

doi:10.3799/dqkx.2017.518

储层多孔介质波动渗流力学研究进展与挑战

蒲春生^{1,2}, 郑黎明^{1,3}, 刘 静¹

1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580

2. 中国石油大学重质油国家重点实验室, 山东青岛 266580

3. 燕山大学车辆与能源学院, 河北秦皇岛 066004

摘要: 随着石油工业对低渗、特低渗、稠油、超稠油、小断块、薄油层及高含水等复杂油藏开发的不断加强, 波动强化采油技术作为一项高效低成本、不伤害储层、不污染环境的储层增产增注新技术, 具有广阔的发展与应用前景。基于对国内外相关成果的广泛调研, 揭示了弹性波作用下储层渗流动力学机制是提高波动强化采油技术矿场应用效果的关键, 阐述了在弹性波作用下波动渗流力学与传统孔隙介质弹性波传播理论和经典油水渗流力学之间的本质差异, 分析了定量描述储层多孔介质波动渗流动力学机理与规律的主要难点, 总结了储层波动渗流力学研究的最新进展, 展望了波动渗流力学理论研究需要进一步解决的重点问题。

关键词: 低频波动; 渗流力学; 弹性波传播; 孔隙介质; 石油地质。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2017)08-1247-16

收稿日期: 2017-01-22

Innovations and Challenges of Vibration Coupled Seepage Mechanics in Oil and Gas Reservoir Development

Pu Chunsheng^{1,2}, Zheng Liming^{1,3}, Liu Jing¹

1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. State Key Laboratory in Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

3. College of Vehicles and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

Abstract: With the development of oil and gas field, the complex reservoirs including low or ultra-low permeability reservoirs, heavy or ultra-heavy oil reservoirs, small fault block reservoirs, thin reservoirs, high water-cut reservoirs have been drawing increasing attention. Low-frequency vibration oil extraction technology has great potential for the complex reservoirs to improve the injection and output, because of its advantages of low cost, high effectivity, no formation damage and environmental pollution. Based on studying the outcomes in related fields at home and aboard, It is found the key lies in the theory of reservoir seepage dynamic mechanism under elastic waves to improve the field effect stability and optimize decision-making of low-frequency vibration oil extraction technology in this study. The generalization of the development of vibration coupled seepage mechanics can effectively distinguish the difference of seepage mechanics under vibration, elastic wave propagation theory in porous media and classical oil and gas seepage mechanics in aspects of the applied disciplines, source types, fluid flow equations, and boundary conditions. The main difficulties for quantitative description of mechanisms in dynamic flow in porous media by vibration coupled seepage mechanics are analyzed. Finally, key issues to be solved for the development of vibration coupled seepage mechanics are suggested.

Key words: low-frequency vibration; seepage mechanics; elastic wave propagation; porous medium; petroleum geology.

近年来, 低频波动强化采油技术由于具有增油效果稳定、施工成本低、不伤害储层、不污染环境等优势, 越来越受到石油行业的重视。低频波动强化采油技术, 又称(人工)地震采油技术, 是一种利用弹性

基金项目: 国家科技重大专项(No.20011ZX05009-004); 国家自然科学基金项目(No.51274229); 中国博士后科学基金项目(No.134268); 教育部长江学者创新团队发展计划项目(No.IRT1294)。

作者简介: 蒲春生(1959—), 男, 教授, 主要从事复杂油气藏物理—化学强化开采和资源环境保护理论与技术方面研究。

ORCID: 0000-0001-5375-7531. E-mail: chshpu@163.com

引用格式: 蒲春生, 郑黎明, 刘静, 2017. 储层多孔介质波动渗流力学研究进展与挑战. 地球科学, 42(8): 1247-1262.

波激励开发储层达到提高原油采收率目的的物理法增产技术(Huh, 2006),国内外围绕该技术的作用机理、应用设备、试验效果等针对性地开展了一系列理论和实践研究,并进一步发展了波动辅助化学开采系列技术。随着低渗、特低渗、致密油等复杂油藏勘探开发的不断发展和波动渗流力学机理研究的不断深入,波动强化采油技术的应用前景日益广阔。

波动强化采油应用过程中,开发储层近井带或内部受到人工震源或井筒内压力波动影响,孔隙发生形变,介质内部渗流场以及各相流体分布发生变化,该过程的微观力学作用机制属于波动渗流力学的研究对象。由于油气田开发过程中渗流场与弹性波场的共存与协同,波动渗流力学是渗流力学与孔隙介质弹性波传播理论的交叉创新学科。开展波动渗流力学研究,揭示弹性波影响储层宏观渗流的微观动力学机制,是波动强化采油技术提高施工效果的关键,亦为多场耦合下的波动辅助化学开采提供指导。

目前针对油气田开发中的波动渗流力学报道仍然较少,本研究通过分析其在波动强化采油中的实践意义、国内外理论研究进展与趋势,探讨了实际储层波动渗流力学研究与模型建立面临的挑战,预测了该理论的重点研究方向,有助于波动渗流力学和波动强化采油技术的进一步发展。

1 波动渗流力学研究的理论与实践意义

油气田开发过程中的波动渗流力学研究主要源于波动强化采油技术的应用与发展。低频波动强化采油技术自 20 世纪 50 年代被提出以来,经过了室内、矿场的检验而逐渐得到了发展。该技术利用强大的振动能量直接或间接作用于地层,通过振动波在地层的传播,使油层及流体产生不同的物理和化学变化,从而改善油层渗流条件,达到油水井增产增注的目的。作为一种特殊的开发手段,低频波动强化采油技术在俄罗斯、美国、加拿大、中东国家、北海油田等得到了广泛应用,国内大量油田如大庆、胜利、辽河、长庆、延长、中原、河南等亦进行了试验与应用。与此同时,波动强化采油作用机制通过实验方法得到了一定的解释。

但是,该技术现场试验中存在受效不稳定的问题,部分井次效果不明显甚至产出下降;目前,国内仅部分油田还在应用,且多用于近井带处理或与其

他增产技术进行复合型创新(吴晓明等, 2008; 李亚峰等, 2012),该技术的相关应用报道亦逐渐减少。

波动强化采油技术发展受限,一方面归结于矿场施工效果相对其他技术(如化学驱、压裂、酸化等)不显著、见效时间长,另一方面,缺乏有效的基础理论支撑,现有定性一半定量的理论认识无法有效指导、优化矿场设计。这促使人们对低频波动强化采油技术基础理论进行深入探索,建立系统化的波动渗流力学理论体系。国内低频波动强化采油研究走向,亦反映了对微观作用机制与波动渗流力学机制的逐渐重视。

2 波动渗流力学与孔隙介质弹性波传播理论的差异

地震勘探中孔隙介质弹性波传播理论研究的是单一小功率人工地震(放炮)产生的弹性波在地层中的传播规律,以此对地层构造、含油气性进行预测分析,假设初始时刻地层流体静止,没有宏观压差渗流影响;波动渗流力学研究的是在大功率人工地震连续作用下叠合弹性波在地层中的传播,及其对地层流体渗流特征的影响,以此对波动强化采油工艺参数进行优化,提高原油采收率。就理论基础和油藏应用过程而言,作为波动强化采油技术基础的波动渗流力学落后于孔隙介质弹性波理论的发展。

波动渗流力学与孔隙介质弹性波传播理论均涉及孔隙介质内部渗流场和弹性波场的耦合。一方面,二者的研究对象、研究方法具有非常高的相似性、可借鉴性和交叉性;另一方面,初始流动状态不同(Bo-bet, 2003; Hsu *et al.*, 2014),又致使二者在弹性波传播和孔隙介质流/固耦合动力学特征方面存在本质差异。进一步理清二者在动力学条件及关键力学特征等方面的差异,对波动强化采油应用过程中渗流力学模型建立及动力学机制分析具有重要意义。

2.1 相似性

波动渗流力学与孔隙介质弹性波传播理论均受到附加波动应(压)力的影响;均涉及弹性波在饱和流体孔隙介质中的传播;均假设波诱导的流体运动满足 Darcy 定律;孔隙介质弹性波传播理论中的毛细管模型、宏观介质模型可为波动渗流力学提供借鉴,用于微观、宏观渗流影响机制分析。

2.2 不同点

根据震源或冲击载荷位置的不同,波动渗流力学与孔隙介质弹性波传播理论涉及不同的震源类

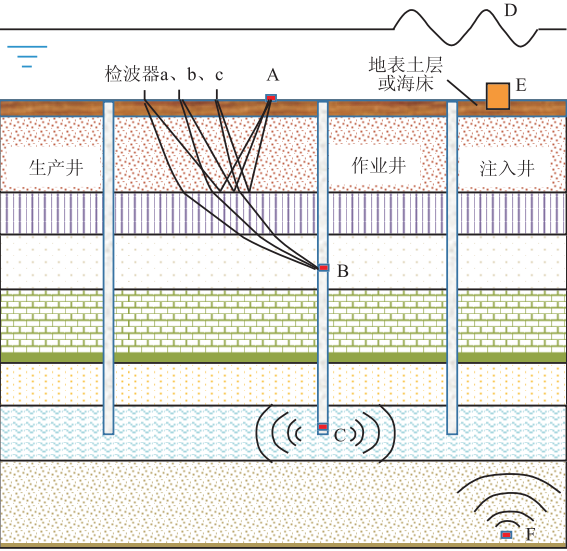


图 1 不同震源类型、研究对象、边界条件的差异
Fig.1 Different wave sources with corresponding research objects and boundaries

型、应用学科、流体运动状态和边界条件。

就震源类型而言,图 1 中 A~F 皆可作为震源,分别为地表震源、井内震源、直接作用储层的井下震源、波浪、振动桩基或结构物、深层震源。震源 C 是波动渗流力学的研究对象,而震源 A~B、D~F 是孔隙介质弹性波传播理论的主要研究对象。震源 A、B 与信号检测构成地质勘探中的地表勘探和 VSP 勘探,初始时刻岩土位移、地表(或井下)压力已知,弹性波在可渗透弹塑性地层传播;震源 C 为油气藏开发过程中的各工艺措施震源或压力波动,初始时刻岩土位移或压力波动已知,上下顶底面不可渗透;当地质环境为河、湖、海洋时,波浪 D 的存在会对水下岩土和埋存结构物产生影响,该过程是水力/海洋工程的研究对象,初始时刻波高、水深等假设已知,海床表面可渗透,海床底部不可渗透;当处于陆地环境,震源 E 会对近地表土体性质或建筑物产生破坏,初始时刻地表位移或震源位移已知,地表可渗透,深层不可渗透,建筑物与土体连接位置视胶结情况、排水与否存在差异;震源 F 存在时,近地表和结构物 E 的变化构成地震形成与预防的研究目标。

