

潜江凹陷深层盐岩安全钻井液密度确定研究

李俊 (中国石化江汉油田分公司石油工程技术研究院, 湖北 武汉 430035)

摘要: 深层盐岩蠕变速率更高, 蠕变缩径造成卡钻, 给钻井尤其是定向井、水平井带来重大工程难题, 合理的钻井液密度设计是抑制蠕变的重要途径。通过盐层蠕变实验, 结合数值模拟, 反演蠕变速率, 提出了蠕变方程, 开展了盐溶解速率实验, 建立了潜江凹陷深层盐岩安全钻井液密度图版, 现场应用表明, 采用推荐安全钻井液密度, 能有效降低盐卡风险, 实现深层盐层长井段连续取芯与安全钻井。

关键词: 潜江组; 本构关系; 盐溶解; 密度图版

盐膏层钻井, 特别是深井盐膏层钻井, 是一个世界级的钻井技术难题。实验表明, 盐膏层在当埋深 2100m 以深, 井底温度 205℃ 以上, 盐膏层受地应力作用造成连续的蠕变变形, 盐层蠕变引起井眼缩径, 造成钻井过程发生盐卡、电测过程遇阻等情况。

潜江凹陷盐间页岩油 (潜江组) 地质复杂, 纵向上发育 193 个Ⅲ级盐韵律层, 埋深近 5000m, 温度近 150℃, 储层薄 (5~38m)、多种岩性“千层饼”, 潜江凹陷蚌页油 2 井潜四下段平均 Na⁺ 含量为 38.07%, Cl⁻ 含量 59.45% (标准盐层为 39.34%, NaCl 含量 90% 以上), 且 NaCl 在盐层中以结晶形式出现, 属六方体系。潜江凹陷钻井实际情况看, 多口以潜四下段为目的层的井出现盐卡, 造成卡钻、侧钻等, 平均处理周期达 26d。

合理的钻井液密度设计是抑制盐层蠕变的重要方法, 盐层缩径包括两个方面: 一是盐层蠕变造成的井眼缩径, 二是盐层溶解造成的井眼扩径。因此, 要得到合理的安全钻井液密度, 两者均要进行研究。

1 盐层蠕变本构关系建立

1.1 盐层蠕变实验

利用潜江凹陷盐间页岩油蚌页油 2 井的盐岩、含盐夹层岩心, 采用线切割技术针对全尺寸岩心进行了标准实验岩样加工, 开展不同围压、差应力、温度、加载方式盐层蠕变室内实验, 实验结果如表 1 所示。

表 1 稳态蠕变速率 (10⁻⁵%/h)

围压 /MPa	差应力 /MPa	50℃	75℃	80℃	86℃
10	5	/	/	27.1	/
	10	2.60	3.25	91.70	5.19
	15	8.73	13.250	265.00	61.20
20	17	3.42	173.000	/	536.70
20	20	4.63	479.60	/	969.50
	25	12.35	1260.00	/	2076.00

1.2 蠕变本构关系

通常一般认为, 在较高应力和较低温度 (< 5250℃)

下盐岩的蠕变以晶格的位错滑移占优势, 此时盐岩的蠕变可用 Heard 模式表示为:

$$\varepsilon = A \exp(-E/RT) \sinh(B\sigma)$$

其中:

ε 为蠕变速率, s⁻¹; E 为激活能, K²/(mol.℃); R 为理想气体常数, 通常取值 1.987K/(mol.℃); σ 为差应力, MPa; T 为绝对温度, K; A, B 为流变常数。

将蠕变实验结果代入上式, 通过不同温度、差应力非线性回归计算, 其中:

$$A=9.614, B=0.411, E=1.61 \times 10^4$$

2 盐溶解速率计算

采用旋转剪切模拟法, 测试 80℃、90℃、110℃ 温度条件下盐岩在不同含盐浓度的钻井液中的溶解速率, 测量结果见表 2。

表 2 盐岩溶解速率实验结果

盐浓度 (%)	5	10	20	25
[Cl ⁻] 含量 (ppm)	30341.9	60683.8	121367.5	151709.4
溶解速率 80℃ (g/h)	0.587	0.351	0.17	0.158
溶解速率 90℃ (g/h)	0.687	0.564	0.281	0.190
溶解速率 110℃ (g/h)	0.56	0.44	0.21	0.168

