

文章编号: 0253-2697(2010)05-0854-04

钻井液—井壁界面半透膜与隔离层形成机理

白小东¹ 蒲晓林²

(1. 西南石油大学材料科学与工程学院 四川成都 610500; 2. 西南石油大学石油工程学院 四川成都 610500)

摘要: 在钻井液—井壁界面形成高效率半透膜是一种新的阻水思路。利用活度控制原理,半透膜具有调控水流方向的作用。半透膜通过膜污染进一步转换成隔离层之后,能阻止外来物质进入地层,起到稳定井壁和保护储层的作用。以自制纳米胶乳 NM-1(平均粒径为 65 nm)和无机纳米粉体 NMTO 为主剂,配制出纳米钻井液;用渗透压法测定了纳米钻井液的半透膜效应,膜效率为 65%;采用滤失量测定法评价了钻井液的隔离层效应,API 滤失量在 120 min 后随时间变化的增量几乎为零,其承压能力在 3.5 MPa 以上。将成膜后的岩心切片,用扫描电镜分析了膜的内部微观结构。研究表明,半透膜是通过纳米胶乳粒子与聚合物形成网络结构后形成,隔离层是在半透膜的基础上通过乳胶粒的变形、填充、高温黏结而形成的,其厚度为 50~60 μm 。

关键词: 纳米胶乳;半透膜;隔离层;钻井液;网络结构

中图分类号: TE245 文献标识码: A

Formation mechanisms of semi-permeable membranes and isolation layers at the interface of drilling-fluids and borehole walls

BAI Xiaodong¹ PU Xiaolin²

(1. School of Materials Science & Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. School of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: The formation of high efficiency semi-permeable membranes at the interface of drilling fluids and borehole walls is a new approach to prevent formations from water. On the principle of activity control, a semi-permeable membrane can control the flow orientation of water, and provided transformed to an isolation layer via membrane contamination, semi-permeable membranes can prevent formations from the invasion of extraneous substances, playing a role in stabilizing borehole walls and safeguarding formations. The present study prepared a kind of nanometer drilling fluid using the self-made nano-latex NM-1 (65 nm in mean grain size) and inorganic nano powder (NMTO) as the host and tested the semi permeable membrane efficiency of this drilling fluid via the osmotic pressure method, which was 65%. The study also evaluated the effect of the drilling fluid as an isolation layer through the API filtration loss method, and the result showed that the incremental of the API filtration loss with time decreased nearly to 0 after 120 minutes and the bearing resistance to pressure increased up to 3.5 MPa. The scanning electron microscopic examination of sliced cores after membrane formation indicated that microstructures inside this semi-permeable membrane were network structures formed through the interaction of nano-latex with polymers in the drilling fluid, while isolation layers with an average thickness of 50~60 μm were thermally felted through the deformation, filling and cementation of latex particles based on semi-permeable membranes.

Key words: nano-latex; semi-permeable membrane; isolation layer; nanometer drilling fluid; network structure

具有选择性和流动渗透性的膜被称为半透膜。隔离层是指在一定条件下任何固相和液相组分均不能通过其进行物质传递的一种隔绝物质通过的隔离带。对“膜”的研究始于对以油为连续相的油基钻井液防塌效能的观测和认识^[1],利用相应的实验装置验证了泥页岩的半透膜特性,同时提出泥页岩的膜效率是可以提高的,并成功研制出半透膜成膜剂和水基成膜钻井液^[2-5]。近年来,国内同行也开展了成膜处理剂、成膜钻井液和膜评价方法的研究^[6-10],淹没

环境下固—液界面在一定条件下存在半透膜特性已经被证实,并用于实验研究和现场应用。笔者主要针对钻井液—井壁界面半透膜与不透水隔离层的形成过程进行了分析。

1 实验

(1) 半透膜效应评价实验。利用渗透压测定装置,先将自制岩样用蒸馏水饱和,驱替岩样中的气体,然后将岩样一端加入 600 mL 配制好的水基纳米钻井

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 50774065)“基于钻井液—井壁界面的膜形成技术与膜传递过程研究”资助。

