

# 海上油田压裂充填井三区复合渗流模型及敏感性分析

高杰, 冯青, 黄子俊, 杨浩, 王艳红, 杨慰兴

中海油田服务股份有限公司油田生产研究院 天津 300459

通讯作者:Email:ex\_gaojie@cosl.com.cn

引用:高杰,冯青,黄子俊,等. 海上油田压裂充填井三区复合渗流模型及敏感性分析[J]. 油气井测试, 2018, 27(6):8-13.

Cite: GAO Jie, FENG Qing, HUANG Zijun, et al. Three-zone composite seepage model for fracpack wells in offshore oilfields and its sensitivity analysis [J]. Well Testing, 2018, 27(6):8-13.

**摘要** 为更好地认识压裂充填井渗流规律,有效评价压裂效果,依据物理模型三个区域的渗流过程,建立三区复合油藏数学模型,求出各个区域的压力解,沿着裂缝方向对连续点源进行叠加积分,结合 Duhamel 原理,得出考虑井储效应和表皮效应的压裂充填井 Laplace 空间无因次井底压力解,通过 Stehfest 数值反演绘制无因次压力及导数特征曲线,并对特征曲线进行流动阶段划分和影响因素分析。分析表明,压力特征曲线依次表现为井筒储集阶段、过渡阶段,裂缝系统与地层的双线性流阶段、地层线性流阶段、径向复合特征以及后期的边界反映;裂缝表皮系数主要影响过渡段,表皮系数越大,压力导数的驼峰值越高;裂缝穿透 I 区、II 区导压系数比越小,压力及压力导数曲线位置越靠下;裂缝穿透 I 区、III 区导压系数比越小,越早呈现径向复合特征,径向流位置越靠下。该方法提高了对压裂充填井渗流规律的认识,为压裂充填技术试井解释提供理论支持。

**关键词** 压裂充填井; 试井; 复合油藏; 渗流模型; 压力特征曲线; 敏感性分析

中图分类号:TE358 文献标识码:A DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.06.002

## Three-zone composite seepage model for fracpack wells in offshore oilfields and its sensitivity analysis

GAO Jie, FENG Qing, HUANG Zijun, YANG Hao, WANG Yanhong, YANG Weixing

Oilfield Production Research Institute of China Oilfield Service Co., Ltd. Tianjin 300459, China

**Abstract:** To better understand the seepage law of fracpack wells and effectively evaluate the fracturing effect, based on the seepage process in three zones of the established physical model, a mathematical model of the three-zone composite reservoir was established. The pressure of each zone is obtained. Through the superposition integral of the continuous point source along the fracture and combining with the Duhamel principle, the Laplace space dimensionless downhole pressure solution of the fracpack well considering the well storage effect and the skin effect is obtained. The dimensionless pressure and derivative curves are drawn by Stehfest numerical inversion. After that, the flow stage is divided and influencing factors is analyzed for the characteristic curve. The analysis shows that the pressure curve has the stages of the wellbore storage stage, the transition stage, the bilinear flow stage of the fracture system and the matrix, the linear flow stage of the formation, the radial composite feature and the later boundary response. The fracture skin factor mainly affects the transition stage and larger skin coefficient results in higher hump peak of the pressure derivative. The smaller the pressure conductivity coefficient ratio  $\bar{\omega}_{21}$ , the lower the pressure and pressure derivative curve are. Smaller  $\bar{\omega}_{31}$  leads to the earlier radial composite feature and the lower radial flow curve. This method improves the understanding of the seepage law of fracpack wells and could provide theoretical support for the well testing interpretation of fracpack well.

