

低渗透储层水平井伤害机理及保护技术

李公让^{1,2} 蓝 强² 张敬辉^{1,2} 李海斌² 杨景利²

(1. 中国石油大学(华东) 石油工程学院, 山东 青岛 266555; 2. 中国石化胜利石油管理局 钻井工艺研究院, 山东 东营 257017)

摘要: 钻井过程中固相堵塞、液相引起的水锁、储层的敏感性、压差和浸泡时间都会对低渗透储层造成伤害, 在此基础上提出了保护储层的3M原则: 首先是最大化预防原则, 采用全过程欠平衡钻井预防固相堵塞, 尽量降低液相引起的自吸伤害; 其次是最大化保护原则, 在无法实现欠平衡钻井时, 以近平衡钻井为主, 采用无黏土防水锁钻井液; 再次是最大化解除原则, 在完井时采用环保生物完井液解除滤饼堵塞, 同时减少压力激动, 缩短作业时间。根据这些原则形成了以无黏土可降解钻井液、高效泡沫钻井液和高效解堵完井液为基础的低渗透水平井储层保护技术。在大牛地气田和胜利油田等17口低渗透储层水平井的应用表明, 该储层保护技术油气层保护效果良好, 能有效提高油气井产量, 降低开发成本。

关键词: 低渗透储集层; 水平井; 防止地层损害; 钻井液; 完井液

中图分类号: TE258 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2010)06-0060-05

Low Permeability Reservoir Horizontal Well Formation Damage Mechanism and Formation Protection

Li Gongrang^{1,2} Lan Qiang² Zhang Jinghui^{1,2} Li Haibin^{1,2} Yang Jingli²

(1. College of Petroleum engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, 266555, China; 2. Drilling Technology Research Institute of Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong, 257017, China)

Abstract: After analysis, it shows that the main formation damage in low permeability reservoir is solid plugging, liquid phase trapping, formation sensibility, pressure difference and soaking time. The 3M principle of sequences was proposed. First, maximizing the precaution, the whole underbalanced drilling is used to avoid solid plugging, and the liquid sucking and trapping should be reduced as much as possible. Second, maximizing the protection, the near-balanced drilling circulating with non-clay anti-water-blocking drilling fluid is used to protect reservoir when UBD cannot be used. Third, maximizing the block-removing, fine completion coupling with environmental biological water-block removing fluid should be used to relieve the mud cake blocking, to relieve the pressure kicking and to shorten the operation time. According to these principles, the low permeability reservoir protection technology was developed with non-clay anti-water-blocking drilling fluid, high-efficiency foam drilling fluid and environmental biological water-block removing completion fluid. The applications in 17 wells in low permeability sandstone reservoir of Daniudi Gas Field and Shengli Oilfield showed that formation protection was achieved. It provided a useful technique for developing low permeability sandstone reservoir.

Key words: low permeability pools; horizontal well; formation damage prevention; drilling fluid; completion fluid

低渗透储层一般具有泥质胶结物含量高、毛细管压力高、水敏性强、孔喉细小、渗透性差、结构复杂、非均质严重、常伴有天然裂缝等特点, 在钻井过程中很容易受到外来流体的污染和损害。而采用非套管完井方式完成的井不能采用射孔的方法消除低渗透储层近井地带的污染^[1-3]。目前, 国内外广泛应用较清洁盐水完井液来消除泥饼, 但该方法不能解决非套管完井井段的泥饼堵塞问题, 仍须进行酸洗作业以解除近井地带污染, 但同时也带来了酸洗不彻

底、二次污染及环境保护等一系列问题。目前常用

收稿日期: 2009-11-13; 改回日期: 2010-10-12

基金项目: 国家科技重大专项“低渗油气田高效开发钻井技术”课题四“低渗油气田储层保护技术”(2008ZX05022-004)部分研究成果

作者简介: 李公让(1970—), 男, 山东临沂人, 1992年毕业于华东化工学院有机化工专业, 2001年获石油大学(华东)油气井工程专业硕士学位, 在读博士研究生, 高级工程师, 主要从事钻井液新技术及其应用研究。

