

引用格式:徐兵威,王世彬,刘城成.致密低渗底水气藏控水二次加砂压裂技术研究与应用[J].油气藏评价与开发,2022,12(4):698-702.

XU Bingwei, WANG Shibin, LIU chengcheng. Research and application of water-control secondary sanding fracturing technology in tight low permeability bottom water gas reservoir[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4): 698-702.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.04.019

致密低渗底水气藏控水二次加砂压裂技术研究与应用

徐兵威^{1,2},王世彬¹,刘城成¹

(1.西南石油大学,四川 成都 610500;2.中国石化华北油气分公司,河南 郑州 450006)

摘要:针对东胜气田盒1段底水气藏压裂裂缝易沟通下部水层,导致底水快速锥进,水淹气井后无产能,有效建产难度大的技术瓶颈。将遇水固结型支撑剂和二次加砂压裂技术结合应用,在压裂缝底部形成人工遮挡层,在控制裂缝高度的同时有效阻挡气水界面上升,提高气水渗透率比率,降低裂缝内水流阻力,延缓气井见水周期,实现致密低渗底水气藏经济有效开发。控水二次加砂压裂技术东胜气田盒1段底水气藏累计试验应用10口井,施工有效率达90%,相比邻井常规压裂工艺产气量提高60%,液气比降低31.7%,其中JP58-A井测试无阻流量达 $20.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,在实现压裂增产的同时取得较好控水效果。

关键词:二次加砂;控水压裂;遇水固结支撑剂;遮挡层;东胜气田

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Research and application of water-control secondary sanding fracturing technology in tight low permeability bottom water gas reservoir

XU Bingwei^{1,2}, WANG Shibin¹, LIU Chengcheng¹

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. Sinopec North China Oil and Gas Company, Zhengzhou, Henan 450006, China)

Abstract: He-1 reservoir of Dongsheng Gas Field is a bottom water gas reservoir. Fractures are easy to communicate with the bottom water layer, resulting in rapid bottom water coning and there is no productivity after water flooding of gas wells. It is difficult to get effective production. Combined the research and development of water-consolidated proppant with the secondary sanding and high-pressure fracture control technology, the artificial shelter layer is formed at the bottom of the fracture, which effectively prevents the rise of gas-water interface while controlling the fracture height, improves the gas-water permeability ratio, reduces the flow resistance in the fracture, delays the water breakthrough cycle of gas wells, and realizes the economic and effective development of tight low permeability bottom water gas reservoirs. The water-control secondary sanding fracturing technology has been applied in ten wells of the bottom water gas reservoir in He-1 Member of Dongsheng Gas Field. The construction efficiency is 90%. Compared with the adjacent wells fractured by the conventional means, the water production of the application wells is increased by 60%, the liquid-gas ratio is decreased by 31.7%, and the measured open flow capacity of Well-JP58-A is $20.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, which has achieved good water control effect while increase fracturing production.

Keywords: secondary sanding; water-control fracturing; water-consolidated proppant; shelter layer; Dongsheng Gas Field

东胜气田位于鄂尔多斯盆地伊盟北部隆起泊尔
江海子断裂以南,处于天环坳陷、伊陕斜坡与伊盟隆

起3个盆地一级构造单元结合部位^[1],面积980 km²,
控制天然气储量 $6\ 212.24 \times 10^8 \text{ m}^3$,由下至上依次发育

收稿日期:2021-12-17。

第一作者简介:徐兵威(1985—),男,博士,副研究员,主要从事油气藏勘探开发研究工作。地址:河南省郑州市陇海西路199号中国石化华北油气分公司,邮政编码:450006。E-mail:xubw.hbsj@sinopec.com

