

# 测试压裂分析技术在渤海 B 油田的应用

张彬奇

(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300452)

**摘要:**测试压裂分析技术是水力压裂施工前获取储层物性参数和分析压裂液性质的手段,是压裂施工顺利进行的技术保证。结合渤海某油田沙河街油藏压裂工程,介绍了测试压裂应用过程和理论基础,并简单介绍几种求取地层闭合压力的数学方法。闭合压力是压裂施工关键参数之一,不同数学计算方法推导出的闭合压力不尽相同,现场压裂工程师要根据实际测试结果选取可靠的数值。压降曲线拟合是在模型中反推出地层关键参数的方法,拟合完毕即得到针对施工地层的压裂模型,在此基础上进行主压裂设计和裂缝预测是较为准确的,以此进行施工也是安全的。

**关键词:**高压低渗油藏;水力压裂;测试压裂;挤注测试;裂缝闭合压力

**中图分类号:**TE242 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2017)06-0033-05

**Application of Mini-frac Analytical Technique in B Oilfield of Bohai/ZHANG Bin-qi** (CNOOC China Limited, Tianjin Branch, Tianjin 300452, China)

**Abstract:** The mini-frac analytical technique is a means of obtaining the reservoir physical parameters and the analysis on fracturing fluid properties before the hydraulic fracturing construction and is also the technical assurance of smooth fracturing construction. This paper introduces the application process and theoretical basis of the test fracturing from the field construction work and briefly introduces several mathematical methods to find the formation closure pressure. Closure pressure is one of the key parameters of fracturing construction, which are not the same for being derived from different mathematical methods; the reliable values should be selected according to the actual test results. The pressure drop curve fitting is a method to reversely calculate the key formation parameters in the model. After fitting, the fracturing model for the construction stratum is obtained. On this basis, the main fracturing design and the fracture prediction are relatively accurate, the construction is also safe.

**Key words:** high pressure and low permeability reservoir; hydraulic fracturing; test-frac; squeeze injection test; fracture closure pressure

海上压裂施工,一是受平台甲板面积限制,大型设备无法摆放,一般都由压裂船完成压裂施工;二是施工过程中若出现提前脱砂等井下复杂情况,现场处理能力有限,一旦发生事故,损失较大。因此,施工程序必须依照实际情况而定,地层参数要尽量准确,过程控制也要严格,才能避免提前脱砂或是砂埋钻具的复杂情况发生。测试压裂的目的就是准确获取地层参数的方法,保证施工的安全避免复杂情况的发生。以渤海某油田沙河街油藏压裂为例,介绍测试压裂过程和软件模型。

## 1 测试压裂分析理论基础

测试压裂就是在主压裂施工前进行的小规模压裂,只是胶液中不加支撑剂,泵入速度采用最大设计泵排量。施工过程是将胶联液泵入地层后立即停

泵,观察压降曲线,并做数值分析,以此得到关键地层数据和工程数据,即管柱水力摩阻、近井眼摩阻、地层破裂压力、裂缝闭合压力、胶液造缝效率和胶液滤失系数等。根据测试结果计算出前置液量、携砂液量、加砂量,并制订相应的工艺措施等。

### 1.1 测试压裂的意义

测试压裂是水力压裂数字化的基础,是确认储层能否进行压裂施工的重要手段,对于水力压裂施工具有重要的意义。因为测试压裂能够得到一系列数值,如破裂压力值。而有了这些数值,就能够有效地降低以下风险:(1)前置液过少造成提前脱砂;(2)前置液过多造成部分裂缝无充填剂的工程浪费。

### 1.2 测试压裂的内容

测试压裂分为2步:盐水挤注测试和胶液挤注测试。

收稿日期:2016-08-08;修回日期:2017-02-14

基金项目:国家科技重大专项“海上稠油油田高效开发示范工程”(编号:2011ZX05057)

作者简介:张彬奇,男,汉族,1979年生,从事海洋石油钻完井技术和管理工作的天津塘沽区渤海石油路海洋石油大厦B座,zhangbq2@cnooc.com.cn。

### 1.2.1 盐水挤注测试

盐水挤注测试包括3部分:阶梯升排量测试和阶梯降排量测试以及平衡测试。

阶梯升排量测试中,通过提高泵排量直到地层被压开后再提高1个或2个泵排量阶梯,如图1所示,通过排量与压力的关系可以确定地层破裂压力和裂缝延伸压力(略大于破裂压力0.34~1.38 MPa)。

