

LF15-1 油田 ZJ10 灰岩储层 PRD 钻完井液体系优化研究

王晋玲¹, 赵峰¹, 唐洪明¹, 徐诗雨¹, 邢希金², 王珊²

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 2. 中海油研究总院, 北京 100028)

摘要: LF15-1 油田 ZJ10 灰岩储层为孔隙型储层, 以中、低孔低渗为主, 储层孔吼较小, 裂缝不发育, 钻完井液对储层存在不同程度的伤害。从储层基本特征、储层敏感性评价及目前所用钻完井液性能评价着手, 分析了储层潜在的损害因素, 开展了储层保护钻完井液体系优选研究。基于选择性暂堵技术, 得到了 PRD 钻完井液体系具体配方, 建议在钻完井液体系中加入 0.7% PF-VIS 和 2.0% PF-FLO; 在完井液体系中加入 5% PF-JPC 和 2% CA101-4。动态损害实验评价表明, 优选的 PRD 钻完井液体系对储层保护效果显著, 液相侵入深度及表皮系数下降明显。

关键词: 钻完井液; 储层保护; 孔隙型储层; PRD; LF15-1 油田

中图分类号: TE258

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)08-0084-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2016.08.020

Optimization of PRD drilling and completion fluid system for ZJ10 limestone reservoir of LF15-1 oilfield

WANG Jin-ling¹, ZHAO Feng¹, TANG Hong-ming¹, XU Shi-yu¹, XING Xi-jin², WANG Shan²

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: ZJ10 limestone reservoir of LF15-1 oilfield is the pore type reservoir and characterized by medium, low porosity, low permeability, small pore throat and less fracture. Drilling and completion fluid causes different degrees of damage to the reservoir. Based on the analysis of reservoir characteristics, reservoir sensitivity and drilling fluid performance evaluation, the optimization of PRD drilling and completion fluid system is conducted. The optimal formulation of PRD drilling and completion fluid system is determined as follows by the selective temporary plugging technology: 0.7% of PF-VIS and 2.0% of PF-FLO for drilling fluid system, 5% of PF-JPC and 2% of CA101-4 for completion fluid system. The dynamic damage experimental evaluation shows that reservoir protection gains obvious effects. The liquid invasion depth and skin factor are obviously decreased.

Key words: drilling and completion fluid; reservoir protection; pore type reservoir; PRD; LF15-1 oilfield

LF15-1 油田位于珠江口盆地东沙隆起的北缘之上, 靠近陆丰凹陷南侧, 含油层主要分布在珠江组, 包括灰岩油层 ZJ10、砂岩油层 ZJ20 和 ZJ30, 油层埋深为 -1 812.0 ~ -1 862.5 m, 含油井段长 50.5 m, 其中本区主力油层为 ZJ10 灰岩储层, 可进一步分为 ZJ10-A、ZJ10-B 2 个油组^[1]。碳酸盐岩储层与碎屑岩储层不同, 其储层伤害的内因主要受自身特殊的孔隙结构和储层流体性质控制^[2]。LF15-1 油田 ZJ10 灰岩储层裂缝不发育, 以孔隙型储层为主, 储层主要伤害是液相侵入后发生水化膜增厚, 使侵入区内岩石的含水饱和度升高而形成水锁。目前广泛应用 PRD 钻完井液体系来减小储层伤害程度。笔者从研究区储层基本特征着手, 在储层敏感性评价及原用钻完井液性能评价的基础上, 开展储层保护钻完井液体系优选研究。

1 储层潜在损害分析

1.1 储层特征

通过对 LF15-1 油田 ZJ10 灰岩储层 10 余个岩心样品进行薄片鉴定、X-衍射以及扫描电镜分析, 结果其岩石类型以泥晶藻屑灰岩、泥晶生屑灰岩为主, 填隙物主要为泥晶基质, 少见亮晶胶结物, 储层矿物包括方解石、白云石、少量黏土矿物及石英, 其中方解石质量分数为 65% ~ 85%, 白云石质量分数为 1% ~ 25%, 黏土矿物质量分数为 1% ~ 3%, 石英质量分数为 1% ~ 5%, 微含铁白云石。