基金项目:中国石化科技项目“鄂北致密砂岩气藏有效开发及提高采收率技术”(P20065)。

3个主要含气储层盒1段、盒2段和盒3段^[2]。东胜气田主力产气层盒1段储层埋深2 800~3 200 m,岩性以浅灰色含砾粗砂岩、中粗砂岩、浅灰色细砂岩、泥质粉砂岩为主,孔隙度主要分布范围5%~17%,平均孔隙度9.3%;渗透率主要分布范围 $(0.15\sim 5.24)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均渗透率 $0.89\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,总体表现为典型的致密低渗砂岩气藏,单井自然产能低或无自然产能,必须经过储层改造才能实现经济开发^[2-3]。但东胜气田盒1段储层在压裂改造过程中存在以下改造难点:①气田位于鄂尔多斯盆地伊盟北部隆起杭锦旗断阶带,天然气成藏基本地质特征具有过渡带的特点,主力气藏盒1段部分区域底水发育^[3-4];②气田形成过程中及后期经历多期次的地质构造运动,导致区内天然裂缝发育,从而后期压裂改造过程中压裂液滤失大,液体利用效率低,压裂裂缝扩展至天然裂缝后易砂堵;③气水层间遮挡层较薄或无有效遮挡,压裂改造过程中极易沟通水层,同时下部水层易通过纵向天然裂缝沟通上部气层,后期生产过程中下部底水快速锥进,水淹气井后无产能,有效建产难度大。

针对裂缝发育的底水油气藏见水快、产能递减速度大的难点,在强化油气藏精细描述的同时,国内外近年来将转向压裂、调剖暂堵、机械控水等技术引入底水油气藏开发,在矿场试验中取得了部分效果。其中,才博等^[5]提出转向压裂技术,利用分层与控水压裂一体化工艺提高了剩余油的动用程度;何平等^[6]在苏里格气田运用变排量控缝高等技术进行现场试验,取得了一定的控水效果;郝桂宪^[7]采用水力喷射压裂技术,使压后含水下降4.7%,日增油7.24 t,达到了增油控水的目的;赵俊等^[8]利用封堵性绒囊流体在苏里格气田破碎性致密砂岩开展控水压裂,单井平均日产提高10%;晁圣棋等^[9]通过水平井机械化学复合控水工艺开展现场试验,作业后初期含水率下降至94.62%;田绪安、郝晨西、瞿霜等^[10-14]在含水油气藏产水机理、控水对策等方面均有相关探索,并取得了一定的控水增产效果。目前国内外针对常规油气藏控水压裂技术及配套工艺均取得了一定效果,但裂缝型致密砂岩底水气藏由于气水关系复杂,压裂施工易沟通水层,现场应用较少。

东胜气田盒1段底水分布没有统一的气水界面、裂缝发育,常规压裂改造后容易沟通水层,导致底水快速锥进、有效建产难度大。通过二次加砂压裂加入遇水固结型支撑剂,在裂缝下部形成人工遮挡层,

提高气水渗透率比例,在控制裂缝高度的同时有效阻挡气水界面上升,降低裂缝内水流阻力,延缓气井见水周期,实现致密低渗底水气藏经济有效开发。

1 控水二次加砂压裂技术

1.1 控水二次加砂压裂机理

控水二次加砂压裂技术实现控水的方式主要包含固结遮挡层防止底水锥进和二次加砂控制裂缝高度两种手段。压裂作业流程分为两次加砂压裂施工。低排量注入含有遇水固结型支撑剂的携砂液体系,顶替到位后停泵,待支撑剂沉降于裂缝底部后压裂裂缝闭合^[15]。沉降下来的遇水固结型支撑剂在地层压力下形成固化裂缝,从而在第二次压裂施工时在裂缝下部形成阻抗。当第二批支撑剂进入裂缝后,垂直向下的延伸受到阻碍,从而迫使裂缝向上及横向扩展,防止裂缝向下延伸,同时增加裂缝宽度,实现有效产层内布置更多支撑剂(图1),提高裂缝导流能力,降低油气流动阻力^[16-17]。

1.2 控水二次加砂压裂技术优势

在致密低渗底水砂岩气藏的储层改造过程中,控水二次加砂压裂技术相比常规加砂压裂技术的技术优势主要体现在以下几个方面:

- 1) 遇水固结型支撑剂在压裂裂缝下部固化形成人工遮挡层,提高气水渗透率比率,阻挡气水界面上升,延缓气井见水周期^[18]。
- 2) 沉降于裂缝下部的遇水固结型支撑剂固化形成阻抗效应,增加缝内净压力,控制压裂裂缝向下延伸,防止沟通水层,同时增加裂缝向上扩展高度及裂缝横向宽度,提高有效储层内裂缝导流能力,降低