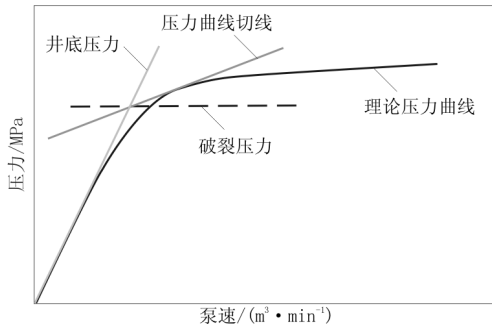


图1 阶梯升排量测试

阶梯降排量测试主要用于确定近井眼摩阻的情况。通过逐渐降低泵速,观察记录泵压变化,可以确定近井眼摩阻大小和类型。近井眼摩阻分为炮眼主导型和近井眼裂缝弯曲型。

当排量、压力降低到一定程度便可进行平衡测试,用于确定裂缝的闭合压力。平衡测试要求压裂工程师根据地层性质确定出测试排量,才能准确得出裂缝闭合压力。另外裂缝闭合压力还可以根据挤注测试后压降曲线拟合函数,用不同的方法线性化来推断裂缝闭合压力大小。如压降函数时间平方根方法、log-log方法、G函数方法等。

在平衡测试中,一部分液体以高泵速注入,以打开裂缝。然后降低泵速至泵入量等于漏失量,此时裂缝会慢慢闭合,泵注压力不变,当裂缝闭合后泵入液体向储层基质渗漏,渗流阻力大,泵压会上涨,记录压力曲线拐点值即可计算出地层闭合压力。

### 1.2.2 胶液挤注测试

胶液挤注测试包括注入、停泵与停泵观测压力降等部分。注入测试中泵入一定体积的压裂胶液,结束后停泵观测压降曲线,得出拟合函数。再对拟合函数取对数函数、微分函数和对微分函数再次微分得G-函数等数学方法确认裂缝闭合压力,计算压裂液滤失系数、压裂液效率、扬氏模量和液体效率。

根据地层特点和挤注测试压降曲线,选取合适的裂缝模型,如PKN、KGD或者RAD模型。在最佳无因次裂缝导流能力计算缝长,缝宽和缝高。

这些数值的计算都由软件来完成,目前现场常用的压裂软件有FracPro PT和FracCADE等软件。这些软件除了对上述参数的分析外,还可以用于推测自然裂缝等非理想裂缝形态的存在,并且修正应力场等功能。

### 1.3 测试压裂数据处理技术

渤海某油田压裂使用FracCADE软件。此软件可以对测井资料进行初步分析,主要是声波测井和伽玛曲线。另外,为准确获取地层资料,除测试期间适当延长压降观测时间之外,综合比较施工井邻井资料也是重要的一步。

测试压裂之前要通过对本地区或者压裂层位进行岩心试验或者通过测井资料分析地层参数来确定初步的压裂施工规模和做初步的压裂施工设计。根据测井资料确定的地层参数的流程如图2所示。

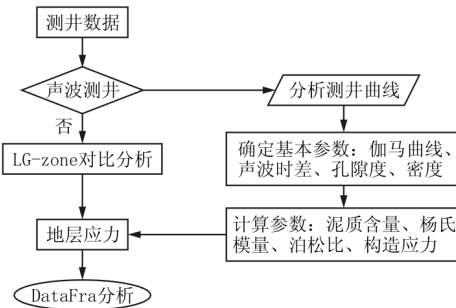


图2 测试压裂数据处理流程图

### 1.4 测试压裂技术施工程序

测试压裂施工程序比较简单,在阶梯升/注入阶段要进行支撑剂段塞测试。所谓的携砂段塞是一个或几个较短的含砂阶段加入到阶梯升/注入压裂稳定注入阶段,主要目的在于检测地层对于支撑剂的敏感性大小,判断支撑剂在裂缝中发挥作用的大小,如果压力上升比较大,那么就难以实现主压裂的高砂比;反之则容易实现主压裂的高砂比。通常每个携砂段塞的用砂量为1~2 m<sup>3</sup>,其砂比变化约为120~240 kg/m<sup>3</sup>。后续胶液中不用添加支撑剂,主要程序分几个步骤完成。表1是渤海B油田测试压裂的施工程序。

