

文章编号:1000-582X(2011)04-047-06

大功率超声波近井无机垢解堵的动力学机理

蒲春生^{1,2}, 饶鹏^{1,3}, 许洪星¹, 吴飞鹏¹

- (1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 东营 257061;
2. 西安石油大学石油工程学院, 陕西 西安 710065;
3. 中国石油青海油田分公司, 甘肃 敦煌 736200)

摘要:利用超声波在含流体储层多孔介质中传播的固/液耦合波动力学理论, 大功率超声波解除近井带地层堵塞过程中, 超声波在近井储层多孔介质中传播引起岩石骨架弹性形变、孔隙流体与骨架固体弹性错流和孔隙弹性变形引起流体挤压喷射流动等微观动力学特性; 超声波作用引起储层多孔介质孔隙半径蠕动变化的动力学特征; 超声波作用解除储层多孔介质中无机垢颗粒微观动力学特征; 分析了大功率超声波作用下, 近井带储层多孔介质中声能聚集引起岩石局部起裂的动力学特征。在此基础上, 提出了大功率超声波解除无机结垢堵塞的无机垢体破碎作用、超声空化作用、超声摩擦作用、超声蠕动输运作用以及超声造缝作用等微观动力学机理。

关键词:超声波解堵; 无机垢堵塞; 动力学机理

中图分类号:TD712

文献标志码:A

Kinetic mechanism of inorganic scale plugging removal at near wellbore zone by high power ultrasonic technology

PU Chun-sheng^{1,2}, RAO Peng^{1,3}, XU Hong-xing¹, WU Fei-peng¹

- (1. School of petroleum Engineering, China university of petroleum, Dongying 257061, shangdong, P. R. China; 2. School of Petroleum Engineering, Xian Petroleum university Xian, 710065 shaanxi, P. R. China; 3. Qinghai Oil field, China National Petroleum Compang Dunhuang 736200, Ganshu, P. R. China)

Abstract: Based on the theory of solid and liquid coupling wave mechanics, the micro-dynamical characteristics caused by the transport of ultrasonic in porous media at near wellbore zone, including the elastic deformation of rock, the elastic crossflow of pore fluid and frame solid, and fluid squirt-flow produced by pore elastic deformation, are analyzed. Analysis of kinetics of peristaltic difference of porosity radius in porous media is presented. The characteristics of the removal of inorganic scale particle in porous media by using ultrasonic technology are also studied. Besides, by applying high power ultrasonic technology, the acoustic energy gathering in porous media at near wellbore zone leading to fracture of part rocks is illustrated. According to these analyses, the micro-dynamical mechanisms, such as inorganic scale fragmentation, ultrasonic cavitations, ultrasonic friction, ultrasonic peristaltic transport and ultrasonic fracture-making, occurred in inorganic scale plugging removal by high power ultrasonic technology are proposed.

Key words: plugging removal by high power ultrasonic technology; inorganic scale plugging; kinetics and mechanism

收稿日期:2010-11-29

基金项目:国家 863 计划目标导向重大项目(2007AA06Z227); 国家科技重大专项项目(2009ZX05009); 国家西部开发科技行动计划重点项目(2005BA901A13); 山东省自然科学基金(ZR2010EM014)

作者简介:蒲春生(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂油气藏强化开采和油气储层保护与环境污染控制方向的研究, (E-mail)chshpu@163.com。

近井带碳酸钙、硫酸钙、硫酸锶和硫酸钡等无机结垢堵塞是很多油田生产井和注入井吸水能力变差、注水压力增高和产量大幅下降的主要原因之一。无机结垢是在油水井注采过程中由微小晶体逐步生长、而且牢固附着在储层岩石骨架表面的致密固体,因此,油水井近井带地层一旦形成无机垢堵塞,要彻底有效地清除比较困难,近井带无机结垢堵塞处理是油田开发中的一项经常性的工作。目前,解决这一问题的主要手段是井底酸洗和地层深部酸化等化学措施,对硫酸钡垢堵塞,常规酸化方法解堵效果往往较差,需要注入溶解能力强的特种超强酸复合化学液体体系。当无机结垢在地层较大范围形成堵塞带时,化学酸化方法一般达不到预期解堵效果,现场不得不采取水力压裂工艺对储层进行重复改造。传统的酸化压裂施工技术复杂,整体成本较高,作业处理后的返排液污染物含量高、处理困难,对环境危害很大。

