

文章编号: 1001-1986(2010)03-0061-05

泥质砂岩激发极化弛豫时间谱微观机理

王 谦, 关继腾, 房文静

(中国石油大学物理科学与技术学院, 山东 东营, 257061)

摘要: 泥质砂岩激发极化弛豫时间谱含有丰富的地层孔隙结构信息。利用串联毛管模型, 建立了描述激发极化效应的数学物理模型, 数值模拟了激发极化充放电的全过程; 利用阻尼最小二乘算法, 对理论计算的激发极化衰减谱进行多指数反演, 分析了岩石孔隙度、阳离子交换量、溶液浓度、温度、溶液类型和放电时间等因素对激发极化弛豫时间谱的影响。结果表明, 弛豫时间谱不仅反映了岩石内部的微观孔隙结构, 而且表现了离子扩散迁移恢复平衡的过程。

关键词: 串联毛管模型; 激发极化效应; 多指数反演; 弛豫时间谱

中图分类号: P631 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.03.014

The microscopic mechanisms of induced polarization relaxation time spectra in shaly sandstone

WANG Qian, GUAN Jiteng, FANG Wenjing

(Faculty of Physical Science and Technology, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: The relaxation time spectra of induced polarization in shaly sandstone has a wealth of information of formation. This paper established the mathematical-physical model of induced polarization based on serial capillary model, and the charging and discharging processes of induced polarization were simulated by numerical method. Meanwhile, the decay curve of induced polarization was inversed from the multi-exponential inversion by Levenberg-Marquardt. The influences of porosity, cation exchange capacity, concentration of solution, temperature, and discharging time etc. on the induced polarization relaxation time spectrum were analyzed. The result shows that relaxation time spectra is not only the expression of the microscopic pore structure in rock, but also the diffusion process of ion reprecipitation.

Key words: serial capillary model; induced polarization; multi-exponential inversion; relaxation time spectrum

激发极化法是开发地下资源重要的电化学勘探方法。储层岩石的极化率衰减曲线主要依靠实验方法研究, 其衰减谱含有丰富的地质信息。目前对衰减谱的研究只是利用不同的反演方法得到极化率衰减的弛豫时间谱^[1-4]。由于岩石物理实验对岩样微观孔隙结构、流体分布和电化学性质等特性难以控制、观察与测定, 因此, 单纯的岩石实验研究很难准确地获取激发极化效应的各种影响因素及其定量规律, 也不能反映孔隙中离子运移的微观机制, 因而理论研究激发极化效应弛豫时间谱具有现实意义。

泥质砂岩的岩石颗粒因带有多余的负离子而吸引溶液中的阳离子, 在其周围形成双电层。在岩石的两端施加一恒定外电场后, 局部浓度发生变化, 导致岩石颗粒与溶液接触面的双电层发生形变, 产生极化电场。去掉电场后, 极化电场逐渐消失, 并且

离子逐渐恢复到原始状态, 同时形成激发极化电位衰减谱。本文依据激发极化机理的浓差极化假说和双电层形变假说, 利用数值模拟方法通过理论计算给出了泥质砂岩极化率的衰减曲线。利用阻尼最小二乘算法, 对其进行多指数反演, 得到了相应的弛豫时间谱, 并分析了岩石孔隙结构和电化学参数等因素对激发极化弛豫时间谱的影响。研究表明, 泥质砂岩激发极化弛豫时间谱反映了岩石内部的微观孔隙结构及溶液中离子扩散迁移恢复平衡的过程。

1 泥质砂岩激发极化效应的数学描述

1.1 串联毛管模型^[5]

实际岩石是由大小及数量不同的孔隙与粗细及数量不同的喉道相互连通而形成的错综复杂的网络系统, 因此, 实际岩石孔隙结构可以由串联毛管模

收稿日期: 2009-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(40874064)

作者简介: 王 谦(1983—), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 从事电磁场理论和岩石物理性质研究。

