

# 储层岩石周期性电渗流特性的微观机制\*

陈 辉, 关继腾, 房文静

(中国石油大学 理学院, 山东 青岛 266555)

**摘要:** 以双电层电位理论和电渗流动的动量方程为基础, 结合储层岩石平行毛管束模型, 推导出岩石孔隙内周期性电渗流的解析式, 揭示了储层中电渗效应的微观机制, 分析了非密闭储层岩石中宏观电渗 Darcy 速度及密闭储层中电渗压力系数频散特性的影响因素。数学模拟结果表明: 储层岩石孔隙中, 周期性电渗流速度剖面在频率较高时呈“波浪”状; 孔隙度越大, 电渗 Darcy 速度模值越大, 其相位也越大, 而电渗压力系数数值越小。储层岩石的溶液浓度越小或阳离子交换量越大, 电渗 Darcy 速度模值和电渗压力系数数值越大, 但对电渗 Darcy 速度的相位没有影响。

**关键词:** 储层岩石; 周期性电渗流; 微观机制; 频散特性; 数学模拟

**中图分类号:** O361; P631 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.3879/j.issn.1000-0887.2012.10.005

## 引 言

电渗效应具有易于控制和驱动效率高等优点, 现已被广泛应用到微机电、生物化学、土木工程等领域<sup>[1-4]</sup>。近年来, 利用周期性电渗流研究储层岩石的孔隙度与流体的流动特性, 已成为地球物理勘探领域中的前沿交叉课题<sup>[5-7]</sup>, 且储层中电渗流理论是今后发展地球物理探测新方法的科学基础。

储层岩石中的电渗流现象是指在孔隙中固液界面双电层内的电荷, 在外加电场作用下拖拽地层流体一起运动的现象。电渗效应首次由 Reuss<sup>[8]</sup> 研究多孔渗水层实验中观测到。目前有关电渗流现象微观机制的概念, 基于 Kvink 在 1850 年提出的固相和液相界面存在双电层的假设。Rice 等<sup>[9]</sup> 利用圆直毛细管模型研究了孔隙介质中流体的电渗流现象。Pride<sup>[10]</sup> 采用平均体积法导出了储层岩石中弹性波和电磁波的耦合特性与频率的关系式, 但他没有进行储层岩石孔隙参数和电化学参数对电渗效应影响的模拟计算和实验验证。Dutta 等<sup>[11]</sup> 将二维通道内周期性电渗行为类比为 Stokes 第二问题, 研究了离子能量参数和双电层厚度对电渗流的影响。Philip 等<sup>[5]</sup> 利用单个圆直毛细管模型研究了端口开放和闭合两种情况下周期性电渗流的流动特性, 并分析了电渗流和流动电位对频率响应的差异。James<sup>[12]</sup> 在薄双电层和小 Reynolds 数情况下, 分析了直毛管内 Zeta 电势变化对电渗流的影响。Kang 等<sup>[13]</sup> 用带电微球填充毛管模拟多孔介质, 研究了毛管密闭和非密闭两种情况下的周期性电渗流特性, 但其理论尚不能揭示储

\* 收稿日期: 2011-11-21; 修订日期: 2012-05-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41174101); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2011DM002)

作者简介: 陈辉(1988—), 男, 山东人, 硕士生(E-mail: chenhuiliuge@163.com);

关继腾(1956—), 男, 北京人, 教授, 硕士生导师(联系人, E-mail: guanjt@upc.edu.cn).

层岩石中电渗流与溶液浓度和阳离子交换量间的关系。Wang 等<sup>[14-15]</sup>、张凯等<sup>[16]</sup>、Wang 等<sup>[17]</sup>以及李志华等<sup>[18]</sup>在不同类型的微通道内分析了压力驱动流和电渗驱动流中物质的扩散、混合和分离现象,并数值模拟了微通道横向尺寸和壁面电势等因素对电渗流速度分布的影响,这对于微流控系统的设计具有指导作用。吴健康等<sup>[19]</sup>以及龚磊等<sup>[20]</sup>研究了生物芯片微通道内周期性电渗流效应和包含电粘性在内的流动电位效应,并数学模拟了双电层厚度和频率 Reynolds 数的影响。

现有资料表明,电渗流的研究大多基于二维微通道模型,所得结论并不能直接用于阐明储层岩石孔隙内流体的电渗流动状态;另外,目前电渗流理论所考虑的影响因素相对单一,还无法定量解释储层岩石储渗特性和阳离子交换量等因素对周期性电渗流的影响。

本文首先构建储层岩石孔隙内周期性电渗流数学模型,得出电场作用下储层岩石中流体速度在孔隙内的分布,从而揭示储层中电渗效应的微观机制。接着重点讨论了在非密闭和密闭两种情况下储层岩石中周期性电渗流的宏观效应:电渗 Darcy 速度和电渗压力系数,并数学模拟了它们随岩石孔隙结构参数、地层水性质、阳离子交换量以及谐变频率等的变化规律。