作者简介: 白小东,男,1980年10月生,2007年获西南石油大学油气井工程专业博士学位,现为西南石油大学讲师,主要从事油气田材料方面的教学与科研工作。E-mail: xiaodongb2003@yahoo.com.cn

液[主要成分包括:钠膨润土、丙烯酸酯类纳米胶乳(NM-1)、亲水性无机纳米颗粒(NMTO)、KHPAN、SMP-II和SMC和XY-27]中,单向施加0.5 MPa的压力,强行渗透10 min,使钻井液进入岩样一定深度。然后在另一端加入600 mL 10%的NaCl溶液,测定渗透压随时间的变化。

(2) 隔离层效应评价实验。在实验中,考察了水基纳米钻井液在120 min内的动滤失量。在120 min后,将钻井液倒出,换成清水,测定滤失量。

(3) SEM分析成膜岩心。将成膜后的岩心分别从纵向和横向劈开,用扫描电镜观察岩心截面的膜孔隙结构、纳米胶乳的堆积状态、纳米胶乳与钻井液其他组分的作用形式,以及半透膜与隔离层的结构对比和隔离层厚度。

2 效应评价

2.1 半透膜效应

实验结果见图1。由图1可知,岩心两端产生了渗透压,在2 h内渗透压达到最大值,约0.75 MPa,说明纳米钻井液使岩心产生了半透膜效应。

一般认为油基钻井液的膜效率最高为100%,水

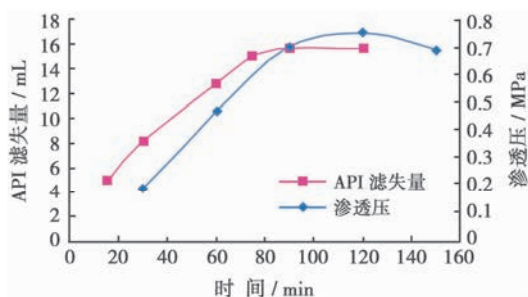
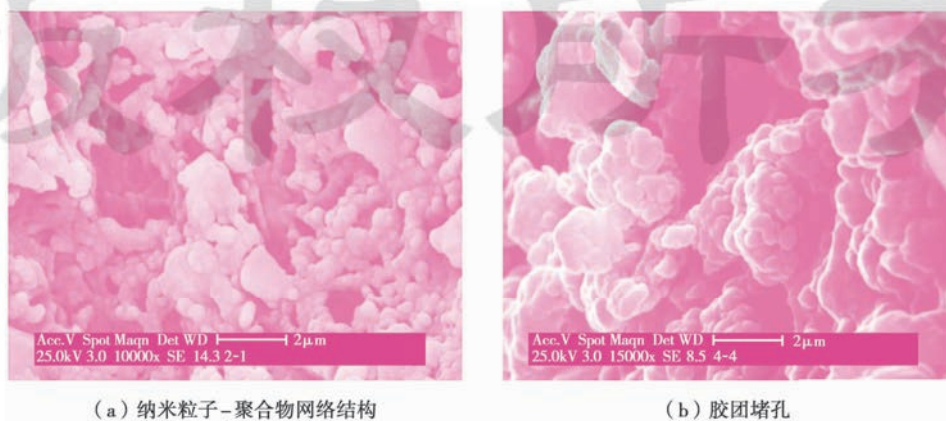


图1 渗透压和API滤失量随时间的变化

Fig. 1 Diversification of osmotic pressure and API filtration loss of mud with time



(a) 纳米粒子-聚合物网络结构

(b) 胶团堵孔

图2 纳米粒子在钻井液中的作用原理

Fig. 2 Action principle of nano-particles in drilling fluids

基钻井液的膜效率相对较低。经计算,水基纳米钻井液体系的半透膜膜效率为65%。在实际钻井过程中,如果井壁具有半透膜效应,则可以通过调节钻井液中自由水的活度(改变无机电解质的浓度)来改变地层与井筒之间水的流动方向,使地层中的水向井筒内流动,或降低钻井液自由水进入地层的量,防止泥页岩的水化膨胀,从而维护了井壁的稳定,有效保护储层。