大功率超声波近井处理技术具有施工简便、成本低廉、不伤害油层和对环境无污染等特点,上世纪 80 年代以来,就一直受到国内外石油界的重视,开展了大量室内实验效果评价和矿场试验研究工作^[1-3]。在此基础上,利用多功能波场采油动态模拟实验装置和模拟无机垢堵塞人造岩心,针对超声波无机结垢近井解堵进行了专项室内实验研究。结果表明,超声波处理对储层岩心无机结垢堵塞的解堵效果十分明显,对渗透率为 30×10^{-3} 、 80×10^{-3} 、 150×10^{-3} 的岩心渗透率恢复率可以达到 34%~37.5%^[4]。

利用超声波在含流体储层多孔介质中传播的固/液耦合波动力学基本原理,大功率超声波解除近井带地层堵塞过程中,超声波在近井储层多孔介质中传播引起岩石骨架弹性变形、孔隙流体与骨架固体弹性错流和孔隙弹性变形引起流体挤压喷射流动等微观动力学特性;超声波作用引起储层多孔介质孔隙半径蠕动变化的动力学特征;超声波作用解除储层多孔介质中无机垢颗粒微观动力学特征;分析了大功率超声波作用下,近井带储层多孔介质中声能聚集引起岩石局部起裂的动力学特征。由此提出了大功率超声波解除无机结垢堵塞的“无机垢体破碎作用”、“超声空化作用”、“超声摩擦作用”、“超声蠕动输运作用”以及“超声造缝作用”等微观动力学机理,为进一步揭示大功率超声波强化采油微观动力学机制与规律取得了重要的新认识。

1 储层多孔介质中超声波传播固/液耦合动力学特征

1.1 超声作用下固/液平行错流与挤压喷射流动机制

大功率超声波作用近井地层时,将以压缩波(P波)和旋转波(SH波)的形式在含流体储层多孔介质中产生沿传播。由于储层岩石固体骨架与孔隙内流体的力学性质及其对超声波动场能量吸收、传递和反应特点具有很大差异,固体和流体由于波动引起的微观弹性运动快慢不一致,使得固/液体系产生沿超声波传播方向强烈的错流机制。骨架固体的波动变形使孔隙内部流体受到强烈挤压,使孔隙内流体产生垂直于波动传播方向的强烈挤压喷射流动机制。根据 M. A. Biot, J. D. Dvokon, A. Nur, G. Mavko(1956, 1962, 1993, 1997)关于弹性波在饱和和流体双相多孔介质中传播动力学理论,可以分析近井带大功率超声波传播过程中,储层多孔介质固/液错流机制和挤压喷射流动机制引起超声波衰减的微观动力学机制^[5-8]。

如图 1 所示,考虑固/液错流和挤压喷射流动机制的二维轴对称问题,轴线与波传播方向平行。假设在超声波作用下,圆柱形多孔介质只在轴向产生变形,岩石骨架变形的唯一非零分量是在波传播的方向上;而流体则是在平行和垂直波传播的方向上均会产生运动(平行错流和挤压喷射流)。圆柱模型的半径 R 即为喷雾流的特征喷雾流动长度,该参数为岩石的基本属性,不受波频率与流体性质的影响。

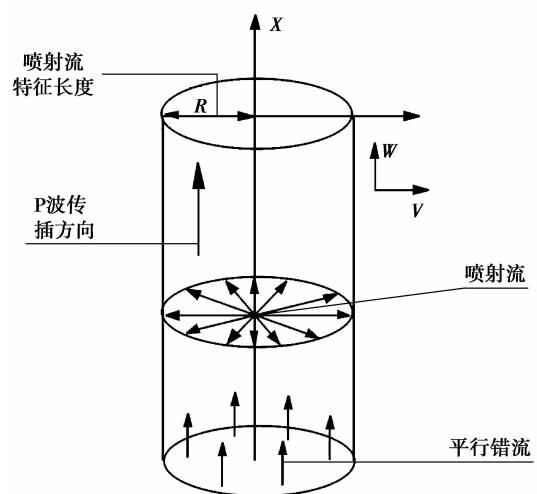


图 1 超声波传播过程中圆柱形固/液耦合动力学模型

1.2 质量守恒方程

二维轴对称波动问题质量守恒方程如下:

$$\frac{\varphi}{\rho_f} \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \varphi \frac{\partial^2 (\omega - u)}{\partial x \partial t} + \varphi \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r \partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial t} \right) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \frac{1}{Q} \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (2)$$

$$d\rho_f = \frac{dP}{dc_0^2}, \quad (3)$$

$$P_t = -F \left(\omega_{xt} + v_{xt} + \frac{1}{r} v_t + \frac{\gamma}{\varphi} u_{xt} \right). \quad (4)$$

