

储层岩石流动电位的电化学影响因素

于华, 关继腾, 程媛媛

(中国石油大学 物理科学与技术学院, 山东 东营 257061)

摘要: 利用储层岩石的流动电位特性描述油藏的流动特性已引起地球物理领域的关注。依据多孔介质中的双电层模型与毛管电化学理论, 建立了渗流场、离子流场和电流场的耦合关系, 数值模拟了泥质砂岩储渗特性和电化学因素对流动电位耦合系数的影响。结果表明: 当考虑储层岩石中存在浓差极化效应时, 流动电位耦合系数的绝对值随溶液浓度、阳离子交换量、孔隙度和渗透率的增大而增大; 浓差极化效应对流动电位具有放大作用。

关键词: 泥质砂岩; 动电效应; 平行毛管束模型; 流动电位; 浓差极化效应

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2012)01-0073-05

近年来, 对于储层中渗流场、电流场和离子流场相互作用效应在地球物理勘探中的应用有了越来越深入的认识, 地球物理场的相互作用效应将是今后地球物理探测新方法的基础。流动电位是指地层压力通过地层渗流过程转换成电位的一种宏观动电效应, 也称过滤电位。储层岩石的流动电位不仅依赖于孔隙空间中流体的性质和微观孔隙结构, 而且还取决于流体与岩石之间的相互作用及储层的电化学特性等因素。目前, 稳恒条件下流动电位的研究在理论和实验方面已经取得一定成果。工程上使用的流动电位计算公式利用的是平板模型推导出的亥姆霍兹公式, 但该公式不能正确地解释流动电位与地层水矿化度、阳离子交换量以及地层储渗特性之间的复杂变化关系, 也没有考虑储层岩石孔隙溶液中浓差极化效应对流动电位的影响, 还没有给出储层岩石储渗特性及电化学性质与流动电位的定量关系。在本次研究中, 将结合孔隙介质的微观圆直毛管模型, 构建稳恒条件下储层岩石渗流场、电流场和离子流场的耦合关系, 定量描述储层孔隙参数和电化学因素与流动电位的定量关系, 阐明储层岩石浓差极化效应对流动电位的影响。

1 储层岩石中三个物理场的数学描述

假设储层流体为不可压缩的牛顿流体, 考虑外加电场与双电层内电荷相互作用产生的电场力, 同时引入流体溶液中正负离子形成的渗透压力^[1-2], 根据平行毛管束模型, 毛管内流体流速 u 的动量方

程可以修正为

$$\mu \nabla^2 u = \nabla P + \rho \nabla U + RT \nabla (C_+ + C_-), \quad (1)$$

式中, P 为流体压力; U 为空间电位; μ 为流体黏度; R 为气体普适常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{k} \cdot \text{mol})$; T 为绝对温度; $RT(C_+ + C_-)$ 为电解质溶液理论中正负离子形成的渗透压力^[1-2], 称为范特霍夫 (Van t Hoff) 公式; C_+ 、 C_- 为正负离子的浓度, 且有

$$C_{\pm} = C_0 e^{\mp(ZF\psi)/(RT)}, \quad (2)$$

C_0 为地层溶液原始浓度, F 为法拉第常数, $F = 9.65 \times 10^4 \text{ C/mol}$, Z 为 Z - Z 价对称地层水溶液中的离子组分的价数; ψ 为双电层形成的电位; ρ 为电荷密度:

$$\rho = FZ(C_+ - C_-) = -2FZC_0 \sinh\left(\frac{ZF\psi}{RT}\right). \quad (3)$$

在毛管半径 r_0 远大于双电层厚度 λ_D , 即 $r_0 \gg \lambda_D$ 的条件下, 毛管内双电层形成的电位分布为^[2]

$$\psi = \zeta \exp[-(r_0 - r)/\lambda_D], \quad (4)$$

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon RT}{2F^2 Z^2 C_0}}, \quad r_0 = \sqrt{\frac{8k}{\varphi}},$$

