

◀“973”计划专题▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2013.04.010

裂缝性地层钻井液漏失动力学模型研究进展

李大奇¹, 康毅力², 刘修善¹, 陈曾伟¹, 思 娜¹

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 四川成都 610500)

摘 要: 为了有效预防和控制裂缝性地层中可能发生的井漏, 需要明确钻井液漏失原因, 了解钻井液漏失特征及规律, 准确预测原地裂缝宽度。借鉴油藏数值模拟和试井的研究思路, 通过建立钻井液漏失动力学模型, 可以分析井漏的影响因素, 反演裂缝宽度, 诊断漏失类型, 揭示漏失的特征及规律, 为防漏堵漏技术研究提供新思路。综述了钻井液漏失动力学模型的研究进展, 详细分析了一维径向漏失模型、一维线性漏失模型及二维平面漏失模型的优缺点, 阐述了钻井液漏失模型的应用情况, 指出耦合井筒压力系统的漏失模型、裂缝网络漏失模型及缝洞型地层漏失模型是今后的主要发展趋势。

关键词: 裂缝性储集层 钻井液 井漏 裂缝宽度 数学模型

中图分类号: TE28⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2013)04-0042-06

Progress in Drilling Fluid Loss Dynamics Model for Fractured Formations

Li Daqi¹, Kang Yili², Liu Xiushan¹, Chen Zengwei¹, Si Na¹

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation (Southwest Petroleum University), Chengdu, Sichuan, 610500, China)

Abstract: Mud loss is a common problem in drilling fractured formations. To prevent and control lost circulation in these kinds of formations, the causes, characteristic and pattern of drilling fluid loss need to be determined, and the width of in-situ fractures needs to be predicted accurately. Using the approach in reservoir simulation and well testing, drilling fluid loss dynamics model can be established to analyze factors causing mud loss, calculate fracture width with inversion, figure out loss type, characteristic and pattern, providing a new way for lost circulation prevention and control. This paper summed up the progress in the study on mud loss dynamics model, analyzed the advantages and disadvantages of mud loss models, and introduced the application of the models. At last, it was pointed out that mud loss models considering well-bore pressure, fracture network, mud loss model for fracture-vuggy formations are needed to be developed in the future.

Key words: fractured reservoir; drilling fluid; lost circulation; fracture width; mathematical model

井漏是钻井施工中存在的重大技术难题之一, 而大部分的井漏都与裂缝有关。统计表明, 在油田现场, 裂缝性地层防漏、堵漏的费用约占各种地层总费用的 90% 以上^[1]。因此, 解决裂缝性地层的井漏问题意义重大。研究发现, 如果清楚原地裂缝宽度的大小和性质, 堵漏技术及堵漏液配方的选择会更具针对性, 会大幅度提高堵漏一次成功率^[2-4]。关于裂缝性地层钻井液的漏失动力学问题, 国内外学者做了大量工作, 如提出利用漏失资料来识别裂缝和

收稿日期: 2013-03-10; **改回日期:** 2013-06-24。

作者简介: 李大奇(1982—), 男, 山东德州人, 2006 年毕业于西南石油大学石油工程专业, 2012 年获西南石油大学油气井工程专业博士学位, 工程师, 主要从事防漏堵漏和井壁稳定方面的研究工作。

联系方式: (010)84988728, ldqewet@163.com。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“深井复杂地层漏失与井壁失稳机理及预测”(编号: 2010CB226705)、国家科技重大专项“塔河盐区钻井液技术研究”(编号: 2011ZX05049-02-01)和国家科技重大专项“复杂地层漏失诊断及完井方法研究”(编号: 2011ZX05005-006-008HZ)联合资助。