其中: t 为时间; ω 为 x 方向上液体的位移量; u 为波动方向固体质点形变量; v 为轴向液体渗流速率; ρ_s 为固相的密度; ρ_l 为液相的密度; ρ_a 为附加耦合密度; μ 为液体粘度; k 为渗透率; P 为流体压力; C_0 为流体声速; α 衰减因子; Q 为与衰减因子、骨架体积模量和孔隙度有关的参数; F 为与 C_0 、 ρ_f 、 φ 和 Q 等有关的系数。下标 x 、 t 表示偏导数($P_x = \frac{\partial P}{\partial x}$, $u_{tt} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$)。

1.3 运动方程

二维轴对称波动问题质量守恒方程如下:

$$(\varphi \rho_f + \rho_a) u_{tt} + \frac{\mu \varphi^2}{k} v_{tt} = -\varphi P_r, \quad (5)$$

由如下分离变量求方程(5)的解:

$$\left. \begin{aligned} v(x, r, t) &= v_0(r) e^{i(\lambda x - \omega t)} \\ P(x, r, t) &= P_0(r) e^{i(\lambda x - \omega t)} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

将方程(6)代入(5)得到径向流体渗流量与压力梯度的关系:

$$\frac{\partial P_0}{\partial r} = v_0 \rho_f \omega^2 \left[\frac{\varphi + \frac{\rho_a}{\rho_f}}{\varphi} + i \frac{\omega_c}{\omega} \right]. \quad (7)$$

1.4 流体压力

x 方向上骨架的形变 u 和流体的位移量 w 可用下式表示:

$$\left. \begin{aligned} u(x, t) &= C_1 e^{i(\lambda x - \omega t)} \\ w(x, t) &= C_2 e^{i(\lambda x - \omega t)} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

应用方程(1)~(8),并用到恒压边界条件,如 $r=R$ 处 $P_0=0$,得到流体压力:

$$P_0 = -i l (\gamma C_1 + \varphi C_2) \frac{F}{\varphi} \left[1 - \frac{J_0(\lambda r)}{J_0(\lambda R)} \right], \quad (9)$$

$$\lambda^2 = \frac{\rho_f \omega^2}{F} \left[\frac{\varphi + \frac{\rho_a}{\rho_f}}{\varphi} + i \frac{\omega_c}{\omega} \right], \quad (10)$$

平均流体压力

$$P_{av} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r P(x, r, t) dr$$

$$= -F \left[1 - \frac{2J_1(\lambda R)}{\lambda R J_0(\lambda R)} \right] \left(\omega_x + \frac{\gamma}{\varphi} u_x \right), \quad (11)$$

上式对 t 求偏导数得

$$\frac{\partial P_a}{\partial t} = -F \left[1 - \frac{2J_1(\lambda R)}{\lambda R J_0(\lambda R)} \right] \left(\omega_{xt} + \frac{\gamma}{\varphi} u_{xt} \right). \quad (12)$$

其中: C_1 、 C_2 为待定常数; J_0 为零阶 Bessel 函数; J_1 为一阶 Bessel 函数。

1.5 P波波速与衰减

通过求解方程(1)和(12)可求解平面波波速 V_p (快波、慢波)及2个对应的衰减值。

$$V_{P1,2} = \frac{1}{\operatorname{Re}(X_{1,2})}, \alpha_{1,2} = \omega \operatorname{Im}(X_{1,2}), \quad (13)$$