就应用学科而言,目前孔隙介质弹性波传播理论已广泛应用于地质勘探、土木工程、海洋工程、水力工程等(Lan *et al.*, 2013; Navas and López-Querol, 2013; Pedro and Susana, 2013; 柳浩和刘江平, 2014; 侯正瑜等, 2016),在油气藏开发前期测井解释和开发过程裂缝检测中亦有涉及;波动渗流力学主要应用于油气藏开发过程中,学科的不同,导

致波动渗流力学受重视程度不够。

就初始条件而言,常规孔隙介质弹性波传播理论假设饱和流体初始时刻静止、岩土压力场稳定;而波动渗流力学中饱和流体处于渗流状态,边界压力与内部不同,常规孔隙介质弹性波传播理论可认为是波动渗流力学中初始宏观渗流速度趋于 0 时的特例。

除上述以外,二者的流体流动模式也不同。孔隙介质弹性波传播理论中仅包含波诱导广义达西流动;波动渗流力学中流体流动是初始宏观渗流和波诱导渗流的共同作用结果,根据油藏类型或开发情况不同,可分为达西流动或非达西流动。

综合波动渗流力学与孔隙介质弹性波传播理论的差异,显示二者模型在运动方程、连续性方程、边界条件和初始条件上相似,但又不完全不同。因此,波动渗流力学是储层开发中的一个创新研究方向。

3 国内外波动渗流力学研究进展

3.1 波动渗流力学基础和交叉学科研究进展

3.1.1 波动渗流力学的研究离不开微观作用机制的实验揭示 如同油气田开发过程中的众多增产技术一样,波动强化采油技术的矿场应用研究程度超过其渗流力学机制研究。目前,该机制主要通过实验方法进行解释,实验机制反之促进波动渗流力学模型的建立与发展。实验表明(Ariadji, 2005; Cidoncha, 2007; 刘静等, 2012),低频振动可提高岩石孔渗,降低原油粘度、液体界面张力、附面层厚度、残余油饱和度,改变表面润湿性,一定程度上可促进微裂缝延展与孔喉内部微粒移动,导致储层渗流能力增强,油气采出和流体注入状况得到改善。波动渗流力学模型建立过程中应尽可能引入上述机制,笔者目前针对弹性波作用下孔隙度、渗透率、流体黏度变化尝试进行力学分析,取得了一定的成果认识(蒲春生等, 2016; 郑黎明等, 2016, 2017)。

3.1.2 波动渗流力学的建立与孔隙介质弹性波传播理论交叉联系 作为孔隙介质弹性波传播理论的经典模型之一, Biot(1956a, 1956b)给出了低/高频条件下孔隙介质耦合方程。后人在此基础上发展了大量模型(White, 1975; Dvorkin and Nur, 1993),以提高求解准确性、适应复杂地质特征,涵盖了饱和/不同流体、弹性/弹塑性/黏塑性固体介质、均质或非均质、各向同性/横观各向同性/各向异性、单层或多层等情形,涉及弹性波波速与衰减、岩土位移—压力动力响应、不同性质相界面处波能量分布的分析

(Rubino *et al.*, 2015).其中,一定水位波动下的岩土变形、孔压响应研究与波动渗流力学研究相近,被应用于海岸/床、河流底部及边坡、浅层地层水、基坑等地质环境.波动渗流力学模型建立中,可借鉴孔隙介质弹性波传播理论模型,循序渐进地发展和完善.

3.1.3 波动渗流力学的复杂性需要数学方法的支持 孔隙介质弹性波传播理论模型的复杂性使之较难得到解析解,目前学者通过 Helmholtz 分解、Laplace 变换、Fourier 变换、Hankel 变换、Green 函数等(丁伯阳等,2011;朱兵见和熊浩,2013)方法进行了半解析分析,辅以函数近似或离散化处理.孔隙介质弹性波传播理论计算仍以数值求解(如有限差分、有限元、均一化等)为主,通过 u - P 或 u - w 形式的隐—显、隐—隐、隐—显复合迭代、隐—隐复合迭代等离散化,也可通过积分方程法、射线追踪法等进行分析(钱进,2010).波动渗流力学模型可借鉴上述方法进行方程处理和求解.

3.2 波动渗流力学研究进展

基于实验机理解释和孔隙介质弹性波传播理论研究,研究人员建立了一系列波动渗流力学数学模型,包括简易渗流模型、毛细管模型、宏观介质模型等,以及综合传质/传热方程的波动复合开采理论模型.由于微观渗流和耦合作用机制的复杂性,相关模型研究仍需进一步深入.

3.2.1 简易渗流模型 简易渗流模型所考虑的情形较为简单,在延续使用达西渗流连续性方程的同时,仅仅将波动作为一项变化的压力边界引入达西方程.Luo(1996)通过简易渗流模型研究了波动对多孔介质渗透率的影响:

$$\frac{\partial P_f}{\partial t} = \frac{k}{\eta\phi(\beta_s + \beta_l)} \nabla^2 P_f, P_f|_{x=0} = P_0 e^{i\omega t}, \quad (1)$$

其中, P_f 为孔隙压力,MPa; β_s 、 β_l 分别为固体和流

体的压缩系数,MPa⁻¹; ϕ 为基质孔隙度; k 为基质渗透率,mD; η 为流体黏度,mPa · s; P_0 为波动作用下岩心一端压力幅值,MPa; ω 为振动频率,Hz; x 为与振源间的距离,m.

王瑞飞等(2006)联立黑油模型质量守恒方程、达西方程、波动压力边界,建立了低频振动作用下油层渗流模型,研究了低频振动对储层渗流与物性参数的影响:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \sum_{j=1}^2 \rho_j S_j X_{ij} \right) = \sum_{j=1}^2 \nabla \left(\tau \rho_j X_{ij} \frac{K_{rj}}{\eta_j} \nabla (P_f + P_{cj} - \rho_j g z) \right) - q_i, P_f|_{r=R_e} = P_e + P_0 \sin \omega t, \quad (2)$$

其中, ρ_j 为 j 相的密度,kg/m³; S_j 为 j 相的饱和度,无因次; X_{ij} 为 i 组分在 j 相中的摩尔分数,无因次; τ 为传导系数,无因次; K_{rj} 为 j 相的相对渗透率,mD; P_e 为毛管力,MPa; z 为深度,m; g 为重力加速度,9.8 m/s²; q_i 为 i 组分的源(汇)量,kg/(m³ · s).

刘静等(2014a)将波诱导压力叠加到变参量的达西运动方程中,同时考虑弹性波对渗透率、孔隙度的动态影响,给出了一维和径向二维饱和单相流体孔隙介质的物性变化(图 2),该研究方法较 Luo(1996)的模型有所进步,但仍未考虑实际流固耦合作用,波诱导压力数值缺少理论支撑,结果表现为孔、渗随振动加速度呈单调变化趋势.

$$\eta C_t \phi(x) \frac{\partial P_f}{\partial t} = \nabla^2 [k(x) P_f], P_f|_{x=0} = P_w + P_0 \sin \omega t, \quad (3)$$

其中:

$$k(x) = k_0 \exp \left[2\pi f \sqrt{\frac{\beta_l}{\rho_f}} P_0 \exp(-\alpha_1 A_1 x) \right];$$

$$\phi(x) \approx \phi_0 (k/k_0)^{1/3},$$
 式中, ϕ_0 为初始孔隙度,小

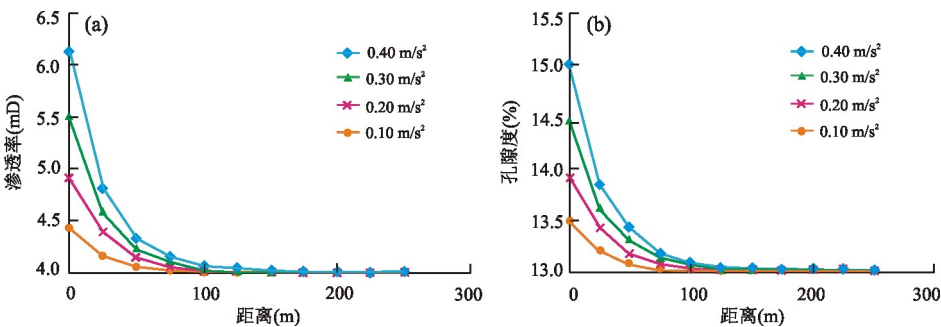


图 2 不同振动加速度下渗透率和孔隙度随距离的变化

Fig.2 The permeability and porosityat different position in different pulsing time
据刘静等(2014a)

数; k_0 为初始渗透率, mD; C_i 为综合压缩系数, MPa^{-1} ; A_1 是实验常数, 无因次; P_0 是初始压力振幅, μm ; f 是地层固有频率, Hz; α_1 为衰减常数因子, m^{-1} ; P_w 为注入端压力, MPa.

3.2.2 宏观介质模型 考虑流固耦合的宏观介质模型以 Biot 理论和连续介质理论为代表, 通过分析流固两相孔隙介质运动, 研究低频波动对渗流的影响, 连续介质理论重点联立流固连续性方程与达西运动方程, Biot 理论则考虑了流固质量耦合、弹性波作用下的流体惯性加速度项等. 相对于毛细管模型模拟微米尺度耦合渗流, 宏观介质模型适用于更大尺度波动渗流力学机理的揭示.

(1) Biot 理论为代表的自适应理论模型. Biot (1956a) 在 Tezaghi 有效应力理论的基础上, 首次给出了低频弹性波作用下两相孔隙介质流固耦合动力学方程:

$$\begin{cases} N \nabla^2 u + \text{grad}[(A + N)e + Q] = \\ \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho_{11}u + \rho_{12}U) + b \frac{\partial}{\partial t}(u - U); \\ \text{grad}[Qe + R] = \\ \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho_{12}u + \rho_{22}U) - b \frac{\partial}{\partial t}(u - U); \end{cases} \quad (4)$$

其中, u 为固体位移, μm ; U 为流体的真实位移, μm ; A 和 N 与孔隙度弹性理论中的模量系数, N 数值等于剪切模量, MPa; R 指一定体积流体进入多孔介质集合体而又保持总体积恒定不变时所需要作用在流体上的力的一种量度, MPa; Q 为代表固体体积变化与流体体积变化之间耦合关系的参数, MPa; b 为耗散因子, $b = \eta\phi^2/k$, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; e 为岩石的体积应变, 无因次; ϵ 为流体的胀缩率, 无因次; ρ_{11} 、 ρ_{12} 、 ρ_{22} 为耦合密度, $(1 - \phi)\rho_s = \rho_{11} + \rho_{12}$, $\phi\rho_f = \rho_{12} + \rho_{22}$, kg/m^3 ; ρ_s 为骨架密度, kg/m^3 .

