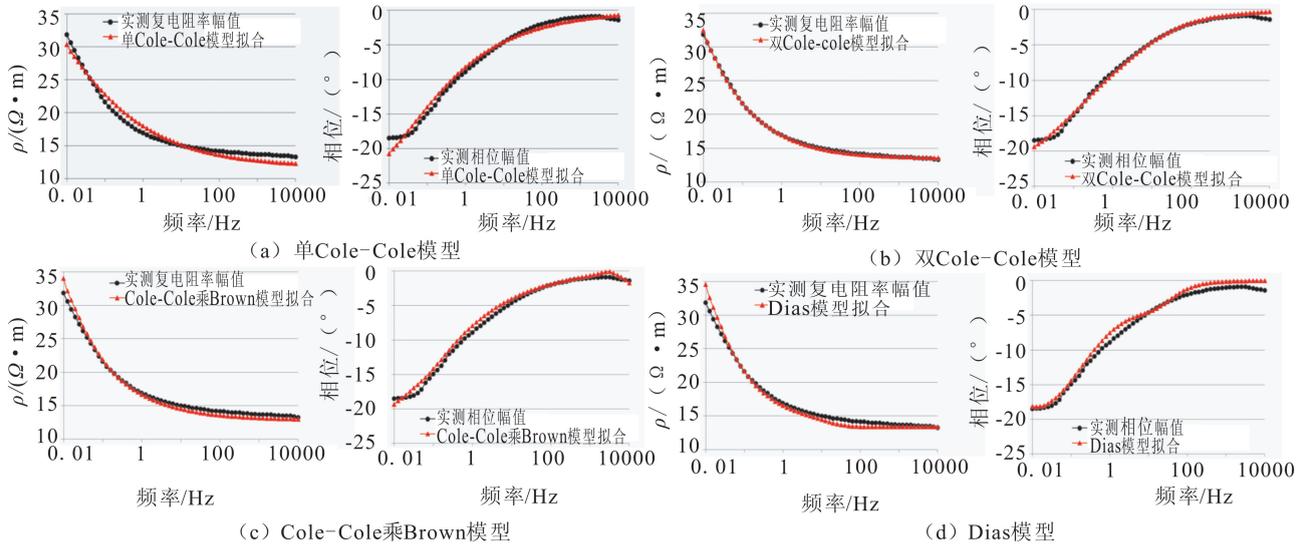


图4 实测复电阻率相位联合反演结果

Fig.4 The joint inversion results of the measured complex resistivity and phase

Cole 乘 Brown 模型中具有明确的激电谱和电磁谱的表达式,但在高频阶段对复电阻率的拟合效果不是很好,这可能与 Brown 模型主要是反映地层中电磁感应耦合效应有关。

对实测曲线进行插值求导发现:在 0.01 Hz 处复电阻率幅值下降最快,复电阻率相对于频率的变化率最大,达到 14.93,且此频点对应的相位绝对值亦为全频段最大值 18.50°;而在 3 164.01 Hz 处复电阻率幅值变化非常缓慢,复电阻率相对于频率的变化率最小值为 0,此频点对应的相位绝对值亦为全频段最小值 0.87°。

双 Cole-Cole 模型对于本次实验所取的其他岩芯的复电阻率和相位曲线也能以较小误差反演拟合,因此本文基于双 Cole-Cole 模型反演得到各频谱参数。考虑到只有极化率和电阻率参数在地球物理勘探解释中得到广泛应用,因此笔者在这里只给出以上两个参数,详见表 2。表中还给出了岩芯所属层位和深度以及实验室岩样分析的总有机碳含量(TOC)。

表 2 某井页岩岩芯频谱参数反演结果

Table 2 Spectral parameters inversion results of the shale cores in a certain well

样品编号	井深/m	层位	岩性	$\rho_0/(\Omega \cdot m)$	$m$	TOC/%
A	1 687.22	罗惹坪组	黑色页岩	3 930.19	0.04	0.61
B	1 688.67	罗惹坪组	黑色页岩	3 992.66	0.15	0.62
C	1 929.46	龙马溪组	黑色页岩	153.65	0.21	1.18
D	1 940.34	龙马溪组	黑色页岩	172.67	0.50	4.59
E	2 036.55	龙马溪组	黑色页岩	336.71	0.65	2.2
F	2 042.28	龙马溪组	黑色页岩	189.31	0.52	2.11

从表 2 中可发现:位于龙马溪组底部的 D、E、F 岩样的总有机碳含量(TOC)均  $>2\%$ 。这与页岩气富集区的形成条件相符,且极化率  $m$  相对其他岩芯均较高,而零频电阻率  $\rho_0$  却相对较低。从本次实验结果分析来看,该井所取岩芯的极化率  $m$  与 TOC 含量存在一定相关性,即富总有机碳(TOC)含量高的岩芯其极化率  $m$  也较高,反之 TOC 低其对应极化率  $m$  也较低,这与本次实验所取岩芯属于深水沉积环境下的海相沉积物以及该环境下沉积物中有机碳和黄铁矿存在一定的相关性有关。

## 4 结论与讨论

通过对富总有机碳含量的页岩岩芯样品的复电阻率、相位进行测定和联合反演,可以得到以下几点认识:

(1) 本次实验所取富有机质页岩样品的复电阻率具有较强的频散特性,表现为极化率参数的异常。页岩标本物性测试测定了试验区龙马溪组底部页岩具有低电阻率、高极化率物性特征。

(2) 富有机质页岩复电阻率幅值随着频率的升高而降低,在高频阶段变化相对低频较缓,从以上分析可以看出富有机质页岩相位绝对值的大小与复电阻率相对频率的变化率成正比,这也与肖占山等对泥质砂岩的研究结果一致<sup>[11-12]</sup>。