联系方式: (0546)8791441, slyhs@vip.sina.com

的钻井液完井液体系,绝大多数是针对常规储层开发的^[1-3]。针对低渗透储层水平井非套管完井储层损害和保护问题,胜利油田深入开展了低渗透砂岩储层钻井完井过程中的伤害机理、保护储层的钻井液、有效解除近井地带伤害的完井液等方面的研究,最终形成了低渗透储层钻井完井液技术,在大牛地气田和胜利油田取得了良好的应用效果,为低渗透油气田开发提供了技术支持。

1 低渗透砂岩储层伤害机理

1.1 固相伤害

针对裸眼水平井的储层损害问题,美国完井工程协会的研究工作揭示了裸眼井损害的实质是过于致密、坚韧的外泥饼堵塞孔隙和筛管孔眼造成的,因此清除泥饼对裸眼井非常必要。该协会和美国Tulsa大学联合研究认为:在清除滤饼后,所有钻井液、完井液都遗留一层极细的剩余固相层,一般厚50~200 μm,覆盖在井壁表面。钻井模拟试验证明,固相进入岩心深约1~4 cm,使井壁表面厚约3 mm地层的渗透率受到严重影响;固相层的影响程度取决于储集层原始渗透率和所含流体及碳氢化合物的相态;微粒迁移、颗粒堵塞是损害非射孔完井储集层的主要方式,井下工具堵塞亦不容忽视^[4]。

采用长岩心进行固相伤害模拟试验,结果见图1。从图1可以看出:低渗透储层孔喉细小,进入储层的颗粒均会对储层产生堵塞伤害;相同浓度的固相颗粒越小,进入储层形成内滤饼的颗粒数量越多,对储层的伤害越大;近井地带污染半径越小,伤害越大。因此低

渗透储层钻井过程中需要控制可以进入储层颗粒的量,尤其是黏土类亚微米颗粒的量,以防止内泥饼的形成。

通过分析水平井非射孔油气层固相损害机理,认为在钻井过程中,钻井液滤饼形成速度快,越能稳定井壁、防漏防卡,并能减少滤液及固相的侵入,但滤饼渗透率低,会对储集层及完井工具造成堵塞,这就要求在钻井期间钻井液要能快速形成滤饼,而完井后内外滤饼要易清除、易溶解、易剥落。应尽可能采用全过程欠平衡钻井以避免固相对储层的污染。

滤饼渗透率一般低于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,远低于储层渗透率^[5],因此非套管完井水平井滤饼的清除就显得尤为重要。酸洗是清除滤饼常用的一种技术手段,但由于存在二次污染、内泥饼难以清除等系列问题,须寻求更有效的技术手段。

1.2 液相伤害

1.2.1 毛细管自吸

在致密砂岩气藏中,初始含水饱和度 S_{wi} 低于束缚水饱和度 S_{wif} 是一种很常见的现象。当 S_{wi} 低于 S_{wif} 时,储层处于亚束缚水状态,当外来流体进入时,就很容易被吸入到毛管孔隙中。Handy等人^[6]建立了毛管自吸液体与时间的关系式:

$$N_{wt}^2 = A^2 \frac{2p_c K_w \phi S_w}{\mu_w} t = kt \quad (1)$$

式中: N_{wt} 为自吸液体的体积, m^3 ; A 为岩心截面积, m^2 ; p_c 为毛管自吸力, Pa ; K_w 为液相渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; ϕ 为孔隙度,无量纲; S_w 为含水饱和度,无量纲; t 为时间,min; μ_w 为液体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

从式(1)可以看出,对于同一岩心和液体毛管自吸液体的量与时间的平方根成正比,其他参数均为常数,因此只要针对某一岩心优选出 k 值最小的流体,则毛管自吸造成的伤害就最小。

1.2.2 水相滞留效应

油(气)和水的界面张力越大,侵入流体的黏度越大,排液需要的时间越长,水锁的伤害就越严重^[7]。在相同的返排压力梯度下,排出的液体越多,含水饱和度越低,气体相对渗透率越高,则液相滞留伤害越小。

常温下驱替压力梯度与含水饱和度的关系如图2所示。从图2可以看出,随着驱替压力梯度的增大,岩心含水饱和度相应减小,其中在相同压力梯度下饱和表面活性剂溶液的岩心其含水饱和度的降低速