2.2 隔离层效应

从图1可知,水基纳米钻井液API滤失量在120 min后随时间变化的增量几乎为零,说明此时已经形成了不透水隔离层。120 min后将钻井液倒出,用清水替换钻井液,加压,观察清水呈线状流出、缓慢滴出或不流出。实验结果发现,即使将压力提高到3.5 MPa也没有清水流出,说明此时隔离层仍未被穿透;当压力提高到5 MPa时,清水缓慢滴出,说明隔离层的局部遭到破坏,但此时仍能减缓水流速度。

3 形成机理

3.1 半透膜形成机理

3.1.1 纳米粒子-聚合物网络结构

水基钻井液中的聚合物处理剂主要是以链状、网状结构分散于钻井液中,单纯依靠聚合物很难在泥页岩井壁形成半透膜。但是,水基纳米钻井液中由于大量水溶性聚合物的存在,聚合物分子链与纳米胶乳粒子形成了独特的颗粒-链段网络结构,见图2。

从图2(a)可以看出,纳米粒子与聚合物链段通过吸附、黏结作用,将单个的纳米颗粒或纳米胶团紧密地与聚合物链连接在一起,形成网络结构。聚合物的存在减少了纳米颗粒和纳米胶团向大孔隙和大裂缝的流失,降低钻井液中纳米材料的消耗。同时,这种独特的网络结构对较大空隙和裂缝的封堵比单一的聚合物、纳米颗粒和纳米胶团更有效。

3.1.2 胶团堵孔

对于稍大一些的孔隙, 乳胶粒子在压差作用下相互黏结在一起, 形成大小不一、形状不规则的胶团, 以胶团的形式封堵孔隙 [图 2(b)], 胶团在一定温度压力条件下同样产生变形现象。

3.1.3 半透膜微观结构

从图 3 可以看出, 水基纳米钻井液形成的半透膜具有一定的微孔隙, 孔隙形状不规则。图 3 中较大的颗粒为无机颗粒, 较小的颗粒为纳米乳胶粒, 无机颗粒主要作为刚性粒子架桥, 封堵较大的孔隙、裂隙及微裂缝, 乳胶粒或单独分散或聚结成大小不一的胶团, 在压差作用下变形封堵更小的孔隙, 此时半透膜(从膜的类型看属于典型的不对称膜)通过活度控制原理, 改变水流方向或减缓钻井液中的自由水进入地层。