## 2 测试压裂分析在渤海B油田的应用

测试压裂本身涉及一部分费用,但是这部分费用将有利于提高设计的准确性,降低施工风险,所以海上油田压裂施工一般不会省去此工艺。尤其是对于地层资料少的施工层段,测试压裂必不可少。

表1 测试压裂技术的程序

阶段名称	泵速/(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	液体	阶段液量/m <sup>3</sup>	说明
替液	0.3	2% KCl		
阶梯升/注入	3.2	2% KCl	20	支撑剂段塞
阶梯降测试	3.2~0	2% KCl	10	至少大于3次降排量
平衡测试	0.3	2% KCl	5	
关井	0			
注入胶液	3.2	YF140HTD	25	
顶替	3.2	WF140		液量取决于实际管柱结构
关井测压降	0			

## 2.1 渤海B油田地质及工程概况

渤海海域是目前我国海洋油气产量的重要海域。渤海湾盆地构造体系有网状、帚状和雁列等不同级序多种类型的体系。B油田为河流相沉积,凹陷古近系沙河街组砂岩为中成岩期—晚成岩期,砂岩颗粒小,存在高温及异常高压,咸水低温钙质沉淀胶结,溶蚀了大量粉砂岩储层中矿物成分,产生了次生孔隙(岩屑、长石与碳酸盐岩胶结物等溶蚀形成)和原生粒间孔隙(受异常压力保护产生),在深埋条件下其特征有:粒度小(粉砂)、埋藏深(超过3000 m)、成岩演化程度高、物性差、压力系数高的特征。因此,测试压裂分析对准确地进行压裂设计和现场压裂施工尤为重要。以本油田CX井为例,基本数据为:射孔段4076.8~4079.8 m,最大井斜25.1°,射孔枪外径5 in(1 in=25.4 mm),孔密度为40孔/m,相位45°/135°双螺旋;射孔弹为四川692厂的HMX型,药量25 g,穿深462 mm,孔径9.9 mm。

## 2.2 测试压裂施工过程

CX井加砂压裂之前进行了测试压裂施工作业,测试曲线见图3和图4。图3中1~1001 s是盐水挤注测试阶段泵速为2 m<sup>3</sup>/min时泵压为69 MPa,环空压力在20 MPa附近波动;1001~6001 s是泵速为0时的泵压和环空压力的压降曲线;6001~6051 s是胶联液挤注测试阶段泵速为3 m<sup>3</sup>/min时泵压和环空压力的变化;6051~10001 s为停泵后泵压和环空压力的压降曲线;10001~11001 s为关闭地面阀门截断钻杆/油管后泵压和环空压力曲线。图4中包含3种测试的挤注测试曲线:阶梯升测试、阶梯降测试和平衡测试;即通过阶梯升排量至测试排量,然后阶梯降至停泵后的阶梯降测试曲线,停泵后泵压及环空压力变化曲线为平衡测试曲线。

