

电磁场-渗流场耦合作用下离子液体 多孔介质流动模型¹⁾

贾 虎²⁾ 张 瑞 黎棚武

(西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500)

摘要 离子液体是一类可调控、多功能的绿色环保材料, 具有良好的电磁场响应, 有望应用于调控水驱油路径。在分析离子液体在毛细管中电磁场响应机理的基础上, 建立了电磁场-渗流场耦合作用下离子液体多孔介质流动模型。通过理论推导与数值分析发现: 电磁场-渗流场耦合作用下毛细管流量大小主要由离子液体电导率与黏度的比值(内因)、电磁场强度与压力梯度(外因)两方面决定; 电磁场产生的洛伦兹力对离子液体施加一个电磁驱动压强, 形成一个类似压力梯度的电磁驱动等效压力梯度, 从而改变离子液体的流量, 当电磁场强度为 $2.0 \times 10^4 \text{ V/m}\cdot\text{T}$ 时, 电磁场在电导率为 0.5 S/m 的离子液体上可形成 10 kPa/m 电磁驱动等效压力梯度。通过调整电磁场方向即可控制离子液体在多孔介质中的流动方向, 解决常规注水利用压力差难以控制流动路径的难题, 为离子液体智能驱油提供理论依据, 且电磁场产生的热效应会影响离子液体的流动能力及潜在驱油效率。

关键词 离子液体, 多孔介质, 电磁场-渗流场耦合, 毛细管流量, 智能驱油

中图分类号: TE312 文献标识码: A doi: [10.6052/0459-1879-21-156](https://doi.org/10.6052/0459-1879-21-156)

FLOW MODEL OF IONIC LIQUIDS IN POROUS MEDIA UNDER COUPLED ELECTROMAGNETIC AND SEEPAGE FIELDS¹⁾

Jia Hu²⁾ Zhang Rui Li Pengwu

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract Ionic liquids (ILs), as a class of green and environment-friendly materials, are adjustable and multifunctional. ILs have excellent electromagnetic field response, which hold a great promise for the adjustment of waterflooding pathway. In this paper, the electromagnetic response mechanism of ILs in capillary is firstly analyzed. Then a flow model of ILs in porous media under coupled electromagnetic and seepage fields is established. Finally, the theoretical derivation and numerical analysis results show that the capillary flow rate under coupled electromagnetic and seepage fields is mainly determined by the ratio of ILs conductivity to viscosity (internal factor), electromagnetic field strength and pressure gradient (external factors). The electromagnetic field generates an electromagnetic drive pressure on the ILs by Lorentz force, forming an electromagnetic drive equivalent pressure gradient analogous to the pressure gradient, thereby changing the flow rate of ILs. When the electromagnetic field strength is $2.0 \times 10^4 \text{ V/m}\cdot\text{T}$, the electromagnetic field can form a 10 kPa/m electromagnetic drive equivalent pressure gradient on an ILs with a conductivity of 0.5 S/m . Meantime,

2021-04-15 收稿, 2021-07-30 录用, 2021-07-31 网络版发表。

1) 霍英东教育基金会高等院校青年教师基金资助项目(171043)。

2) 贾虎, 教授, 主要研究方向: 油田化学与提高油气采收率. E-mail: jiahuswpu@swpu.edu.cn

引用格式: 贾虎, 张瑞, 黎棚武. 电磁场-渗流场耦合作用下离子液体多孔介质流动模型. 力学学报, 2021, 53(8): 2214-2224

Jia Hu, Zhang Rui, Li Pengwu. Flow model of ionic liquids in porous media under coupled electromagnetic and seepage fields. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(8): 2214-2224

the flow direction of ILs in porous media can be controlled by adjusting the direction of electromagnetic field, which can solve the difficult problem of using pressure difference to control flow paths, and provides a theoretical basis for intelligent oil displacement of ILs. Furthermore, the thermal effect generated by the electromagnetic field will affect the flowing capacity of ILs and the oil displacement efficiency.

Key words ionic liquids, porous media, coupled electromagnetic and seepage fields, capillary flow rate, intelligent oil displacement

引言

注水开发是油田保持地层压力、提高采收率的最有效且应用最广的方法,但地层在经历长时间流体冲刷后易在注采井之间形成优势通道,注入水并未能按照预期的驱替路径流动,导致波及范围小、驱替效率低^[1-2]。问题的关键在于传统水驱主要利用压力场实现注入水在地下的渗流与波及,而压力场调控难度大。因此,如何发展绿色智能驱油技术,进一步提高原油采收率成为亟待解决的难题^[3-4]。

离子液体是一类可调控、多功能的绿色环保材料,本质上是一种在室温或室温附近温度下呈现液态的盐,又称为室温离子液体^[5]。与常见的盐一样,离子液体仅由阳离子和阴离子组成,通过静电相互作用结合在一起。而与固态盐形成晶体结构不同,离子液体由能够自由移动的离子组成,如图1所示,从而使盐具有流动的特性^[6]。离子液体具有良好的离子导电性与电化学稳定性,主要应用于电化学领域^[7-8],同时离子液体具有多样性,许多功能型离子液体正在研发中,在生物医学^[9]、绿色化学^[10-11]以及光电子^[12]等多个学科领域具有广阔的应用前景。

