

文章编号: 1000 0747(2005) 06 0082 05

淡水钻井液侵入油层形成低电阻率环带的综合研究与应用分析

李长喜¹, 欧阳健¹, 周灿灿¹, 修立军²

(1. 中国石油勘探开发研究院; 2. 中国石油吉林油田勘探开发研究院)

基金项目: 中国石油天然气集团公司石油科技中青年创新基金(04E7051)

摘要: 通过对钻井液侵入油层的理论研究和数值模拟分析, 可定量计算钻井液侵入后油层含水饱和度、地层水矿化度(电阻率)的径向分布以及地层电阻率的径向变化。应用相对渗透率的概念, 对淡水钻井液滤液侵入油层形成低电阻率环带的过程进行了解释。分析了储集层的孔隙度、含水饱和度和钻井液矿化度等因素变化对地层径向电阻率分布和低电阻率环带的影响。在一维含油岩心钻井液滤液驱替实验和实际测井资料中, 均测量到了低电阻率环带的存在。低电阻率环带的存在对高频感应电阻率测井影响较大, 而低频侧向电阻率测井几乎不受影响。可以用阵列感应或阵列电磁波测井测量出的低电阻率环带来识别低电阻率油层。图7参11

关键词: 低电阻率环带; 淡水钻井液; 数值模拟; 阵列感应测井

中图分类号: P631. 811

文献标识码: A

0 引言

侵入地层的钻井液滤液与地层流体主要发生3种作用: 驱替、混合和扩散^[1]。淡水钻井液侵入油气层时, 由于油相、水相渗透率的不同, 在原状地层和侵入带之间会出现一个低电阻率环带。Dumanoir(1957)、Gondouin等(1964)提出存在低电阻率环带; Tobola & Holdtch(1991)、欧阳健、胡启、张建华等开展了钻井液侵入油层电测井响应的定量评价综合研究^[1]。本文主要通过通过对钻井液侵入的物理过程进行数值模拟, 对低电阻率环带的存在进行理论分析和研究, 并提出用阵列感应测井探测低电阻率油层的低电阻率环带。

1 钻井液滤液侵入过程的理论分析和数值模拟思路

当存在毛细管现象和忽略重力影响时, 钻井液滤液在侵入过程中对地层流体的驱替可用水相、油相质量平衡方程描述^[2,3]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\rho_j r K K_{rj}}{u_j} \frac{\partial p_j}{\partial r} \right) + h q_j = \frac{\alpha \phi \rho_j S_j}{q} \quad (j = o, w) \quad (1)$$

$$p_c = p_o - p_w \quad (2)$$

$$S_o + S_w = 1 \quad (3)$$

由于钻井液滤液和地层水的矿化度不同, 侵入前沿的钻井液滤液(即矿化度界面)会与地层水发生物理

混合, 可用对流扩散方程描述该过程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r K K_{rw} C_w}{u_w} \frac{\partial p_w}{\partial r} \right) + q_w C_{mf} = \frac{\alpha \phi p_w S_w C_{mf}}{q} \quad (4)$$

在钻井液滤液与地层水矿化度不同浓度的交界面附近较窄的范围内会发生离子扩散现象, Semmelbeck引入了离子扩散方程:

$$\frac{D}{r} \frac{\partial C_w}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_w}{\partial r^2} = \frac{\partial C_w}{\partial t} \quad (5)$$

通过有限差分法求解(1)式至(3)式, 可得到钻井液滤液侵入地层后地层径向饱和度的分布特征、地层压力分布以及侵入半径变化特征。将求取的饱和度和压力代入(4)式, 与(5)式联立求解, 可得到地层中水的径向矿化度分布。

应用Atlas的换算公式(Dresser Atlas公司, 1982), 可将地层水矿化度分布转换为地层温度下的地层水电阻率分布:

$$R_w = \left[0.0123 + \frac{3647.5}{C_w^{0.955}} \right] \frac{82}{1.8T + 39} \quad (6)$$