预测原地裂缝宽度大小,综合利用渗流力学与非牛顿流体力学等理论和试井解释等方法实现裂缝宽度预测,并在现场进行了应用^[5-13];A. Lavrov 等人^[14-18]最早使用钻井液漏失模型定量分析钻井液漏失特征及规律,研究了地层性质和工程因素对漏失动态的影响;J. Adachi、R. Majid、M. Ozdemirtas 等人^[19-26]促进了漏失机理研究;S. Salimi 等人^[27]进一步拓宽了漏失模型的应用范围,将其应用到欠平衡钻井储层损害分析中。笔者通过广泛调研,归纳总结了现有的漏失模型,分析了模型的基本假设条件、影响因素及优缺点,列举了漏失模型在裂缝宽度预测、漏失规律分析和储层保护等方面的应用情况,指出了漏失动力学的发展趋势,以期促进国内井漏基础理论研究,提高裂缝性地层堵漏成功率。

1 钻井液漏失动力学模型

钻井液作为一种黏性流体,其基本流动规律符合 Navier-Stokes 方程(N-S 方程)。因直接求解 N-S 方程比较困难,只能通过合理的假设得到不同的漏失模型。

1.1 一维径向模型

F. Sanfillippo 等人^[5]假设钻井液为牛顿流体,仅有一条无限长裂缝与井眼相交,钻井液在裂缝中的流动为层流,井筒为定压力边界,把扩散方程和 Poiseuille 定律应用到钻井液径向漏失中,得到了漏失量与裂缝宽度、压差、时间、孔隙度、综合压缩系数、井眼半径及裂缝倾角等参数的解析关系式(记为模型 1):

$$c \frac{\frac{\omega^2 t}{12\mu C_t \phi_i r_w^2}}{\ln\left(\frac{\omega^2 t}{12\mu C_t \phi_i r_{eq}^2}\right)} - \frac{V(t)}{2\pi\phi_i C_t r_{eq}^2 \omega^2 \Delta p} = 0 \quad (1)$$

式中: c 为常数,约为 2.01; ω 为裂缝宽度,m; t 为漏失时间,s; μ 为钻井液的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; C_t 为综合弹性压缩系数, Pa^{-1} ; ϕ_i 为裂缝孔隙度; r_w 为井眼半径,m; r_{eq} 为当量井眼半径,m; $V(t)$ 为 t 时刻的累计漏失量, m^3 ; Δp 为正压差(井眼压力与地层压力之差),Pa。

模型 1 应用比较方便,然而大部分钻井液并非牛顿流体,所以该模型有一定的局限性。

R. Maglione 等人^[6]基于稳态条件下的扩散方程,推导了宾汉流体在裂缝中的漏失模型,建立了压

差与裂缝宽度、总漏失量、钻井液黏度、井眼半径及漏失速率的关系(记为模型 2):

$$\Delta p(t) = \frac{6Q(t)\mu}{\pi\omega^3} \ln \frac{\left[\frac{V(t)}{\pi\omega} + r_w^2\right]^{\frac{1}{2}}}{r_w} \quad (2)$$

式中: $\Delta p(t)$ 为 t 时刻的正压差,Pa; $Q(t)$ 为 t 时刻的漏失速率, m^3/s 。

R. Maglione 认为裂缝宽度在 0.1~1.0 mm,剪切速率在 $1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 时,式(2)中的黏度可以近似用塑性黏度代替。

F. Bertuzzi^[8]在模型 1 的基础上,进一步对漏失模型进行研究,通过联立 Poiseuille 公式和达西公式,求得方程的解析解(记为模型 3):

$$Q(t) = 2\Delta p r_w \omega^2 \sqrt{\frac{\pi\rho C_t}{3\mu t}} \quad (3)$$

式中: ρ 为钻井液的密度, kg/m^3 。

研究证实,裂缝较小时层流的假设是正确的,并认为高渗透性地层的漏失可以看作是裂缝网络漏失。

O. Liétard 等人^[7]研究了宾汉流体在裂缝中的漏失问题,假设压差为定值,建立了宾汉流体在单条无限长裂缝中漏失的平面径向流动模型(记为模型 4):

$$\Delta p = \frac{12\mu_p}{\omega^2} r_i \ln\left(\frac{r_i}{r_w}\right) \frac{dr}{dt} + \frac{3\tau_y}{\omega} \frac{r_i}{r_w} \quad (4)$$