(3) 以上四个模型中,双 Cole-Cole 模型与 Cole-Cole 乘 Brown 模型对富有机质页岩的复电阻率以及相位曲线拟合效果较好,尤以双 Cole-Cole 模型最好,单 Cole-Cole 模型与 Dias 模型拟合效果

相对较差。

(4) 对岩石频谱参数反演采用随机选取初始值的最小二乘算法是较好选择。

本文在只选择了几种常用导电模型的情况下,得出双 Cole-Cole 模型可以较好描述富有机质页岩的复电阻率和相位,这具有一定局限性。但是通过该模型反演得到某井中富有机质页岩表现出低电阻率、高极化率电性特征,这对使用时频电磁勘探技术和频谱激电法寻找该区块富总有机碳含量的优质页岩储层以及页岩储层复电阻率测井方法的实现,都具有重要的指导与借鉴意义。为了论证该方法的实用性,尚需进行许多其他的研究工作,如使用其他导电模型参与反演计算,取不同地质条件的富有机质页岩进行高温高压条件下不同饱和度的测试实验,从而建立不同环境下的 TOC、电阻率和极化率之间的关系等。

## 参考文献

- [1] Brown R J. EM Coupling in Multifrequency IP and a Generalization of the Cole-Cole Impedance Model[J]. Geophysical Prospecting, 1985, 33(4): 282-302.
- [2] Dias C A. Analytical Model for a Polarizable Medium at Radio and Lower Frequencies [J]. Geophysical Research, 1972, 77(26): 4945-4956.
- [3] Wait J R. Overvoltage Research and Geophysical Applications [M]. London: Pergamon Press, 1959: 22-28.
- [4] Wait J R. Geo-Electromagnetism [M]. New York: Academic Press, INC, 1982.
- [5] Ward S H, Fraser D C. Conduction of Electricity in Rocks [J]// Mining Geophys, 1967( II ): 197-223.
- [6] Pelton W H, Ward S H, Hallof W H, et al. Mineral Discrimination and Removal of Inductive Coupling with Multifrequency IP [J]. Geophysics, 1978, 43(3): 588-609.
- [7] Wong J. An Electrochemical Model of the IP Phenomenon in Disseminated Sulfide Ores [J]. Geophysics, 1979, 44: 1245-1265.
- [8] 程辉,底青云.常用的复电阻率频率谱参数模型对比[C]//第九

届中国国际地球电磁学术讨论会论文集, 2009: 158-160.

- [9] Jing X D, Gillespie A, Trewin B M. Resistivity Index from Non-equilibrium Measurements Using Detailed In-situ Saturation Monitoring [C]// SPE Offshore European Conference, Aberdeen, 1993: 456-464.
- [10] 蒋宏耀,张赛珍.岩石和矿物物理性质论文集[M].北京:地震出版社, 1988: 99-187.
- [11] 肖占山,徐世浙,罗延钟.岩石复电阻率频散特征的机理研究[J].浙江大学学报:理学版, 2006, 23(5): 578-584.
- [12] 肖占山,徐世浙,罗延钟.泥质砂岩复电阻率的频率特性实验[J].高校地质学报, 2006, 12(1): 123-130.
- [13] 石昆法,吴璐苹,李英贤,等.储层条件下岩石样品电性参数测定及规律[J].地球物理学报, 1995(S1), 38(1): 296-302.
- [14] 范宜仁,陆介明,王光海.岩石电阻率频散现象的实验研究[J].石油大学学报:自然科学版, 1994, 18(1): 17-23.
- [15] 柯式镇,冯启宁.岩石复电阻率频散模型及其参数的获取方法[J].测井技术, 1999, 23(6): 416-418.
- [16] 罗延钟,张桂青.频率域激电法原理[M].北京:地质出版社, 1988: 45-125.
- [17] 苏朱刘,胡文宝.复视电阻率法(CR)在油气预测中的应用[J].石油地球物理勘探, 2005, 40(4): 467-471.
- [18] 苏朱刘,胡文宝,颜泽江,等.油气藏上方激电谱的野外观测试验结果及分析[J].石油天然气学报, 2009, 31(6): 59-64.
- [19] Dias C A. Developments in a Model to Describe Low-frequency Electrical Polarization of Rocks [J]. Geophysics, 2000, 65(2): 437-451.
- [20] 丁柱,童茂松,潘涛.岩石复电阻率 Dias 模型及其反演方法[J].大庆石油地质与开发, 2005, 24(5): 90-92.
- [21] 李鹏飞,严良俊,谢兴兵,等.基于最小二乘的岩石频谱参数反演初始值选取的讨论[J].地震工程学报, 2014, 36(3): 569-574.
- [22] 阮百尧,罗润林.一种新的复电阻率频谱参数的递推反演方法[J].物探化探计算技术, 2003, 25(4): 298-301.
- [23] Yu G, Vozoff K, Durney D W. Effect of Pore Pressure on Compressional Wave Velocity in Coals [J]. Exploration Geophysics, 1991, 22: 475-480.
- [24] 解滔,杜学彬,郑国磊,等.水平两层均匀介质中井下电阻率观测信噪比的理论计算[J].西北地震学报, 2012, 34(1): 18-22.
- [25] 王丽丽,梁庆国,孙文,等.不同厚度层状边坡动力响应的模型试验研究[J].地震工程学报, 2013, 35(3): 590-596.

## 更正

《地震工程学报》2015 年第 37 卷增刊 1 中文目录中页码为 91 页的文章标题有误,原标题为“易县台形变异常映震情况分析”,应为:“河北易县台形变异常映震能力分析”。

特此更正。