式中, ζ 为 Zeta 电位, φ 为孔隙度, k 为渗透率。此时, 式(2)可以表示为

$$C_{\pm} = C_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\mp ZF\zeta)^n}{(RT)^n n!} e^{-\frac{n(r_0-r)}{\lambda_D}}. \quad (5)$$

利用电动边界条件和流动边界条件: $r=0$ 处有 $\partial u/\partial r = 0$, $\partial \psi/\partial r = 0$ 和 $r=r_0$ 处有 $u=0$, $\psi=\zeta$, 将式(3)、边界条件(5)代入式(1), 沿毛管截面积分得毛管内流速分布

收稿日期: 2010-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(40874064); 山东省自然科学基金项目(ZR2011DM002)

$$u(r) = \frac{r^2 - r_0^2}{4\mu} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\varepsilon \zeta}{\mu} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{r^2 - r_0^2}{4\mu} 2RT \frac{\partial C_0}{\partial x} - \frac{RT}{\mu} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-ZF\zeta)^n (\lambda_D)^2}{(RT)^n n!} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ZF\zeta)^n (\lambda_D)^2}{(RT)^n n!} \right] \frac{\partial C_0}{\partial x} \quad (6)$$

对于稀溶液,毛管内溶液正负离子摩尔通量为^[2]

$$q_+ = -v_+ ZFC_+ \frac{\partial U}{\partial x} - D_+ \frac{\partial C_+}{\partial x} + C_+ u, \quad (7)$$

$$q_- = v_- ZFC_- \frac{\partial U}{\partial x} - D_- \frac{\partial C_-}{\partial x} + C_- u, \quad (8)$$

式中, D_+ 、 D_- 分别为正、负离子扩散系数, $D_+ = RTv_+$, $D_- = RTv_-$; v_+ 、 v_- 分别为正、负离子迁移率。

将上式沿毛管截面积分,根据平行毛管束模型,得多孔介质中正、负离子流密度

$$W_+ = L_{11} \frac{\partial P}{\partial x} + L_{12} \frac{\partial U}{\partial x} + L_{13} \frac{\partial C_0}{\partial x}, \quad (9)$$

$$W_- = L'_{11} \frac{\partial P}{\partial x} + L'_{12} \frac{\partial U}{\partial x} + L'_{13} \frac{\partial C_0}{\partial x}, \quad (10)$$

式中:

$$\begin{aligned} L_{11} &= -\frac{kC_0}{\mu} - \frac{\varphi C_0}{\mu} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-ZF\zeta)^n (\lambda_D)^2}{(RT)^n n!}, & L'_{11} &= -\frac{kC_0}{\mu} - \frac{\varphi C_0}{\mu} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ZF\zeta)^n (\lambda_D)^2}{(RT)^n n!}, \\ L_{12} &= -v_+ ZFC_0 \left[\varphi + 2\varphi \sqrt{\frac{\varphi}{8k}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-ZF\zeta)^n \lambda_D}{(RT)^n n!} \right] + C_0 \frac{\varepsilon \zeta \varphi}{\mu} + 2C_0 \frac{\varepsilon \zeta \varphi}{\mu} \sqrt{\frac{\varphi}{8k}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-ZF\zeta)^n \lambda_D}{(RT)^n n!}, \\ L'_{12} &= v_- ZFC_0 \left[\varphi + 2\varphi \sqrt{\frac{\varphi}{8k}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ZF\zeta)^n \lambda_D}{(RT)^n n!} \right] + C_0 \frac{\varepsilon \zeta \varphi}{\mu} + 2C_0 \frac{\varepsilon \zeta \varphi}{\mu} \sqrt{\frac{\varphi}{8k}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ZF\zeta)^n \lambda_D}{(RT)^n n!}, \\ L_{13} &= -D_+ \left[\varphi + 2\varphi \sqrt{\frac{\varphi}{8k}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-ZF\zeta)^n \lambda_D}{(RT)^n n!} \right] - 2RT \frac{kC_0}{\mu} - 2RT \frac{\varphi C_0}{\mu} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-ZF\zeta)^n (\lambda_D)^2}{(RT)^n n!} - \\ &\quad \left[2RT \frac{\varphi C_0}{\mu} \sqrt{\frac{\varphi}{8k}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-ZF\zeta)^n \lambda_D}{(RT)^n n!} + RT \frac{\varphi C_0}{\mu} \right] \cdot \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-ZF\zeta)^n (\lambda_D)^2}{(RT)^n n!} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ZF\zeta)^n (\lambda_D)^2}{(RT)^n n!} \right], \\ L'_{13} &= -D_- \left[\varphi + 2\varphi \sqrt{\frac{\varphi}{8k}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ZF\zeta)^n \lambda_D}{(RT)^n n!} \right] - 2RT \frac{kC_0}{\mu} - 2RT \frac{\varphi C_0}{\mu} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ZF\zeta)^n (\lambda_D)^2}{(RT)^n n!} - \\ &\quad \left[2RT \frac{\varphi C_0}{\mu} \sqrt{\frac{\varphi}{8k}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ZF\zeta)^n \lambda_D}{(RT)^n n!} + RT \frac{\varphi C_0}{\mu} \right] \cdot \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-ZF\zeta)^n (\lambda_D)^2}{(RT)^n n!} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ZF\zeta)^n (\lambda_D)^2}{(RT)^n n!} \right]. \end{aligned}$$