式中: μ_p 为塑性黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; r_i 为钻井液侵入半径,m; r 为到井眼中心的径向距离,m; τ_y 为动切力,Pa。

为了便于现场工程师利用漏失数据进行裂缝宽度预测,对式(4)进行无量纲化,得:

$$\frac{dr_D}{dt_D} = \frac{1 - \alpha(r_D - 1)}{4r_D \ln r_D} \quad (5)$$

其中

$$r_D = \frac{r_i}{r_w} \quad (6)$$

$$t_D = \beta t \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{3r_w}{\omega} \frac{\tau_y}{\Delta p} \quad (8)$$

$$\beta = \left(\frac{\omega}{r_w}\right)^2 \frac{\Delta p}{3\mu_p} \quad (9)$$

式中: r_D 为无量纲半径; t_D 为无量纲时间; α 为钻井液侵入系数; β 为时间系数, s^{-1} 。

该模型考虑了压差、裂缝宽度、钻井液塑性黏度、动切力、井眼半径、时间等因素对钻井液漏失的影响,并且 O. Liétard 等人认为该模型只有数值解。

S. J. Sawaryn^[9]及 F. Civan 等人^[10]深入研究了模型 4,认为式(5)存在解析解,并分别给出了不同

的解析解(分别记为模型 5、模型 6)。通过对比数值解和解析解, F. Civan 认为 2 个解析解均有很好的精度,但在相同精度时,模型 6 的解析解形式更简单,更节约计算时间。因此,建议使用该解析解模型,即:

$$t_D = 4r_{D\max}(r_{D\max} - 1) \left\{ -\ln r_D \left[\frac{r_D}{r_{D\max}} + \ln \left(1 - \frac{r_D}{r_{D\max}} \right) \right] + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left[\left(\frac{1}{r_{D\max}} \right)^n - \left(\frac{r_D}{r_{D\max}} \right)^n \right] \right\} \quad (10)$$

其中 $r_{D\max} = 1 + 1/\alpha$ (11)
式中: $r_{D\max}$ 为无因次最大侵入半径。

解析解的出现使得模型 4 的使用更加方便。

A. Lavrov 等人^[14]假设钻井液为幂律流体,裂缝为有限长的平面圆盘状,裂缝宽度随压力线性变化,建立了单条天然裂缝的径向漏失模型(记为模型 7):

$$\frac{dr_f}{dt} = \frac{\left[\Delta p - \frac{2n+1}{n+1} \frac{2\tau_y}{w} (r_f - r_w) \right]^{\frac{1}{n}} \frac{n}{2n+1} \left(\frac{w}{2} \right)^{1+\frac{1}{n}} (1-n)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{1}{K} \right)^{\frac{1}{n}}}{r_f [K(r_f^{1-n} - r_w^{1-n})]^{\frac{1}{n}}} \quad (13)$$

因模型对流体流变参数极为敏感,在计算裂缝水力学宽度时,应考虑地面条件所测流变参数与井下真实值的区别。但是,该模型还存在很多不足,如未考虑裂缝倾角、地层流体性质、裂缝变形和地层流体压缩性等参数的影响。由于未考虑裂缝中地层流体对漏失的阻力作用,会高估井漏严重程度。因此, R. Majidi 等人^[21]假设地层流体为微可压缩牛顿流体,流体在裂缝内的流动符合达西定律,得到了考虑地层流体性质的漏失方程(记为模型 10):

$$2^{\frac{m+1}{n}} \left(r_{D0} \frac{dr_D}{dt_D} \right)^n \frac{r_D^{1-n} - 1}{1-n} - \alpha(r_{D0} - 1) + \lambda \int_0^{t_D} r_{D0} \frac{dr_D}{dt_D} \frac{\exp \left[\frac{-r_{D0}^2}{4\eta^* (t_D - \tau_D)} \right]}{t_D - \tau_D} dt_D - 1 = 0 \quad (14)$$