最近,离子液体在提高采收率领域的应用研究受到学者们关注。Dahbag 等^[13]在离子液体驱油实验的基础上,利用 CMG-STARS 软件中的表面活性剂

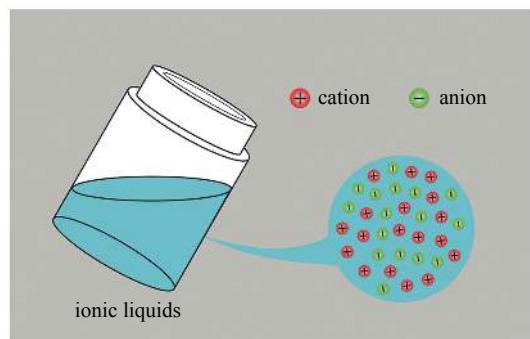


图 1 离子液体宏观与微观状态示意图

Fig. 1 Diagram of the macroscopic and microscopic states of ionic liquids

模型对离子液体驱油过程进行数值模拟,实验接触角测量和模拟的相对渗透率曲线变化表明:离子液体提高采收率机理主要是促进岩石润湿性向更亲水转变。Nabipour 等^[14]分别研究了地层盐水和海水对离子液体驱中界面张力和润湿性变化的影响,结果表明:离子液体不仅可以承受 25 g/L 的含盐度,而且还能更有效的降低油水界面张力。Velusamy 等^[15]研究了 6 种常见咪唑型离子液体在高含盐和不含盐条件下的界面张力变化,接触角测量结果表明:在室温和高含盐条件 (NaCl 浓度为 200 g/L) 下离子液体能够使油水界面张力降低 49.7%。Manshad 等^[16]通过悬滴法和接触角测试证明了离子液体可以作为一种新型表面活性剂来改变岩石润湿性和降低油水界面张力,岩心驱替实验表明:与水驱相比,原油采收率提高了 13%。Pillai 等^[17]研究了 [C₈mim]BF₄, [C₁₀mim]BF₄, [C₁₂mim]BF₄ 这 3 种合成离子液体对界面张力和油湿岩石润湿性的影响,实验发现这 3 种离子液体不仅能在高矿化度和高温条件下保持稳定,还能有效提高岩石润湿性能并且显著降低界面张力。BinDahbag 等^[18]利用驱油实验的采收率和压降数据,对岩心盐水驱和离子液体驱过程进行了拟合,发现在高矿化度条件下采用离子液体驱获得的采收率比盐水驱更高。可见,离子液体在提高采收率方面的研究思路主要是将其视为传统表面活性剂的替代品,仅仅关注了离子液体优异的化学特性。然而离子液体同样表现出良好的物理场响应特征,有望把材料的响应性和驱动性有机地结合为一体,通过物理场刺激来调控材料的转移路径,从而实现离子液体智能驱油,达到提高采收率的目的。

磁场作为一种有效的驱动和控制手段,由于不需要与样品或试剂的直接接触即可实现对分析物的操控,同时具有驱动力强、可控性高等优势,被广泛用于生物医学、微流控等研究领域^[19-20]。在提高采收率领域, Kothari 等^[21]利用表面活性剂与磁性纳米颗粒复配制备了铁磁流体,并总结了铁磁流体驱油

机理: 表面活性剂的加入将大大降低界面张力, 同时铁磁流体具有与磁场相互作用的能力, 外加磁场可以提高驱替液的流动能力, 表现出比表面活性剂驱油更高的波及效率。姚军等^[22]开展了磁场-渗流场耦合作用下的铁磁流体多孔介质流动数值模拟, 研究了利用磁场控制的铁磁流体驱油问题, 结果表明: 利用磁场控制铁磁流体的驱替路径可以提高波及范围从而提高采收率, 为智能驱油提供了新的思路。所使用的铁磁流体是一类特殊的智能纳米材料, 不仅表现出一般流体的性质, 同时可以受到磁场的控制^[23]。由于离子液体功能的可定制性, 利用特殊的阳离子和阴离子可以制备与铁磁流体一样带有磁性的离子液体。磁性离子液体是一类具有磁性的功能化离子液体, 不仅保留了一般离子液体的蒸气压低、液程宽、良好的溶解能力等优点, 而且能够在磁场作用下产生一定的磁化强度, 并对外界磁场产生宏观响应^[24]。Hayashi 和 Hamaguchi^[25]在 2004 年首次提出了磁性离子液体的概念, 他们利用 [bmim]Cl 和 FeCl₃ 为原料合成了一种离子液体 ([bmim]FeCl₄), 该离子液体能够被磁铁吸引, 表现出很强的顺磁性。图 2 中的照片显示了磁性离子液体 ([bmim]FeCl₄) 在磁场下的响应, 无磁铁作用时(图 2(a)), 离子液体层在水层下扩散, 当磁铁靠近时, 离子液体层被磁铁吸引(图 2(b)), 最后在磁场力的作用下被扭曲形成凹曲线型(图 2(c))。

虽然磁场对磁性流体具备很好的控制能力, 但磁性离子液体是一种特殊的离子液体, 大多数离子液体并不具备磁场响应, 因此磁场会限制离子液体的应用范围。相比磁场而言, 离子液体的电磁场响应更加值得关注, 有望应用于调控水驱油路径, 研究的关键在于揭示多孔介质中离子液体在电磁场作用下的流动机理。目前尚未有关于电磁场作用下离子液体在多孔介质中的相关研究。本文在分析离子液体在毛细管中电磁场响应机理的基础上, 建立了电磁场-渗流场耦合作用下离子液体多孔介质流动模型, 通过理论推导与数值分析, 研究电磁场-渗流场耦合

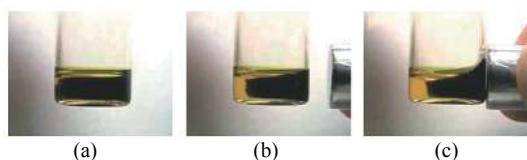


图 2 离子液体 ([bmim]FeCl₄) 的磁场响应^[25]

Fig. 2 Magnetic field response of ionic liquid [bmim]FeCl₄^[25]

作用下离子液体在多孔介质中的流动规律, 并从离子液体优选、离子液体智能驱油、电致热量影响 3 个方面进行讨论。

1 电磁场-渗流场耦合流动模型

1.1 毛细管中的洛伦兹力

在离子液体中有 3 种离子存在形态: 离子对(呈电中性)、离子团(数量很少)以及能够自由移动的阴、阳离子, 正是由于这些自由移动的阴、阳离子存在, 离子液体表现出优异的导电性能, 同时自由移动的阴、阳离子也是离子液体对电磁场产生响应的根本原因^[26]。下面分析离子液体在毛细管中的电磁场响应机理, 首先建立离子液体在电磁场作用下的毛细管模型, 如图 3 所示, 毛细管处在相互垂直的均匀电场(y 方向)和稳恒磁场(z 方向)中, 毛细管轴向沿 x 方向。

在电磁场作用下, 毛细管模型中任意一个自由离子会同时受到电场力和洛伦兹力的作用, 其受力情况可用如下公式表示^[27]

$$\mathbf{F}_i = n_i e \mathbf{E} + n_i e \mathbf{v}_i \times \mathbf{B} \quad (1)$$

式中: \mathbf{F}_i 表示第 i 个离子在电磁场作用下所受的合力; n_i 为第 i 个离子的电荷数; e 为单位电荷 (1.6×10^{-19} C), \mathbf{v}_i 为第 i 个离子在 xOy 平面(垂直于磁场的平面)上的速度分量, \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 分别为电场强度和磁感应强度。

由于离子液体内部阴、阳离子所受电场力的方向相反, 并且离子液体整体呈电中性, 则式 (1) 右边第一项对离子液体内部所有阴、阳离子求和后等于零, 即宏观上离子液体整体所受电场力为零。式 (1)