型模拟。毛管模型中半径较大的部分(粗毛管)表示孔隙,半径较小的部分(细毛管)表示喉道,并且设所有的孔隙大小相同,所有喉道直径、长度都相等。

1.2 激发极化效应的数学物理方程

根据毛管模型和电化学理论^[6],对于 $z-z$ 价对称盐类二元电解质水溶液,单一毛管中的电流强度为

$$\frac{I}{n_0} e_x = Fz(w_+ - w_-)e_x, \quad (1)$$

式中 I 为单位面积上的电流强度, A; n_0 为单位面积上的毛管数; $F = 9.65 \times 10^4 \text{ Cmol}^{-1}$ 为法拉第常数; z 为组分的价数; w_+ 与 w_- 为毛管中正负离子流量,其表达式为

$$w_+ = -v_+ zF \int_0^{r_0} c_+ 2\pi r dr \frac{\partial u}{\partial x} - D_+ \int_0^{r_0} \frac{c_+}{c_0} 2\pi r dr \frac{\partial c_{0+}}{\partial x}; \quad (2)$$

$$w_- = v_- zF \int_0^{r_0} c_- 2\pi r dr \frac{\partial u}{\partial x} - D_- \int_0^{r_0} \frac{c_-}{c_0} 2\pi r dr \frac{\partial c_{0-}}{\partial x}, \quad (3)$$

式中 v_+ 与 v_- 为毛管中正负离子的迁移率; c_0 为毛管中离子的浓度; c_+ 与 c_- 为毛管内溶液正负离子分布浓度, $c_{\pm} = c_{0\pm} \exp\left(\frac{\mp zF\psi}{RT}\right)$, 为双电层电位, R 为气体普适常数, T 为绝对温度; u 为在稳恒电流 I 下毛管中的电位; $D_+ = RTv_+$ 与 $D_- = RTv_-$ 为毛管中正负离子的扩散系数, r_0 为毛管的半径。

毛管中正负离子流量分别满足质量守恒方程,即

$$\nabla \cdot (w_+ e_x) = -\frac{\partial c_0}{\partial t} \int_0^{r_0} \exp\left(\frac{-zF\psi}{RT}\right) 2\pi r dr; \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (w_- e_x) = -\frac{\partial c_0}{\partial t} \int_0^{r_0} \exp\left(\frac{zF\psi}{RT}\right) 2\pi r dr. \quad (5)$$

当岩石通入稳恒电流时,根据物质守恒定律与电流恒定条件,在串联毛管模型的毛管中依据式(1)、式(2)、式(4)建立描述激发极化效应的数学方程。充电过程中,毛管中满足的数学方程为:

$$\left[L_{12} - L_{11} \frac{(L_{12} - L_{22})}{(L_{11} - L_{21})} \right] \frac{\partial^2 c_0}{\partial x^2} = -\frac{\partial c_0}{\partial t} \int_0^{r_0} \exp\left(\frac{-zF\psi}{RT}\right) 2\pi r dr; \quad (6)$$

$$\frac{I}{n_0} e_x = \left[Fz(L_{11} - L_{21}) \frac{\partial u}{\partial x} + Fz(L_{12} - L_{22}) \frac{\partial c_0}{\partial x} \right] e_x, \quad (7)$$

式中 $L_{11} = -v_+ zF \int_0^{r_0} c_+ 2\pi r dr$; $L_{12} = -D_+ \int_0^{r_0} \frac{c_+}{c_0} 2\pi r dr$;

$$L_{21} = v_- zF \int_0^{r_0} c_- 2\pi r dr; \quad L_{22} = -D_- \int_0^{r_0} \frac{c_-}{c_0} 2\pi r dr.$$

放电过程中,毛管中满足的数学方程为:

$$\left[L_{12} - L_{11} \frac{(L_{12} - L_{22})}{(L_{11} - L_{21})} \right] \frac{\partial^2 c_0}{\partial x^2} = -\frac{\partial c_0}{\partial t} \int_0^{r_0} \exp\left(\frac{-zF\psi}{RT}\right) 2\pi r dr; \quad (8)$$

$$\left[Fz(L_{11} - L_{21}) \frac{\partial u}{\partial x} + Fz(L_{12} - L_{22}) \frac{\partial c_0}{\partial x} \right] e_x = 0. \quad (9)$$