式中: r_{D0} 为无因次钻井液侵入半径; λ 为黏度比; η^* 为相对扩散系数。

该模型为更好地了解漏失动态及准确预测裂缝宽度提供了理论依据。

S. Salimi 等人^[27]发现 Mathcad 可以直接求出模型 4 的解析解,并通过与模型 6 解析解对比证实了 Mathcad 解析解的可靠性,利用 Excel 实现了编程,使得模型的应用更方便。

Jinsong Huang 等人^[12]对模型 4 进行了简化,提出了方便现场应用的裂缝宽度计算方法简化模型

$$\frac{n}{2n+1} \left(\frac{1}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{w^{2+\frac{1}{n}}}{2^{1+\frac{1}{n}}} \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \left| - \frac{\partial p}{\partial r} \right|^{\frac{1}{n}-1} + \frac{n}{2n+1} \left(\frac{1}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{1}{2^{1+\frac{1}{n}}} \frac{\partial}{\partial r} \left(w^{2+\frac{1}{n}} \frac{\partial p}{\partial r} \left| - \frac{\partial p}{\partial r} \right|^{\frac{1}{n}-1} \right) = - \frac{\partial w}{\partial t} \quad (12)$$

式中: n 为流性指数; K 为稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$; p 为裂缝内流体压力, Pa 。

A. Lavrov 等人^[15]认为在高的有效应力条件下,裂缝随着压力基本呈线性变形,此时指数变形方程可简化为线性变形方程。因此,使用了裂缝线性变形方程(记为模型 8)。模型中还考虑了牛顿流体、幂律流体和双黏度流体等 3 类流体的本构方程,丰富了单条有限长度水平裂缝的一维径向漏失模型。

R. Majidi 等人^[20]认为赫巴(H-B)流变模式更有普适性,可退化为宾汉和幂律模式。基于这一想法, R. Majidi 利用与 O. Lietard 相似的研究方法,推导了 H-B 流体一维径向漏失模型(记为模型 9):

(记为模型 11),其所计算的裂缝宽度同模型 4 结果比较一致。

1.2 一维线性模型

A. Lavrov 等人^[16]假设钻井液为牛顿流体、裂缝线性变形、壁面存在滤失,当缝内压力大于临界压力时,裂缝壁面才开始滤失,通过联立达西公式,最终建立了单条裂缝的线性漏失方程(记为模型 12):

$$\frac{1}{12\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(w_0 + \frac{p}{K_n} \right)^3 \frac{dp}{dx} \right] = 2q_l + \frac{1}{K_n} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (15)$$

式中: x 为笛卡尔坐标系 x 轴的坐标值, m ; w_0 为流体压力为 0 ($p=0$) 时的裂缝宽度(或线性化的参数), m ; q_l 为壁面滤失速率, m/s ; K_n 为法向刚度系数, MPa/m 。

基于该模型,可分析井筒压力、地层压力、裂缝宽度、裂缝倾角及裂缝面的渗透率等参数对漏失的影响。

1.3 二维平面裂缝模型

A. Lavrov 等人^[17]假设裂缝符合指数变形规律、钻井液为牛顿流体,根据 Reynolds 方程,建立了直角坐标系下的二维平面裂缝漏失方程(记为模型 13):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{w^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{1}{12\mu} \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{w^3}{12\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \sin \alpha_i \right) \right] = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (16)$$

式中: y 为笛卡尔坐标系 y 轴的坐标值, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; α_i 为裂缝的倾角, $(^\circ)$ 。

该模型考虑了裂缝倾角、裂缝尺寸、井筒位置、裂缝指数变形等因素, 并应用局部立方定律探讨了裂缝表面粗糙度对漏失的影响。虽然该模型考虑的因素较多, 但它把钻井液假设为牛顿流体, 本质上还没有脱离水力学研究范畴。