2 钻井液滤液侵入油气层后油气层径向电阻率分布特征与低电阻率环带成因分析

2.1 钻井液滤液侵入油气层后油气层径向电阻率分布特征

进行钻井液滤液侵入的数值模拟, 可得到地层的

含水饱和度和地层水矿化度(电阻率)径向分布剖面, 根据 Archie 公式可计算相应的地层电阻率:

$$R_t = ab R_w / (\phi^m S_w^n) \quad (7)$$

Archie 公式适合以原生孔隙为主的纯砂岩地层, 在高矿化度地层水条件下, 可以不对 Archie 公式进行泥质校正。但对于低矿化度地层水泥质砂岩, 应选用合适的模型来计算相应的地层电阻率。

以中国西部某油田三叠系油层为例, 地层模型的基本参数为: 渗透率为 50mD、孔隙度为 20%、含油饱和度为 60%、原油黏度为 3mPa·s、钻井液与地层的压差为 3.5MPa、钻井液滤液与地层水矿化度分别为 6000×10^{-6} 和 $80\,000 \times 10^{-6}$ 。图 1 为钻井液滤液侵入 11d 后计算的含水饱和度和钻井液与地层水的混合液电阻率径向剖面图, 将混合液电阻率和含水饱和度重叠后可明显看出, 含水饱和度侵入深度可达 1.3m 左右, 而混合液电阻率(矿化度)显示在大于约 0.75m 不再受钻井液滤液侵入的影响。矿化度和饱和度剖面前缘在侵入过程的不一致性, 表明在钻井液滤液面前部至饱和度面之间形成了一个高矿化度(与地层水矿化度近似相等)和高含水饱和度区域, 即低电阻率环带。用 Archie 公式计算得到的某油层电阻率分布剖面(见图 2a 中孔隙度为 20% 时的地层径向电阻率曲线)基本是高侵显示, 在距井壁径向约 0.75m 处出现低电阻率环带。在存在低电阻率环带的情况下, 用高频感应电测井测量结果评价油层时, 应注意不同探测深度的测井响应。

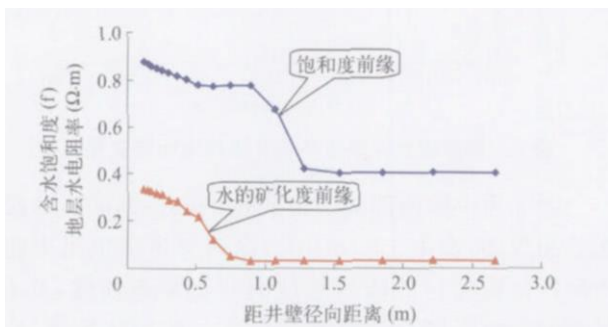


图 1 含水饱和度、地层水电阻率与距井壁径向距离关系图

2.2 低电阻率环带成因分析

对低电阻率环带可解释为: 钻井液滤液径向渗入地层, 在向前驱扫可移动的油和地层水过程中, 含油饱和度大的地层中油的相对渗透率明显大于水的相对渗透率, 所以油的运动速度较快, 饱和度前缘与水的矿化度前缘之间的环形带则富含地层水(见图 1)^[47]。因此, 低电阻率环带在一定程度上反映了油、水两相流体相渗透率的不同, 也即为地层含有可动油的一个充分

条件, 有助于直接识别油层。由于扩散、毛管压力、相对密度等的影响, 环绕井周围的低电阻率环带是短暂存在的。由于钻井液侵入油层随时间而变化, 以地层水为主的混合液的低电阻率环带随时间向油层深处移动, 并逐渐消失。