由电流密度的定义式,得多孔介质中电流密度^[2]:

$$j = FZ(W_+ - W_-), \quad (11)$$

将式(9)和式(10)代入式(11),得

$$j = L_{21} \frac{\partial P}{\partial x} + L_{22} \frac{\partial U}{\partial x} + L_{23} \frac{\partial C_0}{\partial x}, \quad (12)$$

式中:

$$\begin{aligned} L_{21} &= -FZ \frac{\varphi C_0}{\mu} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-ZF\zeta)^n (\lambda_D)^2}{(RT)^n n!} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ZF\zeta)^n (\lambda_D)^2}{(RT)^n n!} \right], \\ L_{22} &= -\frac{\varphi}{R_w} - 2F^2 Z^2 C_0 \varphi \sqrt{\frac{\varphi}{8k}} \left[v_+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-ZF\zeta)^n \lambda_D}{(RT)^n n!} + v_- \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ZF\zeta)^n \lambda_D}{(RT)^n n!} \right] + \\ &\quad 2FZC_0 \frac{\varepsilon \zeta \varphi}{\mu} \sqrt{\frac{\varphi}{8k}} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-ZF\zeta)^n \lambda_D}{(RT)^n n!} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ZF\zeta)^n \lambda_D}{(RT)^n n!} \right], \\ L_{23} &= -FZ(D_+ - D_-) \varphi - 2RT \frac{FZ\varphi C_0}{\mu} \sqrt{\frac{\varphi}{8k}} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-ZF\zeta)^n (\lambda_D)^2}{(RT)^n n!} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ZF\zeta)^n (\lambda_D)^2}{(RT)^n n!} \right] - \\ &\quad \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-ZF\zeta)^n \lambda_D}{(RT)^n n!} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ZF\zeta)^n \lambda_D}{(RT)^n n!} \right] - 2FZ\varphi \sqrt{\frac{\varphi}{8k}} \left[D_+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-ZF\zeta)^n \lambda_D}{(RT)^n n!} - D_- \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ZF\zeta)^n \lambda_D}{(RT)^n n!} \right] - \\ &\quad 2RT \frac{FZ\varphi C_0}{\mu} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-ZF\zeta)^n (\lambda_D)^2}{(RT)^n n!} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ZF\zeta)^n (\lambda_D)^2}{(RT)^n n!} \right]. \end{aligned}$$

式中, $R_w = [F^2 Z^2 C_0 (v_+ + v_-)]^{-1}$, 为地层水溶液的电阻率。式(6)、式(9)、式(10)和式(12)描述了多孔介质中渗流场、电流场、离子流场三个物理场之间的耦合关系。