1.4 裂缝网络模型

P. Tempone 等人^[18]利用离散元法, 假设钻井液为牛顿流体、裂缝可变形, 法向和切向刚度可变, 使用 UDEC 软件模拟了钻井液在单条裂缝及二维裂缝网络中的漏失情况(记为模型 14)。研究表明, 裂缝总长度和刚度控制了累计漏失量; 漏失速率曲线主要被裂缝网络的几何形态所控制; 井筒与裂缝网络的相对位置对漏失速率曲线影响较大, 裂缝内部的连通率对漏失影响并不显著, 黏度对漏失速率的影响很小, 总漏失量与黏度无关。研究还表明, 裂缝网络漏失与单条裂缝的漏失行为不同, UDEC 可以用来进行二维裂缝网络漏失模拟。然而, UDEC 未考虑非牛顿流体, 且只能用来模拟二维的情况, 有待于探索新的解决途径。

2 漏失模型的应用

2.1 裂缝宽度预测

裂缝宽度是选择防漏堵漏技术及堵漏材料的主要依据。可通过成像测井、声波测井和核磁共振识别井下裂缝宽度。然而, 测井法探测裂缝成本较高, 且无法识别裂缝的连通性, 有时因井下故障不能使用。因此, 如果能够充分利用井漏时钻井液录井的实时数据, 通过建立漏失模型解释钻井液漏失数据, 及时识别出连通的裂缝及裂缝宽度, 将对防漏堵漏具有重要意义。

F. Sanfillippo 等人^[5]通过漏失模型预测了裂缝宽度, 并进行了现场应用。例如, 某井在取心钻井中预测到 2 条宽度分别为 0.32 mm 和 0.35 mm 的水力裂缝, 取心后观察岩心, 发现有一条 4 cm 厚的半充填裂缝条带, 裂缝开度为 0.2~0.8 mm, 证实了该模型可用来预测裂缝宽度。该技术的成功应用, 推动了 Agip 公司在裂缝性地层钻井中使用高精度

的进、出口流量计, 并成为企业标准。

O. Liétad 等人^[7]假设钻井液为宾汉流体, 同样利用钻井液录井数据来预测天然裂缝宽度。为便于现场工程师应用所建立的模型建立漏失曲线图版, 可利用漏失数据曲线与图版进行匹配来预测裂缝宽度。该技术在北海中部 2 口井进行了应用, 并取得了较好的应用效果。

F. Verga 等人^[6]测量了现场 3 口井的钻井液漏失数据, 并利用模型 1、2、4 对裂缝水力宽度进行了反演。研究表明, 对单条裂缝漏失, 模型 2、4 计算的裂缝水力宽度基本一致, 裂缝网络地层模型 1 计算的裂缝宽度大约为模型 2 的 2 倍, 分析认为, 这是由前者假设钻井液为牛顿流体所导致的。通过对比模型 2 计算的水力学宽度和成像测井获得的裂缝几何宽度, 认为在缝宽较大时, 水力学宽度与几何宽度的一致性较好。

S. Akin^[13]发展了模型 4 和模型 11, 引入人工神经网络法来预测裂缝宽度和裂缝渗透率, 预测的渗透率与不稳定试井解释的渗透率一致。

2.2 漏失特征及规律研究

A. Lavrov 等人^[14-26]进行了大量研究, 分析了漏失机理, 研究认为: 1) 幂律流体稠度系数对漏失速率曲线有较大影响, 稠度系数的增大, 减小了漏失速率曲线上升部分和末端下降部分的斜率; 2) 钻井液的漏失速率受井筒有效压力和地层压力之差控制, 而与其中某一项的绝对值大小无关; 3) 井筒位置对漏失有明显的影响, 越靠近裂缝中心, 漏失程度越严重, 井眼半径对漏失行为几乎没有影响; 4) 裂缝性质对漏失影响较大。初始裂缝宽度对漏失影响显著, 初始裂缝宽度越大, 漏失速率曲线的峰值越高; 裂缝长度增加, 增大了漏失曲线峰值和末端长度; 裂缝倾角对漏失的影响程度随着裂缝变形能力的降低而降低; 当裂缝面无接触时, 粗糙度对漏失几乎没有影响, 但当接触率大于 0 时, 粗糙度能显著降低钻井液的漏失速率, 这与水力学研究结果类似, 因此建立漏失模型时应考虑粗糙度, 但是否考虑粗糙度对参数敏感性分析结果无影响。