①盐膏层井壁溶解速率的计算:

$$\gamma = \frac{100U_v \pi d}{S} \quad (\text{式 1})$$

式中: γ 为盐岩厚度为 1m 的井壁处盐岩的溶解速率, g/h; U_v 为溶解速率, g/h; d 为井眼直径, cm; S 为岩心的表面积, cm²。

②盐岩层井眼扩大率计算:

$$\phi = \frac{r_2 - r_1}{r_1} \times 100\% \quad r_2 = \sqrt{\frac{h}{\pi \rho}} + r_1 \quad (\text{式 2})$$

式中: ϕ 为每小时井径扩大率; h 为盐层厚度, m; ρ 为盐岩密度, g/cm³; r_1 、 r_2 分别为溶解前与 1h 溶解后的井眼半径, mm。

将表 1 数据代入到式 1、式 2 计算不同温度不同 Cl⁻ 含量井眼扩大率, 其结果如下:

表3 单位时间(1h) 215.9mm 井径扩大率

钻井液中盐浓度 (%)	[Cl ⁻] 含量 (ppm)	80℃ 井径扩大率 (%)	90℃ 井径扩大率 (%)	110℃ 井径扩大率 (%)
5	30341.9	0.515852	0.603467	0.492182
10	60683.8	0.308775	0.495689	0.386918
20	121367.5	0.149668	0.247272	0.184852
25	151709.4	0.139111	0.168141	0.147909
30	182051.4	0.069303	0.138098	0.109008

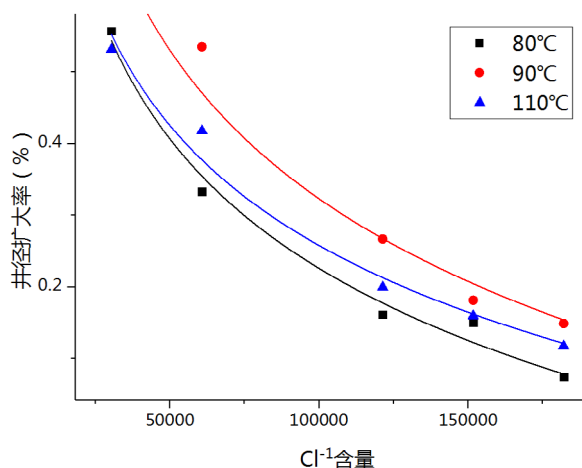


图1 不同温度井眼扩大率与 Cl⁻ 含量的关系

根据单位时间 215.9mm 井眼井径扩大率, 通过非线性回归, 得到井眼扩大率方程:

$$\varphi(80^{\circ}\text{C}) = -0.24 \ln([\text{Cl}^{-}]) + 2.9760$$

$$\varphi(90^{\circ}\text{C}) = -0.277 \ln([\text{Cl}^{-}]) + 3.4875$$

$$\varphi(110^{\circ}\text{C}) = -0.223 \ln([\text{Cl}^{-}]) + 2.8123$$

3 盐层蠕变图版建立

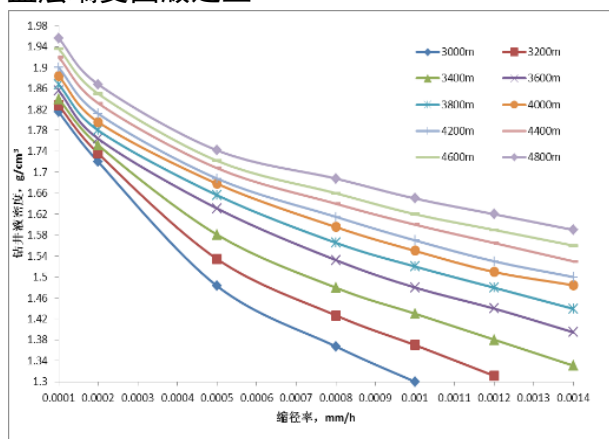


图2 不同深度、控制不同井眼缩径率的最优钻井液密度值

利用 FLAC3D 软件, 结合岩层蠕变本构关系方程, 针对 3000~4800m (计算间隔 200m) 的不同钻井液密度下的井眼缩径率, 对不同泥浆密度下盐岩地层井眼缩径率进行三维计算模拟反演, 计算了不同深度、不同钻井液密度时的缩径率, 并插值出不同深度控制缩径率为