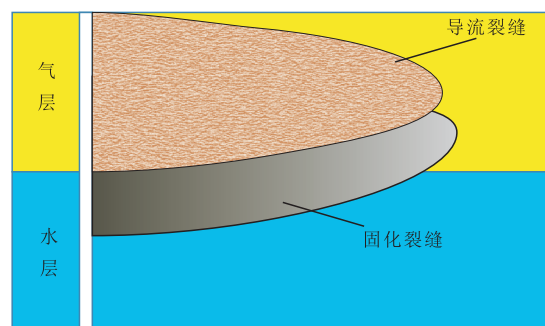


图1 控水二次加砂压裂裂缝示意图
Fig. 1 Fracture of water-control secondary sanding fracturing

天然气流动阻力。

3) 遇水固结型支撑剂主要为小粒径陶粒,在首次加入的支撑剂进入地层后能够有效封堵天然裂缝系统,减小支撑剂填充下半裂缝比例,提高液体和支撑剂的利用效率,增加有效裂缝长度及导流能力,降低二次加砂过程中的砂堵风险,提高施工成功率及压裂增产有效期。

2 遇水固结型支撑剂性能评价

控水二次加砂压裂过程中使用的遇水固结型支撑剂在施工过程中起着关键作用,遇水固结型支撑剂性能直接影响到储层改造成败和压后效果。遇水固结型支撑剂控水的基本原理是在陶粒支撑剂表面覆上遇水固结、见油气溶解的膜,当支撑剂在压裂裂缝中遇到地层水一定时间后变黏,包裹在支撑剂的周围并固结支撑剂间的孔隙,遇到油气后自动降解,实现水层固结、油气层流动^[19-20]。参考石油天然气行业标准《压裂支撑剂充填层短期导流能力评价推荐方法:SY/T 6302—2009》,在开展遇水固结型支撑剂性能测试的情况下,重点针对影响堵水效果和油气流动性的固结状态测试及导流能力开展测试研究。

2.1 固结状态测定

遇水固结型支撑剂的固结状态直接关系到能否较好地封堵水层及保证油气有效流动,达到封堵水层而油气层流动的效果。因此,室内测试地层温度条件下,遇水固结型支撑剂在地层水及煤油(代替原

油和天然气)中的固结状态。

从室内固结状态测定看出,遇水固结型支撑剂在地层水中2 h后开始固结,固结7 d后仍能保持较好的固结状态(图2);遇水固结型支撑剂在地层温度下注入煤油1 h开始溶解,24 h后完全溶解(图3)。

2.2 流动性能测试

不同流体在遇水固结型支撑剂中的流动性能直接影响是否有效封固水层,及油气是否流动。依据SY/T 6302—2009,室内采用裂缝导流能力测试分析实验仪测定地层水和煤油在支撑剂充填层的导流能力和流动压力梯度,将40/70目遇水固结型支撑剂按照3 kg/m²的铺砂浓度铺置在API(美国石油学会)标准导流室内,模拟评价在东胜气田储层闭合压力45 MPa下遇水固结型支撑剂的流动性能。

由实验结果可以看出(图4、图5),遇水固结型支撑剂初始导流能力5 μm²·cm,地层水驱替50 h后驱替压力最高上升0.21 MPa,导流能力下降至0.35 μm²·cm,导流能力下降93%,遇水固结型支撑剂实现了对地层水的有效封堵。注入煤油后驱替压力下降,导流能力最高恢复至4.8 μm²·cm,遇水固结型支撑剂保证了油气的有效流动。再次注入地层水后,驱替压力持续上升,导流能力下降至0.41 μm²·cm,表明遇水固结型支撑剂能够实现对地层水的二次有效封堵。通过遇水固结型支撑剂的流动性能测试可以看出,遇水固结型支撑剂形成的遮挡层能够有效提高油(气)水渗透率比率,阻挡油(气)水界面上升,防止底水锥进淹井。

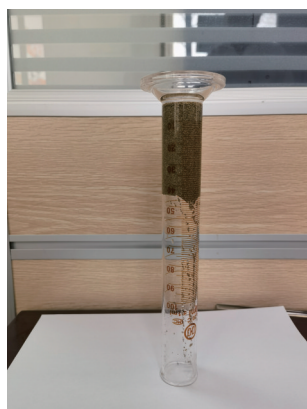


图2 遇水固结型支撑剂在地层水中固结7 d状态
Fig. 2 Consolidation state of consolidation proppant in formation water after 7 days