其中:

$$X_{1,2} = \sqrt{Y_{1,2}}, Y_{1,2} = -\frac{B}{2A} \pm \sqrt{\left(\frac{B}{2A} \right)^2 - \frac{C}{A}},$$

$$A = \frac{\varphi F_{sq} M}{\rho_s^2},$$

$$B = \frac{F_{sq} \left(2\alpha - \varphi - \varphi \frac{\rho_l}{\rho_s} \right) - \left(M + F_{sq} \frac{\alpha^2}{\varphi} \right) \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho_s} + i \frac{\omega_c}{\omega} \right)}{\rho_s},$$

$$C = \frac{\rho_l}{\rho_s} + \left(1 + \frac{\rho_l}{\rho_s} \right) \left(\frac{\rho_a}{\rho_s} + i \frac{\omega_c}{\omega} \right),$$

$$\rho_1 = (1 - \varphi) \rho_s, \rho_2 = \varphi \rho_f, \omega_c = \frac{\mu \varphi}{k \rho_f},$$

$$F_{sq} = F \left[1 - \frac{2J_1(\lambda R)}{\lambda R J_0(\lambda R)} \right], \quad (14)$$

显然,

当 $\omega \rightarrow 0$,有 $F_{sq} \rightarrow 0$,则P波传播速度为

$$V_{p_0} = \sqrt{\frac{M}{(1 - \varphi) \rho_s + \varphi \rho_f}}, \quad (15)$$

如果 $\omega \rightarrow \infty$,有 $\lambda \rightarrow \infty$,则

$$F_{sq} = F \left[1 - \frac{2J_1(\lambda R)}{\lambda R J_0(\lambda R)} \right] \rightarrow F. \quad (16)$$

方程(1)~(16)即为大功率超声波在近井带储层多孔介质中传播衰减波动力学模型,定量描述了超声波近井带储层多孔介质传播过程中引起的固/液平行错动和垂直喷射流动微观动力学机制。分析以上动力学模型不难看出:1)超声波频率越高,在近井地层中衰减越快,处理半径越短;2)地层孔隙度越大,超声波衰减越快,处理半径越短;3)地层流体粘度越大,超声波衰减越快,处理半径越小;4)在超低频情况下,孔隙流体在垂直波传播方向上只能产生缓慢流动,喷射流动机制几乎不影响储层对波场的

响应;5)同样,在超高频率下,孔隙流体处于非松弛状态,固体孔隙波动变形不能将流体挤出孔隙,喷射流动机制也几乎不影响储层对波场的响应。

2 储层孔隙超声蠕动输运动力学分析

根据 Hamida T 等人(2006)的研究结果,弹性波横波沿孔壁传播作用将引起孔隙壁的弹性变形,从而对孔隙内流体产生蠕动输运现象^[9]。

这里考虑一个油井的情况。假设声源安置在油井井下与多孔介质相距 L 的位置。多孔介质中原油压缩系数为 κ 、参考压强 p_0 下原油密度为 ρ_0 、原油粘度为 μ 。在忽略重力和粘度的情况下,压力声波的增压 $|p - p_0|$ 由下式计算

$$|p - p_0| = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{\rho_0 V_0 P}{2\pi\omega}} \quad (17)$$

在横波沿孔壁传播、波幅为定值的假设下,可按式(17)得到

$$a = |p - p_0| R / (2G) \quad (18)$$

其中: P 为声源输出的平均功率; ω 表示角频率;与波频率有关: $f = 2\pi\omega$; V_0 表示原油中声速 $V_0 = 1/\sqrt{\kappa\rho_0}$; R 为管孔半径; G 为多孔介质的弹性模量。

横波沿管孔壁传播的速度 V 取决于多孔介质中液体的压缩系数 κ 和孔壁的膨胀系数。

$$V = 1/\sqrt{\rho_0(\kappa + D)} \quad (19)$$

如图 2 所示,考虑一个可变形、半径为 R 的轴对称圆筒形管孔,孔壁在波幅、波速为定值的横波作用下会产生形变。引入柱坐标系, z 沿管孔中心线的方向。波沿着 z 向传播,孔壁方程 $r = W(z, t)$ 可表示为如下形式:

$$W(z, t) = R + a \cos [(2\pi/\lambda)(z - Vt)] \quad (20)$$

其中波长 $\lambda = V/f$ 。

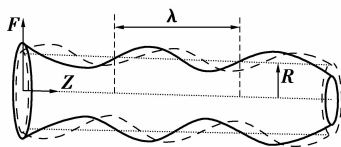


图 2 孔壁在横波作用下产生形变的圆筒形管孔

式(17)~(20)表明,大功率超声波对油井近井储层激励时,储层孔隙壁会以弹性形变的形式对流体产生附加蠕动作用,有利于提高流体的渗流能力。这种孔隙流体的附加波动蠕流作用大小主要取决于