联立流体质量守恒方程、应变—孔隙度关系、流体压缩性方程, 可进一步得到 Biot 模型一维展开连续性方程与孔隙压力:

$$\begin{aligned} \frac{\phi}{\rho_f} \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial t} + \phi \frac{\partial^2 (U_x - u_x)}{\partial x \partial t} &= 0, \\ P_f &= -F \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\gamma}{\phi} \frac{\partial u}{\partial x} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $F = \left(\frac{1}{\rho_f c_0^2} + \frac{1}{\phi Q} \right)^{-1}$, $\gamma = \alpha - \phi$, c_0 为流体中弹性波速度, m/s ; α 为 Biot 系数, 无因次.

BISQ (Biot-Squirt) 模型在 Biot 模型基础上进行了发展, 引入了喷射流机制 (Dvorkin and Nur, 1993), 以固/液波动方程为基础, 结合二维轴对称质

量守恒方程, 包含了液固位移量、流体径向流动速度:

$$\begin{aligned} \frac{\phi}{\rho_f} \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial t} + \phi \frac{\partial^2 (U_x - u_x)}{\partial x \partial t} + \\ \phi \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r \partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right) &= 0, P_f = \\ -F \left[1 - \frac{2J_1(\lambda R)}{\lambda R J_0(\lambda R)} \right] \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\gamma}{\phi} \frac{\partial u}{\partial x} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

其中, J_0 和 J_1 分别表示零阶和一阶 Bessel 函数; v 为垂直弹性波传播方向的流体位移分量, μm ; r 为垂向距离, m ; R 为喷射流特征尺寸, R 与频率、流体速度和压缩性无关, μm .

Diallo and Appel (2000) 考虑 BISQ 模型对射流长度的依赖, RBISQ 模型在直角坐标系中把 BISQ 射流位移 v 替换为坐标系中的径向流动位移 U_r , 克服了这一问题:

$$\begin{aligned} \frac{\phi}{\rho_f} \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial t} + \phi \frac{\partial^2 (U_x - u_x)}{\partial x \partial t} + \\ \phi \left(\frac{\partial^2 U_r}{\partial r \partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial r} \right) &= 0, \\ P_f &= -\frac{F}{\phi} \nabla \cdot \mathbf{W} + F \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{F\gamma_1}{\phi} \nabla \cdot \mathbf{u}. \end{aligned} \quad (7)$$

另外, 还发展了其他诸多模型, 如 Zienkiewicz *et al.* (1980) 对 Biot 方程进行改进, 将很难赋予明确物理意义的参数 A 、 N 、 R 、 Q 替换为可由弹性模量参数表示的 μ 、 λ 、 α 、 M ; De la Cruz-Spanos 模型 (Spanos *et al.*, 1999) 考虑了温度的影响; White (1975)、Berryman *et al.* (1988)、Ciz and Gurevich (2005) 考虑了饱和多相流体的流体斑块模型; 鄂建 (2007) 利用忽略体积力、加速度项的 Biot 固结控制方程, 探讨了粘性土在非线性渗流影响下的一维非线性固结特征; 杨庆节等 (2015) 利用 BISQ 模型分析了双相各向同性介质弹性波传播规律.

(2) 连续介质理论模型. 基于混合物连续介质理论发展起来的多孔介质理论, 采用混溶且强制连续, 带有内部相互作用的假设; Bowen、Ehlers 等人引入体积分数的概念后, 推进了这一理论的发展, 认为在 Biot 理论附加质量密度为 0 时, 两种理论等价 (房志辉, 2011). 混合物连续介质理论的假设条件, 特别适用于饱和多相流体情形, 在考虑多相流体的 Biot 理论模型中亦常予以借鉴.

Huh (2006) 总结了国内外波动强化采油技术研究、不同油田应用及振源发展状况, 综合孔隙级模型、毛管数公式和振动后水驱油藏剩余油流动, 建立了波动作用下饱和油水两相油藏渗流的数学模型,

对波动采油作用效果进行了数值模拟评价.该模型考虑了饱和混相流体的孔隙介质流固连续性方程,假设流体符合线性达西渗流:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} [(1-\phi)\rho_s] + \nabla \cdot [(1-\phi)\rho_s \frac{\partial u}{\partial t}] = 0; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\phi\rho_j S_j) + \nabla \cdot (\phi\rho_j S_j \frac{\partial U_j}{\partial t}) = 0, j = w, o; \\ \phi S_j (U_j - u) = \lambda_j \nabla (P_j - \rho_j g z); \\ e = \nabla \cdot u = -\frac{1}{M} (\sigma - P_w); \end{cases} \quad (8)$$

其中, λ_j 为 j 相的流度, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^2/\text{kg}$; σ 为正应力, MPa; P_j 为 j 相流体的孔隙压力, MPa.

Frehner *et al.* (2007) 将波动作用下岩土固液振动等效为流体中一维弹簧振子振动的力学模型, 解释了振动下流体在多孔介质中流动出现的频谱分离现象, 认为振源频率和多孔介质固有频率的差异促进了振动条件下流固间的相对运动, 而非传统的简单解释——振动力克服液体毛细力而导致流固间发生相对运动:

$$\begin{cases} S\phi\rho_f \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = -S\phi\rho_f\omega_0^2 (U-u); \\ (1-\phi)\rho_s \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial u}{\partial x} \right) + S\phi\rho_f\omega_0^2 (U-u); \end{cases} \quad (9)$$

其中, E 为等效骨架杨氏模量, MPa; ω_0 为骨架特征频率, Hz.

孙峰等(2009)建立了一种流固耦合形式的出砂疏松砂岩合理压差预测模型, 分析了油井生产压差波动对砂岩储集层骨架应力和变形的影响规律, 建立了连续性方程并考虑了骨架体积变化与孔隙流量变化的耦合影响, 但未能表示弹性波作用下的流体惯性作用与固体运动:

$$\phi\rho_f \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial(\phi\rho_f)}{\partial t} - \nabla \left(\rho_f \frac{k}{\eta} \nabla P_f \right) = 0. \quad (10)$$

Vuong *et al.* (2015) 基于体积平均方法的孔隙介质理论, 对拉格朗日坐标下骨架与任意欧拉坐标系下流体间的耦合进行了空间转换, 导出了整合任意骨架应变能函数的一般本构关系. 模型考虑了随时间/空间变化的孔隙度、宏观达西渗流, 并开展了两类有限元数值算例分析(图 3 和图 4). 式(11)分别为考虑体力、流固加速度的连续性方程, 流动方程和动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_X + \phi \nabla \cdot v_f + \nabla \phi \cdot (v_f - v_s) &= 0, \Omega \times [t_0, t_E]; \\ \rho_{f0} a_f + \frac{\eta}{k} \phi (v_f - v_s) + \nabla P_f - \rho_{f0} \dot{b} &= 0, \Omega \times [t_0, t_E]; \\ \rho_{s0} (1 - \phi_0) a_s - \nabla \cdot (\bar{F} \cdot \bar{S}) - \rho_{s0} (1 - \phi_0) \dot{b} - \\ \rho_{f0} J \phi (\dot{b} - a_f) &= 0, \Omega_0 \times [t_0, t_E]; \end{aligned} \quad (11)$$

其中, X 、 x 分别为“任意欧拉—拉格朗日法 ALE”实物坐标系和空间坐标系; v_f 为空间坐标下的流体速度, m/s; v_s 为空间坐标下的骨架速度, m/s; ρ_{s0} 、 ρ_{f0} 为骨架和流体的初始密度, kg/m^3 ; a_s 、 a_f 分别为骨架和流体的平均微观加速度, m/s^2 ; J 为坐标系间形变梯度的行列式; $\partial\Omega_t$ 分别为当前体积边界; $\dot{b}$ 为单位空间节点体积的体力, m/s^2 ; $\bar{F} = d\bar{x}/d\bar{X}$; $\bar{S}$ 为第二 Piola Kirchhoff 应力张量; Ω_0 、 Ω_t 分别为对应物质体积、当前体积; $[t_0, t_E]$ 为时间间隔.

(3) 毛细管模型. 除了宏观模型, 大量研究人员通过建立毛细管模型, 解释了低频波动强化采油技术的诸多微观机制. 以最为简单的单一毛细管(图 5)为研究对象, 研究其流固界面受力、管径方向流速变化、液滴脱离, 是波动渗流力学分析的另一种思路, 它与宏观介质模型分析往往并存.

Yan(1999)利用均一化方法分析了中频波动获

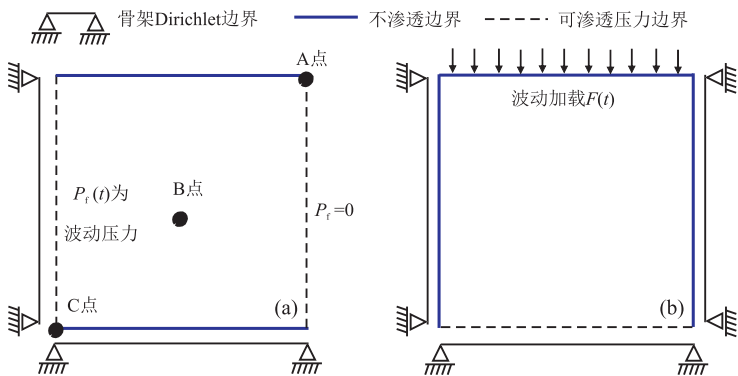


图 3 包含初始宏观渗流的数值算例模型及其边界条件

Fig.3 Physical model for seepage with initial macro flow and boundary conditions under vibration
a.等效为开发油藏—维驱替分析;b.等效为岩土工程变压加载下岩土固结;据 Vuong *et al.* (2015)