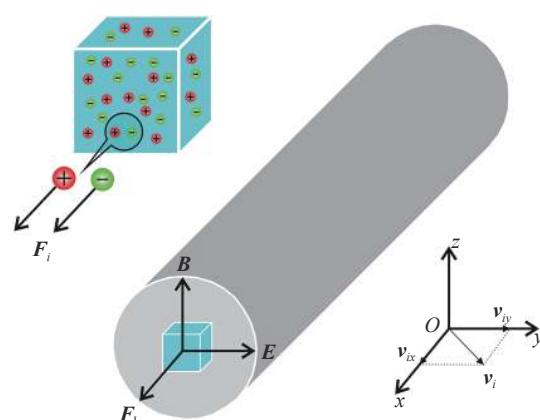


图 3 离子液体在电磁场作用下的毛细管模型

Fig. 3 Capillary model of ionic liquids under electromagnetic field

右边第二项为运动的离子在磁场作用下产生的洛伦兹力, 其大小与在垂直于磁场的平面内的速度大小成正比, 离子速度在 xOy 平面内的分量 v_i 可进一步分解为沿毛细管轴向 (x 方向) 的 v_{ix} 和平行于电场方向 (y 方向) 的 v_{iy} 两个速度分量。

离子液体中不同速度分量的离子在宏观上受到的总洛伦兹力也不同。沿毛细管轴向移动而具有 v_{ix} 分量的离子, 由于阴、阳离子所受洛伦兹力大小相等方向相反, 则总洛伦兹力为零; 因热运动而具有 v_{ix} 分量的离子, 从热力学统计平均分析以及离子液体呈电中性的特点, 离子液体在磁场作用下的总洛伦兹力也为零; 唯一不为零的就是与电场方向平行的速度分量 v_{iy} (即迁移速度), 且阴、阳离子的迁移速度 $v_{iy\pm}$ 满足如下关系^[28]

$$v_{iy\pm} = \mu_{\pm} E \quad (2)$$

式中 μ_{\pm} 为阴、阳离子迁移率, 根据电磁学理论可知, 由于具有速度分量 v_{iy} 的阴、阳离子运动方向相反且所带电荷相反, 则这部分阴、阳离子所受洛伦兹力方向相同, 即在宏观上离子液体的总洛伦兹力不为零。

如图 3 所示, 在毛细管模型中取一单位体积模型, 假设该单位体积模型中离散的阴、阳离子的粒子数密度分别为 m_- , m_+ , 则单位体积的离子液体总洛伦兹力 F_V 为

$$F_V = \sum_i n_i e v_{iy} \times B = E \times B (\mu_- m_- n_- e + \mu_+ m_+ n_+ e) \quad (3)$$

由于离子液体中的离子团很少, 根据电中性原则, 阴、阳离子所带的电荷量 q 相等, 即 $q = n_- e = n_+ e$, 假设离子液体中总离子的粒子数密度为 m , 能够自由移动的阴阳离子数占总离子数的百分比为 λ , 且阴、阳离子的粒子数密度近乎相等, 即有 $m_- \approx m_+ = \lambda m / 2$, 则式 (3) 可改写为

$$F_V = E \times B (\mu_- + \mu_+) \lambda m q / 2 \quad (4)$$

假设离子液体的密度为 ρ , 电导率为 σ , 其电导率又可通过电荷量 q 、粒子数密度 m 以及自由离子占比 λ 表示为如下形式^[29]

$$\sigma = (\mu_- + \mu_+) \lambda m q / 2 \quad (5)$$

则单位质量的离子液体总洛伦兹力 F_L 为

$$F_L = \sigma E \times B / \rho \quad (6)$$

1.2 离子液体运动方程

下面从理论上对电磁场-渗流场耦合作用下离

子液体在毛细管中的运动方程进行推导, 假设毛细管内离子液体的密度为 ρ 且不可压缩, 黏度为 μ . 根据连续介质理论假设可知, 只要离子液体流动特征尺度远大于离子液体微元尺度, 则可采用 Navier-Stokes 动力学方程描述离子液体流动过程. 常黏度条件下不可压缩离子液体的 Navier-Stokes 方程可以表示为

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} \quad (7)$$

式中, \mathbf{v} 为离子液体流速; p 为离子液体压力; \mathbf{f} 为单位质量离子液体所受的体积力, 若考虑离子液体的重力影响并外加电磁场作用, 则离子液体所受的体积力包括重力和电磁场作用下产生的洛伦兹力两部分. 式 (6) 已给出电磁场作用下单位质量离子液体所受的洛伦兹力, 设重力加速度为 \mathbf{g} , 那么电磁场-渗流场耦合作用下离子液体在毛细管中的运动方程可以表示为

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = \frac{1}{\rho} \sigma \mathbf{E} \times \mathbf{B} + \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} \quad (8)$$

假设毛细管直径均匀, 则离子液体在毛细管中流速只有沿轴向的分量, 这样运动方程中的对流项 $\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = 0$; 那么离子液体在毛细管中的运动方程可以简化为

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \sigma \mathbf{E} \times \mathbf{B} + \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} \quad (9)$$

1.3 多孔介质一维流动模型

为了研究电磁场-渗流场耦合作用下离子液体在多孔介质中的一维流动规律, 建立基于“直毛细管”的多孔介质一维流动模型, 如图 4 所示, 该模型由一束平行的等径毛细管所构成^[30].

假设离子液体沿 x 轴正方向流动, 洛伦兹力的方向与流动方向一致; 假设毛细管水平, 则离子液体所

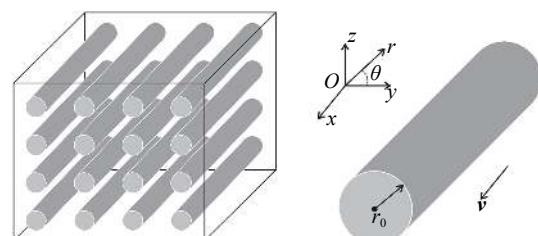


图 4 基于“直毛细管”的多孔介质一维流动模型

Fig. 4 One-dimensional flow model of porous media based on “straight capillary”

受重力可以忽略。这样，电磁场-渗流场耦合作用下离子液体在多孔介质中的一维流动方程可以表示为如下形式

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \sigma E B - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v \quad (10)$$

模型求解选用圆柱坐标系 (r, θ, x) ，则公式(10)在圆柱坐标系下可以表示为

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \sigma E B = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right] \quad (11)$$

当毛细管两端压差恒定且外加电磁场稳定时，离子液体做定常流动，有 $\partial v / \partial t = 0$ 且速度 v 只与 r 坐标有关而与 (θ, x) 无关，则式(11)可进一步简化为

$$\frac{dp}{dx} - \sigma E B = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right) \quad (12)$$

设毛细管半径为 r_0 ，采用无滑移边界条件 $v(r=r_0)=0$ ，求解式(12)可得毛细管中半径为 r 处离子液体速度

$$v = \frac{1}{4\mu} \left(\sigma E B - \frac{dp}{dx} \right) (r_0^2 - r^2) \quad (13)$$