测井解释结果表明, LF15-1 油田珠江组 ZJ10 灰岩储层整体物性较差, 储层物性以中孔、低渗为主。ZJ10-A 油组测井孔隙度在 17.9% ~ 21.5% 之间, 平均为 19.7%, 渗透率为 5.5 ~ 30.3 mD, 平均渗

透率为 17.9 mD; ZJ10-B 油组测井孔隙度在 20.2% ~ 22.3% 之间, 平均为 21.3%, 渗透率为 32.2 ~ 50.2 mD, 平均渗透率为 41.2 mD; ZJ10-B 油组储层物性优于 ZJ10-A 油组。

本区储集空间类型多样, 以次生孔隙最为发育, 包括基质溶孔、粒间溶孔、粒内溶孔、原生粒内孔(有孔虫体腔孔、珊瑚藻内微孔), 溶孔半径为 0.1 ~ 0.6 mm。此外, 还发育大量压溶缝及少量构造缝、溶蚀缝。ZJ10-A 油组平均孔喉半径为 0.094 ~ 2.805 μm , ZJ10-B 油组平均孔喉半径为 0.394 ~ 2.645 μm 。整体上储层孔喉细小, 连通性差, ZJ10-B 油组储层孔喉较 ZJ10-A 略粗。

1.2 储层敏感性实验评价

LF15-1 油田 ZJ10 储层属于孔隙型碳酸盐岩储层, 固态微粒堵塞仍是储层伤害的主要原因, 应力敏感性相对较弱, 随着储层孔喉直径的减小和渗透率的降低, 泥膜和水锁效应对储层的伤害越发显著。

表 1 储层敏感性评价结果

实验类型	岩心深度/m	评价结果		备注
		损害指数	结果	
速敏	1853.82	21.30	弱	地层水
	1844.85	32.40	中等偏弱	
水敏	1855.65	18.49	弱	
	1854.07	44.10	中等偏弱	
酸敏	1854.13	22.37	弱	15% HCl
	1853.79	37.53	中等偏弱	
碱敏	1861.29	41.30	中等偏弱	
	1859.01	35.20	中等偏弱	
应力敏感性	1859.01	9.55	无-弱	
	1859.06	14.82	无-弱	

常见的敏感性矿物主要为碳酸盐胶结物及黏土矿物^[3]。本区储层黏土矿物以伊利石和高岭石为主, 其次为绿泥石和伊/蒙混层; 非黏土敏感性矿物主要为方解石、白云石、黄铁矿。储层敏感性评价主要是通过室内岩心的流动实验分析外来因素对储层的伤害程度, 为钻完井液优化提供依据。笔者根据中国石油天然气总公司行业标准 SY/T 5358—2010《储层敏感性流动实验评价方法》对 LF15-1 油田 ZJ10 灰岩储层进行敏感性实验评价, 实验结果如表 1 所示。

由表 1 可知, LF15-1 油田储层敏感性较弱, 其中以水敏、酸敏、碱敏为主, 速敏不是主要的损害形式, 应力敏感性损害程度最弱。

1.3 原用钻井液性能评价

LF15-1 油田储层段目前使用 PEM 钻井液体系, 其具体配方为: 搬土/海水 + NaOH + Na₂CO₃ + PF-PLUS + PF-GBL + PF-LPF-H + PF-PAC-L + KCl + PF-LSF + JLX + BaSO₄。笔者对钻井液的流变性、失水造壁性、润滑性、抑制性等进行系统评价。

室内评价结果表明: PEM 钻井液体系流变性较好, 沉降稳定性良好(90℃ × 16 h); 滚动回收率较高, 达 81.0%, 但还有进一步提高的空间; 泥饼摩阻系数较小, 为 0.063, 但还有待于进一步提高失水造壁性能, 减少钻井滤液造成地层水化膨胀, 稳定井壁。该钻井液体系目前在 LF15-1-1、LF15-1-2 两口井中使用, 钻井总体较为顺利, 但在部分井段出现泥包、掉块、憋钻等情况, 邻区 LF13-2 油田也出现类似情况, 证明钻井液体系抑制性、封堵性等还有待于提高。

(上接第 83 页)