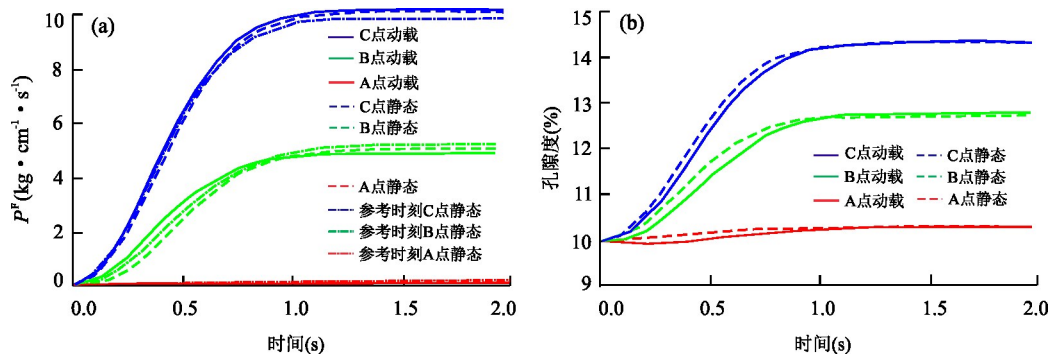


图 4 图 3a 中模型静态或动载固结条件下物性随时间的变化

Fig.4 Property over time for quasi-stationary and instationary simulation from model Fig.3 (a)
a.压力对比;b.孔隙度对比

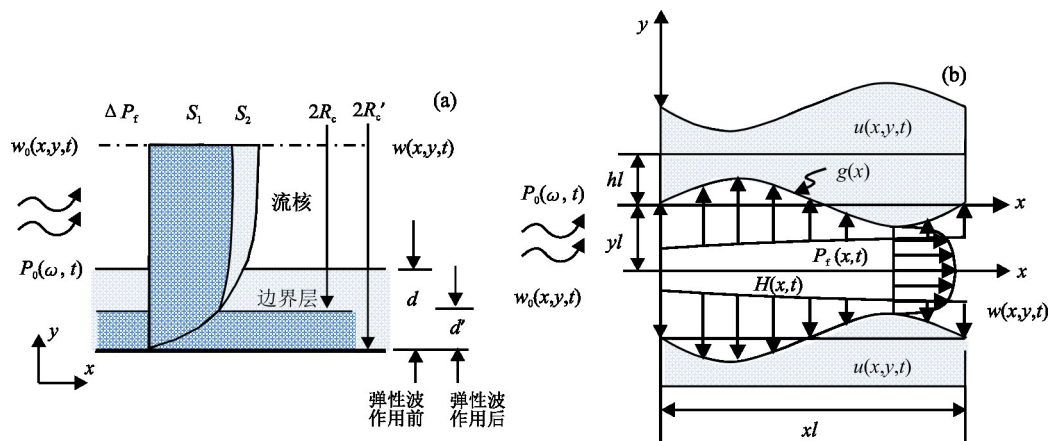


图 5 毛细管尺度模型

Fig.5 Capillary model for simulation
a.直管;b.具有一定迂回度的毛细管

取储层参数的可能性,以毛细管模型为例,忽略流体在垂直喉道方向的流动以及固体沿渗流方向的运动,考虑变孔隙喉道处的流核、固液接触面受力,结合 Darcy 方程、Biot 理论进行了渗流分析,但未考虑宏观渗流作用边界与其他耦合作用机制;图 6 显示随振动时间增加,无因次平均流速呈正弦变化,而非如图 2 中所示单调递减,随振动频率增加,流速波动幅度减小,对于固相有:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_s \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= (2G + \lambda) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, & \text{固相区域 } S_H; \\ u &= \frac{\partial u}{\partial t} = 0, & t = 0; \\ \frac{\partial u}{\partial x} &= 0, & x = 0 \text{ 与 } x = xl; \\ u &= 0, & y = hl; \\ (2G + \lambda) \frac{\partial u}{\partial y} - 2\eta \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial y} &= -P_f(x, t), & y = g(x); \end{aligned} \right. \quad (12)$$

对于液相有:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Hw}{\partial x} &= 0, & \text{液相区域 } P_H; \\ \frac{\partial Hw}{\partial t} + \frac{19}{12} \frac{\partial Hw^2}{\partial x} &= -H \frac{\partial P_f}{\partial x} + \frac{1}{R_e} \frac{\partial^2 Hw}{\partial x^2} - \frac{3}{R_e} w, & \text{液相区域 } P_H; \\ w &= 0, & t = 0; \\ \frac{\partial w}{\partial x} &= 0, & x = 0 \text{ 与 } x = xl; \end{aligned} \right. \quad (13)$$

其中, w 为液体位移, μm ; $g(x)$ 为喉道形状函数,可表示毛细管模型迂回度,无因次; $H(x)$ 为喉道宽度,是关于时间和位移的函数, $H(x, l) = 2(y l + g(x) + w(x, 0, l))$, μm ; $P_H(x, t)$ 代表液体流动区域; $x l$ 、 $y l$ 、 $h l$ 分别为平均孔喉长度、平均孔喉宽度和平行孔喉间平均宽度的一半, μm .

刘静等(2014b)将波诱导渗流惯性力引入圆管层流 N-S 方程中,建立了低频振动条件下细管单相不可压缩流体流动模型,分析了管内流速、剪切力受弹性波的影响,给出了流速沿管中心的周期性变化:

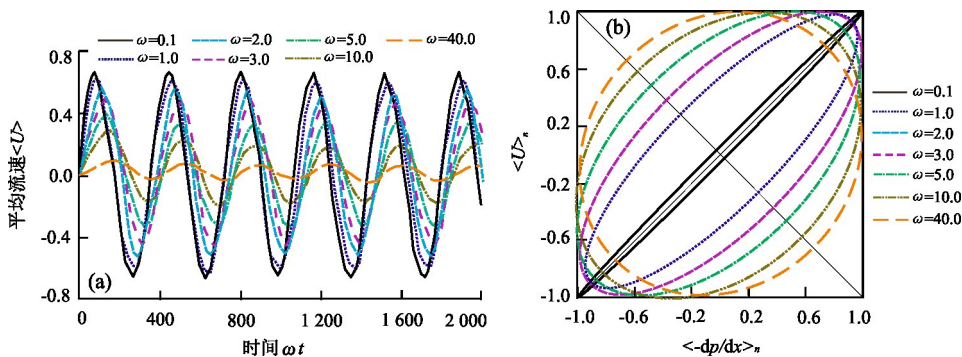


图 6 刚性管($g=0$)中不同谐振波频率下流体流速($R_e=1, x_l=2$)

Fig.6 Response of a fluid in a rigid channel to harmonic perturbation ($R_e=1, x_l=2$)

a.流速随时间变化;b.流速相图;据 Yan(1999)

$$\begin{cases} \eta \left(\frac{\partial \dot{w}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{w}}{\partial r} \right) = \rho_f \frac{\partial \dot{w}}{\partial t} - \nabla P_s + \rho_f U_0 \omega^2 \sin(\omega t); \\ \dot{w}|_{r=0} = \frac{1}{4\eta} (R_c^2 - r^2) \nabla P_s, \frac{\partial \dot{w}}{\partial r} \Big|_{r=0} = \dot{w}|_{r=R_c} = 0; \end{cases} \quad (14)$$

其中, ∇P_s 为管流沿流动方向的原始压力梯度, MPa/m; R_c 为等直径毛细管流动时的流核半径, μm ; U_0 为波动振幅, μm .

关于毛细管模型中弹性波对壁面液滴剥离或微孔隙液滴通过的影响, 研究人员通过液滴受力分析给出了临界波动作用力. Dusseault *et al.* (2000) 对低频高振幅压力波动可促进流体流动进行了理论解释, 给出了饱和多相条件下孔隙介质中非润湿相突破孔喉(图 7)的判别条件:

$$\Delta P_s + \Delta P_d > \sigma/2r, \Delta P_s = d \cdot \frac{\partial P_f}{\partial x}, \Delta P_d = \rho_f a = \rho_f \omega^2 U_0 \sin \omega t, \quad (15)$$

其中, ΔP_d 为波动作用下附加压差, MPa; a 为波动加速度, m/s^2 ; σ 为润湿相与非润湿相间的界面张力, N/m; r 为喉道半径, μm .

Kostrov and Wooden(2008)给出了两种情形下壁面液滴的脱落条件, 一是单个液滴所受波动作用

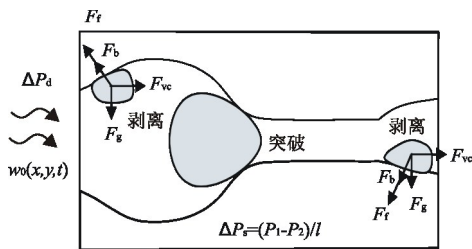


图 7 弹性波作用下孔隙喉道非润湿相突破、剥离临界条件
Fig. 7 Condition for nonwetting phase breakthrough or detach from the pore-throat under wave

力超过液固壁面吸附力; 二是液滴所受波动作用力与周围液滴分子间引力的和大于静电斥力. 尚校森等(2013)考虑液滴所受重力、波动作用力、静电力、界面张力, 给出了弹性波作用力下液滴在倾斜壁面发生移动的临界平衡条件, 为饱和混相流体介质中吸附油驱替提供指导. 相关力学平衡如下所示:

$$F_{vc} \cos \alpha \pm F_g \sin \alpha \geq F_f + F_b, \quad (16)$$

其中, F_{vc} 为壁面液滴剥离的临界振动力, N; F_g 为重力, N; F_f 为壁面摩擦力, N; F_b 为壁面界面张力, N; α 为壁面与流动方向的夹角, $^\circ$.

(4) 波动复合开采理论模型. 围绕波动强化采油技术与其他油气田增产措施的复合应用, 可通过实验或理论研究方法, 分析波动对复合增产措施中渗流的影响, 如刘静等(2013)探讨了低频谐振波降低表面活性剂吸附损耗的具体机制(图 8), 吴晓明等(2008)研究了振动剪切作用对化学复合降粘的作用机理, 李星红等(2014)分析了低频振动促进微球、凝胶深部调驱的具体效果.

何延龙等(2016)结合水力脉冲力学公式和酸化模型, 得出了脉冲条件下盐酸浓度变化, 分析了不同振动参数下盐酸流速随作用距离的周期性衰减情况(图 9), 该模型创新性地将波动渗流力学与储层改造措施相结合, 但脉冲波作用下的孔隙流体流速仍假设为简单的三角函数形式 ($v = \dot{w}|_{t=0} - \omega A_n e^{-\beta x} \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{c_0} \right) + \phi_n \right]$, 其中 A_n 、 ϕ_n 分别为 n 列叠合波的振幅和相位, β 为叠合波衰减系数), 未能说明流固耦合作用.