2.3 储层损害研究

S. Salimi 等人^[27]使用模型 4 研究了裂缝性地层欠平衡钻井中发生短暂的过平衡时, 钻井液性能、时间、压差等对产能和流动效率的影响。研究认为, 钻井液的塑性黏度和动切力对产能有较大影响, 短

暂的过平衡会导致严重的储层损害,裂缝中流体的流动效率会大幅度降低。

3 发展趋势

钻井液漏失动力学研究是一个比较新的领域。

自20世纪90年代中期以来,国外学者开始着手该方面的研究,而国内直到最近几年才开始着手这方面的研究,截至目前取得了一些研究成果(见表1)。但由于钻井液本身及漏失通道的多样性和复杂性,钻井液漏失动力学研究整体上还处于初级阶段。

表1 钻井液漏失模型
Table 1 Model of drilling fluid loss

| 模型 | 几何特性 | | | | | | 流体特性 | | | 耦合关系 | | 解的形式 |
|---------------------|------|------|-----|------|------|------|------|------|---------|------|------|------|
| | 维数 | 裂缝形状 | 粗糙度 | 裂缝长度 | 裂缝倾角 | 井筒位置 | 流变性 | 稳定流动 | 地层流体压缩性 | 裂缝变形 | 壁面滤失 | |
| 模型 1 | 1 | 圆盘 | | 无限 | 任意 | 中心 | 牛顿 | 瞬态 | 微可压缩 | | | 解析 |
| 模型 2 | 1 | 圆盘 | | 无限 | 水平 | | 宾汉 | 稳态 | | | | 解析 |
| 模型 3 | 1 | 圆盘 | | 无限 | 水平 | | 牛顿 | 瞬态 | 微可压缩 | | | 解析 |
| 模型 4 | 1 | 圆盘 | | 无限 | 水平 | | 宾汉 | 瞬态 | | | | 数值 |
| 模型 5,6 | 1 | 圆盘 | | 无限 | 水平 | | 宾汉 | 瞬态 | | | | 解析 |
| 模型 7 | 1 | 圆盘 | | 有限 | 水平 | | 幂律 | 瞬态 | | 线性 | | 数值 |
| 模型 8 | 1 | 圆盘 | | 有限 | 水平 | | 双粘 | 瞬态 | | 线性 | | 数值 |
| 模型 9 | 1 | 圆盘 | | 无限 | 水平 | | 赫巴 | 瞬态 | | | | 数值 |
| 模型 10 | 1 | 圆盘 | | 无限 | 水平 | | 赫巴 | 瞬态 | 微可压缩 | | | 数值 |
| 模型 12 | 1 | 线 | | 有限 | 任意 | | 牛顿 | 瞬态 | | 线性 | 有 | 数值 |
| 模型 13 | 2 | 矩形 | 有 | 有限 | 任意 | 可变 | 牛顿 | 瞬态 | | 指数 | | 数值 |
| 模型 14 | 2 | 线 | | 有限 | 任意 | 可变 | 牛顿 | 瞬态 | | 线性 | | 数值 |
| 模型 15 ¹⁾ | 1 | 圆盘 | | 有限 | 水平 | | 赫巴 | 瞬态 | | 线性 | | 数值 |
| 模型 16 ²⁾ | 2 | 矩形 | 有 | 有限 | 任意 | 可变 | 牛顿 | 瞬态 | | 指数 | | 数值 |
| 模型 17 ³⁾ | 1 | 圆盘 | | 有限 | 水平 | | 赫巴 | 瞬态 | | 两种 | | 数值 |
| 模型 18 ⁴⁾ | 2 | 矩形 | 有 | 有限 | 水平 | 可变 | 赫巴 | 瞬态 | | 两种 | | 数值 |