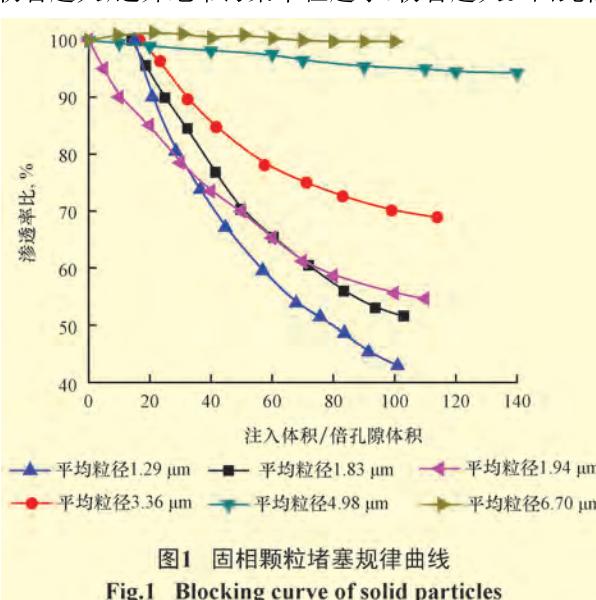


图1 固相颗粒堵塞规律曲线

Fig.1 Blocking curve of solid particles

度大于饱和盐水的岩心,说明加入合适的表面活性剂可以有效降低地层的液相滞留伤害,促进滤液的返排。

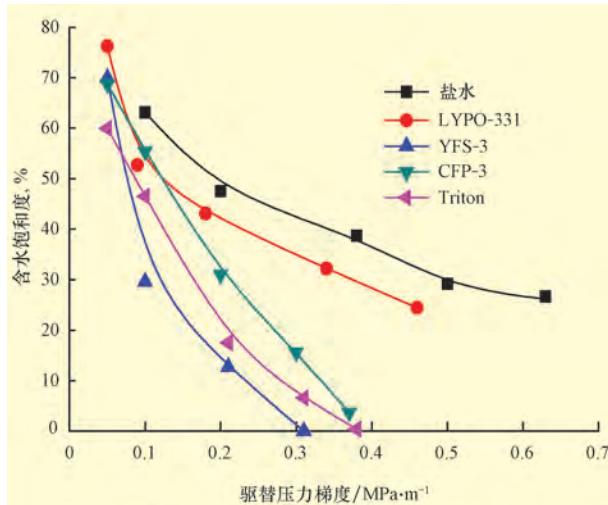


图2 常温下驱替压力梯度与含水饱和度关系
Fig.2 Relation of displacement pressure gradient and water saturation

1.3 敏感性损害

通过评价大牛地气田和胜利油田的3个不同区块的敏感性,认为不同低渗储层区块渗透率不同,矿物组成不同,敏感性的伤害程度也存在较大的差异,但应力敏感性伤害试验表明应力敏感性伤害属永久性伤害,不可逆(见图3),因此在钻井过程中应尽量避免钻井液密度变化和压力激动。

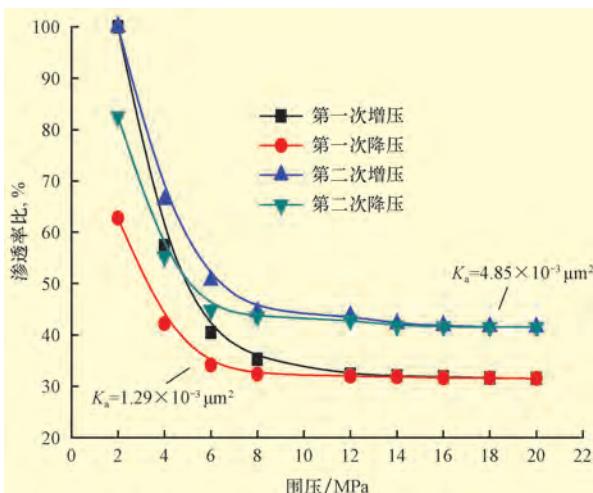


图3 应力敏感性对于岩心渗透率的影响
Fig.3 Effect of stress sensibility on permeability

1.4 压差

为了证实压差对低渗储层的伤害问题,分别在不同压差下,使用无黏土钻井液对岩心损害125 min,测其损害率,结果见表1。

表1 不同压差下损害后岩心渗透率
Table 1 Permeability after contamination of drilling fluids under different pressure difference