图3 遇水固结型支撑剂在煤油中24 h溶解
Fig. 3 Consolidated proppant dissolved in kerosene after 24 hours

3 现场应用

东胜气田盒1段底水气藏采用控水二次加砂压裂技术实施10口井,施工成功率100%,有效率90%,平均日产气量 $4.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,平均液气比 $4.2 \text{ m}^3/10^4 \text{ m}^3$,相比邻井常规压裂工艺产气量提高60%,液气比降低31.7%。以JP58-A井为例介绍控水二次加砂压裂技术的设计思路、施工流程及压后效果。JP58-A井是东胜气田盒1段气层的一口开发水平井,垂深2 851 m,水平段长1 050 m,加权全烃净增值35.3%,岩性主要为浅灰色中砂岩和细砂岩。依据导眼垂向测井显示,盒1段气层下部底水发育,气水层间存在6 m的砂质泥岩隔层,常规压裂工艺易沟通下部水层。因此,采用控水二次加砂压裂技术控制裂缝高度,同时采用遇水固结型支撑剂在裂缝下部形成人工遮挡层,防止压裂裂缝向下延伸沟通水层。

结合JP58-A井水平段地质显示分9段压裂施工(图6),每段控水二次加砂压裂分2次压裂施工,首次压裂施工注入方案设计的40/70目遇水固结型支

撑剂,加砂方式采用2~3个长段塞方式,压裂加砂砂比7%~21%。首次加砂压裂顶替到位后,结合井口压力情况停泵20~30 min,待支撑剂在裂缝中沉降并形成滤饼后开始二次主加砂压裂施工。二次主加砂压裂按施工方案设计砂量注入20/40目陶粒支撑剂,采用阶梯上升方式加砂。

JP58-A井盒1段气层采用控水二次加砂压裂施工累计泵入压裂液 $2\,472.9 \text{ m}^3$,注入40/70目遇水固结型支撑剂 44.3 m^3 、20/40目陶粒支撑剂 242.7 m^3 ,施工排量为 $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$,施工压力为 $27.5 \sim 51.0 \text{ MPa}$ 。压裂施工后依次采用3,5,7,10 mm油嘴(逐渐放大的方式)控压返排,在防止地层出砂情况下连续排液,实现填砂储层裂缝逐步闭合,保持裂缝有效导流能力。现场压裂施工后第3 d见气,井口稳定气产量为 $5.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,测试无阻流量为 $20.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,平均日产液量为 20.5 m^3 ,相比同层位邻近日产液量下降43%,取得了较好的控水增气效果。

4 结论及认识

1) 控水二次加砂压裂技术可以有效控制压裂裂缝向下延伸,防止沟通水层,同时提高有效储层内的裂缝导流能力,降低天然气流动阻力。

2) 遇水固结型支撑剂在水驱过程中导流能力下降达93%,能够在压裂裂缝下部形成人工遮挡层,注入煤油后导流能力恢复率达96%,能有效提高气水渗透率比率,阻挡气水界面上升,延缓气井见水周期。

3) 控水二次加砂压裂技术通过在东胜气田盒1段底水气藏现场10口井的试验表明,该技术压裂施工井相比邻井常规压裂工艺产气量提高60%,液气比降低达31.7%,能够提高储层改造效果,降低致密低渗底水气藏的产水率。

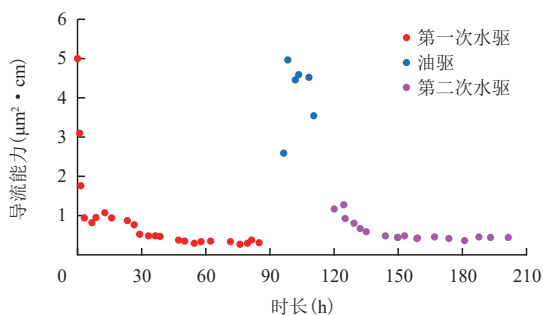


图4 遇水固结型支撑剂的不同流体导流能力曲线
Fig. 4 Different flow conductivity curves of water-consolidated proppant