**Keywords:** fracpack well; well test; composite reservoir; seepage model; pressure characteristic curve; sensitivity analysis

在油井生产过程中,由于岩层自身及作业导致常见出砂现状,油井出砂是油田开发急需解决的难题之一,李军贤<sup>[1]</sup>分析地层出砂的自然原因和人为原因,提出了地层出砂的机理,并对出砂井测试工艺进行优化。对于疏松储层,其井底附近地层易遭到破坏,导致剥落的地层砂随地层流体

流入井筒,对油气井的生产造成不利的影响。对于疏松砂岩,当储层的渗透率较高时,采用常规的砾石充填即可<sup>[2-4]</sup>。但对于物性较差或存在污染的储层,应采用压裂充填措施,既可以建立短而宽的高导流裂缝,起到增产作用;又可以通过井筒砾石充填建立有效的挡砂屏障,从而达到增产和防

砂的双重目的。

近年来,压裂充填技术在国内外海上油田取得成功应用,刘鹏等<sup>[5]</sup>主要从现场施工方面讨论了适合渤海区域稠油油田压裂充填防砂经验,对 BZ25-1 油田应用压裂充填技术进行效果评价。卞晓冰等<sup>[6]</sup>对渤海湾某疏松砂岩稠油油藏进行了压裂充填技术优化设计,为开发方案设计提供技术支撑。压裂充填技术是近年来增产技术的一个突破性技术<sup>[7-10]</sup>,关于其机理、工艺等方面的研究有诸多成果。曲占庆等<sup>[11]</sup>提出压裂防砂井产能预测方法。董钊等<sup>[12]</sup>对压裂充填技术产生裂缝的参数对产量的影响进行研究,以便施工参数的设计。焦国盈<sup>[13]</sup>对压裂防砂技术及增产机理进行了研究。陈金先<sup>[14]</sup>介绍了海上油田压裂防砂技术应用及效果。但目前很少研究建立试井理论模型,通常采用常规压裂井模型来进行压裂充填井的试井解释<sup>[15]</sup>。而建立合理的压裂充填试井模型可以更好地认识渗流规律,有效评价压裂效果。压裂充填的物理模型可以近似描述为:在近井地带受砾石充填的影响,物性相对较差,人工裂缝穿过两个物性不同的区域,人工裂缝末端存在未压裂区域<sup>[16-17]</sup>。所以,将压裂充填模型可以抽象为三区复合模型及有限压裂井的叠合<sup>[18-21]</sup>。本文首先建立了三区复合油藏模型,求出各个区域的压力解,沿着裂缝长度对点源解进行叠加积分,从而推导出压裂充填井试井理论模型。

## 1 模型的建立及求解

压裂充填井渗流分为 3 个过程:充填区到人工裂缝的线性流动,裂缝区到人工裂缝的线性流动,地层向裂缝区的径向流动,由内向外依次为 I 区、II 区、III 区(图 1)。

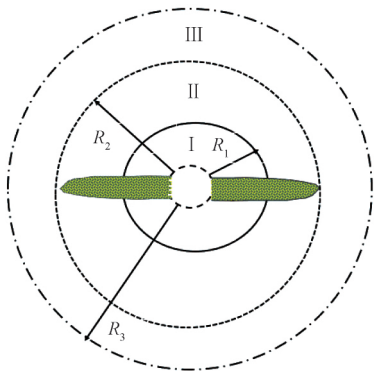


图 1 压裂充填井物理模型

Fig.1 Physical model of the fracpack well

可将模型看成为三区复合模型,在 I、II 区存在人工裂缝,且未穿透 III 区域。

### (1) 三区复合模型的模型建立

假设由一个圆形不连续界面将油藏分割成不同性质的同心区域,井位于系统的中心,各个区域内的物性是相同的,不考虑表皮和井筒的影响,建立三区复合油藏的渗流微分方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 p_{1D}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_{1D}}{\partial r_D} = \frac{\partial p_{1D}}{\partial t_D} \\ \frac{\partial^2 p_{2D}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_{2D}}{\partial r_D} = \frac{1}{\bar{\omega}_{21}} \frac{\partial p_{2D}}{\partial t_D} \\ \frac{\partial^2 p_{3D}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_{3D}}{\partial r_D} = \frac{1}{\bar{\omega}_{31}} \frac{\partial p_{3D}}{\partial t_D} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $p_D$  为无因次压力; $r_D$  为无因次半径; $\bar{\omega}_{21}$  为裂缝穿透 I 区、II 区的导压系数比; $\bar{\omega}_{31}$  为裂缝穿透 I 区、III 区的导压系数比。