综上所述, 宏观介质模型在揭示油藏尺度弹性波流固耦合作用机制方面具有优势, 尽管发展了多种数学模型, 但目前围绕实际储层开发特征(如低渗非达西, 初始渗流, 非牛顿流体耦合物性变化等)的

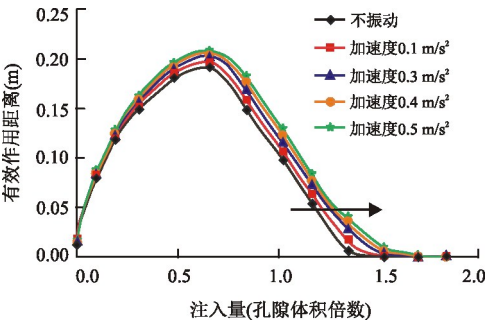


图 8 不同振动加速度、表面活性剂注入量与有效作用距离的关系

Fig.8 The effective distance under different vibration acceleration and injection volume

据刘静等(2013)

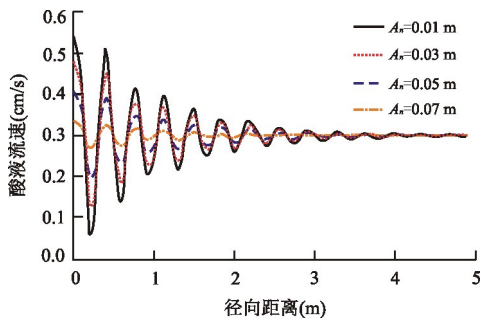


图 9 不同振动参数下酸液流速的变化关系(10 min)

Fig.9 Acidvelocityunder different vibration parameter (10 min)

据何延龙等(2016)

波动渗流力学研究仍然不够,弹性波作用下流固惯性和耦合形变增加了研究的难度,对孔隙介质宏观渗流、波诱导渗流与对应微观机制变化的揭示亦需加强.

4 波动渗流力学研究存在问题与挑战

结合低频波动强化采油技术作用机制以及波动渗流力学研究进展,现给出实际储层波动渗流力学研究与模型建立求解过程中将遇到的问题与挑战.

4.1 经典油气渗流理论的局限

经典的油气渗流理论有如下几个重要特点:(1)在连续介质假设的框架内,以代表性单元体(representative elementary volume,简称 REV)的宏观特性为基础;(2)介质体是稳定不变的;(3)渗流多满足 Dupit 假设;(4)渗流是在等温条件下进行的.取决于理论自身特点,经典渗流问题也相对比较简单,其数学模型基本是拉普拉斯方程、傅里叶热传导方程和二阶非线性抛物型方程.随着研究的深入,经典理论

的不足越来越明显地显露出来.这当中包括上面已经提到的非等温渗流、离散介质渗流等问题,另外还有变形介质渗流问题.虽然有些问题可以在经典理论框架内解决,但大部分还需要在现代理论范畴内解决(如变形介质渗流问题),这也构成现代渗流力学的一些重要发展方向(蒲春生和王香增,2014).波动渗流力学在耦合经典渗流理论时,同样需要考虑现代理论进展.

4.2 储层多孔介质变形与 Biot 弹性波动力学理论

在油气田开发工程中,大多数问题与油水注采有关,注采引起的地下地层压力变化将导致渗流介质体及其相关地质体受力状态的变化,进而导致渗流介质体变形(这方面最为典型的是注采诱发老油田油水井套管大面积变形、错断等地质灾害问题);渗流介质体的变形过程中,其物性参数(孔隙度 ϕ 、压缩系数 C_v 、渗透系数 k 、流体的密度 ρ_f 等)不再是经典理论中的常量,而是与力学状态有关的变量(Ariadji, 2005; Cidoncha, 2007; 蒲春生和刘静, 2015).因此,渗流问题的研究必须既要考虑介质体的应力应变,又要考虑渗流特性的变异,这显然不再是经典渗流理论能解决的.

在 Biot 理论提出后,人们进行了相对真正意义上的流固耦合渗流研究.由此,耦合渗流研究进入了一新阶段.耦合渗流模型虽然相对较复杂,但它将渗流力学与岩土力学、岩石物理学等学科更为紧密地联系起来,也为介质变形条件下渗流问题的研究提供了有效的工具.Biot 理论虽然是目前公认的、较完善的耦合理论,并已得到了广泛地应用,但初期被引入研究渗流问题时,并未考虑到相互耦合影响下的各物性参数是一系列变量,例如渗透系数 k .这可能与耦合渗流理论是从固结理论发展起来的经历有关,因为固结理论更加关注渗流介质的变形问题,至于介质变形对渗流过程有多大影响则相对次要(蒲春生和王香增,2014).

孔隙压力 P 变化导致介质变形、进而影响渗透率 k 的问题,在耦合渗流问题研究中逐渐被重视,并成为目前耦合渗流研究的主要发展方向之一.关于 k 随 P 值的变化,由于 k 不是本构方程中的参变量,现在一般要利用 k 与有效孔隙度 ϕ 的关系 $k(\phi)$ 来间接反映, $k(\phi)$ 可以是理论公式,也可以是建立的经验关系式.该方法使得压力及其时间变化过程对渗流的影响可在流固耦合模型中得到全面刻画,成为渗流力学当前完善 Biot 流固耦合理论的贡献之一.

波动渗流力学在分析常规流固耦合作用时,引入

多孔介质持续变形与物性变化,即可更为详细地描述弹性波作用下的具体渗流特征变化.不断发展的现代 Biot 流固耦合理论,亦可为一些新兴的、精度要求更高的研究,如岩—水—热耦合 (THM)、岩—水—热—化学耦合 (THMC),以及孔喉内微观流体渗流研究等,提供更为完善的理论基础 (Liu *et al.*, 2016).

4.3 孔隙流体压力梯度对固/液耦合渗流理论的重要影响

所谓流固耦合,其实质就是介质应力应变场分析与油气渗流场分析的有机耦合.其中的渗流场分析,实质上是分析渗流要素在研究域内的作用.在波动渗流力学研究油气渗流场中,除孔隙水压力 P 外,还有另一个更为重要的状态变量——压力梯度 $\text{grad}(P)$.

由渗流理论的基本知识可知,压力大小及变化与介质的有效应力及介质变形有关;而压力梯度的大小及变化,则关系到储层流体的渗流速度和介质的有效孔隙度 ϕ .关于压力变化导致介质变形进而影响物性参数的问题,已经得到了广泛深入地研究;压力梯度与渗流速度关系是 Darcy 公式的基本内容,在此无需赘述;关于压力梯度对 ϕ 的影响(记为 $\phi(\text{grad}(P))$),一般认为其作用微小而被忽略.但 $\phi(\text{grad}(P))$ 随 $\text{grad}(P)$ 呈单调递增,如果在同一点上的不同时刻存在 $\text{grad}(P)_{i+1} \gg \text{grad}(P)_i$,或在同一时刻不同点上存在 $\text{grad}(P)_{i+1} \gg \text{grad}(P)_i$,对应的 ϕ_{i+1} 与 ϕ_i 、或者 ϕ_{i+1} 与 ϕ_i 就会产生明显差别 (Zheng *et al.*, 2016),即 $\text{grad}(P)$ 变化较大时, $\phi(\text{grad}(P))$ 的影响应充分考虑.

在油气田开发工程学科中,大多数渗流问题都涉及储层流体的注采;近井地带与远井区域相比(空间变化)以及近井地带开采前后相比(时间变化),储层流体注采产生的压力梯度变化幅度往往是初始压

力梯度的 102~104 倍.由于 $\phi(\Delta P)$ 随 $\text{grad}(P)$ 单调递增,结合上述实验结果,可以说明开采将导致井附近含水层的有效孔隙度产生明显变化,此时 $\phi(\text{grad}(P))$ 可能就不能忽略 (蒲春生和王香增, 2014),与孔隙度相关的岩石弹性模量、渗流能力的变化亦不应忽略.如果 $\phi(\text{grad}(P))$ 作用不可忽略,那么目前开展的流固耦合研究只是仅仅将介质应力应变场与储层孔隙流体压力场进行了耦合的耦合渗流理论,并没有全面反映油气渗流要素的作用,因此它不能充分地体现介质应力应变场与油气渗流场的全面耦合.对于存在显著流固惯性复杂微观渗流的波动渗流力学而言,上述问题应予以引起重视.图 10 给出了弹性波作用下,存在较大初始渗流压力梯度的平面径向模型中近井带孔隙度和压力变化,该数值与初始时刻饱和静态流体、压力梯度较小时的径向模型结果(图 11)具有明显差异.

4.4 含流体多孔介质固/液耦合波动渗流问题的复杂性

在 Biot 理论上发展起来的、目前应用最广泛的 BISQ 模型中,最为关键的假设条件之一就是局部流体流动假设. Dvorkin and Nur (1993) 认为纵波在饱水孔隙介质传播过程中,在一些特定细小孔隙中处于非流动状态的储层流体可被诱发形成局部流体流动 (Biot 流和 Squirt 流, 合称 BS 流),相应的研究方法统称为局部流体流动理论.大量的研究表明, BISQ 模型可获得良好的应用效果,表明在含流体多孔介质中存在弹性波导致的 BS 流的普遍性和该效应的重要性.

BS 流效应的微观动力学机制是:在流体饱和的孔隙介质中,在初始压力梯度 $\text{grad}(P)_0$ 作用下,渗流只发生在较大孔径的孔隙中,而一些相对细小的

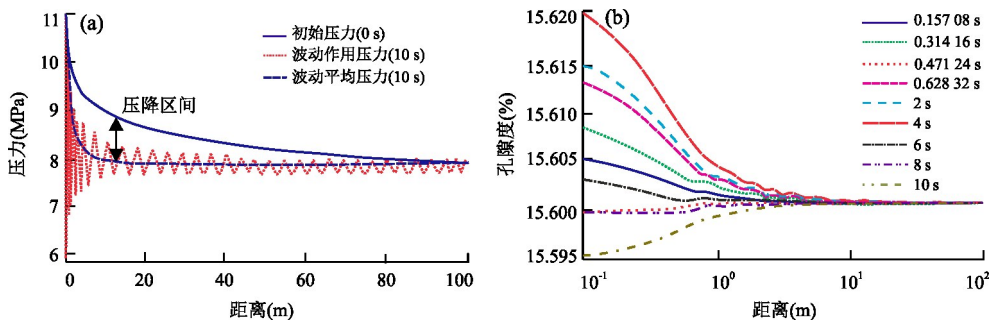


图 10 弹性波作用下考虑压力梯度和物性耦合变化的径向模型模拟结果 ($\phi_i=0.156, P_{in}=11\text{ MPa}, P_e=8.0\text{ MPa}$)
Fig.10 Change of pressure and porosity under vibration in radial model considering the obvious pressure gradient and coupled petrophysics ($\phi_i=0.156, P_{in}=11\text{ MPa}, P_e=8.0\text{ MPa}$)
a. 孔隙压力; b. 孔隙度