## 1 储层岩石中周期性电渗流的数学模型

### 1.1 储层岩石中周期性电渗流的控制方程

电场作用下,储层岩石孔隙中流体流动的动量方程表示为

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} - \rho_0 \left[ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] = \nabla P - \rho_e \mathbf{E}, \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{E}$  为外加电场强度,  $\rho_0$  为流体密度,  $\rho_e$  为孔隙中电荷密度,  $P$  为流体压力,  $\mu$  为流体粘度,  $\mathbf{u}$  为流体流速。

由于实际储层岩石孔隙结构过于复杂,可将储层岩石简化为平行排列的圆直毛管束,一个圆直毛管又称为孔隙单元,圆直毛管模型微观参数与储层岩石宏观参数的对应关系为<sup>[21]</sup>

$$\varphi = n_0 \pi r_0^2, \quad (2)$$

$$k = \frac{n_0 \pi r_0^4}{8}, \quad (3)$$

式中,  $k$  为渗透率,  $\varphi$  为孔隙度,  $n_0$  为单位面积上的毛管数,  $r_0$  为毛管的半径。

假设在直毛管中加入轴向 ( $z$  方向) 交流电场  $E = E_0 e^{-i\omega t}$ , 则其激发的流体流速响应和压力梯度响应均为谐变量, 即  $u = u_0 e^{-i\omega t}$ ,  $P = P_0 e^{-i\omega t}$ 。其中,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为电场频率, 单位为 Hz;  $E_0$ ,  $u_0$  和  $P_0$  分别是电场强度、流体流速和压力梯度的复振幅, 它们仅是空间坐标的函数。考虑到毛管内流体不可压缩,  $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ , 则式(1)可化简整理为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_0}{\partial r} \right) + K^2 u_0 = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial P_0}{\partial z} - \rho_e E_0 \right), \quad (4)$$

式中,  $K^2 = i\omega\rho_0/\mu$ 。式(4)即为岩石孔隙单元中周期性电渗流的控制方程。

### 1.2 储层岩石中双电层电位理论

岩石骨架与溶液中离子相互作用在固液交界面处形成双电层结构, 孔隙中离子浓度服从 Boltzmann 分布:

$$C_i = C_0 \exp\left(\frac{-Z_i F \psi}{RT}\right), \quad (5)$$

式中,  $C_i$  为组分  $i$  的浓度,  $C_0$  为溶液初始浓度,  $F = 9.65 \times 10^4$  C/mol 为 Faraday 常数,  $Z_i$  为组

分  $i$  的价数,  $\psi$  为双电层形成的电位,  $R = 8.314 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$  为气体普适常数,  $T$  为绝对温度.

在 Z-Z 价对称地层水溶液中, 孔隙内的电荷密度为

$$\rho_e = FZ(C_+ - C_-) = -2FZC_0 \sinh\left(\frac{ZF\psi}{RT}\right). \quad (6)$$

储层岩石孔隙内的电位分布满足 Poisson 方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) = -\frac{\rho_e}{\varepsilon}. \quad (7)$$

一般储层岩石孔隙中的双电层厚度  $\lambda_D$  要远小于毛管半径  $r_0$ , 由文献[22]可知, 当  $r_0 \gg \lambda_D$  时,

$\rho_e = -\varepsilon\psi/\lambda_D^2$ , 式(7)的解为

$$\psi = \zeta \exp\left(-\frac{r_0 - r}{\lambda_D}\right), \quad (8)$$

式中,  $\lambda_D = \sqrt{\varepsilon RT/(2F^2 Z^2 C_0)}$ ,  $\zeta$  为双电层 Zeta 电位.

岩石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[23]可知, 储层中岩石的阳离子交换量在数值上等于孔隙溶液中阳离子与阴离子平均浓度之差, 即

$$Q_v = \frac{\int_0^{r_0} (C_+ - C_-) 2\pi r dr}{\pi r_0^2}. \quad (9)$$

所以通过式(5)、式(8)和式(9)可由阳离子交换量  $Q_v$  确定 Zeta 电位的大小.

### 1.3 储层岩石中周期性电渗流的解析解

将  $\rho_e = -\varepsilon\psi/\lambda_D^2$  代入式(4), 整理可得

$$r \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_0}{\partial r} \right) + K^2 r^2 \left[ u_0 - \frac{1}{K^2 \mu} \frac{\partial P_0}{\partial z} - \frac{\varepsilon\psi}{K^2 \lambda_D^2 \mu} E_0 \right] = 0. \quad (10)$$

根据 Bessel 方程的定义, 当  $K^2 \neq 0$  时, 方程(10)的通解为

$$u_0(r) = AJ_0(Kr) + BN_0(Kr) + \frac{1}{K^2 \mu} \frac{\partial P_0}{\partial z} + \frac{\varepsilon\psi}{\mu(1 + K^2 \lambda_D^2)} E_0, \quad (11)$$

式中,  $J_0(Kr)$  为 0 阶第一类 Bessel 函数,  $N_0(Kr)$  为 0 阶第二类 Bessel 函数. 利用流速边界条件: ① 在  $r = 0$  处,  $u_0$  为有限值, 则有  $B = 0$ ; ② 当  $r = r_0$  时,  $u_0 = 0$ , 则有

$$A = -\frac{1}{J_0(Kr_0)} \left[ \frac{1}{K^2 \mu} \frac{\partial P_0}{\partial z} + \frac{\varepsilon\zeta}{\mu(1 + K^2 \lambda_D^2)} E_0 \right]. \quad (12)$$