注:1)具体模型见文献[11];2)具体模型见文献[22];3)具体模型见文献[25];4)具体模型见文献[26]。

从表1可以看出,现有的漏失动力学模型以一维径向流为主,未充分考虑裂缝变形、裂缝粗糙度、裂缝壁面滤失等因素;二维裂缝漏失模型未考虑非平面、非规则及无限长裂缝的影响。对于更为常见的裂缝网络漏失的研究还未真正开始,更未涉及非牛顿流体及三维裂缝网络问题。因此,今后钻井液漏失动力学研究将会更加重视数值建模、室内试验及现场应用等方面的研究。漏失动力学模型研究的发展趋势为:1)考虑恶性漏失时,定井筒压力边界条件的假设不合理,需要建立耦合井筒钻井液循环系统与地层裂缝系统的漏失模型;2)通过试验手段研究钻井液固相对漏失的影响规律,建立考虑钻井液固相沉积及裂缝堵塞的非牛顿流体漏失动力学模型;3)探索能显著提高运算效率的编程方法或计算手段,模拟研究非牛顿流体在三维复杂裂缝网络中的漏失动力学行为;4)开展裂缝-孔洞、裂缝-溶洞及孔-缝-洞三重介质地层钻井液漏失物理及数学建模研究,进一步揭示缝洞型地层漏失特征;5)基于漏失

动力学模型,开展裂缝宽度反演、漏失类型诊断、漏失特征及漏失规律研究;6)开展漏失动力学理论的现场应用试验,完善并推广该技术的应用。

4 结束语

钻井液漏失动力学在裂缝识别、裂缝宽度预测、漏失机理分析、漏失类型诊断、储层损害分析和裂缝性油藏描述等方面有着广泛的应用前景,有助于防漏堵漏技术研究模型化、定量化、科学化。然而,现有的漏失动力学模型还比较简单,无法满足复杂地层的漏失模拟,现场应用方面也存在一定的局限性,有待于进一步研究。

参考文献 References

- [1] Fred E. Fracture closure stress(FCS)and lost returns practices [R]. SPE 92192,2005.