2 储层岩石流动电位的计算方法

理论计算流动电位,需要给出一组孔隙度 φ 、渗透率 k 的数据,然后确定泥质砂岩毛管模型的微观参

表 1 流动电位计算基本参数

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|-----------------------|------|--|------|
| 孔隙度 ϕ | 0.16 | 阳离子交换量 Q_v /(mol/L) | 1.0 |
| 温度 $T/^\circ\text{C}$ | 25 | Na^+ 迁移率 v_+ /($\text{cm}^2 \cdot \text{S}/\text{mol}$) | 50.1 |
| 溶液浓度 C_0 /(mg/L) | 1000 | Cl^- 迁移率 v_- /($\text{cm}^2 \cdot \text{S}/\text{mol}$) | 76.3 |
| 溶液性质 | NaCl | 地层水粘度 μ /($\text{mPa} \cdot \text{s}$) | 1.0 |

数^[3]。选取计算基本参数见表 1。

储层的阳离子交换作用大小,可以用阳离子交换容量 Q_v 描述。由文献[3]可知, Q_v 在数值上等于孔隙液体中阳离子与阴离子平均浓度之差,即

$$Q_v = (\bar{C}_+ - \bar{C}_-) \quad (13)$$

式(13)给出了 Zeta 电位与阳离子交换量之间的关系。

在流动电位产生时,地层中的电流密度 $j=0$,由式(12)可得岩样两端的流动电位

$$\Delta U = - \int_{P_1}^n \frac{L_{21}}{L_{22}} dP - \int_{C_1}^a \frac{L_{23}}{L_{22}} dC_0, \quad (14)$$

定义流动电位耦合系数 $\eta = \Delta U/\Delta P$,则储层岩样的流动电位耦合系数为

$$\eta = \frac{\Delta U}{\Delta P} = - \frac{1}{\Delta P} \left(\int_{P_1}^n \frac{L_{21}}{L_{22}} dP + \int_{C_1}^a \frac{L_{23}}{L_{22}} dC_0 \right) \quad (15)$$

式中, C_1 、 C_2 分别为岩样两端溶液浓度, P_1 、 P_2 为岩样两端压力。式(15)考虑了岩石孔隙溶液的浓差极化效应对流动电位的影响。

2.1 与亥姆霍兹公式的比较

根据式(15),如果忽略毛管浓度梯度的影响,即取 $\Delta C_0=0$,得流动电位耦合系数为

$$\eta = \Delta U/\Delta P = -L_{21}/L_{22}, \quad (16)$$

如果忽略式(12)中的 L_{21} 和 L_{22} 中的高次项,仅保留第一项,则式(16)改写为

$$\eta = e\zeta R_w/\mu \quad (17)$$

式(17)即为亥姆霍兹公式,是目前国内外通常使用的流动电位耦合系数计算公式。因此可知,亥姆霍

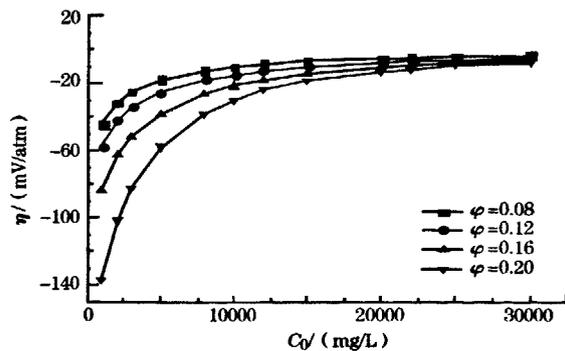


图 2 流动电位耦合系数与溶液浓度的关系曲线

兹公式是不考虑浓差极化效应时 L_{21} 、 L_{22} 取一级近似的结果。

图 1 给出了用式(16)、(17)计算的流动电位耦合系数与溶液浓度的关系。可见,高浓度时两式计算结果相差较小,这说明亥姆霍兹公式具有较好的近似性。但是亥姆霍兹公式不能反映阳离子交换量、孔隙度和渗透率等对流动电位的影响。