岩心号	压差/ MPa	气体渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$		渗透率降低率, %
		损害前	损害后	
5	-0.5	1.124	1.015	10.00
5-1	0	1.280	1.120	12.50
5-2	1.5	1.260	0.950	24.47
5-3	3.0	1.170	0.690	41.22

从表1可看出,井底压差越低,钻井液对储层的伤害越小,最好能实现近平衡或欠平衡钻井。一般水基钻井液密度均大于1.0 kg/L,而无黏土钻井液密度接近1.0 kg/L,如果再配合漂珠或充气,那么就能比较容易地实现近平衡或欠平衡钻进^[8]。

1.5 浸泡时间

根据Poiseuille定律可以推出在压差 Δp 作用下,近井地层滤液侵入深度的计算公式为:

$$L = \left(\frac{t}{\mu\phi}\right)^{\frac{1}{2}} (2\tau^2 K \Delta p + \sigma \tau \sqrt{2K\phi} \cos\theta)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: L 为近井地层液相侵入深度,m; θ 为毛细管壁上的润湿角,(°); t 为排出流体所需要的时间,s; μ 为流体黏度,Pa·s; Δp 为压差,Pa; σ 为流体的表面张力,mN/m; τ 为孔道迂曲度,无量纲; K 为岩石渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

由式(2)可以看出,侵入深度与时间的平方根成正比。浸泡时间越长,低渗储层吸附的液体越多,液体的侵入深度越大,水锁现象越严重,后期的返排压力越高,对储层伤害越严重。因此,应该尽量缩短钻井完井过程中的浸泡时间,最大程度地保护储层。

2 降低水平井钻井伤害对策

通过前面的分析,低渗储层水平井钻井在非套管完井条件下,采用3M原则防止储层损害和保护的序列为:首先是最大化预防原则,采用全过程欠平衡预防钻井伤害,同时尽量降低自吸伤害,低压低渗储层以泡沫钻井液为主;其次是最大化保护原则,在无法实现欠平衡钻井条件下,以近平衡钻井为主,采用无黏土防水锁钻井液;最后是最大化解除原则,在钻井过程储层保护基础上,完井时采用完井与无黏土防水锁钻井液相配合的环保生物完井液解除滤饼堵塞。同时要减少压力激动,缩短作业时间。

2.1 无黏土可降解钻井液性能评价

通过室内试验得知:低渗储层水平井钻井,在非

套管完井时尽可能采用无黏土可降解钻井液,以有利于完井时解除滤饼堵塞^[8-9]。

在室内,分别使用油基钻井液、无黏土钻井液和常规黏土钻井液,对岩心进行污染,然后使用相同的完井液进行处理,用FDS800-6000储层伤害评价装置测其气相渗透率的恢复情况,结果见表2。

表2 不同钻井液污染渗透率恢复试验结果

Table 2 Core flooding experiment results of different drilling fluids contamination

钻井液类型	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$			渗透率恢复率, %
	污染前	污染后	完井液处理后	
油基	1.12	0.36	0.51	45.53
有黏土	1.26	0.67	0.68	53.97
无黏土	1.08	0.81	0.92	85.19

从表2可看出:由于避免了固相对地层的污染,无黏土钻井液对岩心的伤害最小,渗透率恢复率最高,达到85%以上;而油基钻井液可能是由于发生了乳化,造成了更加严重的岩心伤害。

2.2 高效解堵完井液性能评价

根据前面的分析,非射孔完井水平井酸洗存在许多不利因素,为更好地提高滤饼渗透率,解除滤饼堵塞,采用生物酶完井液更有利于滤饼堵塞的解除^[8-9]。笔者评价了优选出的生物酶完井液对无黏土钻井液污染岩心的渗透率恢复率,结果见表3。

表3 生物酶完井液渗透率恢复率

Table 3 Permeability results after bio-enzyme completion operation

完井液类型	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$			渗透率恢复率, %
	污染前	污染后	完井液处理后	
盐水	1.52	1.16	1.01	66.45
生物酶	1.60	1.08	1.52	95.00
生物酶	1.08	0.73	0.98	90.74