- [2] 徐同台,刘玉杰,申威,等. 钻井工程防漏堵漏技术[M]. 北京:石油工业出版社,1997:1-4.
Xu Tongtai,Liu Yujie,Shen Wei,et al. Technology of lost circulation prevention and control during drilling engineering [M]. Beijing:Petroleum Industry Press,1997:1-4.
- [3] 王业众,康毅力,游利军,等. 裂缝性储层漏失机理及控制技术进展[J]. 钻井液与完井液,2007,24(4):74-77.
Wang Yezhong,Kang Yili,You Lijun,et al. Progresses in mechanism study and control;mud losses to fractured reservoirs[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid,2007,24(4):74-77.
- [4] 李大奇,康毅力,曾义金,等. 缝洞型储层缝宽动态变化及其对钻井液漏失的影响[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2011,31(5):76-81.
Li Daqi,Kang Yili,Zeng Yijin,et al. Dynamic variation of fracture width and its effects on drilling fluid lost circulation in fractured vuggy reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science,2011,31(5):76-81.
- [5] Sanfilippo F,Brignoli M,Santarelli F J,et al. Characterization of conductive fractures while drilling[R]. SPE 38177,1997.
- [6] Verga F M,Carugo C,Chelini V,et al. Detection and characterization of fractures in naturally fractured reservoirs[R]. SPE 63266,2000.
- [7] Liétard O,Unwin T,Guillot D,et al. Fracture width LWD and drilling mud/LCM selection guidelines in naturally fractured reservoirs[R]. SPE 36832,1996.
- [8] Bertuzzi F, Sanfilippo F, Brignoli M, et al. Characterization of flow within natural fractures; numerical simulations and field applications[R]. SPE 47268,1998.
- [9] Sawaryn S J. Discussion of fracture width logging while drilling and drilling mud/loss-circulation-material selection guidelines in naturally fractured reservoirs[J]. SPE Drilling & Completion,2001,16(4):268-269.
- [10] Civan F,Rasmussen M L. Further discussion of fracture width logging while drilling and drilling mud/loss-circulation-material selection guidelines in naturally fractured reservoirs[J]. SPE Drilling & Completion,2002,17(4):249-250.
- [11] Majidi R,Miska S Z,Yu M,et al. Modeling of drilling fluid losses in naturally fractured formations[R]. SPE 114630,2008.
- [12] Huang Jinsong,Griffiths D V,Wong Sau-Wai. Characterizing natural-fracture permeability from mud-loss data[J]. SPE Journal,2011,16(1):111-114.
- [13] Akin S. Estimating natural-fracture permeability from mud-loss data; thirty-eighth workshop on geothermal reservoir engineering, California, February 11-13, 2013[C].
- [14] Lavrov A,Tronvoll J. Modeling mud loss in fractured formations[R]. SPE 88700,2004.
- [15] Lavrov A,Tronvoll J. Mechanics of borehole ballooning in naturally-fractured formations[R]. SPE 93747,2005.
- [16] Lavrov A,Tronvoll J. Mud loss into a single fracture during drilling of petroleum wells: modeling approach: 6th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, Trondheim,2003[C]. Netherlands:Swets & Zeitlinger Publishers,2003:189-198.
- [17] Lavrov A. Newtonian fluid flow from an arbitrarily-oriented fracture into a single sink[J]. Acta Mechanica,2006,186(1/2/3/4):55-74.
- [18] Tempone P,Lavrov A. DEM modeling of mud losses into single fractures and fracture network; the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Goa, October 1-6, 2008 [C].
- [19] Adachi J,Baliev L,Houwen O H,et al. Depleted zone drilling; reducing mud losses into fractures[R]. SPE 87224,2004.
- [20] Majidi R,Miska S Z,Yu M,et al. Fracture ballooning in naturally fractured formations: mechanism and controlling factors [R]. SPE 115526,2008.
- [21] Majidi R,Miska S Z,Yu M,et al. Quantitative analysis of mud losses in naturally fractured reservoirs; the effect of rheology [R]. SPE 114130,2008.
- [22] Ozdemirtas M,Babadagli T,Kuru E. Effects of fractal fracture surface roughness on borehole ballooning[J]. Vadose Zone Journal,2009,8(1):1-8.
- [23] Ozdemirtas M,Babadagli T,Kuru E. Experimental and numerical investigations of borehole ballooning in rough fractures[J]. SPE Drilling & Completion,2009,24(2):256-265.
- [24] Ozdemirtas M,Kuru E,Babadagli T. Experimental investigation of borehole ballooning due to flow of non-Newtonian fluids into fractured rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2010,47(7):1200-1206.
- [25] Shahri M P,Zeyghami M,Majidi R. Investigation of fracture ballooning and breathing in naturally fractured reservoirs: effect of fracture deformation law[R]. SPE 150817,2011.
- [26] 李大奇. 裂缝性地层钻井液漏失动力学研究[D]. 成都:西南石油大学石油工程学院,2012.
Li Daqi. Research on drilling fluid losses dynamics in fractured formations[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, School of Petroleum Engineering,2012.
- [27] Salimi S,Ghalambor A,Tronvoll J,et al. A simple analytical approach to simulate underbalanced-drilling in naturally fractured reservoirs; the effect of short overbalanced conditions and time effect[J]. Energies,2010,3(10):1639-1653.

[编辑 令文学]