于是式(11)表示为

$$u_0(r) = \frac{1}{K^2 \mu} \left[ 1 - \frac{J_0(Kr)}{J_0(Kr_0)} \right] \frac{\partial P_0}{\partial z} + \frac{\varepsilon\zeta}{\mu(1 + K^2 \lambda_D^2)} \left[ e^{-(r_0-r)/\lambda_D} - \frac{J_0(Kr)}{J_0(Kr_0)} \right] E_0. \quad (13)$$

式(13)即为流体在孔隙单元中的速度分布.

将式(13)沿孔隙截面积分, 得单个孔隙中的流量为

$$Q_0 = \int_0^{r_0} u_0(r) 2\pi r dr = -L_{Q,P} \frac{\partial P_0}{\partial z} + L_{Q,E} E_0, \quad (14)$$

式中

$$L_{Q,P} = -\frac{1}{K^2 \mu} \left[ \pi r_0^2 - \frac{2\pi r_0}{K} \frac{J_1(Kr_0)}{J_0(Kr_0)} \right],$$

$$L_{Q,E} = -\frac{\varepsilon\zeta}{\mu(1 + K^2 \lambda_D^2)} \left[ \frac{2\pi r_0}{K} \frac{J_1(Kr_0)}{J_0(Kr_0)} - 2\pi(\lambda_D r_0 - \lambda_D^2 + \lambda_D^2 e^{-r_0/\lambda_D}) \right].$$

根据平行毛管束模型,孔隙单元半径  $r_0 = \sqrt{8k/\varphi}$ , 储层岩石的渗流流速  $v_0 = n_0 Q_0$ . 由此可得

$$v_0 = n_0 Q_0 = -L_{v,P} \frac{\partial P_0}{\partial z} + L_{v,E} E_0, \quad (15)$$

其中

$$L_{v,P} = n_0 L_{Q,P} = -\frac{1}{K^2 \mu} \left[ \varphi - \frac{2\varphi}{K\sqrt{8k/\varphi}} \frac{J_1(K\sqrt{8k/\varphi})}{J_0(K\sqrt{8k/\varphi})} \right], \quad (16)$$

$$L_{v,E} = n_0 L_{Q,E} = -\frac{\varepsilon \zeta}{\mu(1 + K^2 \lambda_D^2)} \left[ \frac{2\varphi}{K\sqrt{8k/\varphi}} \frac{J_1(K\sqrt{8k/\varphi})}{J_0(K\sqrt{8k/\varphi})} - 2\varphi \left( \lambda_D \sqrt{\frac{\varphi}{8k}} - \frac{\lambda_D^2 \varphi}{8k} + \frac{\lambda_D^2 \varphi}{8k} e^{(-1/\lambda_D) \sqrt{8k/\varphi}} \right) \right]. \quad (17)$$

## 2 非密闭储层岩石的电渗流特性

数学模拟计算中设地层水为 NaCl 溶液,基本参数取值如表 1 所示.此外,储层岩石渗透率的计算和孔隙度与阳离子交换量的校正方法同文献[24].

表 1 电渗流计算基本参数表

Table 1 Basic parameters to calculate the electroosmosis

quantity	value	quantity	value
porosity $\varphi$	0.30	cation exchange capacity $Q_V / (\text{mol/L})$	0.5
external electric field $E / (\text{V/m})$	10 000	dielectric constant of solution $\varepsilon / (\text{C}^2 \cdot \text{J/m})$	$6.95 \times 10^{-10}$
solution concentration $C_0 / (\text{mg/L})$	1 000	temperature $T / \text{K}$	298
solution density $\rho_0 / (\text{g/cm}^3)$	1.0	solution viscosity $\mu / (\text{mPa} \cdot \text{s})$	1.0

在岩心实验中,非密闭岩样两端不存在压差,则孔隙内流体压力梯度  $\partial P_0 / \partial z = 0$ , 故式(13)可改写为

$$u_0(r) = \frac{\varepsilon \zeta}{\mu(1 + K^2 \lambda_D^2)} \left[ e^{-(r_0-r)/\lambda_D} - \frac{J_0(Kr)}{J_0(Kr_0)} \right] E_0. \quad (18)$$

式(15)可写为

$$v_0 = -\frac{\varepsilon \zeta}{\mu(1 + K^2 \lambda_D^2)} \left[ \frac{2\varphi}{K\sqrt{8k/\varphi}} \frac{J_1(K\sqrt{8k/\varphi})}{J_0(K\sqrt{8k/\varphi})} - 2\varphi \left( \lambda_D \sqrt{\frac{\varphi}{8k}} - \frac{\lambda_D^2 \varphi}{8k} + \frac{\lambda_D^2 \varphi}{8k} e^{(-1/\lambda_D) \sqrt{8k/\varphi}} \right) \right] E_0. \quad (19)$$

式(19)即为非密闭储层岩石中宏观电渗 Darcy(渗流)速度解析式.