考虑串联毛管模型的连续性和周期性条件,利用描述激发极化效应的数学物理方程,对激发极化过程进行数值模拟。

充电初始时刻溶液浓度沿轴向均匀分布,由式(1)、式(2)差分数值计算充电初始时刻毛管两端的电位差为 u_1 。在充电过程中,结合式(1)、式(2)、式(4)对式(6)和式(7)进行有限差分计算,可得到充电过程中毛管两端电位为 $u_2(t)$ 。由双电层理论计算充电过程中毛管两端形变电位差 $\Delta u_2(t)$,所以充电过程中极化率计算公式为:

$$\eta_{\text{充}}(t) = \frac{u_2(t) + \Delta u_2(t) - u_1}{u_2(t) + \Delta u_2(t)}. \quad (10)$$

充电结束时刻毛管两端电位为 u_3 ,双电层形变电位为 Δu_3 ,所以放电开始时刻的电位为 $u_3 + \Delta u_3$ 。在放电过程中,结合式(1)、式(2)、式(4)对式(8)和式(9)进行有限差分计算,可得到放电过程中毛管两端电位为 $u_4(t)$ 。同理,得毛管两端形变电位差 $\Delta u_4(t)$,所以放电过程中极化率计算公式为:

$$\eta_{\text{放}}(t) = \frac{u_4(t) + \Delta u_4(t)}{u_3 + \Delta u_3}. \quad (11)$$

利用上述理论数值模拟激发极化现象的充放电过程,从理论上得到了激发极化效应极化率的衰减曲线,定量计算了泥质砂岩储渗参数和溶液浓度、阳离子交换量等因素对激发极化效应的影响。

2 极化率衰减谱的多指数反演

岩石内部是由一系列大小不等的孔隙群体组成,所以在岩石激发极化效应中测得的极化率是一系列单个孔隙极化率的叠加。因此,随时间变化的极化率 $\eta(t)$ 可以表示为^[7]

$$\eta(t) = \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} f(T) \exp\left(-\frac{t}{T}\right) dT, \quad (12)$$

式中 t 为极化率的测量时间; $f(T)$ 是极化率的幅度; T 为弛豫时间; T_{\min} 和 T_{\max} 分别是最小、最大弛豫时间常数。

式(12)离散后的线性方程组为:

$$\eta = Af, \quad (13)$$

式中 $\eta_{m \times 1} = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m)^T$; $f_{n \times 1} = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T$; $A_{m \times n} = [A_{ij}]_{m \times n} = [\exp(-t_i/T_j)]_{m \times n}$ 。

其中 $\eta_{m \times 1}$ 为激发极化数值模拟极化率衰减信号; t_i 为 $\eta_{m \times 1}$ 中第 i 个极化率衰减信号对应的测量时间; $T_j (j = 1, 2, 3, \dots, n)$ 为预先指定的弛豫时间; $f_{n \times 1}$ 是反演计算的各个弛豫时间 T_j 对应的极化率谱幅度值。 T_j 的选择一般是在 (T_{\min}, T_{\max}) 之间对数选取 n 点,由文献[7]可知 n 最优选取 32~64,即 T_j 的选取如下:

$$T_j = 10^{\lg(T_{\min}) + (j-1)d}, \quad j=1, 2, \dots, n, \quad (14)$$

$$\text{式中 } d = \frac{\lg T_{\max} - \lg T_{\min}}{n-1}.$$

同时为了保证激发极化弛豫时间谱的真实性,在反演过程中应该保证一定的弛豫时间分布点数和覆盖范围。这里选取 T_j 范围为(0.01, 10 000) ms。对式(13)求解即可得到极化率的弛豫时间谱。为了得到平滑连续的反演结果,采用了阻尼最小二乘算法^[8-9]。首先,给定初始模型 f ,由式(13)求出预测极化率信号 η' ,并计算数值模拟极化率信号 η 与 η' 的误差 $\Delta\eta$,即

$$\Delta\eta = \eta - \eta'. \quad (15)$$

利用 $\Delta\eta$ 求出极化率谱幅度的修正量 Δf ,即

$$\sum_{j=1}^n A_{ij} \Delta f_j = \Delta\eta_i, \quad (i=1, 2, \dots, m). \quad (16)$$

