文章编号:1673-5005(2014)05-0130-05

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2014.05.018

疏松砂岩储层敏感性评价方法

徐加放1,李小迪1,孙泽宁1,马英文2,孙中富1,顾甜甜1,陈 哲1

(1. 中国石油大学石油工程学院,山东青岛 266580; 2. 中海油天津分公司钻完井部,天津 300452)

摘要:疏松砂岩胶结差,不能钻取柱状岩心,因此无法用常规储层敏感性评价方法进行评价。建立疏松砂岩敏感性 评价方法即气体流速法和回收法,利用气体流速法测定岩心的速敏指数,通过流体动能定理,推导气测法测定岩心 速敏的临界流速计算方法。给出利用回收法测定储层的水敏、盐敏、碱敏和酸敏特性的计算方法和敏感指数划分原 则。结果表明:回收法适合于测定岩心的水敏、盐敏、碱敏和酸敏特性,适合于疏松和/或未胶结砂岩储层的敏感性 测定;研究方法操作简便、理论依据充分、数据结果可靠。

关键词: 疏松砂岩; 储层敏感性; 评价方法; 回收率; 气体渗透率

中图分类号:TE 256 文献标志码:A

引用格式:徐加放,李小迪,孙泽宁,等. 疏松砂岩储层敏感性评价方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2014,38 (5):130-134.

XU Jiafang, LI Xiaodi, SUN Zening, et al. Evaluation methodology of formation sensitivity for unconsolidated sandstones [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2014,38(5):130-134.

Evaluation methodology of formation sensitivity for unconsolidated sandstones

XU Jiafang¹, LI Xiaodi¹, SUN Zening¹, MA Yingwen², SUN Zhongfu¹, GU Tiantian¹, CHEN Zhe¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Drilling & Completion Department of CNOOC Limited in Tianjin, Tianjin 300452, China)

Abstract: The conventional evaluation methods for the formation sensitivity are not applicable to the unconsolidated sandstones because of its unconsolidation, which leads to be unable to get columnar cores. The evaluation methods for unconsolidated sandstone sensitivity were established, which are gas flow rate method and recovery method, respectively. The gas flow rate method measures the velocity index of cores. Then, the critical flow rate of the velocity index was deduced using gas-testing method by kinetic energy theorem of fluid. And the sensitivity calculation formulation and sensitivity index dividing principle of water, salt, alkali and acid were given by recovery method. It is found that the recovery method is fit for water sensitivity, salt sensitivity, alkali sensitivity and acid sensitivity. The results show that the method is easy to proceed, and has a firm theoretical foundation. And the experimental data are reliable.

Key words: unconsolidated sandstone; formation sensitivity; evaluation method; recovery; gas permeability

储层敏感性是指油气储集地层在遇到与自身性 质差别较大的外来流体时,与外来流体之间发生的 物理化学反应。油气层损害则是指这些物理化学反 应造成的储层渗透率下降的现象。储层敏感性评价 是指利用一定的实验方法来测定某种外来流体对储 层岩心渗透率造成的伤害程度,从而为现场钻井、完 井、注水等作业施工提供技术支持和理论依据^[14]。 对于疏松砂岩储层,钻取岩心时可以采用密封法、冷 冻法和封蜡法等,以保持岩心的完整性。但对于那 些已经解除密封,置于岩心库较长时间的松散岩心, 无法钻取适合于岩心流动实验的柱状岩心,也就不 能够按照相关标准和实验方法^[54]完成所规定的测 试内容。笔者结合流体动能定律^[74]和岩心回收 率^[9]实验,建立一种适合于疏松砂岩储层的敏感性

收稿日期:2014-05-13

基金项目:国家自然科学基金项目(41072094);国家"973"项目(2015CB251206);山东省自然科学基金项目(ZR2012EEM020) 作者简介:徐加放(1973-),男,副教授,博士,主要从事井壁稳定、钻井液及油气层保护教学科研工作。E-mail:xjiafang@upc.edu.cn。 评价方法。