### 2.1 非密闭储层岩石中周期性电渗流速度沿孔隙截面的分布

根据储层岩石平行毛管束理论,  $\varphi = 0.30$  时毛管等效半径  $r_0 \approx 12 \mu\text{m}$ . 由式(18)可计算电渗流速度沿孔隙截面的分布,如图 1 所示.从图 1 中可以看出,在低频范围内( $0 \sim 1\,000 \text{ Hz}$ ),孔隙内流体受到的惯性力较弱,电渗流速度剖面呈“活塞”状,这与定常电渗流相同.随着频率升高,惯性力对流体迟滞作用增强,孔隙内部流体的电渗流速度越来越滞后于近壁处的电渗速度,电渗流速度剖面呈“波浪”状,此范围内的电场频率为过渡频率带( $1\,000 \sim 10\,000 \text{ Hz}$ ).当外加电场的频率高于过渡频率带后,惯性力在孔隙轴心区域(主流区)占主导地位,主流区电渗流动近乎停滞,且在双电层区和主流区之间出现了回流现象,这与文献[19]给出的计算结

论相一致。数学模拟结果还表明过渡频率带仅与岩石孔隙度有关,孔隙度减小,过渡频率带向高频端移动。

为显示电渗流速度在双电层区域变化规律,以孔隙壁为原点,沿孔隙单元径向,用半对数坐标绘制,如图2所示。由图2可知,各个频率下最大电渗流速度(双电层滑移速度)均在2 nm附近取得,而此算例的双电层厚度 $\lambda_D \approx 2.3$  nm,即电渗流速度在双电层与主流区交界处达到最大。另外,各个频率下的双电层滑移速度近乎相同,这是由于 $\lambda_D/r_0 \approx 2.0 \times 10^{-4}$ ,即使在高频下惯性力也无法在如此“薄”的双电层内体现出来,换言之,当 $\lambda_D/r_0 \ll 1$ 时,双电层区域的惯性力可忽略不计,主流区流体受到的惯性力大小即为流体所受惯性力。

2.2 宏观电渗 Darcy 速度频散特性与孔隙度的关系

储层岩石电渗 Darcy 速度的大小反映了孔隙中宏观电动耦合能力的强弱。利用式(19),计算电渗 Darcy 速度与频率的关系,如图3所示,图中模数为孔隙度,实线表示电渗 Darcy 速度的模值 $v_0$ ,虚线表示电渗 Darcy 速度的相位 $\theta_0$ 。储层岩石的微观孔隙结构对流体流动状态有着较大的影响,储层岩石的孔隙度越大,储层流体的渗流能力越强,电渗 Darcy 速度越大;储层孔隙度越大,流体越多,流体受到的惯性力作用越强,电渗 Darcy 速度的相位越大。另外,随着频率增大,孔隙内流体受到的惯性力增强,电渗 Darcy 速度逐渐减小,相位逐渐增大。

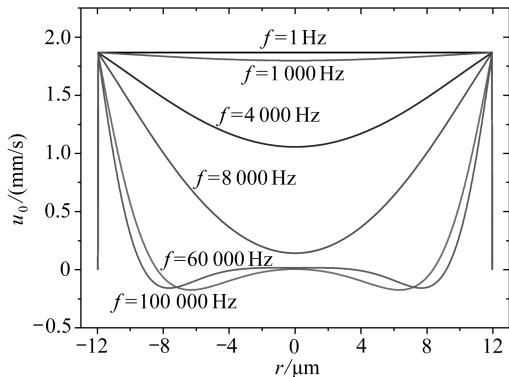


图1 非密闭岩样中周期性电渗流速度沿孔隙截面分布

Fig. 1 Velocity profiles of periodical electroosmosis across pore in reservoir rock with two open ends

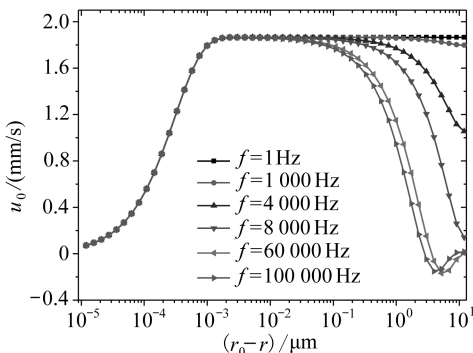


图2 半对数坐标中非密闭岩样孔隙内电渗流速度的分布

Fig. 2 Distribution of periodical electroosmotic velocity in open-end pore on semilog coordinate

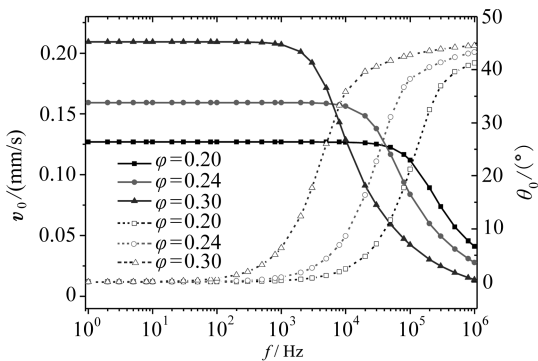


图3 电渗 Darcy 速度频散特性与孔隙度的关系

Fig. 3 Relationship between frequency dispersion characteristics of electroosmotic Darcy velocity and porosity

