

文章编号: 0253-2697(2000) 02-0066-04

利用电阻率特性评价泥页岩的扩散吸附性¹

刘向君 罗平亚

(西南石油学院完井中心 四川 南充 637001)

摘要: 扩散吸附性是泥页岩地层与外来流体接触时呈现出的基本物理性质, 扩散吸附系数则是表征这种能力的基本物理量, 是研究泥页岩地层水化能力、水化程度及泥浆抑制性的重要参数。在分析泥页岩地层扩散吸附性现有方法的基础上, 利用长岩心岩电实验装置, 对泥页岩地层与三种不同水溶液接触时呈现出的扩散吸附能力进行了研究, 并建立了根据电阻率径向分布规律确定地层/泥浆组成体系扩散吸附系数及井眼围岩吸附水分布的方法和计算机程序。理论分析表明, 该方法不仅能够较好地反映地层的扩散吸附性, 而且有助于利用现场测井资料评价水敏性泥页岩地层水化能力及水化程度。

主题词: 电阻率; 扩散吸附; 泥页岩; 扩散吸附系数; 滤液侵入

中图分类号: TE311 **文献标识码:** A

1 前言

扩散吸附性是泥页岩地层与外来流体接触时呈现出的基本物理性质, 扩散吸附系数则是表征这种能力的基本物理量, 是研究泥页岩地层水化能力、水化程度及泥浆抑制性的重要参数。Chenevert 等利用 Mancos 页岩, Willington 页岩及 Pierre 页岩岩心, 对泥页岩地层与不同钻井液滤液接触时呈现出的扩散吸附性进行了研究^[1~5], 发现: 相同地层与不同钻井液滤液接触时扩散吸附性不同, 泥页岩对泥浆滤液的扩散吸附能力不仅取决于组成泥页岩地层的粘土矿物种类、可交换性阳离子含量及类型, 而且取决于与之接触的钻井液性质、接触时间、地层的温度和围岩压力等, 泥浆/地层组成体系中任一环节的改变都可能导致地层扩散吸附规律、水化能力及水化程度的改变。扩散吸附系数越大, 相同时间内, 岩样从钻井液中吸水越多, 岩样的膨胀应变及在地层中产生的水化膨胀应力就越大, 岩石强度降低得也越多, 井壁也越不稳定。因此, 准确地确定特定泥浆/地层体系的扩散吸附系数, 对于研究泥页岩地层的水化能力、水化程度及泥浆的抑制性等, 都具有重要意义。

2 泥页岩地层扩散吸附系数的现有确定方法及存在问题

将钻井液与泥页岩地层接触时, 钻井液在泥页岩地层内呈现出的扩散吸附规律表示为

$$D \nabla^2 w = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (1)$$

式中 D 为扩散吸附常数, w 为地层中任一单元体的含水重量百分比, $\frac{\partial w}{\partial t}$ 为非稳定条件下, 该单元体内吸附水重量百分比随时间的变化率。

对于均质、各向同性地层, 仅考虑吸附水重量百分比随时间在径向上的变化时, 方程(1)化为

$$D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) = \frac{\partial w(r, t)}{\partial t} \quad (2)$$

方程定解条件为

¹ 中国石油天然气集团公司“九五”攻关项目“970406-02”研究成果。

作者简介: 刘向君, 女, 1969年6月生。1995年毕业于西南石油学院, 获油气田开发工程博士学位, 现在西南石油学院完井中心工作, 副教授。通讯处: 四川省南充市。

$$\left. \begin{aligned} w(r, t) \Big|_{r=r_w} &= w_{\max} \\ w(r, t) \Big|_{r=\infty} &= w^0 \end{aligned} \right\} \quad \text{边界条件} \quad (3) \quad w(r, t) \Big|_{t=0} = w^0 \quad \text{初始条件} \quad (4)$$

Chenevert 等^[3]通过下述两种方式求解扩散吸附系数(D):

①实验测定吸附水的分布规律, 代入以下解析表达式, 求得扩散吸附系数(D):

$$w(r, t) = w_{\max} + \int_0^\infty \frac{e^{-D\zeta^2 t} J_0(\zeta r) Y_0(\zeta a) - Y_0(\zeta r) J_0(\zeta a)}{J_0^2(\zeta a) + Y_0^2(\zeta a)} \frac{d\zeta}{\zeta} \quad (5)$$