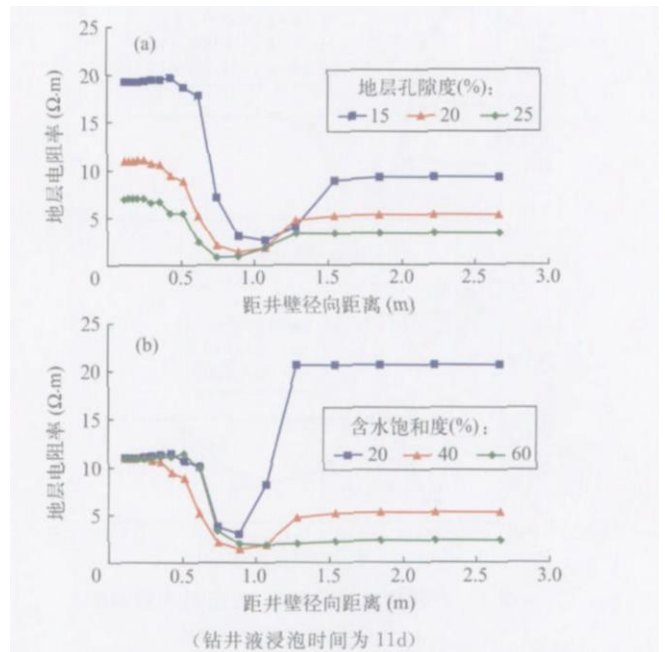


图 2 不同孔隙度、含水饱和度对油层径向电阻率分布的影响

2.3 主要物性参数对径向侵入剖面影响分析

为了评价岩石的物性参数和储集层的含油性参数对模拟地层的径向电阻率分布以及低电阻率环带的影响, 本文以含油层的孔隙度、含水饱和度和钻井液矿化度等因素变化为例, 对地层径向电阻率分布和低电阻率环带的影响进行了分析研究。

图 2a 为含油饱和度 60% 时孔隙度变化对电阻率剖面 and 低电阻率环带的影响, 可见随地层孔隙度减小, 低电阻率环带离井壁的距离增大, 同时宽度也有所增加, 低电阻率环带的电阻率较冲洗带电阻率和原状地层电阻率差别增大, 储集层的径向电阻率也整体增大。由图 2b 可见, 原始含水饱和度对储集层径向电阻率分布和环带宽度都有影响, 而冲洗带电阻率受原始含水饱和度的影响较小。随着含水饱和度减小, 低电阻率环带宽度变窄, 环带电阻率有所升高, 但其与原状地层电阻率的差别明显增大。在上述其他条件不变的情况下, 含水饱和度大于 60% 时低电阻率环带逐渐消失。

图 3a 为钻井液矿化度的变化对电阻率剖面 and 低电阻率环带的影响(含油饱和度为 60%)。由图可见, 钻井液矿化度的变化主要影响冲洗带电阻率, 环带电阻率和原状地层电阻率不受钻井液矿化度的影响。随钻井液矿化度增大, 冲洗带电阻率降低, 其对浅探测电

阻率仪器的测量结果影响很大。由图 3b 可见,随钻井液浸泡时间的增长,低电阻率环带向油层深处移动,且宽度有所增加,低电阻率环带的电阻率与冲洗带电阻率和原状地层电阻率差别逐渐减小,直至消失。

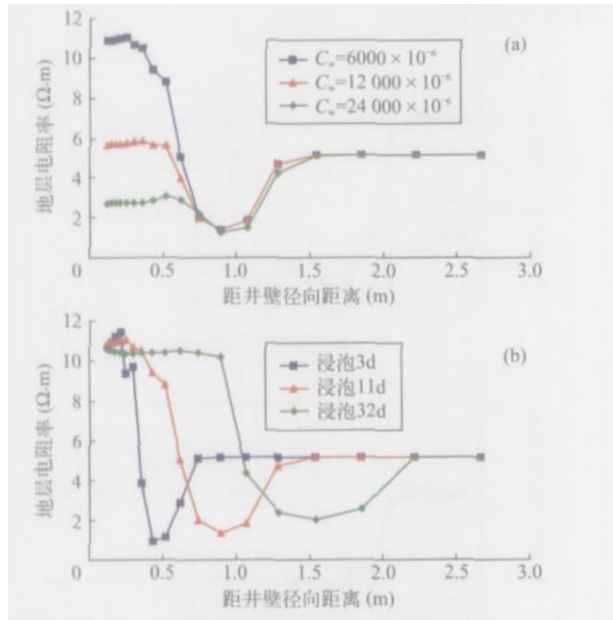


图 3 不同钻井液矿化度、浸泡时间对油层径向电阻率分布的影响

原油黏度对低电阻率环带的形成、大小以及推移速度也有很大的影响。原油黏度越小低电阻率环带越易形成,推移速度越快;反之则反。若原油黏度过大,则油层可能不出现低电阻率环带。