2.3 宏观电渗 Darcy 速度频散特性与溶液浓度和阳离子交换量的关系

溶液浓度对储层岩石电渗 Darcy 速度的影响如图4所示,当溶液浓度增大时,孔隙固液界面的双电层作用减弱,流体的电动耦合作用减弱,电渗 Darcy 速度减小。阳离子交换量对储层岩石电渗 Darcy 速度的影响如图5所示,图中模数为阳离子交换量。阳离子交换量越大,孔隙



固液界面的离子吸附能力越强,流体的电动耦合作用越强,电渗 Darcy 速度越大.另外,溶液浓度和阳离子交换量对其相位几乎没有影响.

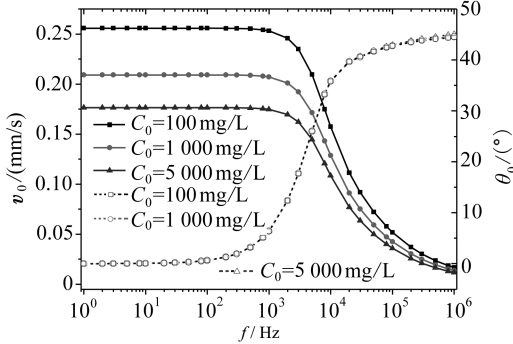


图4 电渗 Darcy 速度频散特性与浓度的关系

Fig. 4 Relationship between frequency dispersion characteristics of electroosmotic Darcy velocity and concentration

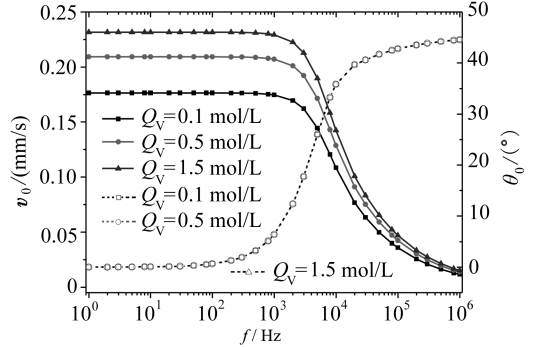


图5 电渗 Darcy 速度频散特性与阳离子交换量的关系

Fig. 5 Relationship between frequency dispersion characteristics of electroosmotic Darcy velocity and cation exchange capacity

### 3 密闭储层岩石的电渗流特性

在密闭岩心实验中,岩样两端闭合,孔隙中流体净流量为 0,所以电渗流产生了诱导背压迫使孔隙内部分流体发生逆向流动,由式(14),有

$$Q_0 = -L_{Q,P} \frac{\partial P_0}{\partial z} + L_{Q,E} E_0 = 0. \quad (20)$$

由式(20)可得孔隙单元内诱导背压梯度为  $\partial P_0 / \partial z = (L_{Q,E} / L_{Q,P}) E_0$ ,代入式(13)整理为

$$u_0(r) = \frac{1}{K^2 \mu} \left[ 1 - \frac{J_0(Kr)}{J_0(Kr_0)} \right] \frac{L_{Q,E}}{L_{Q,P}} E_0 + \frac{\varepsilon \zeta}{\mu (1 + K^2 \lambda_D^2)} \left[ e^{-(r_0-r)/\lambda_D} - \frac{J_0(Kr)}{J_0(Kr_0)} \right] E_0. \quad (21)$$

式(21)即为密闭岩样中孔隙单元内的流体速度分布,从中可得出诱导背压产生的逆向流速度:

$$u_{P_0} = \frac{1}{K^2 \mu} \left[ 1 - \frac{J_0(Kr)}{J_0(Kr_0)} \right] \frac{L_{Q,E}}{L_{Q,P}} E_0. \quad (22)$$

定义储层岩石宏观电渗压力系数  $K_E$ ,  $K_E$  是当通过岩样的渗流流速为 0 时,岩样两端的压强差  $\Delta P$  与岩样两端的电位差  $\Delta U$  之比的负值.故由式(15),  $v_0 = 0$ , 得

$$K_E = - \left. \frac{\Delta P}{\Delta U} \right|_{v_0=0} = \frac{L_{v,E}}{L_{v,P}}. \quad (23)$$

#### 3.1 密闭储层岩石中流体逆向流速度沿孔隙截面的分布

以  $\varphi = 0.30$  为例,由式(22)可计算诱导背压在孔隙单元中产生的流体逆向流速度分布,如图 6 所示,在过渡频率带以下,逆向流速度呈抛物线型,随着频率的升高逆向流速度降低;高频时,流体受惯性力制约,逆向流动近乎停滞.