通过厚度为 dr 的单元液筒的体积流量 $dQ = v dA$ ，其中 dA 表示单元液筒截面积，则离子液体单位时间内通过毛细管的平均流量可表示为

$$Q = \int_A v dA = \int_0^{r_0} v \cdot 2\pi r dr \quad (14)$$

最后将式(13)代入式(14)积分可得电磁场-渗流场耦合作用下离子液体在毛细管中 Poiseuille 流动的流量方程

$$Q = \frac{\pi r_0^4}{8\mu} \left(\sigma E B - \frac{dp}{dx} \right) \quad (15)$$

1.4 多孔介质三维流动模型

图4所示的一维流动模型只能描述离子液体在一个方向上的流动规律，为了弥补这一缺陷将模型作如下修正：在3个互相正交的方向上各放置三分之一的毛细管^[30]，建立基于“毛细管组”的多孔介质三维流动模型，如图5所示。

假设离子液体可以在 x, y, z 三个轴向上流动，重力方向沿 z 轴负方向，洛伦兹力 \mathbf{F}_L 的方向任意（图5），由角度参数 α 和 β 控制，则电磁场-渗流场耦合作用下离子液体在多孔介质中的三维流动方程可

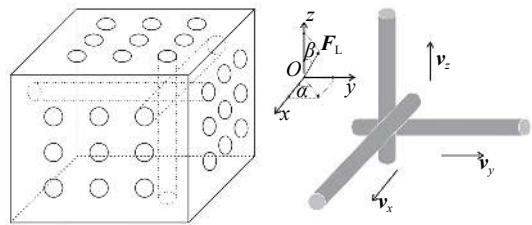


图5 基于“毛细管组”的多孔介质三维流动模型

Fig. 5 Three-dimensional flow model of porous media based on “capillary group”

以表示为如下形式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \sigma E B \cos \alpha \sin \beta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v_x \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \sigma E B \sin \alpha \sin \beta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v_y \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \sigma E B \cos \beta - g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v_z \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

类似一维模型，在圆柱坐标系下采用无滑移边界求解并积分后可得离子液体3个方向上的体积流量

$$\left. \begin{aligned} Q_x &= \frac{\pi r_0^4}{8\mu} \left(\sigma E B \cos \alpha \sin \beta - \frac{\partial p}{\partial x} \right) \\ Q_y &= \frac{\pi r_0^4}{8\mu} \left(\sigma E B \sin \alpha \sin \beta - \frac{\partial p}{\partial y} \right) \\ Q_z &= \frac{\pi r_0^4}{8\mu} \left(\sigma E B \cos \beta - g - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g \right) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

由于 $Q = A \bar{v}$ (Q 为毛细管体积流量， A 为毛细管截面积， $A = \pi r_0^2$ ， \bar{v} 为平均线性速度)，则电磁场-渗流场耦合作用下离子液体在3个方向上的平均线性流速可表示为

$$\left. \begin{aligned} \bar{v}_x &= \frac{r_0^2}{8\mu} \left(\sigma E B \cos \alpha \sin \beta - \frac{\partial p}{\partial x} \right) \\ \bar{v}_y &= \frac{r_0^2}{8\mu} \left(\sigma E B \sin \alpha \sin \beta - \frac{\partial p}{\partial y} \right) \\ \bar{v}_z &= \frac{r_0^2}{8\mu} \left(\sigma E B \cos \beta - g - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g \right) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

2 数值分析

下面以疏松砂岩油藏经长期注水开发后形成的高渗通道为研究对象，对电磁场-渗流场耦合作用下离子液体在多孔介质中的流动规律进行数值分析。在数值计算过程中，根据高渗通道孔隙半径分布特

点, 将多孔介质流动模型中的毛细管半径 r_0 均设为 $100 \mu\text{m}$.

2.1 洛伦兹力

离子液体在电磁场作用下产生响应的本质是洛伦兹力的存在。图 6 为单位体积离子液体的洛伦兹力与电磁场强度的三维关系图, 其中离子液体的电导率为 0.5 S/m 。从图中可以看出, 当离子液体的电导率一定时, 单位体积离子液体的洛伦兹力与电磁场强度有关; 当磁感应强度一定时, 洛伦兹力随着电场强度的增大而增大, 当电场强度一定时, 洛伦兹力随着磁感应强度的增大而增大, 即电场强度与磁感应强度的乘积越大, 单位体积离子液体的洛伦兹力越大。

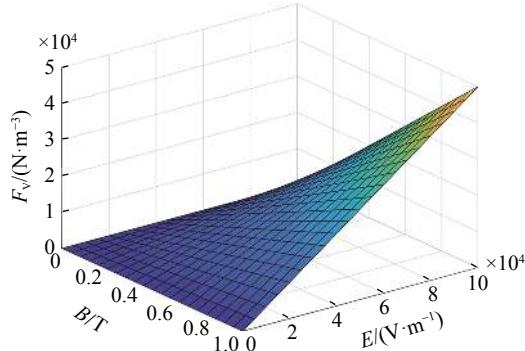


图 6 单位体积离子液体的洛伦兹力与电磁场强度的关系

Fig. 6 The relationship between Lorentz force per unit volume of ionic liquids and electromagnetic field strength

2.2 毛细管流量

图 7 为毛细管流量与离子液体电导率、黏度的三维关系图, 其中电场强度为 $5 \times 10^4 \text{ V/m}$, 磁感应强度为 0.5 T , 压力梯度为 5.0 kPa/m 。从图中可以看出, 当电磁场强度和压力梯度一定时, 毛细管流量与离子液体的电导率与黏度有关; 当黏度一定时, 毛细管流量随着离子液体电导率的增大而增大, 当电导率一定时, 毛细管流量随着离子液体黏度的增大而减小, 即离子液体的电导率与黏度的比值越大, 离子液体的毛细管流量也越大。

图 8 为离子液体毛细管流量与电磁场强度的三维关系图, 其中电导率为 0.5 S/m , 黏度为 $100 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 压力梯度为 5.0 kPa/m 。从图中可以看出, 当离子液体电导率、黏度和压力梯度一定时, 离子液体的毛细管流量只与电磁场强度有关, 当磁感应强度一定时, 离子液体的毛细管流量随着电场强度的增大而增大, 当电场强度一定时, 离子液体的毛细管流量随