式中 $J_0(\cdot)$ 和 $Y_0(\cdot)$ 分别是第一类和第二类贝塞尔函数。

②实验测定吸附水的分布规律, 然后以曲线拟合的方法数值求解。

对式(2) 隐式差分, 得差分方程

$$c_i w_{i-1} + a_i w_i + b_i w_{i+1} = f_i \quad (6)$$

式中 c_i, a_i, b_i 为差分方程组系数。

然而, 不仅在井下实际泥浆/地层体系情况下, 现有测量手段难以提供井周地层内具体的吸附水含量分布, 而且在室内实验中也难以获得各测量点的含水量变化规律, 因此, 利用现有求解方法确定特定泥浆/地层体系的扩散吸附系数存在较多困难。但从 Chenevert 等^[3]的简化实验中已经知道, 泥页岩地层吸附水含量发生变化的深度对应了水化应变的深度, 在泥页岩结构、组成和钻井液性质给定的前提下, 泥页岩地层与钻井液接触时, 岩石结构特性、力学特性等的改变必然引起对应的电阻率的改变, 因此, 泥页岩地层吸附水含量发生变化的深度也必然对应于电阻率发生变化的深度, 电阻率的变化间接反映了地层中吸附水含量的变化。基于这样的考虑, 利用长岩心岩电实验装置, 对利用现有测井资料预测不同的泥浆/地层组成体系的扩散吸附常数及围岩吸附水增量分布规律的方法进行了研究, 并建立了根据侵入带电阻率剖面求解泥浆滤液与特定地层组成体系的扩散吸附系数及井眼围岩吸附水增量分布的计算机程序。

3 利用电阻率参数确定扩散吸附常数 D

借助于高温高压长岩心岩电测量装置, 对利用电阻率参数确定扩散吸附常数 D 的可行性进行了研究。实验证明: 通过监测静失水状态下, 岩心侵入方向上电阻率的变化规律, 可以间接计算得到特定泥浆/地层体系的扩散吸附常数。

3.1 测量原理

实验用长岩心岩电测量装置的岩心夹持器长33cm, 测量岩心直径2.54cm, 沿长度方向上依次共安放了10个测压测电导管, 仪器工作原理如图1所示。将11个长度为3cm, 直径为2.54cm 的岩心柱按一定顺序和方向装入夹持器橡皮套中, 尽可能使岩心端面与测电导管对齐, 当加上围压时, 电极与岩心相通, 在与壳体绝缘的情况下, 通过四电极法测量泥浆滤液侵入过程中每个岩心柱的电阻。测点 i 的岩心电阻率 R_i 根据下式计算

$$R_i = \frac{r_i A}{L_i} \times 10^{-2} \quad (7)$$

式中 r_i 为第 i 个岩心柱的电阻, Ω ($i = 1, 2, 3 \dots 11$); L_i 为第 i 个岩心柱长度, cm; A 为岩心柱截面积, cm^2 。

每隔一定时间监测各测量点的电阻 r_i , 并将各测量点的 r_i 代入式(7), 分别计算出不同时刻各测点的电阻率 R_{ti} , 则根据泥浆滤液侵入前后的岩心电阻率变化可以确定滤液侵入深度。

3.2 利用电阻率参数确定扩散吸附常数 D

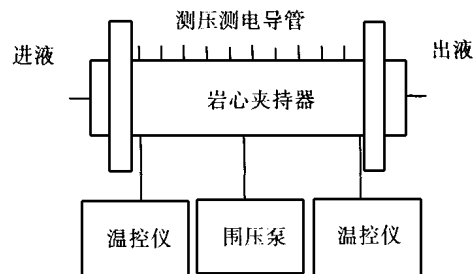


图1 高温高压岩心岩电测量装置示意图

Fig. 1 Experimental set-up for high temperature-high pressure long-core resistivity tests

KCl 溶液、10% KCl 溶液、3% NaCl 溶液, 可见, 相同时间、相同测量条件, 不同泥浆与同一岩样接触时滤液的侵入深度不同, 同一岩样与不同泥浆接触时的行为不同。 x 衍射分析得到实验用页岩样品粘土矿物重量百分比 31%, 且以伊利石为主。以该两组实验数据为例, 建立利用电阻率资料确定特定泥浆/地层体系扩散吸附常数的方法。