#### 3.2 密闭储层岩石中流体速度沿孔隙截面的分布

由式(21)可计算密闭岩样孔隙单元内流体速度的分布,在半对数坐标中如图 7 所示.由图 7 可知,孔隙内流体流动是电渗流和逆向流叠加的结果,在主流区以逆向流特征为主,而在近壁区则以电渗流特征为主;当电场频率小于过渡频率带时,流体受到的惯性力较弱,速度曲线几乎重合;当高频时,主流区受惯性力的作用流动几乎停滞,而双电层很薄受其作用较弱,近

壁区速度变化不大。

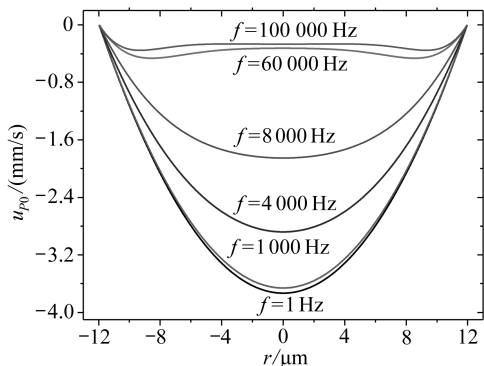


图6 密闭岩样中流体逆向流速度沿孔隙截面分布

Fig. 6 Velocity profiles of counterflow across pore in reservoir rock with two closed ends

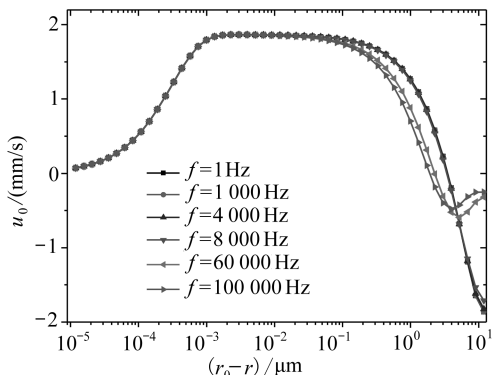


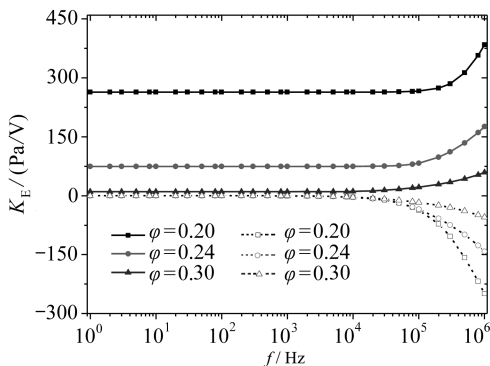
图7 密闭岩样中流体速度沿孔隙截面的分布

Fig. 7 Distribution of fluid velocity in close-end pore on semilog coordinate

### 3.3 宏观电渗压力系数频散特性与孔隙度的关系

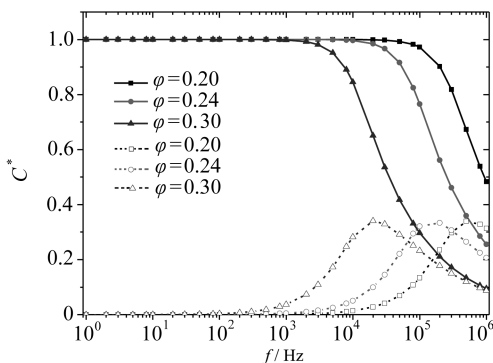
根据上述理论,改变电场频率,由式(23)可得电渗压力系数。图8(a)为不同孔隙度下电渗压力系数与频率的关系,图中模数为孔隙度,电渗压力系数实部由实线表示,虚部由虚线表示。当电场频率较低时,流体惯性力较弱,电渗压力系数几乎不受频率的影响;当电场频率介于过渡频带时,惯性力随频率的升高逐渐增强,电渗压力系数实部及虚部的绝对值受其作用缓慢增大;高频时,惯性力在流体流动中占主导地位,随着频率的升高电渗压力系数开始快速增大。另外,孔隙度越大,电渗压力系数越小。

由于本文所描述的电渗压力系数  $K_E$  恰与文献[5]中的交流电渗耦合系数  $C^*$  互为倒数,因此对本文计算的电渗压力系数求倒数,将计算结果归一化后如图8(b)所示。图8(b)中的曲线变化趋势与文献[5]中计算结论一致。



(a) 原始数值

(a) Original value



(b) 归一化倒数数值

(b) Normalized reciprocal value

图8 电渗压力系数的频散特性与孔隙度的关系

Fig. 8 Relationship between frequency dispersion characteristics of electroosmotic pressure coefficient and porosity