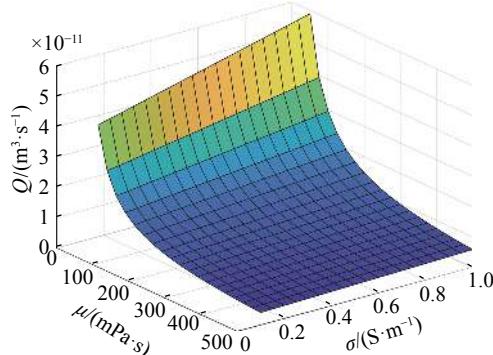


图 7 毛细管流量与离子液体电导率、黏度的关系

Fig. 7 The relationship between capillary flow rate and conductivity and viscosity of ionic liquid

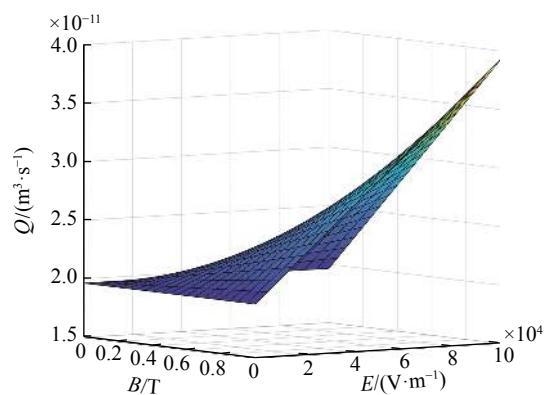


图 8 离子液体的毛细管流量与电磁场强度的关系

Fig. 8 The relationship between capillary flow rate of ionic liquids and electromagnetic field strength

着磁感应强度的增大而增大, 即电场强度与磁感应强度的乘积越大, 离子液体的毛细管流量也越大。

下面用场强与磁感应强度的乘积来表征电磁场强度, 即 $W = EB$ 。图 9 为毛细管流量与压力梯度、电磁场强度的三维关系图, 其中离子液体电导率为 0.5 S/m , 黏度为 $100 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。从图中可以看出, 在电磁场强度为 0 (即不考虑电磁场) 时, 毛细管流量与压力梯度呈线性关系, 且毛细管流量随着压力梯度增大而增大; 当电场强度不断增大时, 毛细管流量与压力梯度之间仍然保持线性关系, 同时不同电磁场强度下的毛细管流量与压力梯度关系构成了一个三维平面, 即考虑电磁场前后毛细管流量和压力梯度之间线性关系的斜率不变, 说明电磁场通过洛伦兹力在离子液体上产生一个电磁驱动压强, 形成一个类似压力梯度的电磁驱动等效压力梯度, 从而改变离子液体的流量。当电磁场强度为 $2.0 \times 10^4 \text{ V/m}\cdot\text{T}$ 时, 电磁场在电导率为 0.5 S/m 的离子液体上可形成 10.0 kPa/m 电磁驱动等效压力梯度。

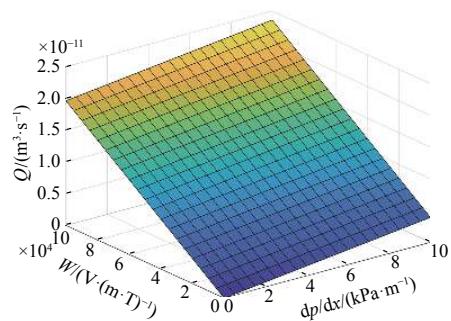
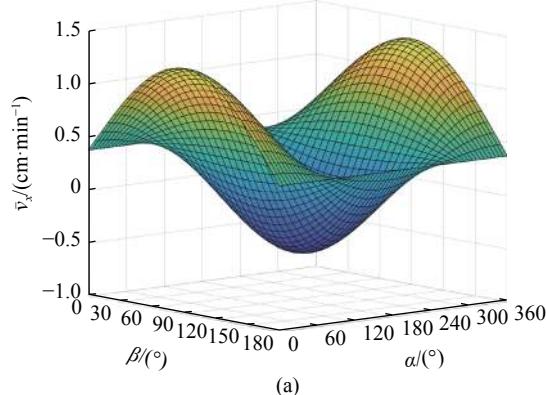


图 9 毛细管流量与压力梯度、电磁场强度的三维关系

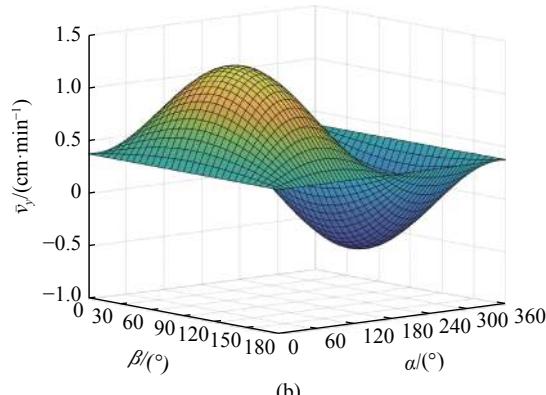
Fig. 9 Three-dimensional relationship between capillary flow rate, pressure gradient and electromagnetic field strength

2.3 平均线性流速

下面利用三维流动模型分析电磁场-渗流场耦合作用下离子液体在多孔介质中的流动特征。图 10(a) 和图 10(b) 分别为离子液体在 x 和 y 方向上的平均线性流速与洛伦兹力方向参数的三维关系图, 其中电导率为 0.5 S/m, 黏度为 100 mPa·s。从图中分析可知, 通过改变角度参数 α 和 β (即调整洛伦兹力的方向),



(a)



(b)

图 10 离子液体在 (a) x 方向和 (b) y 方向平均线性流速与洛伦兹力方向参数的三维关系

Fig. 10 Three-dimensional relationship between the average linear velocity of ionic liquids in the (a) x -direction and (b) y -direction and the direction parameter of Lorentz force

x 和 y 方向上的平均线性流速在流速为 0 的平面上下波动, 说明电磁场不仅可以改变离子液体的流速大小, 还能改变离子液体的流动方向。

由于离子液体在 z 方向上的平均线性流速会受到重力的影响, 下面分析其与洛伦兹力方向参数、密度之间的关系。图 11 为离子液体在 z 方向上的平均线性流速与洛伦兹力方向参数、密度的三维关系图, 其中电导率为 0.5 S/m, 黏度为 100 mPa·s, 重力加速度取值为 9.8 m/s^2 。从图中分析可知, 当 $\beta = 90^\circ$ 时, 洛伦兹力方向与 z 轴垂直, 离子液体仅在压差驱动力和重力作用下流动, 此时 z 方向平均线性流速为负值, 说明重力作用占主导作用, 离子液体沿重力方向流动; 当改变角度参数 β 时, z 方向平均线性流速会相应发生改变, 对于密度较小的离子液体, 随着角度参数 β 的减小, 流速由负值变为正值, 说明洛伦兹力在不断平衡离子液体重力效应, 最终改变了离子液体的运动方向, 对于密度较大的离子液体, 流速一直为负值, 说明需要更大的电磁场强度才能改变离子液体的流动方向。