从表3可以看出,生物酶完井液的处理效果要比盐水完井液的处理效果好得多,渗透率恢复率基本上都超过90%,而盐水完井液的渗透率恢复率仅为66.45%。

2.3 优选泡沫钻井液性能评价

当泡沫钻井液当量循环密度小于地层压力当量密度时,虽然可以减缓滤液进入地层,但由于地层流体源源不断进入井筒逆流自吸仍不可避免。因此,即使采取欠平衡作业,仍然要采用防水锁可降解的泡沫钻井液基液^[10],优选出了一种自吸速度很小的泡沫钻井液,其配方为:0.5%Foam-AC+0.5%YJB-1+0.4%WP-1+辅助剂。图4为盐水钻井液和所优选

泡沫钻井液自吸液体体积与时间平方根的关系曲线。从图4可以看出,泡沫钻井液的自吸速度很小。

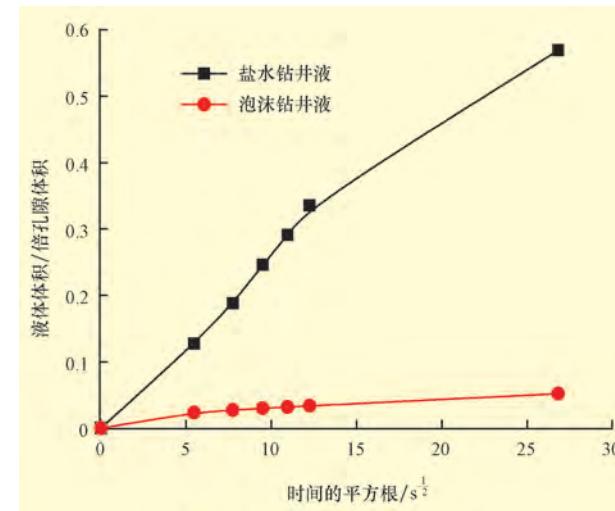


图4 泡沫钻井液自吸试验结果

Fig.4 Imbibiton results of foam based liquid

3 现场应用

目前,保护低渗透储层钻井完井液技术在大牛地气田和胜利油田的17口水平井进行了应用,取得了比较理想的储层保护效果。表4为该技术在大牛地气田部分水平井的应用情况。

3.1 大牛地气田

在2007年之前,大牛地气田的所有井都需要经过压裂才能投产,大15井和大16井的盒2段、盒3段单层组压后试气无阻流量仅为 $2.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。在DF2井水平段钻井施工中,采用无黏土漂珠钻井液,通过采取添加密度减轻剂(漂珠)、补充低密度抑制性胶液、不间断使用四级固控设备、起下钻期间不停离心机等措施,将钻井液密度保持在0.97~1.05 kg/L来降低井底压力,减小钻井液滤液侵入地层的深度。完井时采用生物酶完井液消除滤饼堵塞。该井首次在大牛地气田山1段气层获得自然产能,完井测试表皮系数为-2.3,单井配产 $50\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

3.2 胜利油田

义901区块储层为低孔、低渗透储层,渗透率 $47.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属低渗透油气藏,以往主要采用直井压裂改造的开发方式。由于储层渗透率低,流体渗流能力差,单井产量低,控制储量小。在义901-P1井以前完成的6口井中,除义901-24井日产油20.0 t、义901井初期日产油5.6 t(目前日产油1.1~

表 4 保护低渗储层钻井完井液技术在大牛地气田部分水平井的应用情况

Table 4 Application in parts of horizontal wells in Daniudi Gas Field

井号	水平段位移/m	砂岩段长/m	泥岩段长/m	日产气量/m ³	钻井完井液	完井方式	层位
DF2	897	702	195	25 398	无黏土漂珠钻井液 生物酶完井液	裸眼	山 1 段
DP6	980	960	20	35 698	无黏土钻井液 生物酶完井液	裸眼	山 1 段
DP8	1 485	855	630	7 000(试气)	无黏土钻井液 生物酶完井液	筛管	山 1 段
DP9	754	614	140	12 095	无黏土钻井液 生物酶完井液	筛管	山 1 段
DP11	748	718	30	14 251	无黏土钻井液 生物酶完井液	裸眼	山 1 段
DP12	880	840	40	2 500(试气)	无黏土钻井液 生物酶完井液	筛管	山 1 段
DP14	1 248	1 211	37	15 630	氮气泡沫/无黏土钻井液 生物酶完井液	筛管	盒 1 段

