

# 页岩气储层钻井液损害评价研究

李红梅, 赵毅, 马振锋, 景丰

(陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西 西安 710075)

**摘要:** 延长油田页岩气储层埋藏较深, 地质条件复杂, 页理构造发育, 岩石物性极差, 页岩易膨胀、分散。由于孔缝并存, 页岩气储层比砂岩油藏具有更严重的微粒运移损害、储层应力敏感损害、水锁损害等特性。鉴于延长页岩储层太过致密, 不能用常规方法进行渗透率测定。通过采用人造裂缝法测定钻井液对储层裂缝的污染程度来表征钻井液对储层的损害率。经人造裂缝法测定, 延长油田现场使用的白油基钻井液体系对页岩气储层的污染渗透率恢复率达到 91.060%, 初步证实该体系具有良好的储层保护效果, 可在延长油田进一步推广使用并验证。

**关键词:** 页岩气水平井; 储层损害; 渗透率测试; 人造裂缝; 白油基钻井液

**中图分类号:** P634.6; TE258 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2016)07-0107-04

**Study on Drilling Fluids Formation Damage of Shale Gas Well/LI Hong-mei, ZHAO Yi, MA Zhen-feng, JING Feng**  
(Research Institute of Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710075, China)

**Abstract:** Yanchang oilfield shale gas reservoir is deeply buried with complex geological conditions, foliation structure development, poor physical properties of rock and shale easily expands and disperses. Because of the coexistence of pores and cracks, the characteristics of the shale reservoir are worse than the sandstone oil reservoir, such as the particle movement damage, reservoir stress sensitivity damage, water blocking damage and so on. In view of Yanchang oil shale reservoir is too dense, the permeability measuring can not be made by conventional methods. The artificial fracture method was used to determine the pollution degree of drilling fluid to characterize the damage rate of drilling fluids to the reservoir. Measured by the artificial fracture method, the return pollution permeability rate is up to 91.060% with the use of white oil-based drilling fluids system in Yanchang oil field. It is preliminarily confirmed that this drilling fluids system has good effect in reservoir protection and can be further promoted and used in Yanchang oil field.

**Key words:** horizontal shale gas well; reservoir damage; permeability test; artificial crack; white oil-based drilling fluid

## 1 页岩储层损害特殊性研究

延长油田页岩气储层一般赋存于源岩及与源岩互层共生或紧邻的致密储集层的纳米级孔隙中, 其埋藏较深, 地质条件复杂, 页理构造发育, 具有层理和天然裂隙等薄弱面, 岩石物性极差<sup>[1-4]</sup>。页岩储集空间与致密气砂岩有着本质不同, 相对于砂岩储层, 页岩储层近井地带储层伤害机理具有显著的力学、化学耦合的敏感特性。页岩易膨胀、分散, 钻井液侵入微裂缝将引起储层不可逆的伤害, 并造成井壁页岩围岩物理力学特性的改变。与砂岩油藏相比, 页岩气储层在储层损害方式与机理方面的特殊性<sup>[5]</sup>具体表现在:

(1) 孔缝并存, 滤液对孔喉和裂缝都将产生损害;

(2) 侵入裂缝性页岩储层的固相、裂缝中微粒运移造成的损害更严重;

(3) 裂缝性储层应力敏感损害严重;

(4) 外来流体残渣将导致裂缝堵塞;

(5) 初始水饱和度很低时将引起十分严重的水锁损害;

(6) 钙、镁离子更多地存在于裂缝性页岩储层的地层水中, 入井液体与地层水之间存在流体不配伍问题。

## 2 页岩气储层钻井液损害评价方法的建立

### 2.1 常规岩心驱替测定渗透率损害率的局限

对于砂岩储层一般采用岩心驱替实验来进行渗透率损害评价。即测定钻井液污染前后岩心的渗透

收稿日期: 2015-11-17; 修回日期: 2015-12-04

基金项目: 国家 863 计划资源环境技术领域页岩气勘探开发新技术项目“页岩气钻完井及储层评价与产能预测技术研究”(编号: 2013AA064501)

作者简介: 李红梅, 女, 汉族, 1981 年生, 油气井工程专业, 硕士, 陕西省西安市高新区科技二路 75 号, lihzmj@163.com。

率从而计算渗透率恢复率,其值越高表明油层保护效果越好。但是对于页岩储层,特别是延长油田页岩地层,气测渗透率以及实际孔隙度的测定表明:页岩储层岩心的气测渗透率为  $0.015 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度为 1.093%,可见其具备极低孔隙度、低渗的特征。如此致密的岩心采用常规驱替是难以测定渗透率的,若采用煤油直接驱替测定渗透率,要维持合理的驱替流速所需的驱替压力太大,目前实验条件受限。而且当岩心受到钻井液污染后其渗透率下降,采用常规驱替测定损害后渗透率将更加困难。