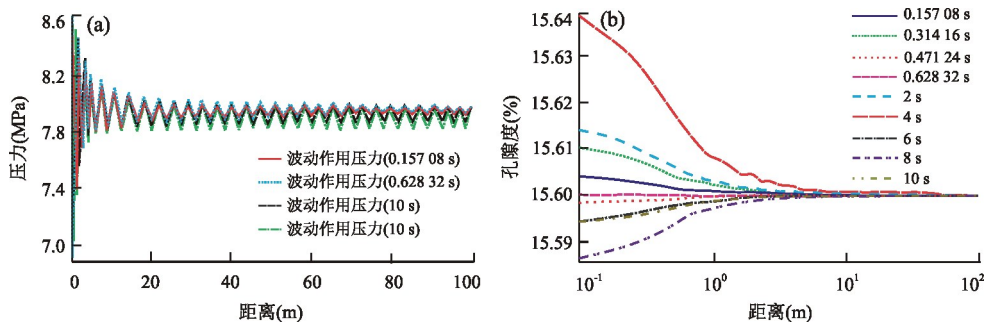


图 11 弹性波作用下仅考虑 Biot 流动诱导物性耦合变化的径向模型模拟结果($\phi_i=0.156, P_0=8.0$ MPa)

Fig.11 Change of pressure and porosity under vibration in radial model only considering the coupled petrophysics due to Biot flow ($\phi_i=0.156, P_0=8.0$ MPa)

a.孔隙压力;b.孔隙度

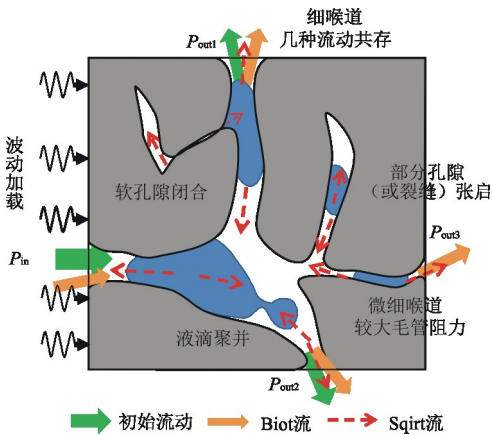


图 12 波动条件下微观流动的复杂性(初始流动、Biot 流与 Squire 流共存)

Fig.12 Complexity of micro flow under wave (coexistence of initial, Biot and Squire flow)

孔隙中的地层流体则处于非流动状态,所以这些细小孔隙不属于有效孔隙;当外力使有效应力发生变化进而导致孔隙流体压力的变化,地层流体将因此获得附加压力梯度 $\Delta \text{grad}(P)$,在 $\text{grad}(P)_0 + \Delta \text{grad}(P)$ 作用下,部分细小孔隙中的流体将产生流动并参与到整体渗流中,此时这部分细小孔隙就转变为有效孔隙.实质上就是压力梯度对有效孔隙度的影响,即 $\phi(\text{grad}(P))$ 的作用效果,该影响在波动渗流力学问题中更为显著(图 12 中张启或扩大的部分孔隙/裂缝以及 BS 流诱导下的微细喉道).

BS 流所刻画的局部流体流动,是非 Darcy 流的微观流动,它不能直接用基于 REV 特征的渗流方程来描述.在此值得指出的是,它所刻画的 $\text{grad}(P)_0 + \Delta \text{grad}(P)$ 作用与低渗介质中基于 REV 特征的起始压力梯度的意义是不等同的.要在目前的耦合渗流理论体系框架内直接考虑 $\phi(\text{grad}(P))$

的作用,是有一定的理论难度的.考虑到 Biot 波动理论和 Biot 耦合渗流理论是建立在同一个理论基础之上的两个学科分支,BS 流效应与 $\phi(\text{grad}(P))$ 作用之间应存在内在的机理联系,局部流体流动理论研究方法对该问题的解决具有重要的借鉴作用.

4.5 弹性波作用下固/液耦合波动渗流理论研究思路

现有的固/液耦合渗流模型主要由 3 个基础方程组成:几何(体积)方程、本构方程和渗流方程.压力梯度和压力对本构方程中的参变量 ϕ 都有影响,但两者的本质区别在于 $\phi(P)$ 通过介质变形来实现,而 $\phi(\text{grad}(P))$ 与介质是否变形无关.这种区别反映在数学方法描述上,即压力是本构方程中的变量, $\phi(P)$ 的作用可以通过本构方程来刻画; $\text{grad}(P)$ 不是本构方程中的变量,因此 $\phi(\text{grad}(P))$ 不能直接利用本构方程来刻画.如上所述, $\phi(\text{grad}(P))$ 效应也不能直接用基于 REV 特征的渗流方程来描述,这在一定程度上说明了该项理论研究的复杂性与困难程度.

借鉴局部流体流动理论的研究方法,将 BS 流效应引入耦合渗流模型中的关键问题是:局部流体径向流动方程与现有模型中基础方程的耦合、微观流动与宏观渗流的转换.在局部流体径向流动方程与现有模型中基础方程的耦合过程中,需要借助一个耦合函数;耦合函数的构建就成为研究过程中的核心问题.在局部流体流动理论中,所采用的耦合函数是针对波动问题的,它不适合渗流问题的研究.耦合函数如何选择、确定,以及理论函数如何与 Biot 孔弹性模型耦合,并要使得建立的耦合渗流模型的求解问题可控制在渗流力学的范畴内.在完成上述方程之间的耦合后,还需要进行微观流动与宏观渗

流的转换.只有经过缜密的理论研究过程,突破上述问题后,才可能在考虑介质变形的同时将 BS 流效应引入到耦合渗流模型中,构建起流固全面耦合的渗流理论模型.实际波动渗流力学分析中,还需考虑诸如求解思路和方法的挑战.

4.5.1 不同坐标系的有效统一 孔隙介质弹性波传播理论利用 Lagrangian 形式微元体平衡方程、本构方程和连续性方程描述流固运动,常规渗流力学利用 Eulerian 形式连续性方程描述流体运动 (Vuong *et al.*, 2015).不同坐标系方程的直接联立会导致基础假设的矛盾,因此波动渗流力学模型建立时应保证坐标系一致.可将欧拉坐标系下的流体、固体连续性方程进行联立,引入孔隙度—形变—压力关系、流/固相密度状态方程,得到同时考虑初始渗流与弹性波作用的耦合运动方程.

以低渗透油藏非达西渗流(鄂建,2007)和孔隙度变化影响引入孔隙介质弹性波传播理论为例,笔者给出了考虑 Biot 流动和宏观渗流耦合作用的固相和液相运动方程(式(17)、(18)).流体黏度 η 受到振动频率 ω 的影响;具有应力敏感性的低渗储层渗透率 k 受到压力梯度 ∇P_f 的影响.

$$\mu \nabla^2 u + \text{grad} [(\mu + \lambda + \alpha^2 M) \nabla \cdot u + \alpha M \nabla \cdot w] + \rho b^S = \rho u + \rho_f \ddot{w}, \tag{17}$$

$$\begin{cases} \alpha M \nabla^2 u + M \nabla^2 w + \rho_f b^F = \rho_f \left(u + \frac{\ddot{w}}{\phi} \right) + \frac{\eta(\omega)}{k(\nabla P_f)} \dot{w} - \lambda_0(k); \\ \alpha M \nabla^2 u + M \nabla^2 w M \frac{\eta}{k K_f} w \text{div} \dot{w} + \rho_f b^F = \rho_f \left(u + \frac{\ddot{w}}{\phi} \right) + \frac{\eta(\omega)}{k(\nabla P_f)} \dot{w} - \lambda_0(k); \\ \left(\frac{1}{M} + \frac{1}{K_f} \text{grad} w \right)^{-1} \cdot \left(\alpha \nabla^2 u + \nabla^2 w - \frac{\eta}{k K_f} w \text{div} \dot{w} \right) + \rho_f b^F = \rho_f \left(u + \frac{\ddot{w}}{\phi} \right) + \frac{\eta(\omega)}{k(\nabla P_f)} \dot{w} - \lambda_0(k); \end{cases} \tag{18}$$

其中, ρ 为多孔介质的密度, $\rho = \phi \rho_f + (1 - \phi) \rho_s$, kg/m^3 ; b^S 、 b^F 分别为作用在单位体积介质和流体上的体力加速度, m/s^2 ; μ 、 λ 为拉梅系数, MPa ; K_f 为流体体积模量, MPa ; λ_0 为启动压力梯度,为关于渗透率的函数, MPa/m .

式(18)为不同形式(忽略单位距离上宏观渗流的位移/压强/孔隙度变化、忽略单位距离上宏观渗流的位移及孔隙度变化、考虑单位距离上宏观渗流的位移与压强及孔隙度变化)的流相运动方程,分别

与式(17)联立即可得到不同的低渗油藏波动方程.3种波动方程组合形式的适用范围分别为:第一种模型可用于波诱导孔隙度变化和流动压差同时较小的情形,用于稳定渗流的均匀、各向同性储层开发初始阶段与油藏内部;第二种模型可用于波诱导孔隙度变化较小、流速变化较小且可忽略的情形,用于稳定渗流的均匀、各向同性储层开发过程;第三种模型可用于波诱导孔隙度变化较大、流速变化较小但不可忽略的情形,可用于存在隔夹层、横向厚度不同、纵向存在死油区等的各向同性储层,渗流会发生空间瞬态变化.

4.5.2 弹性波微观影响机制的考虑 波动渗流力学模型建立过程中,除模型方程和流动形式以外,还应考虑固体、流体物性参数受弹性波影响的微观变化,补充诸如孔隙度变化、黏度变化、毛管力变化以及相渗变化的附加状态方程.