## 2.3 近井筒摩阻分析与计算

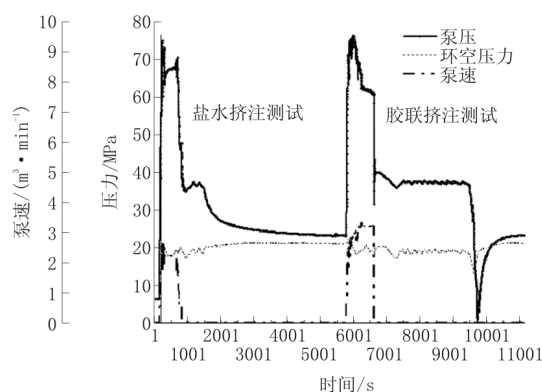


图3 CX井测试压裂施工曲线图

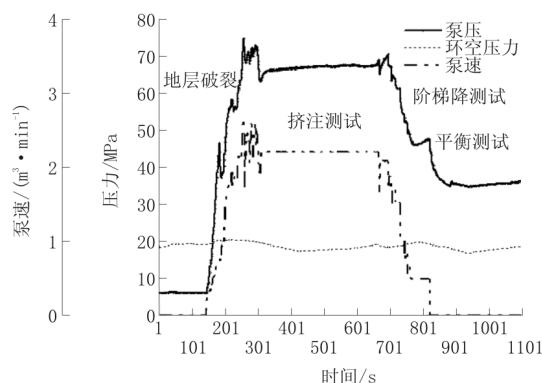


图4 CX井测试压裂分析曲线图

本井图3的测试数据利用FracCADE软件对地层各个参数进行分析,其中利用以下理论知识对近井筒摩阻进行分析。

通过阶梯降测试中相应泵速下的压力与瞬间停泵时压力之差可以得出管柱总摩阻,管柱总摩阻又等于近井筒摩阻与管线流体摩阻之和,近井筒摩阻等于弯曲摩阻与射孔孔眼摩阻之和。

所以,首先从测试压裂的数据中准确地提取瞬间停泵时的压力求得管柱总摩阻,再利用式(1)、式(2)求得管线流体摩阻和射孔孔眼摩阻,从而,近井筒摩阻就等于管柱总摩阻与管线流体摩阻之差,弯曲摩阻等于近井筒摩阻与射孔孔眼摩阻之差。分析结果见图5。

DataFrac软件管线流体摩阻计算:

$$\Delta P_{\text{pipe fric}} = fH(Q/A)^{1.1-1.7} \quad (1)$$

式中: $\Delta P_{\text{pipe fric}}$ ——管线流体摩阻,MPa; $f$ ——摩擦系数, $f$ 根据图板查出具体数值; $H$ ——井深,m; $Q$ ——注入排量,m<sup>3</sup>/min; $A$ ——油管内截面积,in<sup>2</sup>。

炮眼摩阻计算:

$$P_{\text{pf}} = \frac{375\rho Q^2}{n^2 d^4} \times 10^5 \quad (2)$$

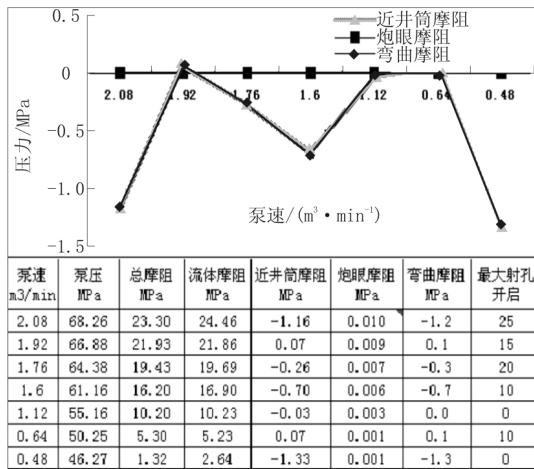


图5 近井筒摩阻分析结果

式中： $P_{pt}$ ——炮眼摩阻， $10^{-1}$  MPa； $\rho$ ——压裂液密度， $kg/m^3$ ； $Q$ ——注入排量， $m^3/min$ ； $n$ ——射孔炮眼数量； $d$ ——炮眼平均直径， $mm$ ； $ISIP$ ——停泵瞬间的压力， $MPa$ 。

### 2.4 确定裂缝闭合压力

确定裂缝的闭合压力常有2种方法，一种是平衡测试试验法，另一种是工程计算法求取。平衡测试试验法是在挤注测试阶梯降排量时推测出合适的排量使得泵入的液体量等于裂缝中液体的滤失量，在这种状态下裂缝会慢慢闭合，当裂缝闭合后，泵入的液量将向基岩滤失，此时渗流阻力会突然增大，表现在压力曲线上即为泵压曲线走平一段时间后突然上升，此上升点所对应的压力即为裂缝的闭合压力。此种方法虽然简单，但实际操作很困难，压裂工程师要对地层很了解才能找到合适的排量使得泵入的液量等于裂缝滤失的液量。现场大多是通过工程计算得出裂缝的闭合压力。

CX井采用工程计算法求取闭合压力如图6所示。图3中的测试数据先对泵压 $P$ 和时间 $T$ 曲线进行拟合得到数学函数，再将此函数线性化如图6中实线所示，并从线性化曲线上找到拐点所对应的压力值即为裂缝的闭合压力。从图3测试压裂曲线中提取瞬时降泵速的压力 $P_{st}$ 为81.00 MPa，瞬间停泵压力 $ISIP$ 为75.81 MPa，平衡压力 $P_{eq}$ 为76.58 MPa，从而拟合出裂缝闭合压力为75.81 MPa。