3 实验验证

用前述数值模拟方法对低电阻率环带的理论分析得到了岩心实验结果验证。图 4 为塔里木油田进行的多电极测量一维含油岩心钻井液滤液驱替实验结果^[1],岩心含油饱和度为 60%,含水饱和度从水驱油的开始端到结束端由大变小,而电阻率则从开始端到结束端由大到小再到大,即中间存在一低电阻率环带。

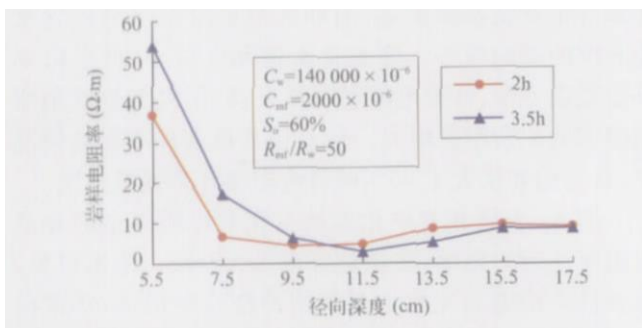


图 4 低电阻率环带随时间径向变化实验模拟图
(据陈福焯等, 1994)

4 低电阻率环带对双感应与阵列感应测井响应的影响及应用分析

低电阻率环带的位置随着侵入时间的变化而变,这反映低电阻率环带对不同探测深度感应测井的影响各异。图 5 为图 3b 所示钻井液侵入油层条件下双感应测井响应随钻井液浸泡时间的变化关系。在高侵背景下,当侵入时间较短时,低电阻率环带距井壁较近,中感应测井受其影响较大,测井响应值下降较快,故深、中感应测井为明显正差异;随着侵入时间增长,低电阻率环带距井壁的距离逐渐增大,中感应测井响应逐渐升高,与深感应测井响应出现交会点(深、中感应测井响应值相等);之后,中感应测井响应值继续升高,明显大于深感应。该变化规律已被较多的时间推移双感应测井所证实^[1,8,11]。阵列感应(或阵列电磁波)测井可测量多种探测深度的地层电阻率,考虑测井时间(即低电阻率环带的位置)与几种中等探测深度阵列感应测井曲线的关系进行优化设计,使得中等探测深度阵列感应测井曲线发生倒序,可以据此直接识别低电阻率环带油层。同时可按 5 参数(侵入带电阻率、侵入带半径、低电阻率环带电阻率、低电阻率环带半径、原状地层电阻率)的低电阻率环带模型进行电阻率反演及定量评价^[9]。