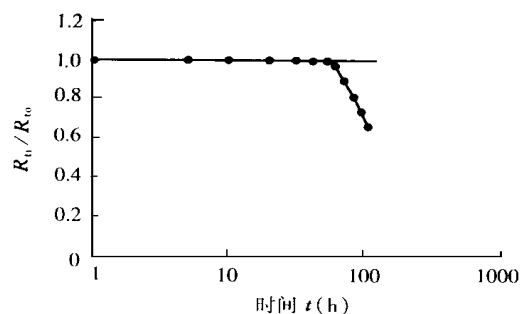


图2 泥浆侵入随时间的变化规律

Fig. 2 Resistivity-time curve for the shale when exposed to 3% KCl solution under normal temperature-normal pressure

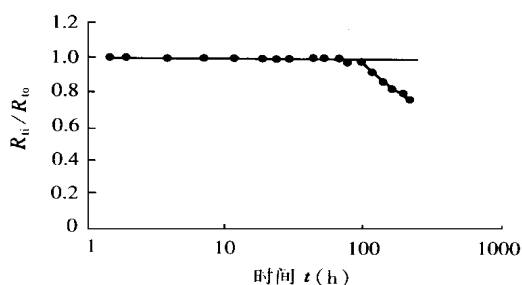


图3 泥浆侵入随时间的变化规律

Fig. 3 Resistivity-time curve for the shale when exposed to 10% KCl solution under normal temperature-normal pressure

在静失水状态下, 为尽量缩短实验时间, 又尽可能避免端面浸泡的影响, 将测量电极固定在长岩心夹持器的2号、3号电极处, 监测滤液侵入过程中电阻率的动态变化。如图2、图3、图4所示, 当岩样与3% KCl 溶液接触50h 后, 2号、3号电极测量得到的电阻率将发生突变, 表明滤液已侵入该处岩石; 当岩样与10% KCl 溶液接触时, 2号、3号电极测量得到的电阻率发生突变的时间延迟至了80h, 而当岩样与3% NaCl 溶液接触时, 2号、3号电极测量得到的电阻率发生突变的时间又缩短到了约21h。可见, 在淡水泥浆滤液钻井条件下, 即使压力差为零, 在含水敏感性粘土矿物的地层中由于渗透压的推动, 粘土矿物仍将从钻井液中吸水, 其结果将使不同时刻径向剖面上的电阻率测量值不等, 并随滤液侵入时间变化而变化。

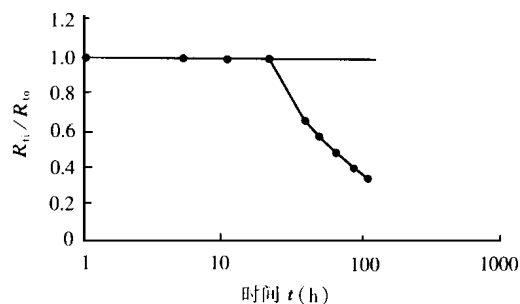


图4 泥浆侵入随时间的变化规律

Fig. 4 Resistivity-time curve for the shale when exposed to 10% NaCl solution under normal temperature-normal pressure

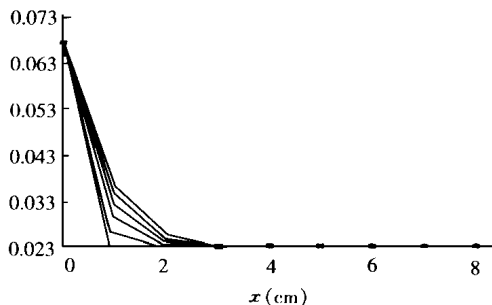


图5 不同时间含水量分布规律

Fig. 5 Distribution of water content

实验前采用称重法测得新鲜岩心平均含水重量百分比为 2.25%, 图2、图3实验结束后取下再次测量得到两实验中端面岩心最大含水重量百分比为 6.75% 和 8.70%。从图2、图3可以读出滤液侵入深度分别等于 6cm、8cm。