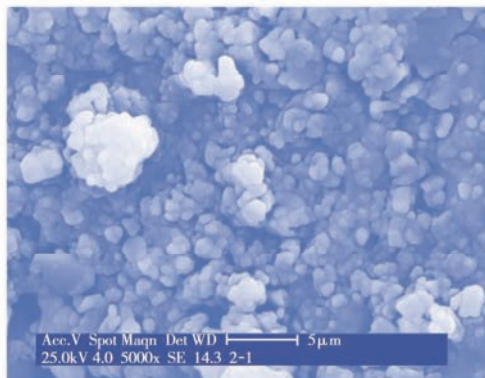


图 3 半透膜微观结构

Fig. 3 Microstructure of semi-permeable membrane

3.2 隔离层形成机理

3.2.1 粒度匹配变形挤入机理

水基纳米钻井液在泥页岩表面形成隔离层的过程中也存在桥堵颗粒与变形颗粒封堵孔喉、微裂缝和裂隙的过程, 见图 4。

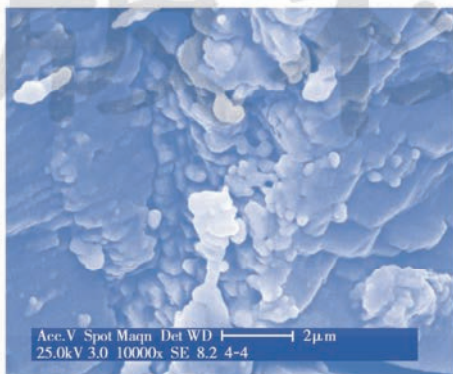


图 4 纳米粒子封堵微裂缝

Fig. 4 Nano-particles plugging microfracture

对于泥页岩的小孔隙, 无机颗粒先形成桥堵, 纳米胶粒单个或几个乳胶粒一起产生变形, 挤入桥堵后的细小孔隙中, 形成致密的封堵。对于微裂缝和裂隙, 首先起封堵作用的仍然是粒径较大的无机颗粒(不排除钻井液中的黏土颗粒)。由于在沿着裂缝方向上胶粒间的挤压作用减弱, 相应的变形挤入作用也减弱, 但是纳米胶粒沿着水流方向进入裂缝时被大颗粒阻挡, 产生了物理沉淀作用。

3.2.2 乳胶粒高温黏结机理

实际钻井过程中的纳米胶乳处于高温高压的液相淹没环境中, 其成膜过程始终是处于液相之中, 和大气环境下的人工制膜有本质区别。从扫描电镜分析可知, 纳米粒子形成了连续的块状、层状和整片的胶膜(图 5), 纳米粒子变形、软化, 互相黏结在一起。其形成过程是: 在井下高压条件下, 乳胶粒变形, 被紧紧地压持在页岩表面; 在高温环境下, 胶粒表面的表面活性剂失效, 胶粒强烈地吸附在页岩表面上, 高温使胶粒变软, 颗粒之间发生吸附、黏结作用, 形成一层憎水胶膜, 阻止钻井液进入地层, 起到稳定井壁和保护储层的作用。