### 2.5 G函数分析法完善压力降曲线分析

流体滤失更好的表达方法是Castillo(1987年)常采用的 $G$ 曲线，CX井分析如图7。测试压裂停泵以后，初始裂缝穿透的扩展会增加液体滤失的速度，

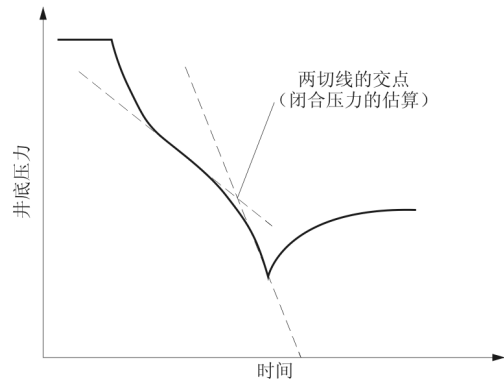
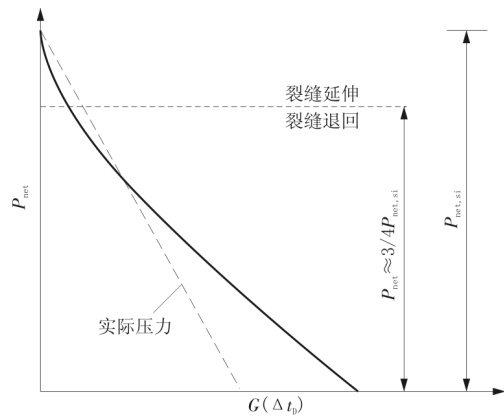


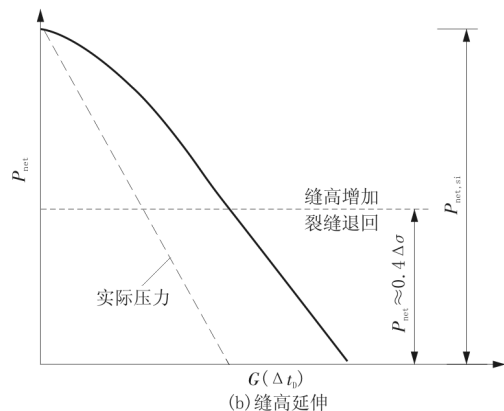
图6 闭合压力估算图

相应地会使 $G$ 图的初始斜率变得陡峭，随后在撤退中压降速率的减少，主要由于裂缝面积的减少或因在裂缝端部区或相对较高的液体损失的消除。结果在泵注期间裂缝穿透变化在 $G$ 图上一凹向剖面，其斜率 $m_c$ 是连续变化的。对3个裂缝几何模型，该条件发生在扩展和退回传递附近。大量的数值模拟表明，当井筒静压力达到停泵时静压力 $P_{net, si}$ 值大约3/4时这种条件产生：

$$P_{net}/P_{net, si} = 3/4 \quad (3)$$



(a) 裂缝扩展



(b) 缝高延伸

图7 在关井期间对于非理想裂缝特征条件下 $G$ 图动态概念

G图的斜率可被设计为 $m_{3/4}$ 且由3/4点来估算。此斜率被用于消除停泵期间裂缝穿透变化的影响。在3/4点选择斜率的正确性由Pater等(1996年)根据实验方法建立的。利用FracCADE软件分析得出CX井的液体滤失效率为0.27。

## 2.6 主压裂设计

利用以上得出的数据,选择合适的压裂模型应用FracCADE软件再次获取地层相关参数,初步模拟施工参数,优化施工曲线,在最佳无因次裂缝导流能力下计算裂缝的缝长缝宽,确定主压裂加砂多少以及施工规模,做主压裂施工设计,如表2所示。

表2 CX井压裂施工设计

阶段	泵速/( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	液体类型	线性液体/ $\text{m}^3$	充填剂/kg	混砂液/ $\text{m}^3$	添加剂/( $\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$ )
前置液	3.2	YF140HTD	159.0	0	159.0	1.1
1PPA	3.2	YF140HTD	20.8	2500	21.6	1.1
2PPA	3.2	YF140HTD	31.2	7500	33.6	1.0
3PPA	3.2	YF140HTD	41.6	15000	46.3	1.6
4PPA	3.2	YF140HTD	31.2	15000	35.9	2.0
5PPA	3.2	YF140HTD	16.7	10000	19.8	2.6
顶替液	3.2	WF140	17.7	0	17.7	3.0

(1)通过支撑剂敏感性测试,发现支撑剂在该井储层效果明显,储层对其承受能力强,作业可使用较高砂比,5PPA为此井的最高砂比设计;