采用阻尼最小二乘算法,将式(16)变为

$$(A^T A + \alpha^2 I) \Delta f = A^T \Delta\eta, \quad (17)$$

式中 I 为单位矩阵; α^2 为阻尼因子。

极化率弛豫谱分量幅度残差对极化率弛豫谱分量幅度近似值的修正公式为:

$$f^{(p+1)} = f^p + \Delta f, \quad (18)$$

式中 f^p 为第 p 次迭代计算的极化率弛豫谱分量幅度值; Δf 为第 p 次迭代计算的极化率谱幅度的修正量。

在物理意义上,极化谱的分布幅度不能小于零,所以,对 f_j 进行非负性限制。这里采用的方法为:当 f_j 为负值时,令其为一个极小的数,重新进行迭代计算,直到方程的解满足给定的约束条件为止。通过上述算法,求解式(13),可以得到连续平滑的弛豫时间谱。

3 数值模拟结果与讨论

3.1 极化率弛豫时间谱的数值模拟

利用前述的激发极化效应的数学模型,选取计算参数见表1,模拟了激发极化效应充放电的过程。其极化率随时间的变化曲线如图1所示。激发极化效应主要是由双电层形变和浓差极化引起的。从图1中可以看出,极化率主要是由双电层形变引起的,离子浓度变化产生的极化率只占很小的一部分。图2是由极化率衰减曲线反演得到的弛豫时间谱,图中给出了双电层形变和浓差极化极化率对总极化率弛豫时间谱的贡献。从图2可知,双电层形变和浓差极化极化率的弛豫时间谱与总极化率弛豫时间谱主峰的位置是一致的,这说明浓差极化效应和双

电层形变效应对激发极化弛豫时间谱的影响是一致的。

表1 激发极化极化率计算基本参数表
Table 1 Basic parameters to calculate the polarizability of induced polarization

参数	数值	参数	数值
泥质砂岩孔隙度 φ	0.16	阳离子交换 $Q_v/\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0.1
充电电流 $j/\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$	1.0	溶液浓度 $C_0/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1 000
温度 $T/$	25	Na^+ 迁移率	50.1
		$V_+/\text{cm}^2\cdot\text{S}\cdot\text{mol}^{-1}$	
溶液	NaCl	Cl^- 迁移率	76.3
		$V_-/\text{cm}^2\cdot\text{S}\cdot\text{mol}^{-1}$	

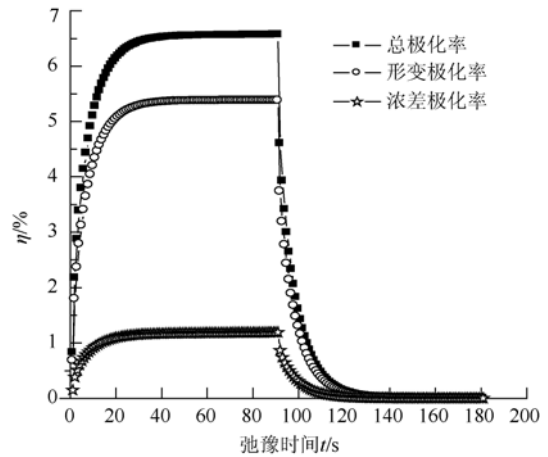


图1 激发极化极化率与时间的关系

Fig. 1 Relationship between time and induced polarizability

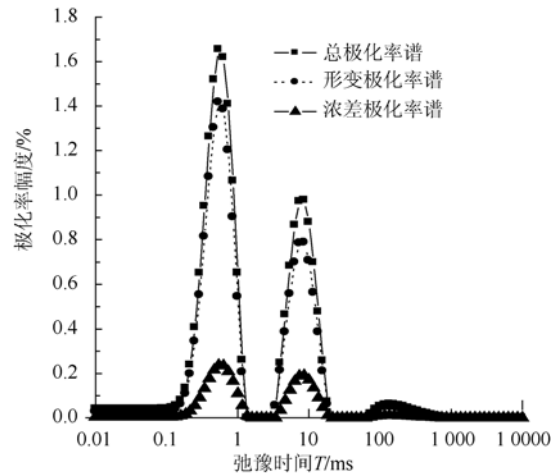


图2 极化率衰减曲线的弛豫时间谱

Fig. 2 Relaxation time spectra of IP decay curve

在其他参数不变的情况下,改变充电电流密度的大小,计算极化率的弛豫时间谱,结果表明,在一定电流强度范围内,弛豫时间谱变化范围非常小,可以认为充电电流强度对极化率与弛豫时间谱没有影响,这与文献[1]的结论一致。