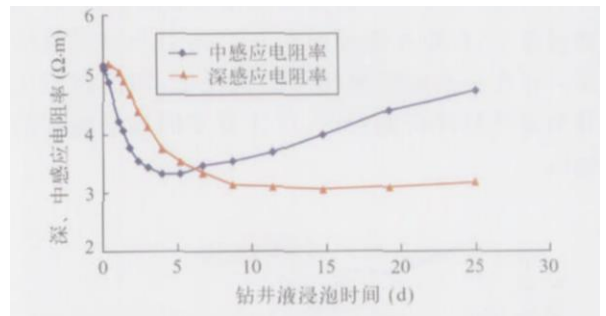


图 5 双感应测井响应随钻井液浸泡时间变化关系

图 6 为中国西部某油田某井 2350~2400m 井段的测井曲线图,图中 122cm (4ft) 纵向分辨率电阻率曲线为阿特拉斯公司的阵列感应测井电阻率曲线,共有 6 种不同径向探测深度的测井曲线。图 7 为 X 层、Y 层不同探测深度电阻率测井值随探测深度的变化关系。Y 层探测深度最浅的测井电阻率曲线测井值最大,其侵入剖面类似图 3b 的高侵剖面,探测深度中等的 50.8cm (20 in)、76.2cm (30 in)、152.4cm (60 in)、228.6cm (90 in) 电阻率曲线的测井值既小于探测深度最浅的 25.4cm (10 in) 电阻率曲线测井值,又小于探测深度最深的 304.8cm (120 in) 电阻率曲线测井值,表现为低电阻率环带的侵入特征。由于低电阻率环带的存在是地层含有可动油的一个充分条件,故该层可直接解释为

油层, 对该层试油日产原油 20t。而第 X 层不同探测深度电阻率曲线显示为明显的高侵特征, 无低电阻率环带, 测井解释为水层。

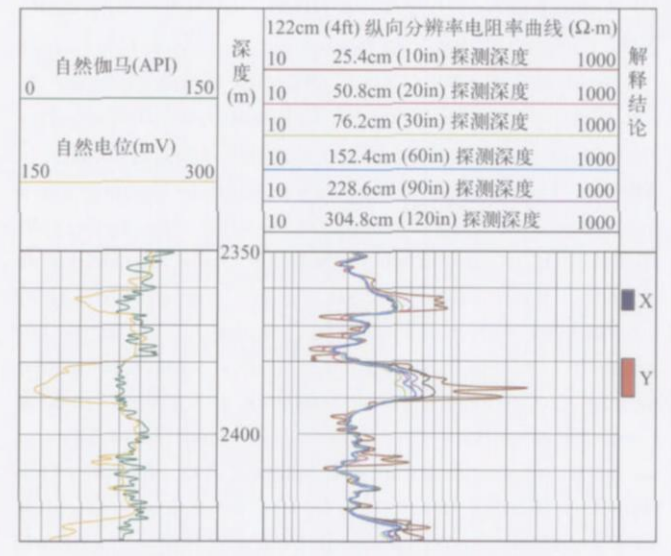


图 6 某井 2350~2400m 井段阵列感应测井识别低电阻率环带油层 Y 层图(据刘洪亮)

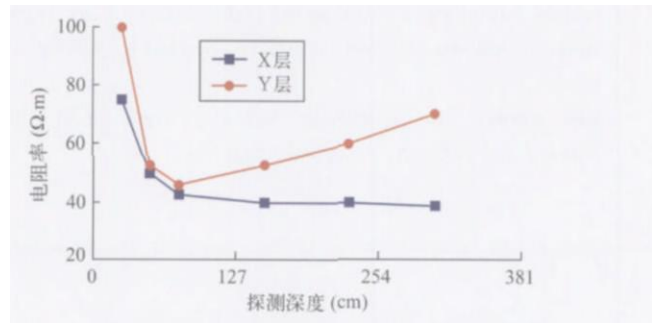


图 7 X 层、Y 层不同探测深度电阻率关系

5 结论

在渗透性地层, 钻井液侵入主要与地层流体发生驱替、混合和扩散 3 种物理过程。通过对这一物理过程的数值模拟, 可计算出地层含水饱和度、地层水矿化度(电阻率)的径向分布, 应用 Archie 公式或其他地层电阻率模型可计算出地层的电阻率径向分布。

淡水钻井液侵入高矿化度地层水的油气层后, 在侵入过程中, 由于油、水两相流体相渗透率的差别, 使侵入带内饱和度前缘与水的矿化度前缘之间的环带含水饱和度较高, 而混合液却是以地层水为主, 电阻率较低, 故形成低电阻率环带。本文初步研究了油层的孔隙度、含油饱和度、钻井液矿化度、浸泡时间以及原油黏度等因素对低电阻率环带的形成、推移速度、形状等的影响, 并初步分析了低电阻率环带对不同探测深度感应测井的影响。