1 岩 心

由于岩心胶结疏松(图1),且在岩心库放置时 间较长,因而只能取到储层的油砂。将油砂洗油、烘 干保存在干燥器中待用。对已洗油岩心进行矿物分 析(全矿和黏矿)和扫描电镜等实验,以便预测和分 析岩心潜在敏感性矿物和敏感性因素。





(a)岩心库中的疏松油砂 (b)压制成型的岩心

图 1 疏松砂岩岩心照片 Fig. 1 Pictures of unconsolidated sand

2 速敏-气测法

2.1 理论依据

油气层中微粒运移造成的损害主要取决于油气 层中流体的流动速度^[10]。地层流体开始流动时,参 与运动的微粒小而少,多为未胶结颗粒,对岩心渗透 率影响较小;随着流速增大,参与运动的颗粒逐渐增 多,在岩心孔喉处形成"桥堵",使岩心渗透率明显 下降。维持岩心渗透率平稳的最大流体流动速度称 为该岩心的临界流速^[5,10]。根据最小动能理论^[11], 固体颗粒是否产生运移取决于流体的动能,且该动 能不受流体状态(气体或液体)的影响,而只取决于 流体流动所产生的总动能 *E*,即

$$E = \frac{1}{2}\rho v^2. \tag{1}$$

式中,E 为流体动能,J; ρ 为流体密度, kg/m^3 ;v 为流体的流速, m/s_{\circ}

若气测时,气体流动所产生的动能与液体相等, 则有

$$\frac{1}{2}\rho_{w}v_{w}^{2} = \frac{1}{2}\rho_{g}v_{g}^{2},$$
(2)

可得发生气速敏时的临界流速即为地层水速敏的临 界流速,即

$$v_{\rm w} = v_{\rm g} \sqrt{\frac{\rho_{\rm g}}{\rho_{\rm w}}}.$$
(3)

因此,气体的临界流速成为获得岩心速敏的关键。 假设岩心为一孔隙导体^[12],在流量一定的情况下, 流体通过某固定截面积柱状岩心的平均流速与岩心 的孔隙度成反比,即

$$\boldsymbol{v}_{\mathrm{AB}} = Q/A\boldsymbol{\varphi}.\tag{4}$$

式中, $v_{R_{R_{R}}}$ 为流体通过孔隙时的平均流速,m/s;Q为 流体的体积流量, $m^3/s;A$ 为多孔介质的截面积, m^2 ; φ 为多孔介质孔隙度。

将式(3)和(4)联立,可得疏松砂岩岩心发生速 敏时的临界流速为

$$v_{\rm w} = \frac{Q_{\rm g}}{A\varphi} \sqrt{\frac{\rho_{\rm g}}{\rho_{\rm w}}}.$$
 (5)

若气体密度和水的密度已知,只要测出气测渗 透率时的流量、岩心截面积和孔隙度,即可得到地层 水的临界速敏流速。

2.2 实验方法

按照参考文献[13]制作人造岩心(图1),并按 参考文献[5]测定岩心的气测渗透率。逐渐增大气 体的流速,测定并计算岩心渗透率变化规律。

2.3 敏感指数

岩心的速敏指数由下式计算:

$$D_{\rm v} = \frac{k_{\rm max} - k_{\rm min}}{k_{\rm max}}.$$
 (6)

式中, D_v 为速敏指数; k_{max} 为临界流速前岩心渗透率的最大值, μm^2 ; k_{min} 为速敏伤害后的最小渗透率, μm^2 。

气测速敏造成的渗透率损害程度与液体相同^[5,10],即: $D_v \leq 0.05$,无速敏; $0.05 < D_v \leq 0.30$,弱速敏; $0.30 < D_v \leq 0.50$,中等偏弱速敏; $0.50 < D_v \leq 0.70$,中等偏强速敏; $D_v > 0.70$,强速敏。