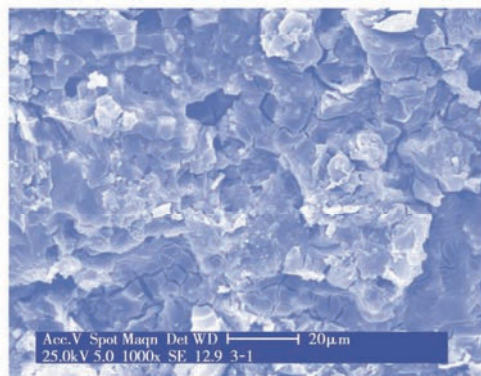


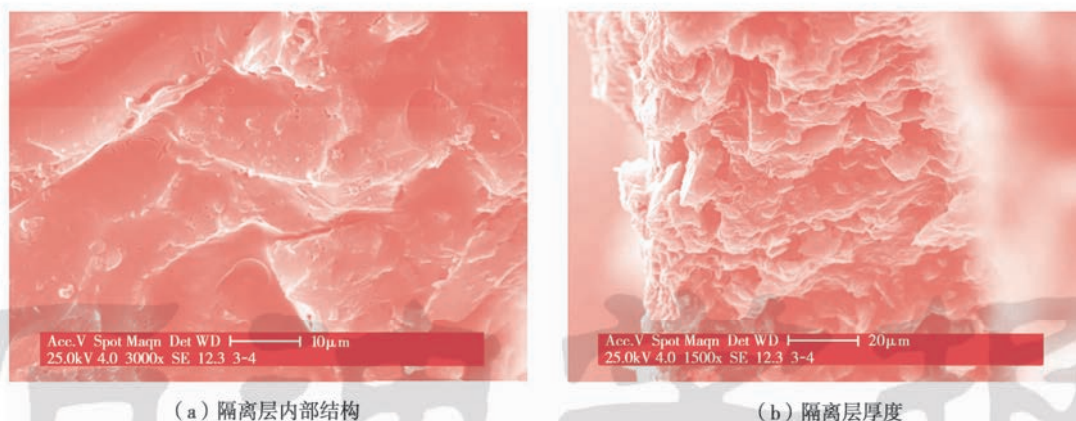
图 5 纳米胶乳形成胶膜

Fig. 5 Latex film formed by nano-particles

3.2.3 隔离层内部结构

取水基纳米钻井液成膜实验后的岩心纵剖面, 用扫描电镜观察隔离层的内部结构, 结果见图 6。

从隔离层的纵剖面可以看出, 水基纳米钻井液所形成的隔离层较完整, 纳米胶粒在高温高压下软化、变形, 颗粒间相互黏结, 形成了具有层状结构和不连续微孔隙的胶膜。胶膜的层状结构说明了其形成过程是经过一次、两次甚至多次的堵孔、覆盖作用, 隔离层内的少量不连续微孔隙说明: 在实际的井下成膜过程中, 乳胶粒的分布和受力是不均衡的。通过微观测量, 水基纳米钻井液所形成的隔离层厚度为 50~60 µm。



(a) 隔离层内部结构

(b) 隔离层厚度

图6 隔离层扫描电镜图

Fig. 6 Scanning electron microscope map of the isolation layer

4 结论

(1) 利用渗透压仪测定了水基纳米钻井液体系的膜效率为65%,能形成完全不透水的隔离层,API滤失量增量在较短时间内能达到零,膜的承压能力在3.5 MPa以上。半透膜是通过胶团堵孔、纳米粒子—聚合物网络结构的共同作用而形成的。

(2) 隔离层是在半透膜的基础上通过变形挤入、高温黏结形成不透水的胶膜。隔离层的内部微观结构研究发现,隔离层具有一定的层状结构和不连续的微孔隙,隔离层厚度为50~60 μm。

参 考 文 献

- [1] Mondshine T C, Kercheville J D. Shale dehydration studies point way to successful gumbo shale drilling[J]. The Oil and Gas Journal, 1966, 28(3): 235-251.
- [2] Mody F K, Tare U A, Tan C P, et al. Development of novel membrane efficient water-based drilling fluids through fundamental understanding of osmotic membrane generation in shales[R]. SPE 77447, 2002.
- [3] Mody F K, Hale A H. Borehole-stability model to couple the mechanics and chemistry of drilling-fluid/shale interactions[R]. SPE 25728, 1993.
- [4] Tan C P, Mody F K, Tare V A. Novel high membrane efficiency water-based drilling fluids for alleviating problems in troublesome shale formations[R]. SPE 77192, 2002.
- [5] Tan C P, Mody F K, Tare V A. Development and laboratory verification of high membrane efficiency water-based drilling fluids with oil-based drilling fluid-like performance in shale stabilization[R]. SPE 78159, 2002.
- [6] 徐加放, 邱正松, 吕开河. 泥页岩水化-力学耦合模拟实验装置与压力传递实验新技术[J]. 石油学报, 2005, 26(6): 115-118. Xu Jiafang, Qiu Zhengsong, Lü Kaihe. Pressure transmission testing technology and simulation equipment for hydro-mechanics coupling of shale[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(6): 115-118.
- [7] 蓝强, 邱正松, 王毅. 硅酸盐钻井液防塌机理研究[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 133-138. Lan Qiang, Qiu Zhengsong, Wang Yi. Study on anti-collapse mechanism of silicate drilling fluid[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 133-138.
- [8] 白小东, 蒲晓林. 水基钻井液成膜技术研究进展[J]. 天然气工业, 2006, 26(8): 75-77. Bai Xiaodong, Pu Xiaolin. Evolution of membrane forming technology of water-based mud[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(8): 75-77.
- [9] 蒲晓林, 雷刚, 罗兴树, 等. 钻井液隔离膜理论与成膜钻井液研究[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(6): 1-4. Pu Xiaolin, Lei Gang, Luo Xingshu, et al. Study on membrane theory and film-forming drilling fluid[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005, 22(6): 1-4.
- [10] 薛玉志, 李公让, 蓝强, 等. 超低渗透钻井液稳定井壁的作用机理研究[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 434-439. Xue Yuzhi, Li Gongran, Lan Qiang, et al. Interaction mechanisms of ultra-low permeable drilling fluid for stability of borehole wall[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 434-439.

(收稿日期 2010-01-08 改回日期 2010-03-17 编辑 仇学艳)