结合力学与实验机制分析,笔者在物性变化状态方程修正方面取得了一定认识.现以波动作用下孔隙度变化、原油黏度变化、孔喉内微粒运移为例进行说明,分别如式(19)~式(21)所示:

$$\begin{aligned} \phi_{i+1} &= \phi_i + \xi \cdot e_i \cdot \frac{1 - \phi_i}{1 + e_i} \text{ 且 } \xi = \\ &= \frac{1 - \beta (\dot{w}^{2-n} \rho_f / K_f)^{\frac{-n}{1+n}}}{1 - \beta (v_0^{2-n} \rho_{f0} / K_{f0})^{\frac{-n}{1+n}}} + \frac{\frac{\sqrt{\pi}}{2} - \Phi(P_f; \text{lgr}_{d50}, 1)}{\frac{\sqrt{\pi}}{2} - \Phi(P_{f0}; \text{lgr}_{d50}, 1)}, \end{aligned} \tag{19}$$

$$\eta(\omega) \approx \eta_0 F(\omega) = \begin{cases} C \rho_f u \omega^2 + \eta_0, & \omega \text{ 为低频;} \\ \frac{a}{4} (\eta_0 \rho_f \omega)^{0.5}, & \omega \text{ 为高频,} \end{cases} \tag{20}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \{ \dot{w} [\rho_f (1 - C_p) + \rho_s C_p] \} &= \\ \frac{\partial}{\partial t} \{ \phi [\rho_f + (\rho_s - \rho_w) (C_p + g_b - g_d - g_p)] \} &, \end{aligned} \tag{21}$$

其中, ξ 低频弹性波影响下的孔隙度修正系数,无因次; v_0 为初始流速, m/s ; P_{f0} 是初始孔隙压力, MPa ; n 为非牛顿流体流态指数,无因次; $\Phi(P_f; \text{lgr}_{d50}, 1)$ 代表正态分布的累积分布; r_{d50} 为饱和度中值压力对应的孔喉中值半径, μm ; C 为低频弹性波作用下的降黏率实验拟合系数, $\text{m} \cdot \text{s}$; η_0 为无弹性波影响下的流体初始黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; 下标 t 表示模拟时间节点, s ; C_p 为微粒浓度, m^{-3} ; g_b 、 g_d 、 g_p 分别为单位体积岩石中颗粒从孔隙表面的剥离的体积、颗粒在孔隙表面的沉积的体积、颗粒在孔喉处堵塞而滞留的体积, m^{-3} .

4.5.3 数学模型迭代求解 由于耦合了低渗储层

渗流场和弹性波场,波动渗流力学模型表现为更加复杂的线性变系数或非线性常系数非齐次微分方程组形式,解析、数值求解更为繁琐;更难通过积分变换得到解析函数,方程扩展导致离散方程增大,弹性波场、渗流场时间尺度的不一致性增强,迭代步骤增加,求解效率和计算稳定性下降。

5 波动渗流力学未来研究方向探讨

波动采油技术应用过程中,受实际储层复杂特征和多波激励的耦合影响,储层岩土响应与渗流机制分析非常复杂,要揭示波场对饱和非混相流体多重介质渗流和流体产出的影响,需要人们对波动渗流力学不断研究与改进。

(1)波诱导与宏观渗流耦合解释。储层孔隙流体在宏观压差驱动下流动,在波动激励下又会产生波诱导流动。耦合压差作用下,比已有储层孔隙介质弹性波传播机理模型更为复杂,弹性波场对孔隙介质渗流影响和具体流固交错过程的揭示更为困难。

(2)考虑低渗油气藏非达西渗流。波动采油主要应用于低/特低渗油气藏的强化开采,实际储层非均质性强、发育天然裂缝,增加了波动渗流力学机理定量描述的难度。渗流力学理论引入孔隙介质弹性波传播理论时应引入低渗非达西流动、启动压力梯度,甚至储层改造反应流、裂缝/溶洞大尺度流等。

(3)饱和多相渗流流体渗流分析。波动采油涉及油水两相、气水两相、油气水三相波动渗流机制,非常复杂;当与其他增产技术复合应用时,流体相数更多、特性更为复杂、传热/扩散/吸附等机制不可忽略,饱和非混相流体的模型分析将是非常大的一个挑战。

(4)叠合波场对实际储层的影响。随着波动采油技术发展,多波叠合、提高波场激励的效果是装备发展的方向,叠合波的波动渗流力学问题是一个非常复杂的问题。然而,波动渗流力学目前仍局限于单一波分析,假设不同波形、频率、强度等初始激励条件下的渗流模型有待进一步研究。

6 结论

随着石油工业对低渗、特低渗、稠油、超稠油、小断块、薄油层以及高含水等复杂油藏开发的不断加强,作为一项高效成本增产增注和提高采收率新技

术,波动强化开采技术将具有十分广阔的发展与应用前景。在波动强化采油理论与技术的研究和应用中,还存在大量基础科学问题、工艺技术和配套装备问题需要不断加强研究解决,该技术还存在很大的发展空间。

作为提高波动强化采油技术矿场应用效果的关键,弹性波作用下储层渗流动力学机制研究亟待开展。波动渗流力学综合了宏观渗流场与弹性波场激励的耦合作用,是经典渗流力学和孔隙介质弹性波传播理论的交叉学科。在研究对象、研究方法具有较高相似性、可借鉴性的同时,由于流动初始条件的不同,波动渗流力学与孔隙介质弹性波传播理论在弹性波传播和孔隙介质流/固动力学特征方面又存在本质差异。

在充分结合实验微观作用机制、孔隙介质弹性波传播理论、经典渗流力学的基础上,目前的波动渗流力学模型研究涵盖了简易渗流模型、毛细管模型、宏观介质模型、波动复合开采理论模型等,其中,宏观介质模型在揭示油藏尺度耦合机制时具有优势。在受到经典油气渗流理论局限、储层多孔介质持续变形/物性改变、孔隙流体压力梯度重要影响、波动渗流理论具体研究思路等方面制约的同时,波动渗流力学也迎来其发展的机遇。

References

- Ariadji, T., 2005. Effect of Vibration on Rock and Fluid Properties: On Seeking the Vibroseismic Technology Mechanisms. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta. doi:10.2118/93112-ms
- Berryman, J.G., Thigpen, L., Chin, R.C.Y., 1988. Bulk Elastic Wave Propagation in Partially Saturated Porous Solids. *Journal of the Acoustical Society of America*, 84(1): 360-373. doi:10.1121/1.396938
- Biot, M.A., 1956a. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid: I. Low-Frequency Range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28(2): 168-178. doi:10.1121/1.1908239
- Biot, M.A., 1956b. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid: II. Higher Frequency Range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28(2): 179-191. doi:10.1121/1.1908241
- Bobet, A., 2003. Effect of Pore Water Pressure on Tunnel Support during Static and Seismic Loading. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18: 377-393. doi:10.1016/S0886-7798(03)00008-7
- Cidoncha, J.G., 2007. Application of Acoustic Waves for Res-

- ervoir Stimulation. International Oil Conference and Exhibition, Veracruz. doi:10.2118/108643-MS
- Ciz, R., Gurevich, B., 2005. Amplitude of Biot's Slow Wave Scattered by a Spherical Inclusion in a Fluid-Saturated Poroelastic Medium. *Geophysical Journal International*, 160 (3): 991–1005. doi:10.1111/j.1365-246x.2005.02556.x
- Diallo, M. S., Appel, E., 2000. Acoustic Wave Propagation in Saturated Porous Media: Reformulation of the Biot/Squirt Flow Theory. *Journal of Applied Geophysics*, 44 (4): 313–325. doi:10.1016/s0926-9851(00)00009-4
- Ding, B. Y., Chen, J., Pan, X. D., 2011. The Solutions of Green's Function for Lamb's Problem in a Two-Phase Saturated Medium. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 43 (3): 533–541 (in Chinese with English abstract).
- Dusseault, M., Davidson, B., Spanos, T., 2000. Pressure Pulsing: The Ups and Downs of Starting a New Technology. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 39 (4): 13–17. doi:10.2118/00-04-TB
- Dvorkin, J., Nur, A., 1993. Dynamic Poroelasticity: A Unified Model with the Squirt and the Biot Mechanisms. *Geophysics*, 58 (4): 524–533. doi:10.1190/1.1443435
- E, J., 2007. Theory of One Dimension Non-Linear Consolidation of Cohesive Soil Based on Non-Linear Seepage (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 18–26 (in Chinese with English abstract).
- Fang, Z. H., 2011. A Semi-Analytical Solution for One Dimensional Transient Response of Single Layered Fluid-Saturated Porous Media (Dissertation). Zhejiang University, Hangzhou, 11–29 (in Chinese with English abstract).
- Frehner, M., Schmalholz, S. M., Podladchikov, Y., 2007. Interaction of Seismic Background Noise with Oscillating Pore Fluids Causes Spectral Modifications of Passive Seismic Measurements at Low Frequencies. SEG Annual Meeting, San Antonio, 1307–1311. doi:10.1190/1.2792742
- He, Y. L., Pu, C. S., Dong, Q. L., et al., 2016. Kinetic Model of Plug Removal Reaction Based on a Synergy between Hydraulic Pulse Wave and Multi-Hydracid Acidification. *Acta Petrolei Sinica*, 37 (4): 499–507 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Y., Guo, C. S., Wang, J. Q., et al., 2016. Using Gas-smann Equation Predict Marine Sediment Porosity. *Earth Science*, 41 (7): 1198–1204 (in Chinese with English abstract).
- Hsu, W. Y., Yang, R. Y., Hsu, T. J., et al., 2014. Boundary Layer Structure Under Wave-Mud Interactions. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 24 (4): 247–252.
- Huh, C., 2006. Improved Oil Recovery by Seismic Vibration: A Preliminary Assessment of Possible Mechanisms. International Oil Conference and Exhibition, Cancun. doi:10.2118/103870-ms
- Kostrov, S., Wooden, W., 2008. Possible Mechanisms and Case Studies for Enhancement of Oil Recovery and Production Using In-Situ Seismic Stimulation. SPE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa.
- Lan, H. T., Liu, C., Guo, Z. Q., et al., 2013. A Viscoelastic Representation of Wave Attenuation and Velocity Dispersion in Fractured Porous Media. SEG Annual Meeting, Houston, 2942–2947. doi:10.1190/segam2013-0974.1
- Li, X. H., Liu, M., Pu, C. S., et al., 2014. Study on Polymer Gel Crosslink with Effect of Low-Frequency Vibration. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 21 (3): 86–88 (in Chinese).
- Li, Y. F., Yang, J., Liu, Q., et al., 2012. Application of Vibration-Fracturing Coupled Acidizing Technology in Xifeng Oilfield. *Petrochemical Industry Application*, 31 (10): 36–38 (in Chinese).
- Liu, H., Liu, J. P., 2014. Comparison of Natural Seismic Numerical Simulation and Practical Example. *Earth Science*, 39 (12): 1783–1792 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Pu, C. S., Lin, C. Y., et al., 2014a. Research on Single-Phase Fluid Mechanical Model under Low-Frequency Vibration. *Science Technology and Engineering*, 14 (10): 31–33 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Pu, C. S., Lin, C. Y., et al., 2014b. Mathematical Model of Microscopic Dynamics about Single-Phase Incompressible Fluid Flows in Thin Tube under Low Frequency Vibration. *Natural Gas Geoscience*, 25 (10): 1610–1614 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Pu, C. S., Zheng, L. M., et al., 2012. Experiment Research on Effects of Low Frequency Vibration Wave for Crude Oil Viscosity. *Science Technology and Engineering*, 12 (27): 7061–7067 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Pu, C. S., Zheng, L. M., et al., 2013. Research on Decreasing Adsorption Characteristics of Surfactant under Low Frequency Resonance Wave. *Journal of Basic Science and Engineering*, 21 (5): 946–952 (in Chinese with English abstract).
- Liu, R. C., Li, B., Jiang, Y. J., et al., 2016. Review: Mathematical Expressions for Estimating Equivalent Permeability of Rock Fracture Networks. *Hydrogeology Journal*, 24 (7): 1623–1649. doi:10.1007/s10040-016-1441-8
- Luo, Y. T., Davidson, B., Dusseault, M., 1996. Measurements in Ultra-Low Permeability Media with Time-Varying Properties. ISRM International Symposium, Turin.