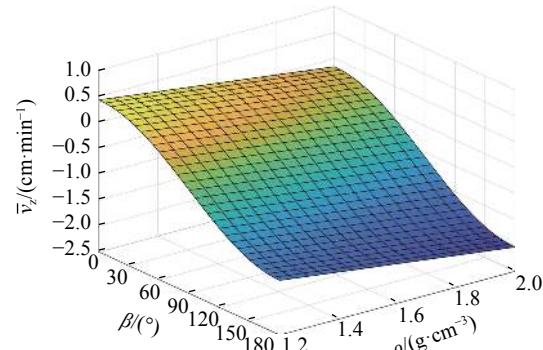
图 11 离子液体在 z 方向的平均线性流速与洛伦兹力方向参数、密度的三维关系

Fig. 11 Three-dimensional relationship between the average linear velocity of ionic liquids in the z -direction, the direction parameter of Lorentz force and density

3 讨论

3.1 离子液体优选

根据文献 [31] 中的公式, 可以求出 5 种离子液体在温度为 25°C 时的电导率和黏度数据, 并计算相应电导率与黏度的比值, 如表 1 所示。

下面利用基于“直毛细管”简化的多孔介质一维流动模型来分析表 1 中 4 种离子液体在电磁场-渗流场耦合作用下的流动特点。图 12 为不同离子液体

的毛细管流量与压力梯度的关系, 其中电磁场强度为 $2.5 \times 10^4 \text{ V/m}\cdot\text{T}$ 。由图中分析可知, [bmim][(CF₃SO₂)₂N] 的毛细管流量明显高于其他离子液体, 主要是因为其电导率与黏度的比值最大; 而 [bmim][BF₄] 的电导率与黏度的比值最小, 因此其毛细管流量最小; [bmim][CF₃SO₃] 与 [bmim][BF₄] 两种离子液体对应的直线几乎重合, 两者的毛细管流量相近, 结合表 1 中数据分析可知, 主要是因为这两种离子液体的电导率与黏度的比值相当。由局部放大图可知, 在较小

压力梯度时, 因 [bmim][BF₄] 的电导率与黏度比值略大于 [bmim][CF₃SO₃], 其毛细管流量要大于 [bmim][CF₃SO₃]; 随着压力梯度不断增大, 由于 [bmim][CF₃SO₃] 的黏度比 [bmim][BF₄] 小, 其毛细管流量逐渐高于 [bmim][BF₄]。因此, 在优选离子液体时, 应选择电导率与黏度的比值较大的离子液体作为流体介质, 若离子液体电导率与黏度的比值相同时, 应选择黏度较小的离子液体, 从而保证离子液体在多孔介质中更容易流动。

表 1 五种离子液体的电导率和黏度

Table 1 Conductivity and viscosity of five ionic liquids

Ionic liquids	[bmim][(C ₂ F ₅ SO ₂) ₂ N]	[bmim][(CF ₃ SO ₂) ₂ N]	[bmim][CF ₃ SO ₃]	[bmim][PF ₆]	[bmim][BF ₄]
$\sigma / (\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	0.14	0.39	0.29	0.15	0.35
$\mu / (\text{mPa}\cdot\text{s})$	108.40	49.58	83.64	258.74	99.42
$\sigma \cdot \mu^{-1} / (\text{S}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	1.29	7.87	3.47	0.58	3.52

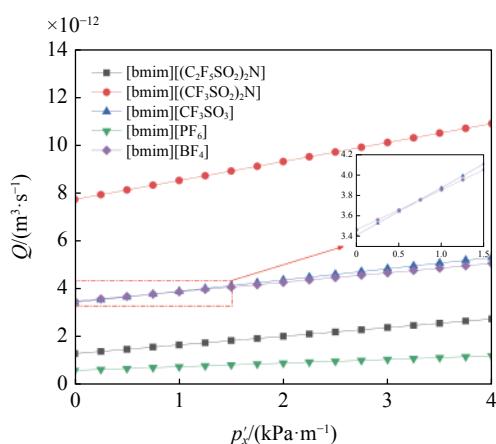


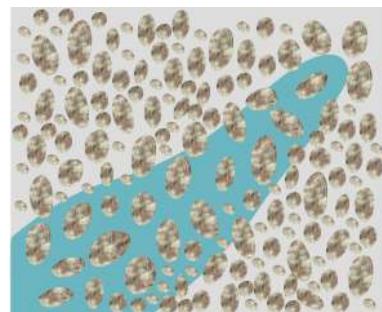
图 12 不同离子液体的毛细管流量与压力梯度的关系

Fig. 12 The relationship between capillary flow and pressure gradient of different ionic liquids

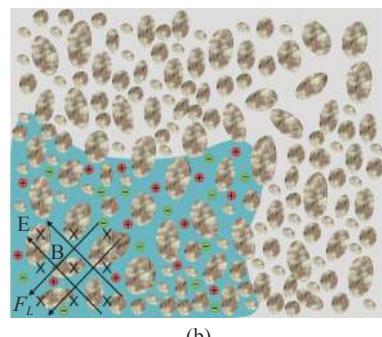
3.2 离子液体智能驱油

离子液体具有良好的电磁场响应, 电磁场的可调控性为离子液体的智能驱油提供了思路。基于“毛细管组”简化的多孔介质三维流动模型, 从理论上说明了通过改变角度参数 α 和 β (即调整洛伦兹力的方向)可以改变离子液体的流动速度大小和方向。在疏松砂岩油藏中, 若能实时改变作用在离子液体上的电场方向和磁场方向, 即可改变离子液体所受的洛伦兹力方向, 进而控制电磁场-渗流场耦合作用下离子液体在多孔介质中的流动方向, 解决利用压力差难以控制流动路径的难题, 为离子液体智能驱油提供理论依据。图 13 为在平面上存在优势通道时传统

水驱和离子液体驱的流动路径示意图, 由于优势通道的存在, 传统水驱时注入水在压力差的驱动下主要沿着优势通道流动(图 13(a)), 两侧的区域难以波及; 离子液体驱时, 在电磁场作用下产生的洛伦兹力(图 13(b))可以延缓注入离子液体沿优势通道的快速突进, 从而改变离子液体的流动路径。



(a)



(b)

图 13 在平面上存在优势通道时 (a) 传统水驱和 (b) 离子液体驱的流动路径示意

Fig. 13 Diagram of the flow paths of (a) traditional waterflooding and (b) ionic liquids flooding when there is a dominant channel laterally