3.2 孔隙度对弛豫时间谱的影响

为了研究岩石孔径分布对弛豫时间谱的影响,研究了 3 种不同孔隙度下的极化率弛豫时间谱。如图 3 所示,随着孔隙度的增大,极化率幅度降低,弛豫时间谱的第一个主峰位置不变,第二个主峰随孔隙度的增大逐渐左移。由此可知,随着孔隙度的增大,毛管的平均半径越大,离子的扩散通道越大,扩散速度越快,所以弛豫时间越短。

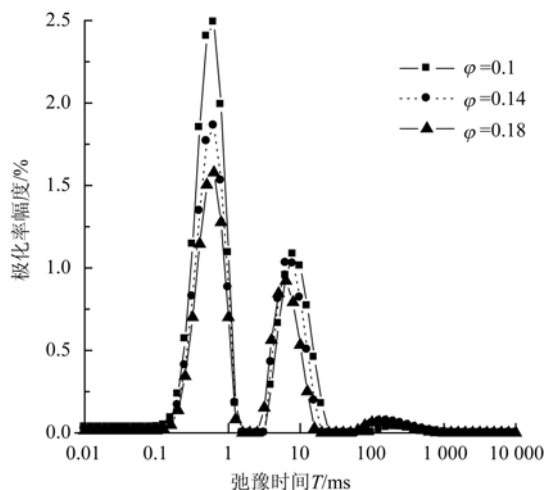


图 3 不同孔隙度的弛豫时间谱

Fig. 3 Relaxation time spectra for different porosities

3.3 溶液浓度对弛豫时间谱的影响

在其他参数不变的情况下,改变溶液浓度的大小,对激发极化弛豫时间谱的影响如图 4 所示。从图 4 中可以看出,随着溶液浓度的增加,极化率的幅度降低,但是并不改变谱主峰的位置,说明溶液浓度对弛豫时间谱没有影响,这与文献[1]的实验结论一致。

3.4 阳离子交换量对弛豫时间谱的影响

图 5 是不同阳离子交换量下极化率弛豫时间谱。从图 5 可知,随着阳离子交换量的增加,极化率幅度升高,第一个主峰位置不动,第二个主峰的位置向右偏移,即随阳离子的增加弛豫时间谱逐渐展宽。这主要是由于阳离子交换量是岩石表面和内部溶液离子交换能力的体现。当阳离子量增大,可交换与吸附的离子增多,由于离子间的相互作用,离子扩散的速度变慢,离子恢复到平衡状态的时间就长,因此,导致弛豫时间谱展宽右移。

3.5 温度对弛豫时间谱的影响

温度影响离子的热运动状况,所以它对弛豫时间谱也有一定的影响。图 6 给出了不同温度下的弛豫时间谱。从图 6 中可以看出,温度越高,弛豫时间谱越窄,极化率幅度值越高。这是因为温度越高,