初始条件、连接条件和边界条件为:

$$\begin{cases} r_D \frac{\partial p_{1D}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=0} = -1 \\ p_{1D} = p_{2D} \Big|_{r_D=R_{eD1}} \\ p_{2D} = p_{3D} \Big|_{r_D=R_{eD2}} \\ \frac{\partial p_{1D}}{\partial r_D} = \frac{1}{\lambda_{21}} \frac{\partial p_{2D}}{\partial r_D} = \frac{1}{\lambda_{31}} \frac{\partial p_{3D}}{\partial r_D} \\ p_{3D} \Big|_{r_D=\infty} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\lambda_{21}$  为 I 区、II 区的流度比; $\lambda_{31}$  为 I 区、III 区的流度比。

通过 Laplace 变换,得出各个区域的通解为:

$$\bar{p}_{1D} = c_1 K_0(r_D \sqrt{s}) + c_2 I_0(r_D \sqrt{s}) \quad (3)$$

$$\bar{p}_{2D} = c_3 K_0(r_D \sqrt{s/\bar{\omega}_{21}}) + c_4 I_0(r_D \sqrt{s/\bar{\omega}_{21}}) \quad (4)$$

$$\bar{p}_{3D} = c_5 K_0(r_D \sqrt{s/\bar{\omega}_{31}}) \quad (5)$$

其中  $c_1 = 1/s$ ,  $c_2 = c_1 B_4$ ,  $c_3 = c_1 B_3$   
 $c_4 = c_1 B_2$ ,  $c_5 = c_1 B_1$

$$B_4 = \frac{B_3 K_1(R_{eD1} \sqrt{s}) - K_0(R_{eD1} \sqrt{s})}{B_3 I_1(R_{eD1} \sqrt{s}) + I_0(R_{eD1} \sqrt{s})}$$

$$B_3 = \frac{K_0(R_{eD1} \sqrt{s/\bar{\omega}_{31}}) + B_2 I_0(R_{eD1} \sqrt{s/\bar{\omega}_{31}})}{\frac{1}{\lambda_{21} \sqrt{\bar{\omega}_{21}}} (K_1(R_{eD1} \sqrt{s/\bar{\omega}_{31}}) - B_2 I_1(R_{eD1} \sqrt{s/\bar{\omega}_{31}}))}$$

$$B_2 = \frac{B_1 K_1(R_{eD2} \sqrt{s/\bar{\omega}_{21}}) - K_0(R_{eD2} \sqrt{s/\bar{\omega}_{21}})}{I_0(R_{eD2} \sqrt{s/\bar{\omega}_{21}}) + B_2 I_1(R_{eD2} \sqrt{s/\bar{\omega}_{21}})}$$

$$B_1 = \frac{\lambda_{31} \sqrt{\bar{\omega}_{31}} K_0(R_{eD2} \sqrt{s/\bar{\omega}_{31}})}{\lambda_{21} \sqrt{\bar{\omega}_{21}} K_1(R_{eD2} \sqrt{s/\bar{\omega}_{31}})}$$

$$\bar{\omega}_{21} = \left( \frac{\phi \mu C_i}{K} \right)_2 \bigg/ \left( \frac{\phi \mu C_i}{K} \right)_1$$

$$\bar{\omega}_{31} = \left( \frac{\phi \mu C_i}{K} \right)_3 \bigg/ \left( \frac{\phi \mu C_i}{K} \right)_1$$

$$\lambda_{31} = \left( \frac{K}{\mu} \right)_1 \bigg/ \left( \frac{K}{\mu} \right)_3$$

$$\lambda_{21} = \left( \frac{K}{\mu} \right)_1 \bigg/ \left( \frac{K}{\mu} \right)_2$$