0.001/h 时推荐钻井液密度值, 通过数据拟合建立缩径率与泥浆密度相关关系图版。

根据潜江凹陷岩芯室内研究和现场钻井证明, 对潜江凹陷地区, 控制蠕变速率为 0.001~0.0005/h (0.001/h 为下限值, 0.0005/h 为上限制) 设计盐层钻井液密度, 井下钻井和下套管作业都安全, 得到了潜江凹陷不同深度安全钻井液密度。该最优钻井液曲线簇的完成对实际钻井工程中选用钻井液有重要的参考意义。

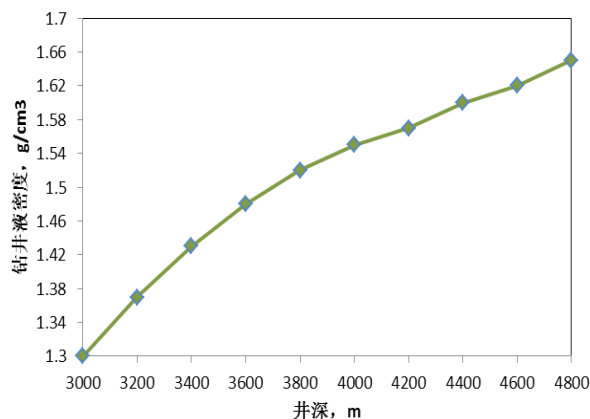


图3 潜江凹陷安全钻井液密度值

4 现场应用

蚌页油 2 井位于湖北省潜江市江汉油田广华寺, 井型为直井, 设计井深 4590.00m, 目的层为潜四下段, 完钻层位为荆沙组。三开钻进至 3500m (潜四上段) 通过提高钻井液密度至 1.45g/cm³, 后根据井深增加, 进一步提高密度, 最高达 1.60g/cm³, 穿盐成功率 100%, 尤其是深部潜四下段纯盐岩井段, 井眼扩大率仅仅为 0.6%, 全井取心总长 224.08m, 芯长 219.68m, 收获率 98%。

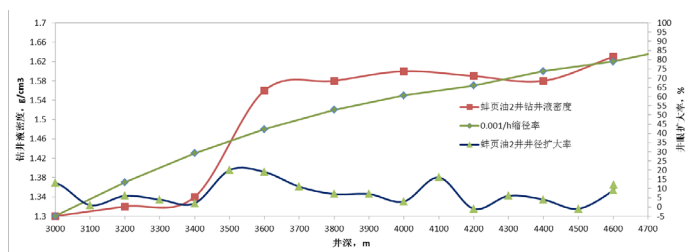


图4 蚌页油 2 井井径扩大率分布图

5 结论

①饱和盐水条件下盐岩溶解 100h 后, 井眼扩大率达 10.67%, 综合考虑溶解扩径与盐层蠕变缩径是适合的钻井液密度设计的重要方法;

②潜江凹陷盐层 (> 3000m) 以 0.001h⁻¹ 进行钻井液密度设计值在 1.3~1.66g/cm³, 能够保证钻井工程安全。

参考文献:

- [1] 杨春和, 陈锋, 等. 盐岩蠕变本构关系研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1602-1604.
- [2] 曾义金. 深层盐膏岩蠕变特性研究及其在钻井的应用 [J]. 石油钻探技术, 2005, 33(5): 48-51.
- [3] 楼一珊. 盐层钻井过程中合理钻井液密度及含盐饱和度的确定 [J]. 石油天然气学报, 2006, 28(2): 86-89.