已知侵入时间、对应的侵入深度及初始含水量后, 假定一扩散吸附系数, 计算水进曲线, 将计算结果与已知数据相对比, 直到指定时间计算所得的端面含水重量百分比等于已知值, 且侵入深度也与已知滤液侵入深度相当时为止, 此所得的扩散吸附系数即为地层的扩散吸附系数, 对应的水进曲线即为井壁地层吸附水分分布规律。

由于实验是一维的, 因此, 描述图2、图3所示的水吸附特征的方程表示为

$$D \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} w(x, t) \Big|_{x=0} &= w_{\max} \\ w(x, t) \Big|_{x=L} &= w^o \end{aligned}$$

边界条件

(9)

$$w(x, t) \Big|_{t=0} = w^o$$

初始条件 (10)

对方程差分求解, 得到扩散吸附系数分别为 $D_1 = 2.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$, $D_2 = 2.15 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$, 将其分别代入相应计算程序, 可得不同时间侵入剖面含水量分布。对应于图2的不同时间侵入剖面含水量分布特征见图5。

4 实际井下扩散吸附系数及围岩吸附水分布

一维线性侵入实验结果表明, 利用侵入剖面电阻率变化规律, 可以确定出泥浆滤液与特定地层组成体系的扩散吸附常数, 及对应的吸附水增量分布规律, 为进一步开展水敏性泥岩地层井壁稳定性现场评价奠定基础。

由于粘土矿物特殊的物理—化学性质, 当它直接暴露在钻井液中时, 若滤液有效浓度低于地层水有效浓度, 地层就必然要从钻井液中吸水, 导致围岩含水量呈径向变化。现有研究表明, 通过对测井资料的综合分析可以近似计算得到原状泥页岩地层的含水量 w^o 、任意测井时刻井壁地层的含水量及滤液侵入深度(d_i), 这些参数联同方程组(2)、(3)、(4)、(6), 求解可以得到特定泥浆/地层组成体系的扩散吸附系数(D)及对应的吸附水分布规律, 相同时间内, 滤液侵入深度越大, 泥浆滤液与特定地层组成体系的扩散吸附常数越大, 则泥页岩地层与该泥浆接触时的水化能力越强, 泥浆防塌性能越差。

例: 已知 $R_{FL}/R_{ILD} = 10$, $R_{LLM}/R_{LLD} = 1.03$, 由测井解释得到侵入带直径(d_i) = 43.18cm (侵入半径为 21.59cm), 测井时刻井壁地层最大含水量为7.25%, 原状地层含水量为5.75%, 钻井至本次测井间隔约为48h, 将这些参数一起代入模拟程序计算, 当 $D = 9 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 时, 模拟过程结束。由模拟程序得到围岩内含水量分布特征如图6所示。由图可见, 在模拟时间约等于48h时, 侵入深度约等于电阻率测井确定的侵入半径(d_i)。

5 结 论

综上所述, 从理论推导而言, 可以利用钻井以后岩石物理性质随地层与泥浆接触时间变化而变化的特征来预测该泥浆滤液与地层组成的体系的扩散吸附常数(D), 及与之对应的井眼围岩地层吸附水分布规律。相同时间内, 滤液侵入深度越大, 泥浆滤液与特定地层组成体系的扩散吸附常数越大, 则泥页岩地层与该泥浆接触时的水化能力越强, 泥浆防塌性能越差, 对井壁稳定不利。但该方法对测井依赖性大, 因此, 高质量的测井资料将是成功应用该方法的先决条件。