- [7] 王秀军, 张晖, 王立, 等. 小麦麸脂肪替代品对低脂冰淇淋品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2009, (5): 82-84.
- [8] Winuprasith T, Suphantharika M. Microfibrillated cellulose from mangosteen (*Garciniamangostana* L.) rind: Preparation, characterization, and evaluation as an emulsion stabilizer[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 32(2): 383-394.
- [9] 石淑兰, 何福望. 制浆造纸分析与检测[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003: 91-110.
- [10] Jonas Lewin Bauer, Britta Harbaum-Piayda, Heiko Stöckmann, et al. Antioxidant activities of corn fiber and wheat bran and derived extracts[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 50: 132-138.
- [11] Winuprasith T, Suphantharika M. Microfibrillated cellulose from mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) rind: Preparation, characterization, and evaluation as an emulsion stabilizer[J]. Food Hydro-

colloids, 2013, 32(2): 383-394.

- [12] Akira Isogai, Tsuguyuki Satio, Hayaka Fukuzumi. TEMPO-oxidized cellulose nanofibers[J]. Nanoscale, 2011, 3(7): 71-85.
- [13] 付伟. 细菌纤维素纳米纤维稳定 Pickering 乳液的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.
- [14] Palazolo G G, Sobral P A, Wagner J R. Freeze-thaw stability of oil-in-water emulsions prepared with native and thermally-denatured soybean isolates[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(3): 398-409.
- [15] Justyna Frelichowska, Marie-Alexandrine Bolziner, Yves Chevalier. Effects of solid particle content on properties of o/w Pickering emulsions[J]. Colloid and Interface Science, 2010, 351: 348-356.
- [16] Marefati A, Rayner M, Timgren A, et al. Freezing and freeze-drying of Pickering emulsions stabilized by starch granules[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2013, 436: 512-520. ■

2 储层保护钻井液体系优选

2.1 PRD 钻井液体系优选

室内实验评价了 PF-VIS、PF-FLO 质量分数对钻井液体系的影响,确定了 PF-VIS 质量分数不低于 0.7%,PF-FLO 质量分数为 2% 左右时,钻井液性能最好,结果如表 2、表 3 所示。优化后的 PRD 钻井液体系配方为:海水 + 0.15% NaOH + 0.15% Na₂CO₃ + 0.7% PF-VIS + 2.0% PF-FLO + 3.0% JLX-C + 氯化钾或甲酸钠加重,密度为 1.10 ~ 1.20 g/cm³。

表 2 PF-VIS 质量分数对体系性能的影响评价结果

w(PF-VIS)/ %	实验 条件	AV/ (mPa·s)	PV/ (mPa·s)	YP/ Pa	Φ6/Φ3	FL _{API} / cm ³
0.5	滚前	24.0	14.0	10.0	6/5	
	滚后	25.5	13.5	12.0	8/7	5.5
0.7	滚前	35.5	19.0	16.5	13/11	
	滚后	33.0	17.0	16.0	12/10	5.0
0.9	滚前	47.0	22.0	25.0	15/12	
	滚后	43.0	20.0	23.0	13/10	4.8
1.0	滚前	56.0	27.0	29.0	17/14	
	滚后	49.0	24.0	25.0	14/12	4.5

注:热滚条件为 90℃ × 16 h。

表 3 PF-FLO 质量分数对体系性能的影响评价结果

w(PF-FLO)/ %	AV/ (mPa·s)	PV/ (mPa·s)	YP/ Pa	Φ6/ Φ3	GEL	FL _{API} / cm ³	FL _{HTHP} / cm ³
1.0	22.5	12	10.5	10/8	8/12	5.5	17.0
2.0	33.0	17	16.0	12/10	9/16	5.0	15.5

注:老化条件为 90℃ × 16 h。

对优选的钻井液体系进行室内评价,结果表明,优选的 PRD 钻井液体系具有良好的抑制性能,滚动回收率达 90% 左右;当加入 2% 润滑剂 PF-LUBE 后,泥饼摩阻系数降低为 0.048,明显地改变体系的润滑性能,建议在优选的 PRD 体系中加入润滑剂 PF-LUBE;加入 5% ~ 10% 的劣质土后,钻井液体系流变性和失水变化不大,说明 PRD 体系具有良好的抗劣质土污染能力;随 NaCl 加量的增加,PRD 钻井液体系的表现黏度、切力以及滤失量均变化不大,说明该体系抗 NaCl 污染能力较强。