无因次定义为:

$$p_D = \frac{Kh(p_i - p)}{1.842 \times 10^{-3} q \mu B}$$

$$p_{fD} = \frac{Kh(p_i - p_f)}{1.842 \times 10^{-3} q \mu B}$$

$$t_D = \frac{3.6Kt}{\phi \mu C L_f^2}$$

$$x_D = \frac{x}{L_f}, y_D = \frac{y}{L_f}$$

$$R_{eD} = \frac{R_e}{L_f}$$

$$F_D = \frac{K_f w_f}{KL_f}$$

式中:  $K_0, I_0, K_1, I_1$  为修正零阶和一阶 Bessel 函数;  $K$  为渗透率, mD;  $\mu$  为黏度, mPa·s;  $C_i$  为压缩系数, MPa<sup>-1</sup>;  $\phi$  为孔隙度;  $q$  为产量, 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d;  $L$  为裂缝半长, m;  $w$  为裂缝宽度, m; 下标 D 表示无因次; 下标 f 表示裂缝; 下标 1, 2 和 3 分别表示 I 区、II 区和 III 区。

(2) 在 III 区复合油藏模型中, 考虑第 I 区、II 区被压裂, 假设裂缝形态为矩形, 裂缝与井筒对称, 对式(3)、式(4)进行叠加积分, 并重新定义交界面连接条件, 即

$$\bar{p}_D(x_D, y_D, s) = \frac{1}{2s} \int_{-1}^{-R_{eD1}} \bar{q}_m(\alpha, s) \times (B_3 K_0 x_D \sqrt{s/\bar{\omega}_{21}} + B_2 I_0 x_D \sqrt{s/\bar{\omega}_{21}}) d\alpha + \frac{1}{2s} \int_{-R_{eD1}}^{R_{eD1}} \bar{q}_m(\alpha, s) \times (K_0 x_D \sqrt{s} + B_4 I_0 x_D \sqrt{s}) d\alpha + \frac{1}{2s} \int_{R_{eD1}}^1 \bar{q}_m(\alpha, s) \times (B_3 K_0 x_D \sqrt{s/\bar{\omega}_{21}} + B_2 I_0 x_D \sqrt{s/\bar{\omega}_{21}}) d\alpha \quad (6)$$

$$\bar{p}_D(x_D, 0, s) = \bar{p}_m(x_D) \quad (7)$$

$$\bar{p}_{wD} - \bar{p}_m(x_D) = \frac{\pi}{F_D} \left[ x_D - \int_0^{x_D} \int_0^v q_m(u) du dv \right] \quad (8)$$

式中:  $s$  为 Laplace 变量;  $\alpha$  为微元  $d\alpha$  距原点的距离;  $x, y$  分别为裂缝上任意一点距原点的距离;  $F$  为裂缝导流能力, mD·m。

对于定产量生产的油藏, 存在积分归一化的关系, 即

$$\int_{-1}^1 \bar{q}_m(\alpha, s) d\alpha = 1/s \quad (9)$$

联立以上方程, 可以得到压裂充填井井底压力表达式。应用叠加原理<sup>[22]</sup>和 Duhamel 原理<sup>[23]</sup>考虑井储效应和裂缝表皮效应, 得到 Laplace 空间解的关系式, 即

$$\bar{p}_{wD} = \frac{s \bar{p}_D(s) + S}{s \{ 1 + C_D s [S + s \bar{p}(s)] \}} \quad (10)$$

式中:  $S$  为表皮系数;  $C_D$  为无因次井筒储集系数。

## 2 压力特征曲线及敏感性参数分析

对式(10)进行 Stehfest 数值反演, 得到真实空间内的压力解, 再通过计算机编制程序, 绘制压力特征曲线<sup>[24]</sup>。对于压裂充填井, 其压力特征曲线依次表现为早期井筒储集阶段、井储后的过渡阶段、裂缝系统与地层的双线性流阶段、地层线性流阶段、径向复合特征阶段, 以及后期的边界反映阶段(图 2)。由于裂缝穿透 I 区、II 区, 压力在 I 区、II 区内的传导主要反映的是裂缝流阶段, 物性差异的大小会影响有限导流裂缝阶段。