孔隙介质弹性力学性质、油层物理性质以及外加超声波功率、超声波频率、超声波源置放方式等。

3 超声波作用对孔壁无机垢微粒拖拽剥离动力学分析

假设堵塞微粒只受到超声波的作用,多孔介质中不存在压力梯度,不考虑固体对流体的耦合作用。设孔道半径为 R_p ,则超声波纵波作用下多孔介质中振荡流体的运动方程可写成如下形式:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (21)$$

其中: u 为流体流速; t 为超声波作用时间; ρ 为流体密度; p 为压力; x 为孔道轴向坐标; ν 为流体运动粘度; r 为孔道径向坐标。

振荡压力梯度可以表示为

$$\frac{dp}{dx} = \rho I e^{i\omega t} \quad (22)$$

式中: I 为声强; ω 为角频率。

由 ρI 可确定特征速度 $U_{\max} = IR_p^2/4\nu$,即孔道中心线处的流速。当压力梯度 ρI 为常数,由连续性方程及边界条件 $r = R_p$ 可求得运动方程的解:

$$u(r, t) = \frac{1}{i\omega} e^{i\omega t} \left[1 - \frac{J_0(r \sqrt{-i\omega/\nu})}{J_0(R_p \sqrt{-i\omega/\nu})} \right] \quad (23)$$

在距离 x 处的特征速度 U_{\max} 与超声波的输出功率 P_0 有如下关系:

$$A\rho V U_{\max}^2 = P_0 e^{-2\alpha x} \quad (24)$$

其中: V 是超声波传播速度; A 是孔道截面积; α 是超声波阻尼系数。

由方程(23)、(24)及表达式 $I = 4\nu U_{\max}^2/R_p^2$ 可知:在超声波输出功率 P_0 、孔道半径 R_p 、超声波角频率 ω 、波速 V 、流体粘度 ν 、流体密度 ρ 、孔道截面积 A 及波的阻尼系数 α 已知的情况下,孔道中振荡流体流速是关于轴向坐标 x ,径向坐标 r 和超声波作用时间 t 的一个方程。

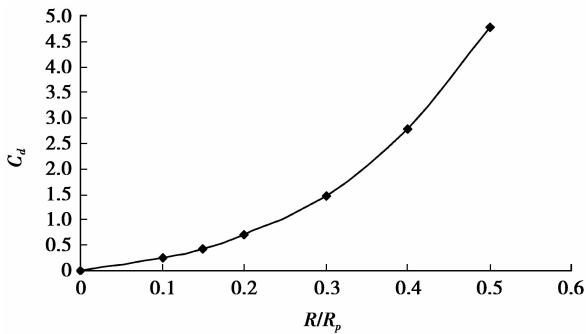
超声波作用时,粘附在孔壁上半径为 R 的球形微粒在振荡流体的作用下将受到一个拉力,该拉力的最大值写成如下形式^[10]:

$$F_D = C_d 6\pi\rho R u(r=0, t)_{\max} \quad (25)$$

其中: $u(r=0, t)_{\max}$ 为超声波振荡引起的流体最大速度,与超声波频率有关; C_d 与微粒半径、孔道半径之比有关。

当多孔介质中存在压力梯度,并具有稳定的液流时,该拉力最大值的表达式如下:

$$F_D = C_d 6\pi\mu R [u(r=0, t)_{\max} + v(r=0)] \quad (26)$$

图3 C_d 与 R/R_p 的关系曲线

其中, $v(r=0)$ 是由压力梯度引起的轴向液流速度。

如图4所示,微粒受到超声波附加拉力 F_D 、提升力 F_L 的作用下,克服粘附力 F_A ,通过“滚动-提升-拖动”3个过程使微粒从孔隙表面脱离。

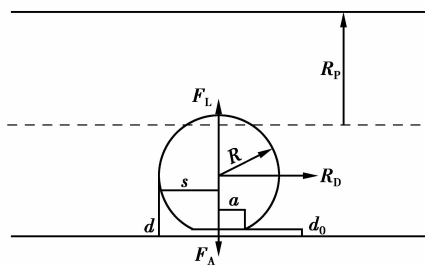


图4 粘附微粒受力分析图

当微粒受力平衡时,有作用在微粒上的力矩平衡,存在如下关系:

$$1. 4RF_D = a(F_A - F_L), \quad (27)$$

式(27)即为微粒与孔壁脱落的临界条件,粘附力 F_A 是范德华引力 F_{vdw} 、结构力 F_{st} 、波恩短程斥力 F_{born} 、双电层静电排斥力 F_{dl} 和重力 F_g 的合力,可由胶体动力学确定^[7]。