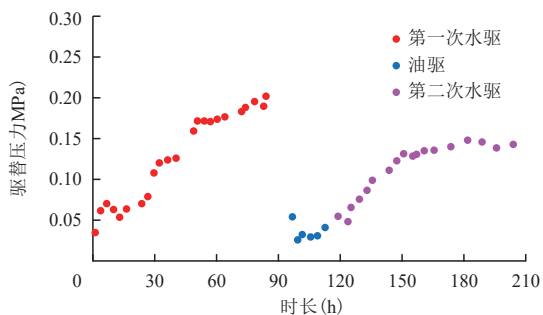


图5 遇水固结型支撑剂的不同流体驱替压力曲线
Fig. 5 Different fluid displacement pressure curves of water-consolidated proppant

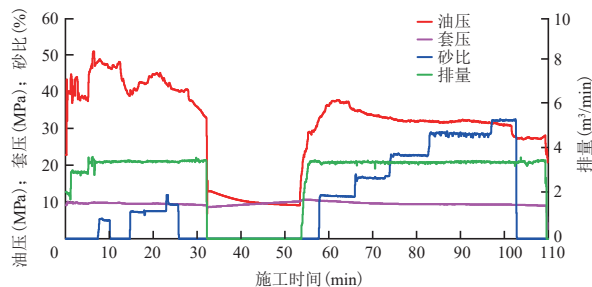


图6 JP58-A井第3段控水二次加砂压裂施工曲线
Fig. 6 Water control secondary sand fracturing construction curve of 3rd stage of Well-JP58-A