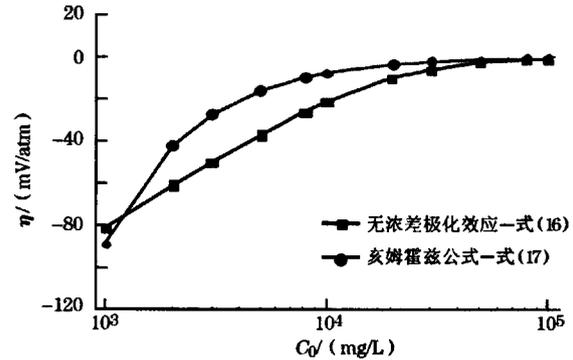


图 1 流动电位耦合系数与亥姆霍兹公式的比较

2.2 无浓差极化效应时流动电位的计算

当不考虑浓差极化效应对流动电位的影响,即忽略毛管中的浓度梯度,则流动电位的耦合系数如式(16)所示。选取表 1 中的计算参数,可得如图 2 所示的流动电位耦合系数与溶液浓度的关系曲线,图中模数为孔隙度。从图中可知,流动电位耦合系数的绝对值随着溶液浓度增大而减小。这是因为溶液浓度越大,孔隙固液界面的双电层作用越小,电化耦合作用越小,流动电位耦合系数的绝对值越小。

在其他参数不变的情况下,改变阳离子交换量的大小,可以得到流动电位耦合系数与阳离子交换量的关系曲线(图 3)。从图中可知,流动电位耦合系数的绝对值随着阳离子交换量的增大而减小。这说明阳离子交换量越大,孔隙固液界面离子的吸附能力越强,流体的流动耦合作用减弱,流动电位耦合系数的绝对值越小。

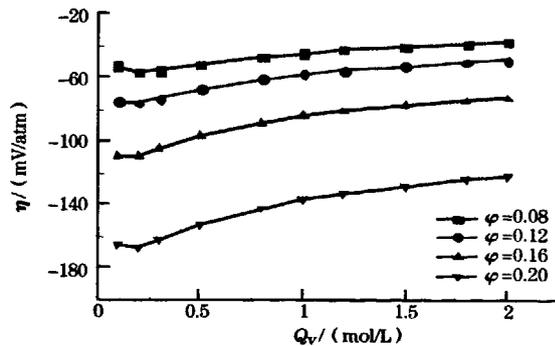


图 3 流动电位耦合系数与阳离子交换量的关系曲线

改变孔隙度的大小,其他参数不变,得到如图4所示的流动电位耦合系数与孔隙度的关系曲线,图中模数为溶液浓度。由图可知,随着地层孔隙度的增大,流动电位耦合系数的绝对值增大。因此,地层孔隙度越大,地层流体的流动速度越快,流动电位的幅值越大,流动电位耦合系数的绝对值越大。

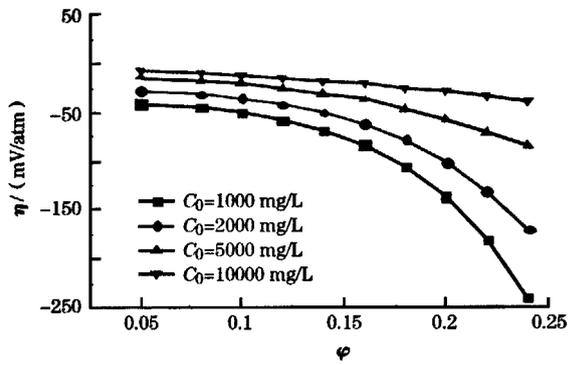


图4 流动电位耦合系数与孔隙度的关系曲线

2.3 浓差极化效应对流动电位的影响

如果考虑浓差极化对流动电位的影响,流动电位的耦合系数如式(15)所示。利用表1中的计算参数模拟溶液浓度对流动电位耦合系数的影响时,令毛管两端溶液浓度 C_1 、 C_2 之比为改变量:取 C_2 为 1 000 mg/L,改变 C_1 的大小,计算流动电位耦合系数与 C_1/C_2 的关系,如图5横坐标的正轴所示;取 C_1 为 1 000 mg/L,改变 C_2 的大小,计算流动电位耦合系数与 C_2/C_1 的关系,如图5横坐标的负轴所示。图5所示为流动电位耦合系数与毛管两端溶液浓度 C_1 和 C_2 的关系,图中模数为孔隙度。由图可知,毛管两端溶液浓度 C_1 和 C_2 之间的差异越大,流动电位耦合系数的绝对值越大。与图2对比可知,考虑浓差极化效应时流动电位耦合系数要大于不考虑浓差极化效应的计算结果。