从方程(25)和(26)可以看出,频率越高、功率越大、流体粘度越大,超声波对微粒的附加波动力越大,解堵效果越明显。但另一方面,频率越高,衰减也越快,超声波的穿透深度也就越浅。因此,需要有一个合理的频率范围。

4 近井地层大功率超声波造缝增渗动力学分析

根据波动理论、岩石力学和断裂力学原理,大功率超声波近井解堵的另一个波动力学机制就是造缝增渗作用。当超声波对地层产生的附加作用力超过

岩石的极限抗剪和抗压强度时,岩石就会发生破坏起裂,随后到达的大功率超声波在先前微裂缝尖端处应力集中,进一步推进裂纹的扩展,进而在近井地带建立一个随机微裂缝区域。

针对不同类型岩石,可以采用最大正应力强度理论、最大正应变强度理论、最大剪应力强度理论和最大剪应变强度理论来表示相应的岩石破坏准则^[11]。

当岩石在大功率超声波冲击荷载施加于岩石超过破坏准则的极限抗压和抗剪能力时,首先在井眼附近的岩石发生起裂,随后持续发生的超声波将同时以 V_p 和 V_s 波速的纵波和横波向外传播,产生大功率波动应力波。即

$$V_p = [(\lambda + 2\mu)/\rho]^{1/2}, \quad (28)$$

$$V_s = (\mu/\rho)^{1/2}, \quad (29)$$

式中: V_p 和 V_s 分别以 p 波和 S 波的波速; λ 和 μ 分别是弹性常数; ρ 为密度。

当波动产生的强大应力波传至裂缝处时,引起应力场的变化。特别是裂纹尖端处,应力发生畸变,应力场骤增,导致裂缝扩展^[8]。裂纹尖端处应力表达式为

$$\sigma_{ij} = \frac{K_R(t)}{2\pi\gamma} f_{Rij}(\theta), \quad (30)$$

式中: $f_{Rij}(\theta)$ 为已知函数; γ 和 θ 为以裂纹端部为原点的极坐标系坐标; $K_R(t)$ 是随物体和裂纹的几何形状及入射的应力波波形的变化的应力强度系数; R 为变形形式,代表 I、II、III 型断裂裂纹。

为简单起见,此处仅讨论其中一种裂纹(R 为 I 型)的情况,将式(30)中的应力强度系数记为

$$K_1(\alpha, t) = \sigma_0 \alpha^\pi f(C_\delta t/a), \quad (31)$$

式中: σ_0 为外荷载应力幅值; α 为裂纹长度。

对任意应力加载函数 $\sigma(t)$, 则式(31)变为

$$K_1(\alpha, t_c) = \alpha\pi \int_0^{t_c} \sigma'(x) f[C_\delta(t-x)/a] dx, \quad (32)$$

对常应变率加载,令 $\sigma'(x) = \alpha'$ 及 t_c 时刻施加的应力水平达到断裂应力水平 σ_c 时有 $\sigma_c = \alpha' t_c$, 代入式(32)中,则 t_c 时刻的关系式为

$$K_1(\alpha, t_c) = \sigma_0 \alpha \pi \int_0^{\sigma_c/\alpha'} f(C_\delta/a) dx. \quad (33)$$

式(33)表明裂缝形成与外荷载应力幅值 σ_0 以及波速 C_δ 密切相关。

结果表明,依据岩石强度破坏准则,通过调整优化波动工作参数,在一定条件下实现对岩石的“定向”破碎,在近井带储层中建立人工裂缝发育带,实

现增加储层岩石渗透率和油水井注采能力的目的,这对低渗、特低渗油气藏强化开采具有重要意义。

5 结 论

根据超声波传播、衰减和激励引起近井带储层多孔介质中固/液耦合动力学特征,进一步揭示了大功率超声波近井无机结垢解堵的微观动力学机理,对超声波解堵技术的选井选层决策和矿场工艺优化设计具有十分重要的指导意义。