参考文献

- [1] 何发岐,王付斌,张威,等.鄂尔多斯盆地北缘勘探思路转变与天然气领域重大突破[J].中国石油勘探,2020,25(6):39-49.
HE Faqi, WANG Fubin, ZHANG Wei, et al. Transformation of exploration ideas and major breakthrough in natural gas discovery in the northern margin of the Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(6): 39-49.
- [2] 李良,张威,齐荣,等.连续成藏与非连续成藏过渡带上的气藏分布特征—以鄂尔多斯盆地北部东胜气田为例[M].北京:石油工业出版社,2021.
LI Liang, ZHANG Wei, QI Rong, et al. Distribution characteristics of gas reservoirs in transition zones of continuous and discontinuous accumulations: A case study of Dongsheng gas field in northern Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021.
- [3] 王周红,王东辉.东胜气田储层特征研究[J].天然气技术与经济,2014,8(5):9-12.
WANG Zhouhong, WANG Donghui. Reservoir characteristics in Dongsheng Gasfield, Ordos Basin[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2014, 8(5): 9-12.
- [4] 袁勇.东胜气田锦58井区盒1沉积相描述及储层分类评价[J].中国石油石化,2017,(9):32-33.
YUAN Yong. Sedimentary facies description and reservoir classification evaluation of He1 in Jin 58 well block of Dongsheng gas field[J]. China Petrochem, 2017, (9): 32-33.
- [5] 才博,邱晓惠,王欣,等.利用分层与控水压裂一体化工艺提高剩余油动用程度研究[J].油气井测试,2013,22(1):61-64.
CAI Bo, QIU Xiaohui, WANG Xin, et al. Study on separate layer fracturing integrated with water control technology in low porosity and low permeability multilayer reservoir[J]. Well Testing, 2013, 22(1): 61-64.
- [6] 何平,石强,李达,等.苏里格气田西区控水压裂技术研究及应用[J].石油化工应用,2013,32(3):20-23.
HE Ping, SHI Qiang, LI Da, et al. Research and application of water control fracturing technology in Sue's west gas field[J]. Petrochemical Industry Application, 2013, 32(3): 20-23.
- [7] 郝桂宪.不动管柱水力喷射控水压裂探索与实践[J].化工管理,2017,(21):215.
HAO Guixian. Exploration and practice of hydraulic jet control hydraulic fracturing with unfixed column[J]. Chemical Enterprise Management, 2017, (21): 215.
- [8] 赵俊,杨生文,孙泽宇,等.苏里格深部煤系致密气储层缝囊流体控水压裂[J].石油钻采工艺,2020,42(5):647-651.
ZHAO Jun, YANG Shengwen, SUN Zening, et al. Applying fuzzy-ball fluid to the water control fracturing in deepcoal-measure tight gas reservoirs in Sulige[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(5): 647-651.
- [9] 晁圣棋,邹明华,张艳辉,等.水平井机械化学复合控水工艺现场试验研究[J].石油矿场机械,2021,50(6):21-26.
CHAO Shengqi, ZOU Minghua, ZHANG Yanhui, et al. Field research on combination water control technology of horizontal well[J]. Oil Field Equipment, 2021, 50(6): 21-26.
- [10] 田绪安,杨程,李宇,等.临兴气田产水机理及控水对策研究[J].山东化工,2021,50(23):123-124.
TIAN Xu'an, YANG Cheng, LI Yu, et al. Study on water production mechanism and water control countermeasures of Linxing Gas Field[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(23): 123-124.
- [11] 郝晨西,杜志栋,张嵩.致密砂岩气藏控水压裂工艺效果分析及应用[J].辽宁化工,2021,50(10):1548-1550.
HAO Chenxi, DU Zhidong, ZHANG Song. Effect Analysis and Application of Water Control Fracturing Technology in Tight Sandstone Gas Reservoirs[J]. Liaoning Chemical Industry, 2021, 50(10): 1548-1550.
- [12] 冯兴武.双河油田高含水开发后期薄互层控水压裂技术研究[J].石油地质与工程,2019,33(5):107-111.
FENG Xingwu. Thin interlayer-controlled water fracturing technology in the late stage of high water-cut development of Shuanghe oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2019, 33(5): 107-111.
- [13] 谷文彬,裴玉彬,赵安军,等.人工隔层技术在控缝高压裂井中的应用[J].石油钻采工艺,2017,39(5):646-651.
GU Wenbin, PEI Yubin, ZHAO Anjun, et al. Application of artificial barrier technology to fracture height control in fracturing wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(5): 646-651.
- [14] 瞿霜. TN 气田水侵特征与控水稳气技术研究[D].成都:西南石油大学,2019.
QU Shuang. Study on water invasion characteristics and water control and gas stabilization technology of TN gas field[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2020.
- [15] 申贝贝,何青,陈付虎,等.东胜气田压裂施工排量优化研究[J].油气藏评价与开发,2014,4(2):50-54.
SHEN Beibei, HE Qing, CHEN Fuhu, et al. Research on construction displacement optimization by fracturing in Dongsheng gas field[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2014, 4(2): 50-54.
- [16] 刘力铭,郭建春,卢聪,等.二次加砂压裂技术在樊131区块樊134-1井的应用[J].油气地质与采收率,2014,21(1):107-110.
LIU Liming, GUO Jianchun, LU Cong, et al. Application for secondary sand fracturing technology in well Fan134-1, Fan131 block[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1): 107-110.
- [17] 王宇宾,刘建伟.二次加砂压裂技术研究与实践[J].石油钻采工艺,2005,27(5):81-84.
WANG Yubin, LIU Jianwei. Research and practice of secondary sand fracturing technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(5): 81-84.
- [18] 张兴国,田世澄,陈丛林,等.人工夹层的抑制水锥作用的研究[J].现代地质,2002,16(1):83-87.
ZHANG Xingguo, TIAN Shicheng, CHEN Conglin, et al. Function of man-made barrier on bottom-water coning[J]. Geoscience, 2002, 16(1): 83-87.
- [19] 范凤英,韩伟,郭东华,等.化学凝胶隔板阻断底水锥进矿场试验[J].钻采工艺,2003,26(4):86-88.
FAN Fengying, HAN Wei, GUO Donghua, et al. Field test of shutting off bottom water coning by chemical gel plate[J]. Drilling & Production Technology, 2003, 26(4): 86-88.
- [20] 杨科峰,马新仿,张士诚,等.凝胶作为压裂人工隔板材料的实验研究[J].油田化学,2011,28(1):24-27.
YANG Kefeng, MA Xinfang, ZHANG Shicheng, et al. Laboratory research on gel as fracturing artificial barrier material[J]. Oilfield Chemistry, 2011, 28(1): 24-27.

(编辑 尹淑容)