3 水敏、盐敏、碱敏、酸敏-回收法

3.1 实验方法

回收法^[9,14-16]是井壁稳定性研究最常用方法之一。为适应储层敏感性研究,对实验方法和步骤进行了调整。

将洗油岩心轻轻粉碎,全部通过 100 目筛,筛取 100~200 目岩心颗粒,放到 105 ℃干燥箱中烘干 4 ~6 h,取出,放到干燥皿中密闭冷却,待用;取适量 岩心颗粒(50 g)加入到敏感性待测溶液中(350 mL 水、盐溶液、酸液、碱液等),轻轻搅拌 2~3 h,倒入 200 目样品筛中,筛取剩余样品;将筛余固相回收, 放到 105 ℃干燥箱中烘干 4~6 h,取出,放到干燥皿 中密闭冷却,称重,计算岩心回收率 *R*.:

$$R_{\rm r} = \frac{m_1 - m_2}{m_1}.$$
 (6)

式中, m_1 为实验前岩心质量, $g;m_2$ 为回收后岩心质量, g_o

3.2 敏感指数

由于酸既可以与砂岩储层中的 SiO₂ 发生反应, 也可以与黏土矿物发生反应,而水、盐和弱碱一般只 与黏土矿物反应,因此,岩心在酸液中的回收率与其 他敏感性流体的回收率不同,酸敏的敏感指数也应该 与其它试液的敏感指数有所不同,根据对回收率方 法、泥岩和疏松砂岩回收率的研究,推荐敏感指数见 表1。

表1 敏感性评价指标

Table 1 Evaluation indicators for sensibility

损害程度	酸敏	盐水敏和碱敏
无–弱	$R_{\rm r}$ >0.90	<i>R</i> _r >0. 98
中等偏弱	$0.90 < R_r < 0.80$	$0.98 < R_r < 0.95$
中等偏强	0. $80 < R_r < 0.70$	$0.95 < R_r < 0.90$
强	$R_{\rm r} < 0.70$	$R_{\rm r} < 0.90$

4 实验结果分析

取如图1(a)所示的胜利油田某井沙一段(埋藏深度850m)疏松砂岩岩心碎屑若干,并收集该井 及邻井有关资料进行对比分析。根据资料显示,岩 心胶结差,粒度分选中等,颗粒磨圆度次棱至次圆, 胶结类型为晶粒镶嵌式胶结,接触方式为点-线接触。

4.1 岩心分析

利用 X-射线衍射法对该岩心的矿物组成进行 分析^[2],实验结果及邻井资料见表 2、3;同时利用扫 描电镜对矿物分布、发育情况进行观察和分析^[2], 结果见图 2。

					%
结果	石英	钾长石	斜长石	铁白云石	黏土矿物
实验	64	6	22	2	6
邻井1	68	4	20	1	7
邻井2	68	5	20	1	6

表 2 岩心全矿物分析结果 Table 2 Total mineral analysis by X-ray diffraction

表3 岩心黏	_矿物分析结界
--------	---------

 Table 3
 Clay mineral analysis by X-ray diffraction

					%
结果	高岭石	绿泥石	伊利石	伊/蒙间层	伊/蒙间
되자	(K)	(Ch)	(I)	(I/S)	层比(S)
实验	3	3	3	91	75
邻井1	1	2	2	95	85
邻井 2	2	2	3	93	80

对比实验结果与邻井资料,各种矿物的含量差 别不大,黏土矿物的相对含量测试结果也比较接近, 且三种岩心同属一个地层,埋藏深度接近,因此,该 井岩心敏感性应该与邻井差别不大,也是该实验方 法参考的重要依据。



(c)粒表膜状分布丝片状伊蒙混层(d)粒间孔隙充填长石Fs、丝片 及粒间孔隙充填长石(1500倍) 状伊蒙混层及粒表膜状分布 丝片状伊蒙混层(1200倍)

> 图 2 岩心扫描电镜分析结果 Fig. 2 Pictures by SEM

4.2 气测速敏实验

洗油后岩心完全变成分散的颗粒,不加入黏结剂时压制岩心遇水分散(标准盐水,图3),而加入黏结剂则可能改变岩心颗粒的表面特性,失去了实验的真实性,因此,采用人造岩心利用气体测定岩心的敏感性,实验结果见图4。