阵列感应(或阵列电磁波)测井可测量不同径向深度的地层电阻率, 进行合理的测井优化设计后可测量出油层中的低电阻率环带, 直接用来识别油层, 尤其是直接识别高侵剖面情况下的低对比度油层, 具有很大的实际应用价值。

符号注释:

p_c, p_w, p_o ——毛细管压力和水相、油相压力, Pa; S_o, S_w ——含油、含水饱和度, f; μ_o, μ_w ——油、水黏度, Pa·s; K ——地层绝对渗透率, D; K_o, K_w ——油、水两相的相对渗透率, f; ϕ ——地层孔隙度, f; q_o, q_w ——单位地层厚度的油、水产量(采出为负, 注入为正), $kg/(s \cdot m^3)$; h ——地层厚度, m; ρ_w, ρ_o ——水、油的密度, kg/m^3 ; r ——地层径向半径, m; t ——侵入时间, s; C_w, C_{mf} ——地层水、钻井液滤液矿化度, mg/L; D ——扩散系数, 无量纲; a, b ——比例系数, 无量纲; m ——孔隙度指数, 无量纲; n ——饱和度指数, 无量纲; R_w, R_{mf} ——地层水、钻井液滤液的电阻率, $\Omega \cdot m$; T ——温度, $^{\circ}C$ 。

参考文献:

- [1] 欧阳健, 王贵文, 吴继余, 等. 测井地质分析与油气层评价技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999. 158-170. (OUYANG Jian, WANG Gui wen, WU Ji yu, et al. An analysis for logging geology and evaluation technique for hydrocarbon reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999. 158-170.)
- [2] Buckley S E, Leverett M C. Mechanism of fluid displacement in sands[J]. Trans. AIME, 1942, 146: 107-116.
- [3] 沈平平, 王家禄, 田玉玲, 等. 三维油藏物理模拟的饱和度测量技术研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(增刊): 71-76. (SHEN Ping ping, WANG Jia lu, TIAN Yu ling, et al. Saturation measurement technique for 3D reservoir physical modeling[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(Supp.): 71-76.)
- [4] 布雷德利 H B. 石油工程手册[M]. 童宪章, 沈平平, 胡乃人, 等(译). 北京: 石油工业出版社, 1996. 1072-1080. (Bradley H B. Petroleum engineering handbook[M]. TONG Xian zhang, SHEN Ping ping, HU Nai ren, et al(Trans.). Beijing: Petroleum Industry Press, 1996. 1072-1080.)
- [5] 赵军, 宋帆. 塔里木盆地低电阻率油层成因分析与评价[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(6): 69-71. (ZHAO Jun, SONG Fan. Genetic analysis and evaluation of low resistivity oil formation in Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(6): 69-71.)
- [6] 高楚桥, 章成广, 肖承文, 等. 用水相相对渗透率确定低电阻率油层产液性质[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(5): 80-82. (GAO Chu qiao, ZHANG Cheng guang, XIAO Cheng wen, et al. Estimate produced fluid type of low resistivity hydrocarbon bearing reservoirs from relative permeability[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(5): 80-82.)
- [7] 李阳, 王端平, 刘建民. 陆相水驱油藏剩余油富集区研究[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(3): 91-96. (LI Yang, WANG Duan ping, LIU Jian min. Remaining oil enrichment areas in continental waterflooding reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(3): 91-96.)
- [8] Tobola D P, Holdtch S A. Determination of reservoir permeability

bility from repeated induction logging [A]. *SPE Formation Evaluation*, Mar., 1991.