### 3.4 宏观电渗压力系数频散特性与溶液浓度和阳离子交换量的关系

图9为不同浓度下的电渗压力系数与频率的关系。由图9可知,溶液浓度越大,双电层作用越弱,电渗压力系数实部及虚部的绝对值越小。图10为不同阳离子交换量下的电渗压力系

数与频率的关系。由图 10 可知,随着阳离子交换量增大,固液界面离子吸附能力增强,电渗压力系数的实部及虚部的绝对值有所增大。

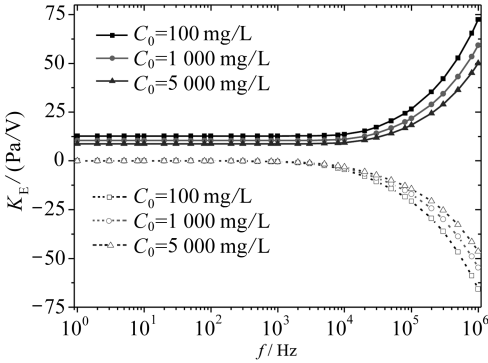


图 9 电渗压力系数频散特性与浓度的关系

Fig. 9 Relationship between frequency dispersion characteristics of electroosmotic pressure coefficient and concentration

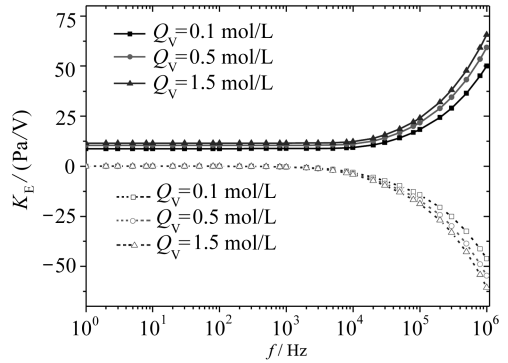


图 10 电渗压力系数频散特性与阳离子交换量的关系

Fig. 10 Relationship between frequency dispersion characteristics of electroosmotic pressure coefficient and cation exchange capacity

## 4 结 论

本文基于平行毛管束模型,建立起宏观储层岩石储渗参数与微观毛管模型参数之间相互关联的计算式,将单个毛管中的周期性电渗流理论扩展到储层岩石中,得到了以下结论:

1) 在非密闭储层岩石孔隙中,随着电场频率升高,惯性力作用增强,周期性电渗流速度剖面的“波浪”状结构愈加明显,宏观电渗 Darcy 速度随之减小趋于 0,其相位增大趋于  $45^\circ$ 。地层水溶液浓度降低和岩石阳离子交换量升高,都使得电渗 Darcy 速度模值增大,但对其相位没有影响。

2) 密闭储层岩石孔隙内流体速度是逆向流和电渗流叠加的结果;随着频率升高,主流区流体速度降低,双电层区流体速度变化很小,而宏观电渗压力系数随之增大。储层岩石电化学因素的改变仅影响电渗压力系数的数值大小,不影响其变化规律。

3) 储层岩石微观孔隙结构对电渗 Darcy 速度和电渗压力系数有着相反的影响。孔隙度越大,电渗 Darcy 速度模值及相位越大,而电渗压力系数实部及虚部绝对值却越小。因此,电渗 Darcy 速度适合研究大孔隙度的储层岩石,而电渗压力系数则宜用于分析小孔隙度的储层岩石。

### 参考文献 (References):

- [1] 林建忠,包福兵,张凯,王瑞金. 微纳流动理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 193-196. (LIN Jian-zhong, BAO Fu-bing, ZHANG Kai, WANG Rui-jin. *The Theory and Application of Microflows and Nanoflows*[M]. Beijing: Science Press, 2010: 193-196. (in Chinese))
- [2] 尤慧艳. 电渗及其在色谱中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-5. (YOU Hui-yan. *The Electroosmosis and Application in Chromatography*[M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-5. (in Chinese))
- [3] 吴健康,龚磊,陈波,曹侃. 微/纳流控系统电渗流研究进展[J]. 力学进展, 2009, 39(5): 555-565. (WU Jian-kang, GONG Lei, CHEN Bo, CAO Kan. Advances in the research of electroosmotic flows in micro/nanofluidic systems[J]. *Advance in Mechanics*, 2009, 39(5): 555-565.