(b) 遇水后

(a) 遇水前 图 3 人工岩心

图 3 人工岩心遇水前后对比 Fig. 3 Core's comparison before and after immersed in water

由图 4 看出,在流量为 0.11 cm³/s 时岩心渗透 率损失近 30%,渗透率最大损失率超过了 80%。因 此,根据敏感性指数认定该岩心为强速敏,临界气流 速为 0.11 cm³/min^[5]。



图 4 岩心渗透率损失率与气体流量的关系

Fig. 4 Permeability changing with gas flowing speed

实验测得该岩心的直径为 2.54 cm, 孔隙度为 0.30, 则水的临界流速可以计算如下:

$$v_{\rm w} = \frac{Q_{\rm g}}{A\varphi} \sqrt{\frac{\rho_{\rm g}}{\rho_{\rm w}}} \approx 2.60 \times 10^{-5}.$$
 (7)

因此,该岩心的临界流速为2.60×10⁻⁵ m/s。

查阅岩心相邻区块敏感性资料(同为疏松砂 岩,采取冷冻取心法),计算地层水临界流速为2.26 ×10⁻⁵ m/s,误差为13%。表明该方法具有一定可比 性。

4.3 酸敏、盐水敏及碱敏

实验岩心的酸敏、盐水敏和碱敏实验结果见表 4(实验程序按参考文献[6]进行)。

表 4 岩心酸敏、盐水敏、碱敏实验结果

 Table 4
 Experimental results for acid, salt, water and alkali sensitivity

酸敏		盐水敏		碱敏	
试液	回收 率	盐度/ %	回收 率	pH 值	回收 率
15% 盐酸	0.85	8	0.88	7.0	0.88
12% 盐酸+1% 氢氟酸	0.82	4	0.88	8.5	0.92
12% 盐酸+2% 氢氟酸	0.80	2	0.86	10.0	0.97
12%盐酸+3%氢氟酸	0.76	1	0.84	11.5	0.95
12% 盐酸+4% 氢氟酸	0.65	0	0.86	13.0	0.91

表4表明:对于酸敏,岩心的回收率较低,且随 酸度增加而变小,结合推荐敏感性指数和邻井测试 结果(邻井1:酸敏损害率59.2%;邻井2:酸敏损害 率89.0%),该地层属强酸敏性地层。

对于盐水敏,邻井1使用模拟地层水驱替时其 液体渗透率偏低,属强水敏性岩样,临界矿化度不低 于模拟地层水;邻井2使用1%氯化钾溶液驱替时 (0.05 cm³/min)流动实验压力超过10 MPa,出口流 量极低无法获取液体渗透率值,属强水敏岩样。该 地层岩心盐敏矿化度较高,在1%氯化钾溶液中已 经发生较严重水敏,且0.05 cm³/min已严重超出速 敏的临界流量,造成实验失败。对比图3可知,该地 层岩心以黏土矿物接触胶结为主,孔隙黏土矿物发 育但胶结疏松,因此可以说明该地层岩心水敏性很强。

对于碱敏,邻井1碱敏损害率73.7%,属强碱 敏,临界pH值7.0;邻井2碱敏损害率70.8%,属强 碱敏,临界pH值7.0。该结果的不当之处在于实验 仍是在1%盐水中进行,岩心已经发生水敏,因此测 试结果可能是水敏结果,而不是碱敏造成的。由于 岩心水敏性较强(即使是模拟地层水),因此碱敏实 验利用8% KCl溶液代替模拟地层水,以消除由于 水敏带来的实验误差,用NaOH溶液调节pH值为7 ~13。实验结果表明,该地层岩心无论是在弱碱性 还是强碱性条件下的回收率都比较低,而在pH值 约为10时才比较高,因此认为其临界pH值为10 而非7。

5 结 论

(1)建立了一种疏松砂岩储层速敏实验方法-气测法,并通过流体动能定律推导出了地层水条件 下发生速敏的临界流速。

(2)建立了一种疏松砂岩储层水敏、盐敏、碱敏 和酸敏的快速评价方法-回收率法,并给出了敏感 指数划分方法。

(3)该方法操作简单,理论依据充分,实验结果 具有很好的可参考性,特别适合于疏松和/或未胶结 砂岩储层的敏感性测定。

参考文献:

- [1] 法鲁克・西维. 油层伤害:原理、模拟、评价和防治[M]. 北京:石油工业出版社, 2003.
- [2] 徐同台,熊友明,康毅力. 保护油气层技术[M]. 3 版. 北京:石油工业出版社, 2010:1-8.
- [3] 康毅力,罗平亚. 储层保护系统工程:实践与认识[J]. 钻井液与完井液,2007,24(1):1-7,95.
 KANG Yili, LUO Pingya. System engineering of reservoir preservation: practice and theory[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2007,24(1):1-7,95.
- [4] 岳前升,刘书杰,向兴金.基于储层保护的疏松砂岩稠 油油藏完井液[J].大庆石油学院学报,2009,33(5): 79-81,85.

YUE Qiansheng, LIU Shujie, XIANG Xingjin. Completion fluid in unconsolidated sandstone heavy oil reservoir based on reservoir protection [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2009,33(5):79-81,85.

[5] 中国石化股份胜利油田分公司地质科学研究院,中国石油勘探开发研究院.SY/T5358-2010 储层敏感性流动实验评价方法[S].北京:石油工业出版社,2010.

- [6] 全国石油天然气标准化技术委员会(SAC/TC 355).
 B/T 29172-2012 岩心分析方法[S].北京:石油工业出版社,2012.
- [7] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 北京:石油工业出版社, 1998:53-70.
- [8] 杨立喜. 解决连续作用的流体问题时动量定理与动能 定理的选择[J]. 唐山学院学报,2008,21(6):78-79.
 YANG Lixi. The choice between kinetic energy theorem and momentum theorem in determining the role of continuous functioning fluids[J]. Journal of Tangshan College, 2008,21(6):78-79.
- [9] 张孝华,罗兴树. 现代泥浆实验技术[M]. 东营:石油 大学出版社,1999:45-46.
- [10] 吕开河.保护油气层技术[M].东营:中国石油大学 出版社,2010:93-99.
- [11] 苏义脑,周川,窦修荣. 空气钻井工作特性分析与工艺参数的选择研究[J]. 石油勘探与开发,2005,32
 (2):86-90,122.

SU Yinao, ZHOU Chuan, DOU Xiurong. Operation characteristics analysis and process parameters selection of air drilling[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005,32(2):86-90,122.

- [12] 秦积舜,李爱芬. 油层物理学[M]. 东营:石油大学 出版社, 2001:148-150.
- [13] 张国新,蒋建宁,郭进忠,等. 疏松砂岩室内岩心制作

方法[J]. 钻井液与完井液,2007,24(1):23-25,97. ZHANG Guoxin, JIANG Jianning, GUO Jinzhong, et al. The method of making loosely compacted sand cores [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2007,24(1): 23-25,97

- [14] 黄维安,邱正松,徐加放,等. 吐哈西部油田井壁失稳 机理实验研究[J]. 石油学报,2007,28(3):116-123.
 HUANG Weian, QIU Zhengsong, XU Jiafang, et al. Experimental study on sidewall instability mechanism of oil wells in the western Tuha Oilf ield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007,28(3):116-123.
- [15] 邱正松,徐加放,吕开河,等."多元协同"稳定井壁 新理论[J].石油学报,2007,28(2):117-119.
 QIU Zhengsong, XU Jiafang, LÜ Kaihe, et al. A multivariate cooperation principle for well bore stabilization [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007,28(2):117-119.
- [16] 徐加放,邱正松,刘庆来,等. 塔河油田井壁稳定机理 与防塌钻井液技术研究[J]. 石油钻采工艺,2005,27 (4):33-36,90.

XU Jiafang, QIU Zhengsong, LIU Qinglai, et al. Study on mechanism of wellbore stability and technology of anti-sloughing drilling fluid in Tahe Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005,27(4):33-36 90.

(编辑 刘为清)