图 14 为在纵向上存在高渗层时传统水驱和离子液体驱的流动路径示意图,由于高渗层的存在以及重力作用,传统水驱时注入水在压力差的驱动下主要沿着高渗层流动(图 14(a)),进入低渗层中的注入水较少;离子液体驱时,由于竖直向上的洛伦兹力的存在(14(b)),原本进入高渗层的离子液体向低渗层中流动,进而改变离子液体驱替方向。可见,无论是平面上存在优势通道,还是纵向上存在高渗层,通过电磁场的调控可以改变洛伦兹力的方向,从而控制离子液体朝低波及区域驱替,达到提高波及范围而提高采出程度目的。

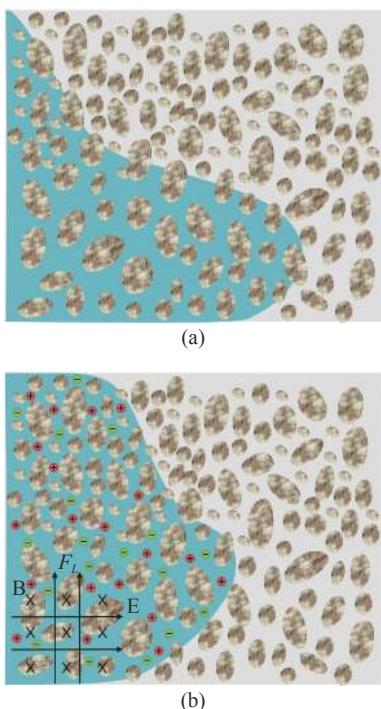


图 14 在纵向上存在高渗层时 (a) 传统水驱和 (b) 离子液体驱的流动路径示意

Fig. 14 Diagram of the flow paths of (a) traditional waterflooding and (b) ionic liquids flooding when there is a high permeability layer vertically

3.3 电致热量影响

离子液体在电磁场作用下会产生电流,电流会产生热量即电致热量,随着热量不断增加,电磁场产生的热量会使离子液体的温度升高,而离子液体是温度敏感材料,其电导率和黏度也会随着温度的变化发生相应的改变,从而影响电磁场-渗流场耦合作用下离子液体在多孔介质中的流动。根据文献 [31] 中的公式,可以求出 [bmim][PF₆] 和 [bmim][BF₄] 这两种常见离子液体在不同温度 T 下的电导率 σ 和黏度 μ 数据,并计算相应电导率与黏度的比值 σ/μ ,如表 2

和表 3 所示。由表中数据分析可知,随着温度的升高两种常见离子液体的电导率变大、黏度降低,其电导率与黏度的比值在不断增大。图 15 为两种常见离子液体的毛细管流量与温度的关系,其中电磁场强度为 2.5×10^4 V/m·T, 压力梯度为 5.0 kPa/m。从图中可以看出,毛细管流量随着温度升高而增大,结合表中数据可以说明温度升高会增大离子液体电导率与黏度的比值,进而促进离子液体在多孔介质中流动;通过非线性函数拟合可以发现,毛细管流量随温度的升高趋势符合指指数型增长规律,且 [bmim][BF₄] 的流量增加速度明显高于 [bmim][PF₆], 说明温度升高对 [bmim][BF₄] 离子液体在多孔介质中流动的影响程度更大。另外,温度升高能降低原油黏度、改变岩

表 2 离子液体 [bmim][PF₆] 在不同温度下的电导率和黏度

Table 2 Conductivity and viscosity of ionic liquid [bmim][PF₆] at different temperatures

$T/^\circ\text{C}$	25	35	45	55	65
$\sigma /(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	0.15	0.25	0.39	0.57	0.80
$\mu /(\text{mPa} \cdot \text{s})$	258.74	140.04	84.17	54.81	38.00
$\sigma \cdot \mu^{-1} /(\text{S} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	0.58	1.79	4.63	10.40	21.05

表 3 离子液体 [bmim][BF₄] 在不同温度下的电导率和黏度

Table 3 Conductivity and viscosity of ionic liquid [bmim][BF₄] at different temperatures

$T/^\circ\text{C}$	25	35	45	55	65
$\sigma /(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	0.35	0.55	0.81	1.13	1.51
$\mu /(\text{mPa} \cdot \text{s})$	99.42	60.29	39.41	27.34	19.89
$\sigma \cdot \mu^{-1} /(\text{S} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	3.52	9.12	20.55	41.33	75.92

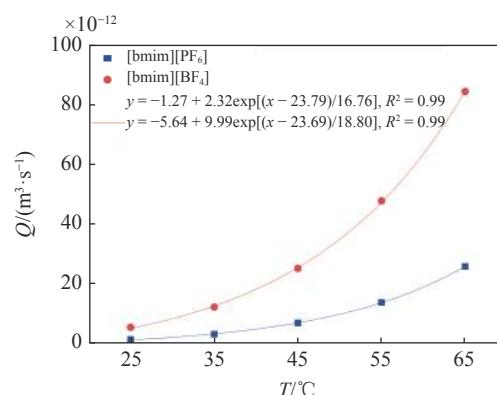


图 15 两种常见离子液体的毛细管流量与温度的关系

Fig. 15 The relationship between capillary flow and temperature of two common ionic liquids

石润湿性, 提升原油渗流能力。因此, 电磁场产生的热效应对离子液体流动能力及驱油效率的影响有待进一步深入研究。

4 结论与认识

在分析离子液体在毛细管中电磁场响应机理的基础上, 建立了电磁场-渗流场耦合作用下离子液体多孔介质流动模型。通过理论推导与数值分析得到以下结论与认识:

(1) 电磁场-渗流场耦合作用下毛细管流量大小主要由离子液体电导率与黏度的比值(内因)、电磁场强度与压力梯度(外因)两方面因素决定;

(2) 电磁场通过洛伦兹力在离子液体上产生一个电磁驱动压强, 形成一个类似压力梯度的电磁驱动等效压力梯度, 从而改变离子液体的流量, 当电磁场强度为 2.0×10^4 V/m·T 时, 电磁场在电导率为 0.5 S/m 的离子液体上可形成 10 kPa/m 电磁驱动等效压力梯度;

(3) 通过调整电磁场方向即可控制离子液体在多孔介质中的流动方向, 解决利用压力差难以控制流动路径的难题, 为离子液体智能驱油提供理论依据;

(4) 离子液体在电磁场作用产生的电致热量, 不仅会影响离子液体的电导率和黏度, 也会降低原油黏度、改变岩石润湿性。因此, 电磁场产生的热效应对离子液体的流动能力及驱油效率的影响有待进一步探索。