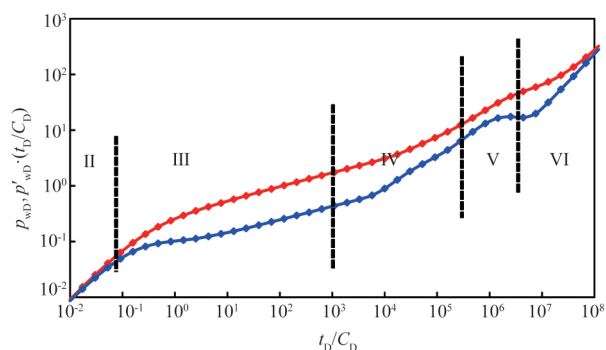


图 2 压裂充填井压力响应特征曲线

Fig.2 Pressure response curve of the fracpack well

### 2.1 裂缝表皮

裂缝表皮是由于压裂施工过程中, 压裂液受压渗入裂缝表面, 对地层造成的污染和伤害, 其值是大于等于零, 反映裂缝表面的污染程度<sup>[25]</sup>。裂缝表皮系数主要影响井筒储集效应后的过渡段, 表皮系数越大, 压力导数的驼峰值越高, 反之压力导数的驼峰很小(图 3)。

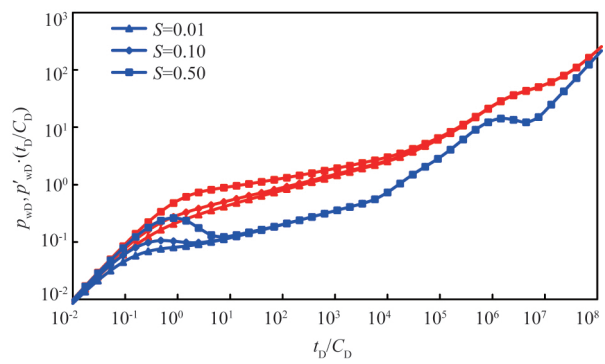


图 3 裂缝表皮系数  $S$  对压力响应特征曲线的影响  
Fig.3 Effect of fracture skin factor  $S$  on pressure response curve

2.2 导压系数比

由于裂缝穿透 I 区、II 区,  $\bar{\omega}_{21}$  的大小影响裂缝与地层的双线性流阶段和地层线性流阶段 (图 4),  $\bar{\omega}_{21}$  越小, 相对于 I 区、II 区的导压系数越大, 流体在地层中流动的压力损失越小, 所需要的压降越小, 压力及压力导数曲线位置越靠下; 反之,  $\bar{\omega}_{21}$  越大, 相对于 I 区、II 区的导压系数越小, 流体在地层中流动的压力损失越大, 所需要的压降越大, 压力及压力导数曲线位置越靠上。

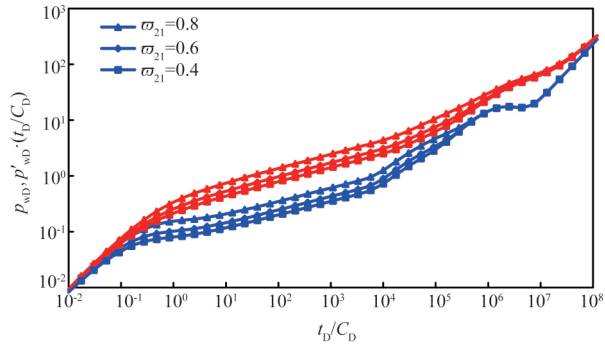


图 4 导压系数比  $\bar{\omega}_{21}$  对压力响应特征曲线的影响  
Fig.4 Effect of pressure coefficient ratio  $\bar{\omega}_{21}$  on pressure response curve

$\bar{\omega}_{31}$  的大小只影响 III 区 (图 5), 其值越小, 相对于 I 区、III 区的压力传导能力越大, 越早呈现径向复合特征, 径向流位置越靠下, 同时表现为 III 区物性越好, III 区径向流位置靠下; 反之,  $\bar{\omega}_{31}$  越大, III 区的压力传导能力越小, 复合径向特征出现越晚, 径向流位置越靠上, 表现为 III 区物性越差。