1) 无机垢体破碎作用。大功率超声波作用于近井储层岩石骨架固体的结果,使固体发生弹性变形,依附在孔壁表面的无机垢聚集体整体结构将受到不同程度的破坏,有利于使无机垢聚集体变得破碎疏松。同时,骨架固体的波动变形使孔隙内部流体受到强烈挤压,使孔隙内流体产生强烈的挤压喷射流动机制,这种强烈的挤压流动有效地将已变疏松的无机垢碎片和微粒剥离进入孔隙流体中。

2) 大功率超声摩擦作用。由于储层岩石固体骨架与孔隙内流体的力学性质及其对超声波动场能量吸收、传递和反应特点具有很大差异,固体和流体由于波动引起的微观弹性运动快慢不一致,使得固/液体系在超声波作用下发生强烈的错流现象。这种强烈的固/液错动使孔隙内流体与无机垢界面、无机垢层与孔隙表面之间产生剧烈的摩擦运动而剪切错位,从而促进无机垢碎片和微粒从孔隙表面脱落。

3) 大功率超声蠕动输运作用。当大功率超声波作用于近井储层多孔介质而发生弹性形变时,将使储层孔隙尺寸发生涨缩变化,孔隙吼道交替增大,使孔隙流体产生附加超声蠕动输运现象。这种超声蠕动输运作用也有利于储层孔隙中无机垢碎片和微粒从孔壁脱落和随同孔隙流体排出地层,恢复近井储层渗流能力。

4) 大功率超声波造缝增渗作用。当超声波对地层产生的附加作用力超过岩石的极限抗剪和抗压强度时,岩石就会破坏起裂,井底发生器产生的超声波连续作用在裂缝尖端处实现应力集中,于是可在近井带建立一个随机分布的微裂缝区。

参考文献:

- [1] 孙仁远,沈本善,严焯培. 超声波对多孔介质中流体流动的影响[J]. 水动力学研究与进展, 1997(3): 277-280.
SUN REN-YUAN, SHEN BEN-SHAN, YAN ZHI-

PEI. The influence of ultrasonic wave on the fluid flow through porous media[J]. Advance in Hydrodynamics, 1997(3):277-280.

- [2] 顾春元, 虞建业, 任永林, 等. 超声波采油技术研究及应用[J]. 石油钻采工艺, 2003(6): 59-61.
GU CHUN-YUAN, YU JIAN-YE, REN YONG-LIN, et al. On the studies of ultrasonic wave stimulation technique and applications[J]. Oil & Gas Drilling and Production, 2003(6): 59-61.
- [3] 张永发, 祝济之, 胡长华. 超声波地层解堵机理研究初步[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(5): 397-400.
ZHANG YONG-FA, ZHU JI-ZHI, HU CHANG-HUA. Primary study on the mechanism of formation blockage removal with ultrasonic wave[J]. Journal of Beijing University of Science and Engineering, 2006, 26(5): 397-400.
- [4] 杨悦, 蒲春生, 王萍. 低频脉冲波对储层岩心渗流特性影响规律研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(2): 123-125.
YANG YUE, PU CHUN-SHENG, WANG PING. Study on the effect law of low-frequency pulse waves on the seepage performance of reservoir cores[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2007, 22(2): 123-125.
- [5] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid: Low-frequency range[J]. Acoust Soc Amer, 1956(a, b) 28: 168-178, 179-191.
- [6] DVORKON J, NUR A. Dynamic poroelasticity: a unified model with the squirt and the Biot mechanisms[J]. Geophysics, 1993, 58(4): 524-533.
- [7] DVORKIN J, NOLEN-HOEKSEMA R, NUR A. The squirt-flow mechanism: macroscopic description[J]. Geophysics, 1994, 59(3): 428-438.
- [8] DVORKIN J, MAVKO G, NUR A. Squirt flow in fully saturated rocks[J]. Geophysics, 1995, 60(1): 97-107.
- [9] HAMIDA T. The influence of ultrasonic energy on capillary fluid displacement [J]. SPE, 2006, 106521-STU: 1-30.
- [10] POESIO P, OOMS G. Removal of particle bridges from a porous material by ultrasonic irradiation [J]. Transport in Porous Media, 2007, 66: 235-257.
- [11] 邓天宇. 岩力学的弹塑性理论基础[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.

(编辑 陈移峰)