- [9] 张建华, 欧阳健. 钻井液侵入油气层双感应(双侧向)测井动态反演解释的多解性分析[A]. 渤海湾地区低电阻率油气层测井技术与解释方法[C]. 北京: 石油工业出版社, 2000. 175-183. (ZHANG Jian hua, OUYANG Jian. An poly solubility analysis for dynamic inversion interpretation on dual induction and dual lateral log in hydrocarbon reservoirs invaded by drilling mud[A]. Logging technique and interpretation method for low resistivity hydrocarbon reservoirs in Bohai Gulf Area [C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000. 175-183.)
- [10] 欧阳健. 油藏中饱和度电阻率分布规律研究——深入分析低电阻油层基本成因[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(3): 44-47. (OUYANG Jian. A study on saturation resistivity distribution pattern of reservoirs — An in depth analysis for the basic origin of low resistivity reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(3): 44-47.)
- [11] 欧阳健. 加强岩石物理研究, 提高油气勘探效益[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 45. (OUYANG Jian. Strengthening petrophysical study to raise explomation benefit[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(2): 45.)

第一作者简介: 李长喜(1977), 男, 河北邯郸人, 现为中国石油勘探开发研究院博士研究生, 从事岩石物理及测井评价研究工作。地址: 北京市 910 信箱, 测井遥感研究所, 邮政编码: 100083; 电话: (010) 62097556。E-mail: lichangxi@petrochina.com.cn

收稿日期: 2005-03-29 修回日期: 2005-10-07

(编辑 郭海莉 绘图 李秀贤)

Forming mechanism and application of low resistivity annulus in oil reservoirs invaded by fresh drilling mud

LI Chang xi¹, OUYANG Jian¹, ZHOU Can can¹, XIU Li jun² (1. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China*; 2. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina Jilin Oilfield Company, Jilin 138001, China*)

Abstract: The invasion profiles of mud filtrate invading into a permeable layer was theoretically studied and numerically analyzed. By means of simulation, the radial distribution of formation water saturation, salinity and formation resistivity after invasion were computed. The forming process of the low resistivity annulus was explained on the concept of relative permeability. The effects of formation parameters, such as formation porosity, water saturation and mud filtrate salinity, on the invasion profiles were also analyzed. The existence of low resistivity annulus was proved by one dimensional oil bearing core displacement experiment with fresh mud filtrate and by field logging data. It is found that the effect of low resistivity annulus on induction logs, such as array induction logs, is greater than that on lateral logs, and that the identification of low resistivity annulus from array induction logs can be used to classify oil pay zone.

Key words: low resistivity annulus; fresh mud filtrate; numerical simulation; array induction log

会议消息

国家天然气科技攻关二十年学术研讨会在北京召开

由中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院主办的“国家天然气科技攻关二十年学术研讨会”于 2005 年 8 月 31 至 9 月 2 日在北京香山饭店隆重召开。

参加会议的有来自全国各油田、有关高校及科研院所、科研管理部门等共 151 名会议代表, 会议共包括 3 个内容: 大会发言、老专家自由讨论、天然气将来发展的座谈会。

大会报告的主题为“天然气地质理论及应用”, 共 33 个报告。主要内容包括攻关 20 年来取得的重大勘探成果以及天然气地质理论的创新性进展; 中国主要含气盆地天然气勘探成果、资源和成藏特点、富集规律和勘探前景; 天然气成藏前缘问题(包括生烃动力学、水溶气、天然气运移、成藏期次)等。

老专家自由讨论畅谈了过去国家天然气科技攻关立项的艰辛历程和“六五”至“九五”攻关以来所取得的丰硕成果。大家一致认为, 自从煤成气理论提出并在实践勘探中应用, 使中国

天然气储量快速增加。

天然气将来发展的座谈会由贾承造院士主持, 高层领导和知名专家就“中国天然气远景、存在的问题及攻关方向和如何组织、加强天然气科技攻关”等主题提出了很多宝贵意见和设想。

与会代表一致认为, 在国家能源日趋紧张的情况下, 在中国第一批国家重点科技攻关项目“煤成气的开发研究”完成 20 周年之际, 在天然气科技攻关结出的硕果——“西气东输”正式全线输气供气之年, 在科研人员新旧交替之时召开的“国家天然气科技攻关二十年学术研讨会”意义重大, 应进一步组织国家天然气科技攻关。会议开得非常成功, 具有划时代的意义, 对中国天然气工业的发展起着积极的推动作用。

(秦胜飞 供稿)