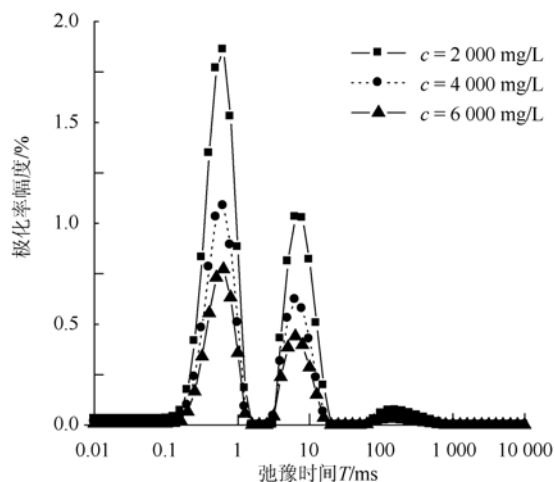


图 4 不同浓度下的弛豫时间谱

Fig. 4 Relaxation time spectra at different concentration

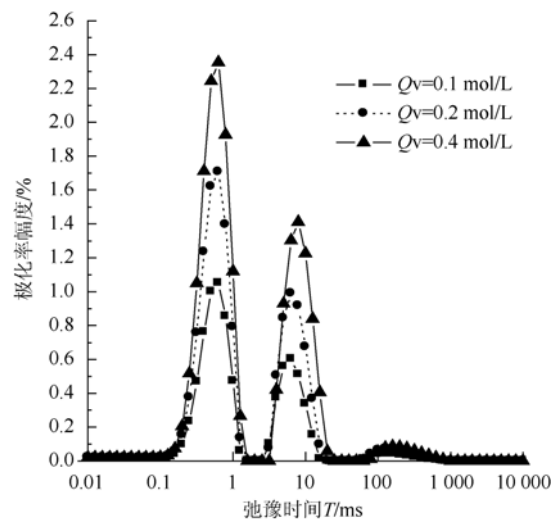


图 5 不同阳离子交换量下的弛豫时间谱

Fig. 5 Relaxation time spectra at different cation exchange capacity

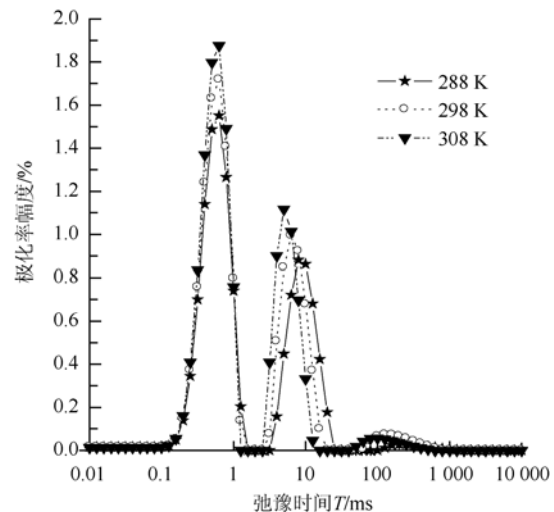


图 6 不同温度下的弛豫时间谱

Fig. 6 Relaxation time spectra at different temperatures.

离子的热运动越剧烈,扩散速度越快,弛豫时间也就越短;同时双电层表面的离子交换吸附作用越强,导致双电层形变电位越高,极化率值越大。

3.6 KCl 溶液和 NaCl 溶液弛豫时间谱的差异

图 7 给出了不同类型溶液的极化率弛豫时间谱。NaCl 溶液和 KCl 溶液具有相同的摩尔浓度,即溶液中这两种离子的数目相同。从图 7 中可以看出, KCl 溶液的极化率幅度高于 NaCl 溶液,第一个主峰的位置相同,第二个主峰相对 NaCl 向左偏移,这主要是由于 KCl 的离子迁移率大于 NaCl,所以 KCl 溶液中离子的扩散速度快,弛豫时间短,弛豫时间谱窄,这与文献[10]的结果一致。同时,也说明在摩尔浓度及溶液结构类型相同的条件下,溶质的质量越大极化率值越高。

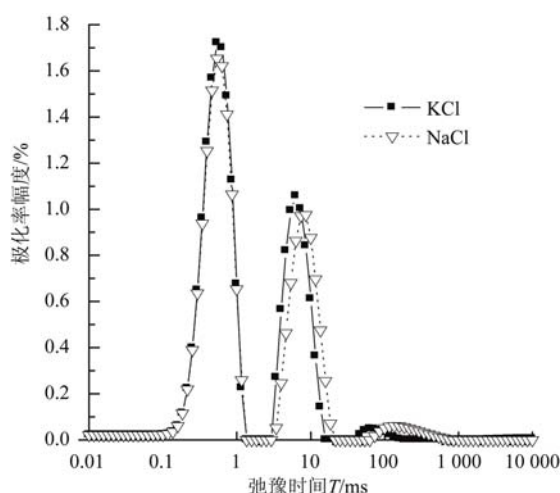


图 7 不同溶液类型的弛豫时间谱

Fig. 7 Relaxation time spectra in different solutions

3.7 不同放电时间对弛豫时间谱的影响

充电 120 s 后,选择不同的放电时间,其弛豫时间谱如图 8 所示。随着放电时间的延长,第一个主峰的位置和峰值几乎重合,第二个主峰逐渐升高左移,峰数由双峰到三峰。这主要是由于随着放电时间的延长,离子恢复平衡逐渐充分,反映出大分量的弛豫时间谱。