页岩气储层具有易膨胀破碎、页理构造发育、非均质性和各向异性强等特征,这决定了页岩气在地层中的渗流通道主要由裂缝提供,即页岩气储层在储层伤害机理上具有明显的裂缝性储层的特征。裂缝性储层的储集空间远比孔隙性储集层复杂<sup>[6-7]</sup>,裂缝既是裂缝性油藏流体的储集空间,同时又起渗流通道的作用。相对于基岩来说,裂缝是受损害的敏感部位。对页岩储层进行损害评价时需重点进行入井液中的固相颗粒或残渣对裂缝渗透率的损害以及入井液在裂缝壁面形成内、外滤饼所造成的渗透率损害以及应力敏感性损害和水锁损害等方面的研究。

通过以上分析可知,钻井液对页岩储层的渗透率损害主要是由于钻井液对于裂缝的损害。鉴于延长页岩储层太过致密,难以进行液体驱替测定渗透率,更无法直接评价损害后的渗透率。针对这一特点,采用人造裂缝法测定钻井液对岩心渗透率的恢复率,主要通过测定钻井液对储层裂缝的污染程度来表征钻井液对储层的损害率。

## 2.2 人造裂缝法评价钻井液对岩心的损害率

岩心人造裂缝法进行钻井液损害评价,即将岩心沿端面纵向劈裂,在一定围压下进行驱替,测定渗透率。考虑到围压对于人造裂缝闭合程度的影响,进而影响渗透率测试结果,实验中进行的渗透率测定,包括气测和煤油测试均在围压等于 5 MPa 的条件下进行。

### 2.2.1 气测渗透率的测定

根据达西公式可得岩心的气测渗透率:

$$k_a = \frac{2P_a Q_0 \mu L \times 10^2}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (1)$$

式中: $k_a$ ——气测渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $P_a$ ——大气压, MPa;  $Q_0$ ——绝对大气压时岩样出口端气体体积流

量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $\mu$ ——实验温度和大气压下的氮气粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $L$ ——岩心长度, cm;  $A$ ——岩心横截面积,  $\text{cm}^2$ ;  $P_1$ ——岩样进口端压力, MPa;  $P_2$ ——岩样出口端压力(大气压力), MPa。

用游标卡尺测定岩心长度  $L$  和直径  $d$ ; 将岩心装入气测渗透率仪岩心夹持器中,加围压密封。打开气源,将干燥气体通过岩样,用皂沫流量计测量气体的流量  $Q_0$ ,通过调节气体的流速来调节岩样两端的压差,记录两端压力  $P_1$  和  $P_2$ 。按照上述公式计算气测渗透率。

### 2.2.2 孔隙度的测定

采用液体饱和法测定岩心的孔隙度:

$$\varphi = \frac{4(m_1 - m_0)}{\pi \rho L d^2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\varphi$ ——岩心孔隙度, %;  $m_1$ ——饱和后岩样质量, g;  $m_0$ ——岩样质量, g;  $\rho$ ——煤油密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $L$ ——岩心长度, cm;  $d$ ——岩心直径, cm。

将抽提、烘干的已知质量  $m_0$  的岩样放入真空干燥器中,真空度达到 133.3 Pa 时,抽空 2~8 h,对渗透率低于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的样品,需要抽空 18~24 h。将饱和用的液体(煤油)引入真空干燥器中,继续抽空 1 h,随后在常压下浸泡 4 h 以上。将岩样取出,迅速擦掉岩样表面的液体并称量,记质量为  $m_1$ 。两次质量差除以饱和液体的密度即可得到孔隙体积。

从延长油田柳平 172 井储层段取得岩心,进行岩心渗透率及孔隙度测定,测定结果见表 1。从测定结果可以看出,岩心渗透率仅为  $3.582 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度为 1.132%,表明该地层为低孔低渗地层。

表 1 岩心基本参数

岩性	井号	深度/m	$m_0/\text{g}$	$d/\text{cm}$	$L/\text{cm}$	$m_1/\text{g}$	$k_a/(\times 10^{-3} \mu\text{m}^2)$	$\varphi/\%$
页岩	柳平	1658.39 ~	61.437	2.534	4.940	61.719	3.582	1.132
岩	172	1660.26						

## 3 延长油田白油基钻井液体系储层保护性能评价

### 3.1 白油基钻井液配制

延长油田页岩气水平井现场应用白油基钻井液体系进行水平段钻进,根据现场白油基钻井液配方进行室内配制,并测试评价其性能及对岩心渗透率的损害。

### 3.1.1 配方

油水比 90:10(3 号白油) + 4% SPAN80 + 1% ABS + 3.5% OP-4 + 5% HFGEL-120 有机土 + 3% 降滤失剂 + 6% CaO + 1% 提切剂(水为 10% CaCl<sub>2</sub> 溶液) + CaCO<sub>3</sub>(加重至 1.2 g/cm<sup>3</sup>)。