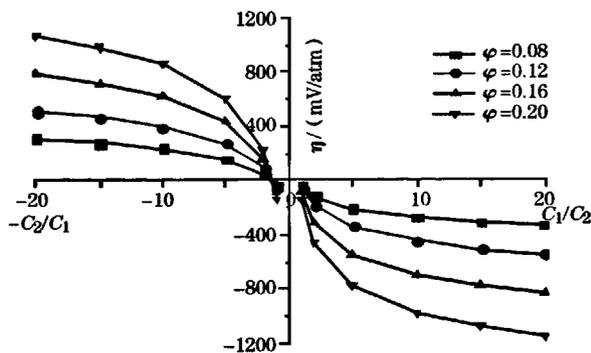


图5 流动电位耦合系数与溶液浓度的关系曲线

选取不同的毛管两端溶液浓度 C_1 和 C_2 比值,改变阳离子交换量的大小,可以得到流动电位耦合

系数与阳离子交换量的关系曲线,如图6所示,图中模数为 C_1 与 C_2 的相互比值。从图中可知,流动电位耦合系数的绝对值随着阳离子交换量的增大而增大。与图3对比,当计算中考虑了毛管的浓度梯度,流动电位耦合系数与阳离子交换量的关系就发生了明显变化。这是因为阳离子交换量越大,孔隙固液界面的双电层作用越大,浓差极化效应越大,浓差极化效应对流动电位的影响越大。

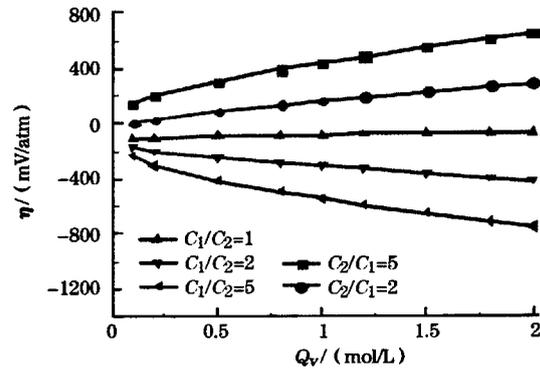


图6 流动电位耦合系数与阳离子交换量的关系曲线

在其他数不变的情况下,改变孔隙度的大小,得到如图7所示的流动电位耦合系数与孔隙度的关系曲线,图中模数为毛管两端溶液浓度 C_1 和 C_2 比值。由图可知,随着地层孔隙度的增大,流动电位耦合系数的绝对值增大。与图4对比,流动电位耦合系数的绝对值要大于不考虑浓差极化效应的计算结果。

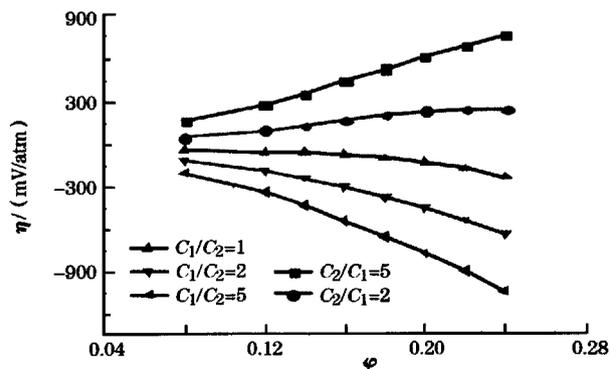


图7 流动电位耦合系数与孔隙度的关系曲线

3 结论

利用孔隙介质的微观毛管模型,定量分析储层岩石储渗特性和电化学性质对流动电位的影响,得到如下结论。

(1) 泥质砂岩中存在着导电、渗流和离子扩散三种物理化学过程,建立渗流场、电流场和离子流场三种物理场之间的耦合关系,可以从物理本质上描述储层岩石流动电位的形成机理。