- Navas, P., López-Querol, S., 2013. Generalized Unconfined Seepage Flow Model Using Displacement Based Formulation. *Engineering Geology*, 166: 140—151. doi: 10.1016/j.enggeo.2013.09.009
- Pedro, N., Susana, L. Q., 2013. Generalized Unconfined Seepage Flow Model Using Displacement Based Formulation. *Engineering Geology*, 166: 140—151. doi: 10.1016/j.enggeo.2013.09.009
- Pu, C. S., Liu, J., 2015. Physical and Physical-Chemical Compound Enhanced Oil Recovery Theory and Technique in Complex Reservoir (Volume 5): Enhanced Oil Recovery Theory and Technique under Low-Frequency Vibration Compound with Chemicals in Low-Permeability Reservoir. Petroleum Industry Press, Beijing, 105 (in Chinese).
- Pu, C. S., Wang, X. Z., 2014. Physical and Physical-Chemical Compound Enhanced Oil Recovery Theory and Technique in Complex Reservoir (Volume 3): Enhanced Oil Recovery Theory and Technique under Vibration in Complex Reservoir. Petroleum Industry Press, Beijing, 87 (in Chinese).
- Pu, C. S., Xu, J. X., Liu, X., 2016. Study on Influence of High Frequency Vibration on Viscosity and Temperature Parameters of Heavy Oil in Porous Elastic Medium. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 31 (6): 54—59, 107 (in Chinese with English abstract).
- Qian, J., 2010. Seismic Numerical Simulation and Inversion of Fractured Coal Reservoirs (Dissertation). China University of Mining & Technology, Xuzhou, 8—10 (in Chinese with English abstract).
- Rubino, J. G., Quintal, B., Müller, T. M., et al., 2015. Energy Dissipation of P- and S-Waves in Fluid-Saturated Rocks: An Overview Focusing on Hydraulically Connected Fractures. *Journal of Earth Science*, 26 (6): 785—790. doi: 10.1007/s12583-015-0613-0
- Shang, X. S., Pu, C. S., Yu, G. L., et al., 2013. Study on Micro-Dynamic Mechanism of Droplet Motion under Vibration. *Science Technology and Engineering*, 13 (8): 2166—2169 (in Chinese with English abstract).
- Spanos, T., Davidson, B., Dusseault, M. B., et al., 1999. Pressure Pulsing at the Reservoir Scale: A New IOR Approach. Annual Technical Meeting, Calgary. doi: 10.2118/99-11
- Sun, F., Ge, H. K., Xue, S. F., et al., 2009. A Research into Drawdown Pressure Impacts on Sand Production from Unconsolidated Sand Reservoirs. *China Offshore Oil and Gas*, 21 (1): 39—42 (in Chinese with English abstract).
- Vuong, A. T., Yoshihara, L., Wall, W. A., 2015. A General Approach for Modeling Interacting Flow through Porous Media under Finite Deformations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 283: 1240—1259. doi: 10.1016/j.cma.2014.08.018
- Wang, R. F., Sun, W., Zhang, R. J., et al., 2006. The Research on Downhole Low Frequency Vibration for EOR. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 36 (3): 457—460 (in Chinese with English abstract).
- White, J. E., 1975. Computed Seismic Speeds and Attenuation in Rocks with Partial Gas Saturation. *Geophysics*, 40 (2): 224—232. doi: 10.1190/1.1440520
- Wu, X. M., Zhang, J. G., Wang, Y., et al., 2008. Laboratory Experiment and Oilfield Application of the Oil Viscosity Reduction Method with Chemical Reagent Assisted by Oscillation. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 15 (6): 89—91 (in Chinese with English abstract).
- Yan, P., 1999. Reservoir Analysis Using Intermediate Frequency Excitation (Dissertation). Stanford University, Palo Alto, 41—113.
- Yang, Q. J., Liu, C., Guo, Z. Q., et al., 2015. Wave Propagation in Two-Phase Isotropic Medium Based on BISQ Model in Frequency-Space Domain. *Progress in Geophysics*, 30 (1): 249—260 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, L. M., Liu, J., Pu, C. S., et al., 2016. Seepage Analysis under Low-Frequency Vibration in One-Dimensional Porous Media Model Saturated with Single-Phase Percolating Fluid. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35 (10): 2098—2105 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, L. M., Pu, C. S., Li, Y. J., et al., 2017. Biot's Consolidation with Variables for Influence of Low-Frequency Vibration Stimulation on Radial Flow in Low-Permeability Developed Reservoir. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 39 (4): 752—758 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, L. M., Pu, C. S., Xu, J. X., et al., 2016. Modified Model of Porosity Variation in Seepage Fluid-Saturated Porous Media under Elastic Wave. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 6 (4): 569—575. doi: 10.1007/s13202-015-0217-3
- Zhu, B. J., Xiong, H., 2013. Analysis of Active Vibration Isolation by Open Trench in Two-Dimensional Saturated Ground. *Rock and Soil Mechanics*, 34 (2): 462—467 (in Chinese with English abstract).
- Zienkiewicz, O. C., Chang, C. T., Bettess, P., 1980. Drained, Undrained, Consolidating and Dynamic Behaviour Assumptions in Soils. *Geotechnique*, 30 (4): 385—395. doi: 10.1016/0148-9062(81)91040-8

附中文参考文献

- 丁伯阳, 陈军, 潘晓东, 2011. 饱和多孔介质中 Lamb 问题的 Green 函数解答. *力学学报*, 43 (3): 533—541.

- 鄂建, 2007. 粘性土一维非线性渗流固结理论研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学, 18—26.
- 房志辉, 2011. 单层饱和多孔介质一维瞬态响应半解析解(硕士学位论文). 杭州: 浙江大学, 11—29.
- 何延龙, 蒲春生, 董巧玲, 等, 2016. 脉冲波协同多氢酸酸化解堵反应动力学模型. 石油学报, 37(4): 499—507.
- 侯正瑜, 郭常升, 王景强, 等, 2016. 利用 Gassmann 方程预测海底沉积物孔隙度. 地球科学, 41(7): 1198—1204.
- 李星红, 刘敏, 蒲春生, 等, 2014. 低频振动对聚合物凝胶交联过程的影响. 油气地质与采收率, 21(3): 86—88.
- 李亚峰, 杨杰, 刘强, 等, 2012. 振动—压裂复合酸化解堵技术在西峰油田的应用. 石油化工应用, 31(10): 36—38.
- 柳浩, 刘江平, 2014. 天然地震数值模拟与实例对比. 地球科学, 39(12): 1783—1792.
- 刘静, 蒲春生, 林承焰, 等, 2014a. 低频谐振波作用下单相流体渗流模型研究. 科学技术与工程, 14(10): 31—33.
- 刘静, 蒲春生, 林承焰, 等, 2014b. 低频振动单相不可压缩流体细管流动微观动力学数学模型研究. 天然气地球科学, 25(10): 1610—1614.
- 刘静, 蒲春生, 郑黎明, 等, 2012. 低频振动对原油黏度影响的实验研究. 科学技术与工程, 12(27): 7061—7067.
- 刘静, 蒲春生, 郑黎明, 等, 2013. 低频谐振波降低表面活性剂吸附特性的研究. 应用基础与工程科学学报, 21(5): 946—952.
- 蒲春生, 刘静, 2015. 复杂油藏物理法、物理—化学复合发强化开采理论与技术丛书(卷五): 低渗透油藏低频谐振波化学复合强化开采理论与技术. 北京: 石油工业出版社, 105.
- 蒲春生, 王香增, 2014. 复杂油藏物理法、物理—化学复合发强化开采理论与技术丛书(卷三): 复杂油藏波场强化开采理论与技术. 北京: 石油工业出版社, 87.
- 蒲春生, 徐加祥, 刘玺, 等, 2016. 高频波动对多孔弹性介质中稠油黏温参数影响规律研究. 西安石油大学学报(自然科学版), 31(6): 54—59, 107.
- 钱进, 2010. 含裂隙煤储层地震数值模拟与反演方法研究(博士学位论文). 徐州: 中国矿业大学, 8—10.
- 尚校森, 蒲春生, 于光磊, 等, 2013. 波动下液滴运动微观动力学机理研究. 科学技术与工程, 13(8): 2166—2169.
- 孙峰, 葛洪魁, 薛世峰, 等, 2009. 生产压差对疏松砂岩储层出砂影响规律研究. 中国海上油气, 21(1): 39—42.
- 王瑞飞, 孙卫, 张荣军, 等, 2006. 井下低频振动提高原油采收率技术研究. 西北大学学报(自然科学版), 36(3): 457—460.
- 吴晓明, 张建国, 王颖, 等, 2008. 振动辅助化学剂降粘的室内实验及现场应用. 油气地质与采收率, 15(6): 89—91.
- 杨庆节, 刘财, 郭智奇, 等, 2015. 基于 BISQ 模型双相各向同性介质弹性波传播的频率—空间域有限差分模拟. 地球物理学进展, 30(1): 249—260.
- 郑黎明, 刘静, 蒲春生, 等, 2016. 波动采油对饱和单相一维储层模型渗流的影响分析. 岩石力学与工程学报, 35(10): 2098—2105.
- 郑黎明, 蒲春生, 李悦静, 等, 2017. 低频振动对低渗油藏径向渗流影响的变参量 Biot 固结分析. 岩土工程学报, 39(4): 752—758.
- 朱兵见, 熊浩, 2013. 二维饱和地基中空沟主动隔振分析. 岩土力学, 34(2): 462—467.