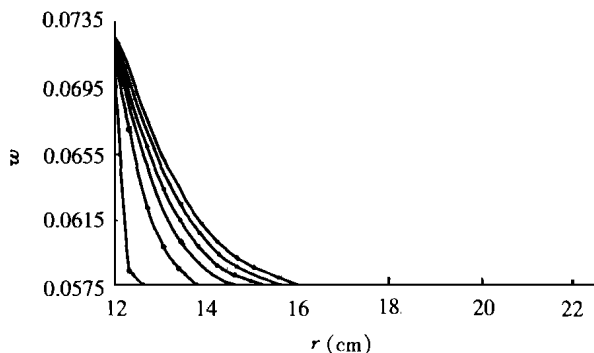


图6 井周吸附水分布规律

Fig. 6 Distribution of water content

参 考 文 献

- [1] Chenevert M E, Osisanya S O. Shale/mud inhibition defined with rig-site methods [J]. SPE Drilling Engineering. Sep. 1989: 261 ~ 268.
- [2] Osisanya S O, Chenevert M E. Rigsite shale evaluation techniques for control of shale-related wellbore instability problems [C]. SPE/IADC 16054, 1987: 51 ~ 66.
- [3] Yew C H, Chenevert M E, Wang C L and Osisanya S O. Wellbore stress distribution produced by moisture adsorption [C]. SPE 19536, 1989: 191 ~ 198.
- [4] Osisanya S O, Chenevert M E. Physics-chemical modelling of wellbore stability in shale formations [R]. Petroleum society of CIM & AOS-TRA. 1994, No. 94-20.
- [5] Santarelli F J. et al. Do shales swell? a critical review of available evidence [C]. SPE/IADC29421, 1995: 741 ~ 756.

(收稿日期 1999-02-09 修订日期 1999-07-05 编辑 杨 茁)

APPLICATION OF RESISTIVITY TO EVALUATE DIFFUSION-ABSORPTION ABILITY OF SHALE FORMATION ACTA 2000, 21(2): 66 ~ 69.

LIU Xiang-jun et al. (*Southwest Petroleum Institute*)

On the basis of present methods to determine diffusion-absorption property of shale formation, long-core resistivity experimental apparatus has been introduced to study the diffusion-absorption ability of shale formation when exposed to various aqueous solutions. The computer program has been established for using radial resistivity distribution to determine the diffusion-absorption coefficient and the distribution of water content. Theoretical analysis indicates that this method not only reflects the diffusion-absorption performance of formation perfectly, but also provides a fundamental idea to evaluate the hydration ability and hydration state of watersensitive formation in the field.

Key words: resistivity; diffusion-absorption; shale; diffusion-absorption coefficient; filtrate invasion

PETROLEUM ENGINEERING

FRACTURE RELIABILITY FOR PRODUCTION PLATFORMS UNDER EXTREME ICE LOADING IN BOHAI GULF ACTA 2000, 21(2): 70 ~ 77.

FANG Hua-can (*Petroleum University, Beijing*)

Offshore production platforms in Bohai Gulf experience ice loading for more than three months each year. The ice load on a platform is much larger than any other environmental loads such as those from waves, current, wind or even earthquake. Therefore, reliability analysis, especially fracture reliability analysis, for the design of fixed production platforms in ice environment or under extreme ice-loads is required to be conducted. This paper develops a reliability model to calculate the residual strength concerned with temperatures. It gives a probability distribution of fracture toughness CTOD value δ_c which accounts for the residual strength of the components at different temperatures. The probability distribution of the maximum stress in the component Which depends on the ice thickness and ice compression strength is also given. According to this reliability model, a calculation method for the reliability of platform components is presented and a computation example is given to show the assessment process.

Key words: offshore; production; platform; fracture; reliability; assessment; ice load

A DRILLING STRING TORSIONAL VIBRATION MODEL AND ITS SOLUTION ACTA 2000, 21(2): 78 ~ 82.

LIU Qing-you et al. (*Southwest Petroleum Institute*)

Based on the interaction of bit and formation, the force from the rock and bit is used for the boundary condition of the end of the drill string. As simplified by the elastic bar theory and FE method, a torsional vibration model for the drill string simulates the bit/formation interaction and elastic deformation of the drill string is established. The torsional model is solved by numerical method by considering the boundary condition and initial condition. The theoretical work in this paper is the basis for the dynamic behavior and kinetics of drilling string and rock bit and for well orbit control early failure prevention.

Key words: string; rock; bit; dynamics; torsional vibration; model

STATIC AND DYNAMIC FE ANALYSIS OF DRILLING PUMP FRAMEWORK ACTA 2000, 21(2): 83 ~ 87.

ZHANG Qing-yuan (*Beijing University*)

FEM analyses are carried out to calculate the strength, stiffness and inherent vibration property of model F 1300 triplex drilling pump framework by using SAP5/LISA software. The stress and deformation distribution in every part of the framework under rate load, and the model frequencies of several minimum orders as well as the vibration modes are obtained. The results