4 结 论

a. 在外加电场作用下,带电离子的浓度分布发生变化。由于浓度的变化使固液界面的双电层结构发生了变化,即双电层形变和浓差极化都是由离子扩散迁移引起的。浓差极化控制着激发极化效应随时间的变化过程,双电层形变不控制其随时间的变化过程,但影响激发极化效应的强弱。双电层形变和浓差极化的衰减过程是离子扩散迁移恢复平衡的过程,因此,它们对弛豫时间谱的影响是一致的。

b. 弛豫时间谱可以反映岩石内部的孔径分布,与孔隙结构有关,而与溶液浓度无关。但是阳离子

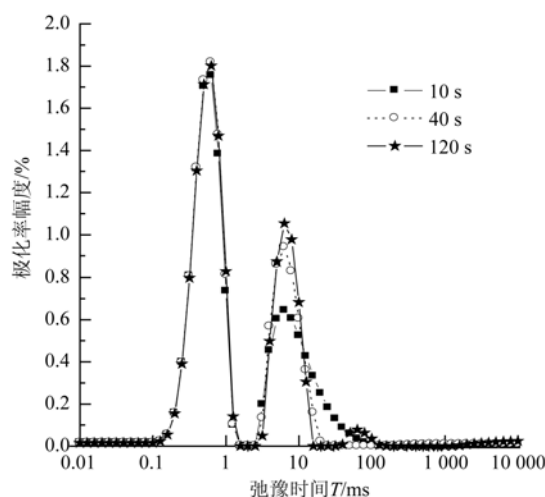


图 8 不同放电时间对弛豫谱的影响

Fig. 8 Relaxation time spectra at different discharging times

交换量反映岩石表面与溶液之间的离子交换与吸附作用,间接地影响离子扩散恢复平衡速率,所以,弛豫时间谱随阳离子的交换量的增加,逐渐展宽。

c. 弛豫时间谱的分布也反映了离子恢复平衡过程中扩散作用的强弱。所以,温度、离子的迁移率等影响离子扩散迁移的物理化学因素也影响弛豫时间谱的分布。同时,只有在较长的放电时间下,才能得到弛豫时间谱的大分量,反映出更丰富的谱信息。

参考文献

- [1] 王伟男. 泥质砂岩的物理性质及其测井应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 82-89.
- [2] Tong M S. Estimation of permeability of shaly sand reservoir from induced polarization relaxation time spectra[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering., 2004, 45: 31-40.
- [3] 童茂松. 岩石激发极化弛豫时间谱与孔隙结构、渗透率的关系[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 116-122.
- [4] 王宏建, 童茂松. 利用激发极化确定泥质砂岩渗透率的实验研究[J]. 测井技术, 2008, 32(4): 296-299.
- [5] 范业活, 关继腾, 房文静. 含水泥质砂岩导电特性的机理研究[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2005, 18(2): 57-64.
- [6] 范业活. 储层岩石电化学特性的毛管模型理论及应用研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2005
- [7] 童茂松. 岩石激发极化衰减谱的多指数反演[J]. 物探化探计算技术, 2005, 28(2): 133-136.
- [8] 翁爱华, 李舟波, 王雪秋. 核磁测井数据弛豫谱反演软件研究[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(4): 395-397.
- [9] 王为民, 李培, 叶朝辉. 核磁共振弛豫信号的多指数反演[J]. 中国科学 A 辑, 2001, 31(8): 730-736.
- [10] 童茂松. 利用激发极化弛豫时间谱确定渗透率的实验研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(2): 625-629.