- (in Chinese))
- [4] 哈亚特 T, 阿夫扎尔 S, 亨迪 A. 广义 Burgers 流体中电渗流的精确解[J]. 应用数学和力学, 2011, **32**(9): 1046-1053. (Tasawar Hayat, Saira Afzal. Awatif Hendi. Exact solution of electroosmotic flow in generalized Burgers fluid[J]. *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, 2011, **32**(9): 1119-1126. )
- [5] Reppert P M, Morgan F D. Frequency-dependent electroosmosis[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, **254**(2): 372-383.
- [6] James G B. Electrokinetic effects and fluid permeability[J]. *Physica B*, 2003, **338**(1/4): 270-273.
- [7] David B P, WONG Po-zen. Low-frequency AC electrokinetics[J]. *Colloid and Surfaces A (Physicochemical and Engineering Aspects)*, 1999, **159**(2/3): 283-292.
- [8] Reuss F C. Proceedings of the Imperial Society of Naturalists of Moscow[C]//Moscow, 1809, **3**: 327.
- [9] Rice C L, Whitehead R. Electrokinetic flow in a narrow cylindrical capillary[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1965, **69**(11): 4017-4023.
- [10] Pride S R. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media[J]. *Physical Review B*, 1994, **50**(21): 15678-15696.
- [11] Dutta P, Beskok A. Analytical solution of time periodic electroosmotic flows: analogies to Stokes' second problem[J]. *Analytical Chemistry*, 2001, **73**(21): 5097-5102.
- [12] James P G. Electroosmotic flows with random Zeta potential[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, **249**(1): 217-226.
- [13] Kang Y, Yang C, Huang X Y. AC electroosmosis in microchannels packed with a porous medium[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, **14**(8): 1249-1257.
- [14] WANG Rui-jin, LIN Jian-zhong, LI Zhi-hua. Study on the impacting factors of transverse diffusion in the micro-channels of T-sensors[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2005, **5**(8): 1281-1286.
- [15] WANG Rui-jin, LIN Jian-zhong. Numerical analysis on a passive chaotic micromixer with helical microchannel[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2006, **6**(1): 190-194.
- [16] 张凯, 林建忠, 李志华. 电渗驱动微通道流中的扩散[J]. 应用数学和力学, 2006, **27**(5): 512-518. (ZHANG Kai, LIN Jian-zhong, LI Zhi-hua. Research on diffusion in the microchannel flow driven by electroosmosis[J]. *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, 2006, **27**(5): 575-582. )
- [17] WANG Rui-jin, LIN Jian-zhong, LI Zhi-hua. Analysis of electro-osmotic flow characteristics at joint of capillaries with step change in  $\zeta$ -potential and dimension[J]. *Biomedical Microdevices*, 2005, **7**(2): 131-135.
- [18] 李志华, 林建忠, 聂德明. 消除毛细管电泳槽道中弯道导致的扩散效应的新方法[J]. 应用数学和力学, 2005, **26**(6): 631-636. (LI Zhi-hua, LIN Jian-zhong, NIE De-ming. New approach to minimize dispersion induced by turn in capillary electrophoresis channel flows[J]. *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, 2005, **26**(6): 685-690. )
- [19] 吴健康, 王贤明. 生物芯片微通道周期性电渗流特性[J]. 力学学报, 2006, **38**(3): 309-315. (WU Jian-kang, WANG Xian-ming. Flow behavior of periodical electroosmosis in microchannel for biochips[J]. *Chinese Journal of Theoretical Applied Mechanics*, 2006, **38**(3): 309-315. (in Chinese))
- [20] 龚磊, 吴健康, 王蕾, 晁侃. 微通道周期流动电位势及电粘性效应[J]. 应用数学和力学, 2008,

- 29(6): 649-656. (GONG Lei, WU Jian-kang, WANG Lei, CHAO Kan. Periodical streaming potential and electro-viscous effects in microchannel flow [J]. *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, 2008, 29(6): 715-724. )
- [21] 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006: 181-181. (QIN Ji-shun, LI Ai-fen. *Physical Properties of Petroleum Reservoir*[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006: 181-181. (in Chinese))
- [22] 关继腾, 房文静. 含水岩土体系电化学传质动力学耦合关系研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 664-667. (GUAN Ji-teng, FANG Wen-jing. Coupling relationship for electrochemical hydrodynamics in water-saturated sandy soil and clay soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(6): 664-667. (in Chinese))
- [23] 沙皮罗 Д. А. 岩石的物理-化学性质及其在石油矿场地球物理中的应用[M]. 姜恩承译. 北京: 石油工业出版社, 1987: 3-10. (Shaliro G A. *Rock's Physicochemical Property and Its Practical Application to Geophysics in Oil Field*[M]. JIANG En-cheng translates. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987: 3-10. (Chinese version))
- [24] 关继腾, 王谦, 范业活, 房文静, 于华. 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): 214-223. (GUAN Ji-teng, WANG Qian, FAN Ye-huo, FANG Wen-jing, YU hua. Study on the mechanisms of electrochemical logging response in shaly sandstone based on capillary model[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(1): 214-223. (in Chinese))

## Microscopic Mechanism of Periodical Electroosmosis in Reservoir Rocks

CHEN Hui, GUAN Ji-teng, FANG Wen-jing  
(Faculty of Science, China University of Petroleum,  
Qingdao, Shandong 266555, P. R. China)

**Abstract:** Based on the electric double layer (EDL) theory and the momentum equation governing the electroosmosis flow, an analytical solution to the periodical electroosmosis with a parallel straight capillary bundle model of reservoir rocks to reveal the microscopic mechanism of the electroosmotic flows in rocks was presented. The theory shows that both frequency dispersion characteristics of the macroscopic electroosmotic Darcy velocity in unsealed rocks and the electroosmotic pressure coefficient in sealed rocks depend on the porosity and electrochemical properties of reservoir rocks. The mathematical simulation indicates that the distribution of the periodical electroosmotic velocity is wave-like in the rock pore. The greater the porosity, the greater electroosmotic Darcy velocity and the smaller electroosmotic pressure coefficient are generated. The module value of the electroosmotic Darcy velocity and the electroosmotic pressure coefficient increase with the decreasing solution concentration or the increasing cation exchange capacity without affecting the phase of the electroosmotic Darcy velocity.

**Key words:** reservoir rock; periodical electroosmosis; microscopic mechanism; frequency dispersion characteristic; mathematical simulation