参 考 文 献

- 1 侯玉培. 整装油藏流场重整提高采收率的数值模拟研究. [硕士论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2011 (Hou Yupei. Numerical simulation research of uncompartimentalized oilfields by flow field reforming to improve oil recovery. [Master Thesis]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2011 (in Chinese))
- 2 贾虎, 邓力辉. 基于流线聚类人工智能方法的水驱油藏流场识别. *石油勘探与开发*, 2018, 45(2): 312-319 (Jia Hu, Deng Lihui. Oil reservoir water flooding flowing area identification based on the method of streamline clustering artificial intelligence. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(2): 312-319 (in Chinese))
- 3 贾爱林, 郭建林. 智能化油气田建设关键技术与认识. *石油勘探与开发*, 2012, 39(1): 118-122 (Jia Ailin, Guo Jianlin. Key technologies and understandings on the construction of smart fields. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(1): 118-122 (in Chinese))
- 4 张玉松, 刘琦, 彭勃等. 智能纳米化学驱油剂研究现状. *现代化工*, 2020, 40(6): 19-23 (Zhang Yusong, Liu Qi, Peng Bo, et al. Development of smart nanomaterials for enhanced oil recovery. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40(6): 19-23 (in Chinese))
- 5 邓友全. 离子液体—性质、制备与应用. 北京: 中国石化出版社, 2006. (Deng Youquan. Ionic Liquid-Property, Preparation and Application. Beijing: China Petrochemical Press, 2006 (in Chinese))
- 6 Singh VV, Nigam AK, Batra A, et al. Applications of ionic liquids in electrochemical sensors and biosensors. *International Journal of Electrochemistry*, 2012, 2012: 1-19
- 7 Ohno H. Electrochemical Aspects of Ionic Liquids. John Wiley & Sons, 2005
- 8 Armand M, Endres F, Macfarlane DR, et al. Ionic-liquid materials for the electrochemical challenges of the future. *Nature Materials*, 2009, 8(8): 621-629
- 9 曹建平, 牟永晓, 陈媛媛等. 离子液体在药物研究中的应用. *药学学报*, 2019, 54(2): 245-257 (Cao Jianping, Mou Yongxiao, Chen Yuanyuan, et al. Application of ionic liquids in drug research. *Acta Pharmaceutica Sinica*, 2019, 54(2): 245-257 (in Chinese))
- 10 Earle MJ, Seddon KR. Ionic liquids. Green solvents for the future. *Pure and Applied Chemistry*, 2000, 72(7): 1391-1398
- 11 Zhao H. Innovative applications of ionic liquids as “green” engineering liquids. *Chemical Engineering Communications*, 2006, 193(12): 1660-1677
- 12 Souza RF, Alencar M, Meneghetti MR, et al. Nonlocal optical nonlinearity of ionic liquids. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, 20(15): 155102
- 13 Dahbag MB, Hossain ME, Alquaishi AA. Efficiency of ionic liquids as an enhanced oil recovery chemical: simulation approach. *Energy & Fuels*, 2016, 30(11): 9260-9265
- 14 Nabipour M, Ayatollahi S, Keshavarz P. Application of different novel and newly designed commercial ionic liquids and surfactants for more oil recovery from an Iranian oil field. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, 230: 579-588
- 15 Velusamy S, Sakthivel S, Sangwai JS. Effect of imidazolium-based ionic liquids on the interfacial tension of the alkane–water system and its influence on the wettability alteration of quartz under saline conditions through contact angle measurements. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(46): 13521-13534
- 16 Manshad AK, Rezaei M, Moradi S, et al. Wettability alteration and interfacial tension (IFT) reduction in enhanced oil recovery (EOR) process by ionic liquid flooding. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, 248: 153-162
- 17 Pillai P, Kumar A, Mandal A. Mechanistic studies of enhanced oil recovery by imidazolium-based ionic liquids as novel surfactants. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2018, 63: 262-274
- 18 BinDahbag MS, Hassanzadeh H, AlQuaishi AA, et al. Suitability of ionic solutions as a chemical substance for chemical enhanced oil recovery-A simulation study. *Fuel*, 2019, 242: 368-373
- 19 Miklés Z, 刘明杰. 电场和磁场响应的智能高分子材料. *生命科学*, 2008(3): 369-374 (Miklés Z, Liu Mingjie. Magnetic and electric field responsive soft materials. *Chinese Bulletin of Life Science*, 2008(3): 369-374 (in Chinese))

- 20 李炜, 姜燕妮, 颜君毅等. 磁场对双扩散液层热毛细对流的影响. *力学学报*, 2012, 44(3): 481-486 (Li Wei, Jiang Yanni, Yan Junyi, et al. Effect of magnetic field on thermocapillary convection in a double-diffusive liquid layer. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, 44(3): 481-486 (in Chinese))
- 21 Kothari N, Raina B, Chandak KB, et al. Application of ferrofluids for enhanced surfactant flooding in IOR//SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, Barcelona, Spain, June 2010, SPE-131272-MS
- 22 姚军, 黄涛, 黄朝琴等. 磁场-渗流场耦合作用下的铁磁流体多孔介质流动数值模拟. *科学通报*, 2017, 62(8): 836-846 (Yao Jun, Huang Tao, Huang Chaoqin, et al. Numerical simulation of ferrofluid flow in porous media under coupled magnetic and seepage fields. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(8): 836-846 (in Chinese))
- 23 Rosensweig RE. Magnetic fluids. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1987, 19(1): 437-461
- 24 姚田, 姚舜, 宋航. 磁性离子液体的应用研究进展. 化工进展, 2016, 35(S2): 214-218 (Yao Tian, Yao Shun, Song Hang. Application progress of magnetic ionic liquids. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, 35(S2): 214-218 (in Chinese))
- 25 Hayashi S, Hamaguchi H. Discovery of a magnetic ionic liquid [bmim]FeCl₄. *Chemistry Letters*, 2004, 33(12): 1590-1591
- 26 Wasserscheid P, Welton T. Ionic Liquids in Synthesis. John Wiley & Sons, 2008
- 27 Eijkel JCT, Dalton C, Hayden CJ, et al. A circular ac magnetohydrodynamic micropump for chromatographic applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2003, 92(1-2): 215-221
- 28 万静, 梁忠诚. 离子液体电磁驱动研究. *南京邮电大学学报 (自然科学版)*, 2012, 32(2): 97-102 (Wan Jing, Liang Zhongcheng. Electromagnetic drive of ionic liquids. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2012, 32(2): 97-102 (in Chinese))
- 29 Kataoka H, Saito Y. New approached for determining the degree of dissociation of a salt by measurements of dynamic properties of lithium ion electrolytes. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2002, 106(50): 13064-13068
- 30 Scheidegger AE. The physics of flow through porous media. *Soil Science*, 1958, 86(6): 355
- 31 Tokuda H, Hayamizu K, Ishii K, et al. Physicochemical properties and structures of room temperature ionic liquids. 1. Variation of anionic species. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2004, 108(42): 16593-16600