### 3.1.2 配制方法<sup>[8-9]</sup>

(1) 向 500 mL 搅拌杯中按比例加入定量的 CaCl<sub>2</sub> 溶液,向其中加入 ABS,高速充分搅拌 10~20 min;

(2) 加入白油并按比例加入全部 SPAN80 和 OP-4,高速(10000 r/min)搅拌约 1 h,以乳化形成乳状液;

(3) 加入有机土、降滤失剂和 CaO 等固相,高速(10000 r/min)搅拌加入,每种处理剂加入间隔时间为 10 min,最后搅拌 1 h;

(4) 加入提切剂搅拌 10 min 后加入 CaCO<sub>3</sub> 调整至所需密度,充分高速(10000 r/min)搅拌 2 h 以上,形成最终体系。

### 3.1.3 白油基钻井液基础性能测试

由表 2 可以看出,白油基钻井液的表现粘度 AV、塑性粘度 PV 及动切力 YP 都在合理范围内,流变性良好;动塑比 YP/PV 为 0.426,能有效携带岩屑上返;10 s 及 10 min 静切力 Gel<sub>10''/10'</sub> 为 13 及 19,能在停钻时有效悬浮岩屑;中压滤失量 FL 为 1.4 mL,满足储层段 FL < 5 mL 的要求;密度 ρ 为钻井设计值;破乳电压 ES 达到 2000 V,表明体系稳定性好,不易发生破乳。综上所述,该白油基钻井液各项基础性能优良,达到了页岩气水平井钻井要求。

表 2 油水比 90:10 调整配方后加重性能测试

AV/ (mPa·s)	PV/ (mPa·s)	YP/ Pa	YP/ PV	Gel <sub>10''/10'</sub>	FL/ mL	ρ/(g· cm <sup>-3</sup> )	ES/ V
34	24	10.22	0.426	13/19	1.4	1.2	2000

## 3.2 白油基钻井液储层保护性能测试

### 3.2.1 实验整体思路

(1) 配制所形成的白油基钻井液对岩心进行动态污染;

(2) 测定岩心的原始油测渗透率 K<sub>0</sub>;

(3) 测定岩心经钻井液污染后的煤油测渗透率

K<sub>od</sub>;

(4) 计算动态渗透率恢复值 R<sub>d</sub>。

计算实验结果:

$$R_d = \frac{K_{od}}{K_o} \times 100\% \quad (3)$$

式中:R<sub>d</sub>——动态渗透率恢复值,%;K<sub>od</sub>——钻井液动态损害岩心后岩心对煤油的平衡渗透率,10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>;K<sub>o</sub>——钻井液损害岩心前岩心对煤油的平衡渗透率,10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>。

### 3.2.2 实验数据记录

使用如图 1 所示的 JHMD-II 型高温高压岩心动态损害评价系统进行实验。实验中岩心夹持器上分别设立 4 个测压点,将岩心分成 4 段,分别测试各段的压差,进而计算各段的渗透率(如图 2 所示)。



图 1 JHMD-II 型高温高压岩心动态损害评价系统

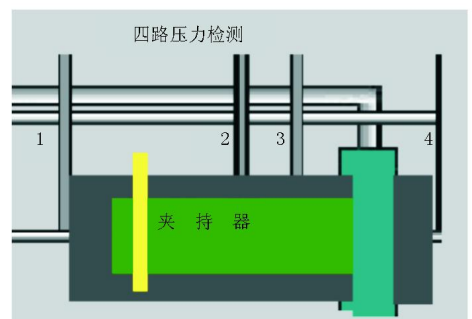


图 2 岩心四路压力检测示意图

#### 3.2.2.1 人造裂缝岩心原始渗透率测定

采用平流泵恒流驱替,驱替流速为 0.8 mL/min,测试人造裂缝岩心的原始渗透率,根据软件记录结果,测试各段及岩心整个油测原始渗透率数据如表 3 所示。

表 3 原始渗透率测试数据

测试段	原始渗透率 K <sub>0</sub> /md	测试段	原始渗透率 K <sub>0</sub> /md
12	1.504	34	320.987
23	64.198	14	8.121

### 3.2.2.2 人造裂缝岩心钻井液污染后渗透率测定

采用配制的油水比 90:10 的钻井液,在 3.5 MPa 的气压驱动下,对岩心进行端面污染,实验温度为 60 ℃,污染时间为 125 min。污染后,采用平流泵恒流驱替,驱替流速为 0.8 mL/min,测试人造裂缝岩心的污染后渗透率。根据软件记录结果,测试各段及岩心整个油测原始渗透率数据及计算的渗透率恢复率数据见表 4。