(2) 依据微观毛管模型理论,结合三种物理场之间的耦合关系,推导了泥质砂岩流动电位的计算公式,定量研究了不考虑浓差极化效应和考虑浓差极化效应两种情况下,储层岩石的储渗特性和电化学特性对流动电位耦合系数的影响。结果表明:不考虑浓差极化效应时,流动电位耦合系数的绝对值随溶液浓度和阳离子交换量的增大而减小,随孔隙度和渗透率的增大而增大;考虑浓差极化效应时,流动电位耦合系数的绝对值随溶液浓度、阳离子交换量、孔隙度和渗透率的增大而增大。数值模拟结果证实了浓差极化效应对流动电位的放大作用。

(3) 计算储层岩石流动电位时,原亥姆霍兹公式不能解释阳离子交换量等因素对流动电位的影响,是一个简化的数学模型。考虑浓差极化效应对流动电位的耦合影响,笔者所述的建立流动电位计算方法可以较好地反映泥质砂岩动电效应产生的微观机理,优于亥姆霍兹公式的计算结果。

参考文献:

- [1] 黄维菊,魏星.膜分离技术概论[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [2] Ronald F Probst.物理-化学流体动力学导论[M].戴干策,等译.上海:华东化工学院出版社,1992.
- [3] 关继腾,王谦,范业活,等.利用毛管模型研究泥质砂岩电化学测井响应机理[J].地球物理学报,2010,53(1).
- [4] Glover P W J, Jackson M D. Borehole electrokinetics [J]. The Leading Edge, 2010, 29(6).
- [5] Walker E, Glover P W J. Permeability models of porous media: Characteristic length scales, scaling constants and time-dependent electrokinetic coupling [J]. Geophysics, 2010, 75(6).
- [6] Glover P W J, Dery N. Streaming potential coupling coefficient of quartz glass bead packs: Dependence on grain diameter, pore size, and pore throat radius [J]. Geophysics, 2010, 75(6).
- [7] Saunders J H, Jackson M D, Pain C C. Fluid flow monitoring in oil fields using downhole measurements of electrokinetic potential [J]. Geophysics, 2008, 73(5).
- [8] 金鼎,孙宝佃,胡恒山,等.动电效应测井研究现状和展望[J].测井技术,2010,34(4).
- [9] 张峰.地球深部流体流动电位实验研究[D].武汉:中国地质大学,2010.
- [10] 杨春梅,李洪奇,陆大卫,等.油田开发过程中的动电现象研究[J].地球物理学进展,2005,20(4).
- [11] Ishido T, Mizutani H. Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics [J]. J Geophys Res, 1981, 86(B3).
- [12] Saunders J H, Jackson M D, Pain C C. A new numerical model of electrokinetic potential response during hydrocarbon recovery [J]. Geophys Res Lett, 2006, 33.
- [13] Jackson M D. Characterization of multiphase electrokinetic coupling using a bundle of capillary tubes model [J]. J Geophys Res, 2008, 113.
- [14] 王军,胡恒山,徐小蓉,等.基于动电效应的岩芯渗透率实验测量[J].地球物理学报,2010,53(8).

A STUDY OF THE INFLUENCES OF ELECTROCHEMICAL FACTOR ON STREAMING POTENTIAL IN RESERVOIR ROCK

YU Hua, GUAN Ji-teng, CHENG Yuan-yuan

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

Abstract: In the field of geophysical exploration, great attention has been paid to the utilization of the streaming potential characteristics in reservoir rock to describe the flow characteristics of the reservoir. According to the electrical double-layer model and the electrochemical theory, the authors derived the coupling relationships between flow field, ion field and current field based on the capillary model. The influences of pore structure parameters on the coupling coefficient of streaming potential were obtained by numerical simulation. The results show that, when the influence of the concentration polarization effect on streaming potential is considered, the absolute value of coupling coefficient of streaming potential increases with the increasing solution concentration, cation exchange capacity, porosity and permeability. In addition, the concentration difference polarization amplifies the streaming potential.

Key words: argillaceous sandstone; electro-kinetic effects; capillary model; streaming potential; concentration difference polarization

作者简介: 于华(1985-),女,中国石油大学(华东)在读硕士研究生,主要从事电磁场理论及岩石物理研究。