(2)为降低作业压力,主压裂前置液期间可放入支撑剂段塞打磨孔眼;

(3)储层具有低渗透性,物性差的特点,不具有好的遮挡层,主压裂应使用低粘清洁压裂液,既能减少对储层的伤害,又能对缝高进行控制;

(4)在27%的低压裂效率情况下,主压裂设计应采用 $3.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 左右的较大排量,来达到液体滤失减少,造缝效率提升的效果;

(5)在83.36 MPa的破裂压力,0.022 MPa/m的压力梯度, $3.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 的作业排量条件下,井口压力预计约为79.9 MPa,因此,选择105 MPa井口,使用3台2000型主压车进行作业。

## 3 结论

(1)本次CX井通过挤注测试中的阶梯升排量测试可以确认地层的破裂压力为83.36 MPa,压力梯度为0.022 MPa/m。随后进行盐水顶替阶段确定管柱水力摩阻、近井筒摩阻、裂缝闭合压力,通过用压裂软件进行压力降曲线分析并用平方根分析法和

G函数分析法加以完善,准确确定地层岩石性质参数。随后结合本井储层特性及预计施工压力,确定最终的压裂施工参数。从本口井压裂施工结果来看,压裂测试分析技术取得的参数准确可靠,施工过程中诸多参数与设计相符,施工过程顺利,为该油田同层位储层的下步开发积累丰富的经验。

(2)测试压裂分析是压裂施工设计的基础,所得关键参数裂缝闭合压力可以通过多种方法求得。

(3)储层的延伸压力梯度可由阶梯升排量分析得出,孔眼摩阻、近井筒摩阻参数可由阶梯降排量测试得出,通过以上数据可对井口施工压力进行估算,为压裂井口及车组的选择提供依据。

(4)压降测试分析是获取压裂液效率参数、储层裂缝特征、闭合应力的重要方法。

(5)根据获取的资料可进行有针对性压裂施工设计,从而能够进行合理规模的压裂施工设计,有效地减少施工风险。

## 参考文献:

- [1] 埃克诺德斯,诺尔特.油藏增产措施(第三版)[M].张保平,等译.北京:石油工业出版社,2002.
- [2] 王鸿勋.水力压裂原理[M].北京:石油工业出版社,1987.
- [3] 万仁溥,罗英俊.采油技术手册(第七分册)[M].北京:石油工业出版社,1991:24-28.
- [4] 中国石油天然气集团公司油气开发部[C]//压裂酸化技术论文集.北京:石油工业出版社,1999.
- [5] 中国石油学会石油工程学会钻井工作部[C]//低渗透油田钻井、完井及测试技术研讨会论文集.北京:石油工业出版社,1999.
- [6] 贺甲元,李凤霞,黄志文.裸眼水平井压裂裂缝高度确定方法[J].科学技术与工程,2013,13(30):179-181.
- [7] 徐庆岩,朱大伟,凌浩川.特低渗透油藏压裂水平井衰竭开采参数优选研究[J].非常规油气,2014,1(2):37-42.
- [8] 龙增伟.两井地区超低渗透油田整体压裂技术研究[J].非常规油气,2014,1(2):67-72.
- [9] 刘海龙,吴淑红.煤层气井压裂效果评价及压裂施工工程因素分析[J].非常规油气,2014,1(3):64-71.
- [10] 张红妮,陈井亭.低渗透油田蓄能整体压裂技术研究——以吉林油田外围井区为例[J].非常规油气,2015,2(5):55-60.
- [11] 刘秉谦,张遂安,李宗田.压裂新技术在非常规油气开发中的应用[J].非常规油气,2015,2(2):78-86.
- [12] 赵少伟,杨进,范白涛,等.含水率对稠油出砂冷采的影响[J].石油科技论坛,2010,5(1):25-27.
- [13] 赵少伟,杨进,范白涛,等.渤海稠油油藏出砂冷采工作制度优化模拟实验研究[J].石油科技论坛,2010,5(1):28-31.
- [14] 赵少伟,范白涛,杨秋荣,等.海上油气田低效井侧钻技术[J].航海工程,2015,(6):144-148.
- [15] 董长银,张琪.砾石充填防砂工艺参数优化设计[J].中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(5):57-62.
- [16] 周建宇.高压砾石充填防砂工艺参数优化设计方法研究[J].西安石油大学学报,2005,20(3):79-82.