2.3 其他参数的影响

流度比  $\lambda_{21}$ 、 $\lambda_{31}$  对压力动态响应曲线特征和导压系数比对压力动态响应曲线的影响类似。

由于 II 区半径的大小和裂缝半长一样, 所以  $R_{cd2}=1$ , 充填区半径  $0 < R_{cd1} < 1$ ,  $R_{cd1}$  越大, 说明物性

差的区域对线性流起主导作用, 其对压力特征曲线的影响与导压系数比  $\bar{\omega}_{21}$  类似。

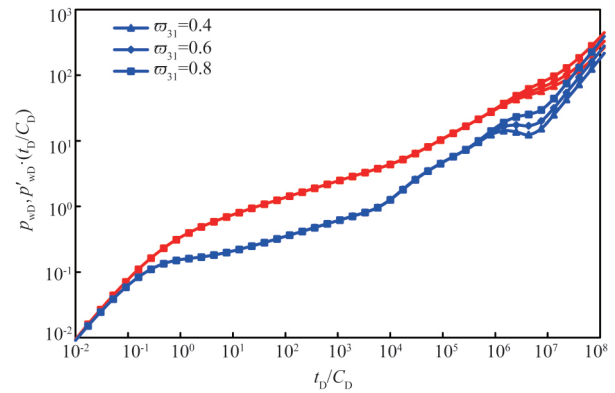


图 5 导压系数比  $\bar{\omega}_{31}$  对压力响应特征曲线的影响  
Fig.5 Effect of pressure coefficient ratio  $\bar{\omega}_{31}$  on pressure response curve

3 实例应用

海上某浅层油藏属于背斜构造, 三角洲前缘沉积, 目的层岩性主要为长石石英砂岩, 以细砂岩为主, 胶结类型为孔隙型胶结。

X1 井属于底水油藏, 射开厚度 8 m, 原始地层压力为 14 MPa, 地层温度 75 ℃, 地层原油黏度 123.72 mPa·s, 原油体积系数 1.027, 原始溶解气油比 2.7~3.6 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, 测井解释有效孔隙度 24.7%, 泥质含量 15.6%, 含水饱和度 35.9%, 渗透率 221.5 mD 属高孔中渗储层。于 2016 年 9 月初投产, 初期井口压力、流压比较稳定, 液量呈波动下降趋势, 采用解堵作业后, 有效期短。该井于 2017 年 12 月进行压裂充填作业, 作业后以日产油 55 m<sup>3</sup>、日产液 100 m<sup>3</sup> 生产一个月, 然后关井 140 h 进行压力恢复测试。