表 4 污染后渗透率及渗透率恢复率测试数据

测试段	污染后渗透率 $K_d$ /md	渗透率恢复率 $R_d$ /%
12	1.441	95.811
23	70.536	109.873
34	282.142	87.898
14	7.395	91.060

人造裂缝法致密页岩气岩心动态污染损害实验结果表明,白油基钻井液配方对延长油田页岩气储层的污染渗透率恢复率可达 91.060%,具有良好的储层保护效果。

## 4 结论

(1) 页岩储层由于其地层特点,在储层损害方式与机理方面具有特殊性。

(2) 常规驱替是难以测定页岩储层液测渗透率的,依据页岩储层损害机理,采用人造裂缝法进行致密页岩气岩心的动态污染损害评价。

(3) 延长油田页岩气井应用的白油基钻井液流

变性、携岩性、稳定性均良好,能满足页岩气水平井钻井要求。

(4) 通过对人造裂缝岩心进行渗透率测定,测试结果表明,白油基钻井液对延长页岩气储层的污染渗透率恢复率可达 91.060%,初步证实该体系具有良好的储层保护效果,可在延长油田进一步推广使用及验证。

## 参考文献:

- [1] 张鸿翔. 页岩气:全球油气资源开发的新亮点——我国页岩气开发的现状与关键问题[J]. 战略与决策研究,2010,25(4):406-410.
- [2] 崔思华,班凡生林,等. 页岩气钻完井技术现状及难点分析[J]. 天然气工业,2011,31(4):72-75.
- [3] 刘德华,肖佳林,等. 页岩气开发技术现状及研究方向[J]. 石油天然气学报,2011,33(1):119-123.
- [4] 王建华,刘杰,张进. 页岩气开发钻完井技术探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(10):1-5.
- [5] 耿娇娇,鄢捷年,邓田青,等. 低渗透凝析气藏储层损害特征及钻井液保护技术[J]. 石油学报,2011,5(32):893-898.
- [6] 王富华,邱正松. 复杂储层保护技术实验研究[J]. 石油钻探技术,2003,5(31):42-45.
- [7] 王香增,高胜利,高潮. 鄂尔多斯盆地南部中生界陆相页岩气地质特征,2014,41(3):295-303.
- [8] 吕传炳,孟庆立,张国兴,等. 低密度水包白油钻井液在潜山欠平衡钻井中的应用[J]. 钻井液与完井液,2009,26(3):32-34.
- [9] 刘绪全,陈敦辉,陈勉,等. 环保型全白油基钻井液的研究与应用[J]. 钻井液与完井液,2011,28(2):10-12.
- [3] 陈宁,彭步涛. 贵州页岩气调查评价井钻探施工技术综述[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40:260-265.
- [4] 刘洪林,王莉,王红岩,等. 中国页岩气勘探开发适用技术探讨[J]. 油气井测试,2009,18(4):68-71.
- [5] 朱恒银,王强. 页岩气勘探开发技术综述[J]. 安徽地质,2013,23(1):21-25.
- [6] 杨登科,王勇,刘权胜,等. 国内外页岩气勘探开发技术研究现状及进展[J]. 石油化工应用,2012,31(2):1-4.
- [7] 牛遼,王彦兴,熊念,等. 焦石坝构造页岩气水平井井身结构设计探讨[J]. 中国化工贸易,2014,(1):89.
- [8] 王金磊,武贤柱. 页岩气钻完井工程技术现状[J]. 钻采工艺,2012,38(11):7-10.
- [9] 宋继伟,李勇. 贵州省页岩气调查井施工工艺[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(8):26-30.
- [10] 崔思华,班凡生,袁光杰. 页岩气钻完井技术现状及难点分析[J]. 天然气工业,2011年,(4):72-75.

## (上接第 91 页)

地层裂隙发育和含水情况等,才能更好地优化井身结构设计,从而确定钻井结构、开次、各开次井深、表层套管和技术套管的直径和下深、套管壁厚、材质等,尽可能既要满足复杂地层钻进的需要,顺利完成表层套管、技术套管的下入,还要为后续钻进预留足够井径空间,有利于下一步的钻探施工,从而缩短钻探工期,优质高效的完成勘探施工任务。

## 参考文献:

- [1] 王华平,张铎,张德军,等. 威远构造页岩气钻井技术探讨[J]. 钻采工艺,2012,2(3):9-11.
- [2] 邱正松,高宏松,黄维安. 页岩气钻探开发技术研究进展[J]. 西部探矿工程,2012,(6):66-69.