2.2 PRD 完井液体系优选

常用完井液有起顶替作用的完井液和起破胶作用的破胶液^[4]。PRD 钻井液体系须考虑破胶(泥饼解除)问题。根据 PRD 钻井液体系的组成,破胶液

体系中必须同时引入破胶剂和缓蚀剂^[5]。破胶液基本配方为:过滤海水 + 破胶剂 PF-JPC + 缓蚀剂 CA101-4。由于破胶液的作用主要是处理井壁处 PRD 钻开液形成的滤饼,因此室内采用滤纸法对 PF-JPC 破胶剂的破胶效果进行评价,结果如表 4 所示。

表 4 破胶液效果评价

过滤介质	PF-JPC 破胶剂 质量分数/%	压力/ MPa	滤失时 间/s	滤失体 积/cm ³
空白滤纸	—	0.7	11	119.0
破胶前泥饼			1800	4.2
破胶 2 h 泥饼	5	0.7	11	81.0
破胶 5 h 泥饼	5	0.7	11	114.0

实验结果表明,采用 5% PF-JPC 破胶液破胶 5 h,体系破胶,滤饼的滤失速率基本和空白滤纸相当。说明 5% PF-JPC 破胶液具有良好的泥饼解除液效果。

此外,由于破胶剂 PF-JPC 属于氧化性物质,因此需要对加入缓蚀剂(CA101-4)后的破胶液的腐蚀性能进行评价,结果如表 5 所示。

表 5 破胶液腐蚀性能评价

体系	缓蚀剂 CA101-4 质量分数/%	平均腐蚀速率/ (mm·a ⁻¹)	挂片腐蚀状态描述
破胶液	空白	30.2901	点蚀
	1.0	5.6208	表面光滑,无点蚀
	1.5	2.6701	表面光滑,无点蚀
	2.0	0.9572	表面光滑,无点蚀
	2.5	0.9034	表面光滑,无点蚀

注:90℃ × 24 h, N80。

从实验结果来看,破胶液体系的腐蚀性随着缓蚀剂 CA101-4 质量分数的增加,腐蚀速率明显降低,当其质量分数为 2.0% 时,腐蚀速率为 0.957 2 mm/a,能满足生产需要。因此,最终确定了适合于 LF15-1 油田储层段的破胶液配方:过滤海水 + 5% PF-JPC + 2% CA101-4,用 KCl 调节密度。

2.3 PRD 钻完井液体系动态损害评价

通过对 LF15-1 油田灰岩储层段钻完井液体系进行优化评价研究,确定了相应的 PRD 钻井液体系以及 PRD 破胶液^[6]。根据《钻井液完井液损害油层室内评价方法》对 LF15-1 油田储层段 PRD 钻完井液体系动态损害进行评价,结果如表 6 所示。

表6 PRD 钻完井液动态损害评价实验结果

岩心号	井深/ m	$K_{\text{mud}}/$ 2 h	滤失 量/ 2 h	K_g	K_{oi}	K_{od}	I_{ri}	液相	
								侵入 深度/ m	表皮 系数
10	1844.91	0.0285	8.60	14.02	12.81	10.95	85.47	0.743	0.210
24	1859.20	0.0221	6.80	26.39	9.89	8.68	87.78	0.698	0.164
30	1854.07	0.0148	4.60	10.19	7.28	6.59	90.58	0.577	0.103
34	1859.02	0.0150	4.70	42.36	11.14	10.05	90.23	0.787	0.140

注: K_g 为气测渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_o 为煤油初测渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_{od} 顺序工作液后岩心煤油自然反排渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; I_{ri} 岩心煤油反排渗透率恢复率, %; K_{mud} 钻井液循环过程中岩心近似渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; 滤失量为累计值, mL; 破胶时间为 6 h。