0.1 t)外,其他井日产油不超过2.0 t。义901-P1井在钻井时采用可降解钻井液,完井时采用生物完井液清除滤饼和消除聚合物对地层造成的污染。该井完井测试时自喷,日产油115.8 m³,日产气6 022 m³,单井产量较相邻直井提高5倍以上,解决了裸眼完井近井地带的污染问题,而且采用该技术可以避免压裂施工,既降低了开发成本又缩短了建井周期。

4 结论与建议

1) 采用水平井开发低渗储层,在非套管完井条件下,储层损害都很严重,尤其是固相和液相伤害。在欠平衡钻井条件下,固相伤害可以忽略,但液相伤害仍然十分严重,在钻井时应采用无黏土钻井液并采取防水锁措施。

2) 在低渗储层钻水平井时,首选欠平衡钻井方式,以尽可能降低对储层的污染。

3) 泡沫钻井液体系适用于低渗储层水平井,可以起到保护储层的作用,但在使用时应尽量避开在煤层、碳质泥岩等不稳定井段。

4) 无黏土钻井液和生物酶完井液配合使用,既满足了环境保护和可持续发展的需要,又有利于保护低渗储层,是一项具有很高推广价值的钻井完井液技术。

参 考 文 献

- [1] 赵金洲,薛玉志,李公让.胜利油田钻井过程中低渗油气藏的保护对策[J].中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(3):148-151.
Zhao Jinzhou, Xue Yuzhi, Li Gongrang. Formation damage control for low-permeability reservoir during drilling operation in Shengli Oilfield [J]. Journal of China University of Petroleum,

Edition of Natural Science, 2007, 31(3):148-151.

- [2] 唐玉响,沈建文,王佩平,等.强水敏高孔高渗储层水平井储层保护钻井液技术[J].石油钻探技术,2009,37(4):46-49.
Tang Yuxiang, Shen Jianwen, Wang Peiping, et al. Formation protection drilling fluids suitable for reservoir with high porosity, high permeability and high water sensitivity [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(4):46-49.
- [3] 田冷,何顺利,李秀生,等.低渗透气田砂岩储层应力敏感试井模型研究[J].石油钻探技术,2007,35(6):89-92.
Tian Leng, He Shunli, Li Xiusheng, et al. Study of well test of stress-sensitive sandstone in low permeability gas reservoir [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(6):89-92.
- [4] Lacewell J L, Burnett D B. Correlating good well design, drilling and cleanup practices with high well productivity [R]. SPE 65480, 2000.
- [5] Burton R C, Hodge R M. Key drilling and completion concerns in horizontal wells: the AADE 2003 National Technology Conference, Houston, April 1-3, 2003[C].
- [6] Handy L L. Determination of effective capillary pressures for porous media from imbibition data [R]. SPE 1361, 1960.
- [7] 谢晓永,孟英峰,唐洪明,等.裂缝性低渗砂岩气藏水基钻井液欠平衡钻井储层保护[J].石油钻探技术,2008,36(5):51-53.
Xie Xiaoyong, Meng Yingfeng, Tang Hongming, et al. Underbalanced water based mud to protect fractured tight sandstone gas reservoirs [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(5):51-53.
- [8] 薛玉志,刘宝峰,李公让,等.大牛地气田保护储层钻井完井液技术研究[J].钻井液与完井液,2009,26(3):5-8.
Xue Yuzhi, Liu Baofeng, Li Gongrang, et al. Drill-in fluid technology for reservoir protection in Daniudi Gas Field [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009, 26(3):5-8.
- [9] 郑锋辉,薛玉志,刘宝峰,等.无黏土钻井液及生物完井液在DF2井的应用[J].油田化学,2008,25(4):302-304,324.
Zheng Fenghui, Xue Yuzhi, Liu Baofeng, et al. Non-bentonite drilling fluid and biologic completion fluid used in Well DF2 [J]. Oilfield Chemistry, 2008, 25(4):302-304,324.
- [10] 巢贵业,高春华.大牛地气田保护储层固井技术研究与应用[J].石油钻探技术,2007,35(1):38-40.
Chao Guiye, Gao Chunhua. Study and application of cementing technique to protect reservoir in Daniudi Gas Field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(1):38-40.