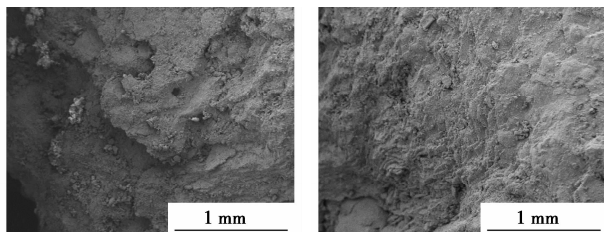
由实验结果可知:

(1) PRD 钻井液体系循环 2 h 后, 实验岩心近似渗透率下降 99.8% 以上; 在钻井液循环 5 min 以内渗透率下降 99% 以上。说明 PRD 钻井液快速在岩心中形成较为致密的封堵层, 阻止工作液进一步侵入到储层。

(2) 钻井液循环 2 h 后, PRD 钻井液滤失量为 4.7 ~ 8.6 mL, 平均滤失量为 6.2 mL。总体上看, PRD 钻井液动态滤失量较低。

(3) 推荐的水平井 PRD 钻完井液体系动态损害后, 岩心渗透率恢复率为 85.47% ~ 90.58%, 平均渗透率恢复率为 87.94%, 岩心渗透率恢复较好, PRD 钻完井液体系储层保护效果良好。

(4) 实验后岩心泥饼端纵向剖面微观结构如图 1 所示。由图 1 可见, 实验后岩心孔隙内干净,



(a) LF15-1

(b) 1844.91 m

(c) ZJ10-A

图1 实验后岩心泥饼端纵向剖面微观结构图

说明钻井液固液相侵入程度低, 破胶完全, 储层保护效果良好。

(5) 根据平面径向流条件下任意时刻钻井液液相侵入深度计算模型, 对 LF15-1 油田 PRD 钻完井液体系液相侵入深度和表皮系数进行计算, 结果表明, PRD 钻井液在储层液相侵入深度为 0.577 ~ 0.787 m, 平均侵入深度为 0.702 m; 表皮系数为 0.103 ~ 0.210, 平均表皮系数为 0.154。

总体上看, PRD 工作液体系具有封堵效果好, 滤失量低, 反排恢复率高, 侵入深度及表皮系数较低的特点, 对储层损害较小, 储层保护效果良好。因此, PRD 钻完井液体系作为 LF15-1 油田储层段钻完井液体系完全可行。

3 结论

(1) LF15-1 油田 ZJ10 灰岩储层整体物性较差, 以中孔、低渗为主, 储层孔喉细小, 连通性差, ZJ10-B 油组储层物性及孔喉大小均优于 ZJ10-A 油组。ZJ10 储层属于孔隙型碳酸盐岩储层, 固态微粒堵塞为储层伤害的主要原因。

(2) LF15-1 油田储层敏感性较弱, 以水敏、酸敏、碱敏为主。原用 PEM 钻井液体系虽然基本能保证正常钻进, 但钻井过程中仍暴露出不少问题, 且对储层有不同程度的伤害。

(3) 基于选择性暂堵技术, 笔者优选了 PRD 钻完井液体系, 动态损害评价表明, PRD 钻完井液体系具有封堵效果好, 滤失量低, 反排恢复率高, 侵入深度及表皮系数较低的特点, 对储层损害较小, 储层保护效果良好。

参考文献

- [1] 朱璠, 宋建虎, 李彬, 等. 随钻测井技术在陆丰 X 油田水平井钻探中的应用[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(10): 85-89.
- [2] 黄维安, 邱正松, 岳星辰, 等. 页岩气储层损害机制及保护水基钻完井液技术[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(3): 99-105.
- [3] 顾军, 向阳, 何湘清, 等. 裂缝-孔隙型储层保护钻完井液体系研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(2): 184-186.
- [4] 程鑫桥, 舒福昌, 李蔚萍, 等. 一种用于 PRD 钻井液的缓释破胶剂[J]. 钻井液与完井液, 2010, 27(1): 33-37.
- [5] 马美娜, 许明标, 唐海雄, 等. 有效降解 PRD 钻井液的低温破胶剂 IPC 室内研究[J]. 油田化学, 2005, 22(4): 289-291.
- [6] 谢克姜, 胡文军, 方满宗. PRD 储层钻井液技术研究与应用[J]. 石油钻采工艺, 2007, 29(6): 99-101. ■