根据 X1 井提供的压后恢复数据, 绘制实测压力及其导数双对数曲线, 采用本文建立的模型进行拟合, 拟合曲线如图 6 所示。

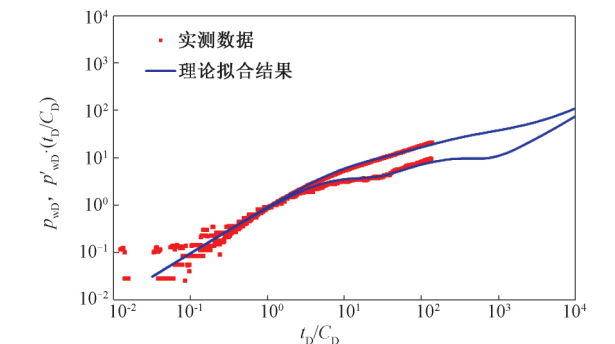


图 6 X1 井压力及其导数双对数拟合图  
Fig.6 Pressure log-log fit of Well X1



解释结果为:井筒储集常数  $C$  为  $1.98 \text{ m}^3/\text{MPa}$ , 表皮系数  $S$  为  $0.001$ , I 区储层渗透率  $K_1$  为  $23 \text{ mD}$ , II 区储层渗透率  $K_2$  为  $110 \text{ mD}$ , III 区储层渗透率  $K_3$  为  $84 \text{ mD}$ , 水力裂缝渗透率  $K_f$  为  $10 \times 10^3 \text{ mD}$ , 导压系数比  $\bar{\omega}_{21}$  为  $0.2$ ,  $\bar{\omega}_{31}$  为  $0.27$ , 流度比  $\lambda_{21}$  为  $0.2$ ,  $\lambda_{31}$  为  $0.27$ , 裂缝长度  $L_f$  为  $10 \text{ m}$ 。从拟合结果可以看出, 曲线拟合程度较好, 验证了该模型对压裂充填井的适用性。渗透率解释结果表明, I 区受充填影响物性变差; II 区压裂区域存在分支裂缝, 可以改善周围的储层; III 区未经过改造, 其渗透率应为原始地层渗透率。

## 4 结论

(1) 本文得出了考虑井储效应和裂缝表皮效应的井底压力表达式, 可以用于压裂充填井试井解释, 能够获得裂缝表皮、导压系数比、流度比及边界等参数, 对指导压裂充填井的试井分析具有理论意义和现实意义。

(2) 该方法适用于中高渗疏松砂岩储层, 需要达到增产和防砂的双重目的, 压裂改造以短缝长为主, 以便观察到晚期的径向复合特征。

(3) 本文将压裂充填井的储层划分比较详细, 可以求出各个区域的渗透率和半径, 可以指导污染带渗透率和污染半径的确定。

**致谢:** 在论文的撰写过程中, 得到了中海油田服务股份有限公司油田生产研究院领导及同事的帮助, 对论文的顺利完成起到重要作用, 在此表示感谢。

## 参考文献

- [1] 李军贤. 地层出砂井测试工艺优化 [J]. 油气井测试, 2018, 27(2): 47-52.  
LI Junxian. Optimization of testing techniques for wells with formation sand production [J]. Well Testing, 2018, 27(2): 47-52.
- [2] 苏崇华. 疏松砂岩油田生产过程中储层伤害机理研究 [J]. 中国海上油气, 2009, 21(1): 31-34.  
SU Conghua. A research on damage mechanisms of loose sand reservoirs during their production [J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(1): 31-34.
- [3] 胡才志, 李相方, 王辉. 疏松砂岩储层防砂方法优选实验评价 [J]. 石油钻探技术, 2003, 31(6): 51-53.  
HU Caizhi, LI Xiangfang, WANG Hui. Lab optimum evaluations to sand control method for unconsolidated sand reservoirs [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 31(6): 51-53.
- [4] MARK L, KEITH W, JIM W. Hydraulic fracturing for sand control in unconsolidated heavy-oil reservoirs [C]. SPE 54628, 1999.
- [5] 刘鹏, 马英文, 张亮, 等. 压裂充填技术在疏松地层中的应用 [J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(4): 56-59.  
LIU Peng, MA Yingwen, ZHANG Liang, et al. Application of frac-packing technology in unconsolidated reservoir [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006, 28(4): 56-59.
- [6] 卞晓冰, 张士诚, 王雷. 海上疏松砂岩稠油油藏压裂充填优化技术 [J]. 油气井测试, 2012, 21(1): 39-41.  
BIAN Xiaobing, ZHANG Shicheng, WANG Lei. Optimization design for fracturing pack of loose sandstone heavy oil reservoir at sea [J]. Well Testing, 2012, 21(1): 39-41.
- [7] 宋友贵, 纪朝凤, 李怀文, 等. 压裂-充填综合防砂技术的研究与应用 [J]. 石油钻探技术, 1999, 27(2): 45-46.  
SONG Yougui, JI Chaofeng, LI Huaiwen, et al. Development of fracture packing sand controlling technique and its applications [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1999, 27(2): 45-46.
- [8] 周江, 王琪, 张怀文, 等. 压裂充填综合防砂技术综述 [J]. 新疆石油科技, 2001, 11(4): 8-13.  
ZHOU Jiang, WANG Qi, ZHANG Huaiwen, et al. Summary of comprehensive sand control technology for fracturing and filling [J]. Xinjiang Petroleum Science & Technology, 2001, 11(4): 8-13.
- [9] 尚志会. 压裂充填技术的应用与发展 [J]. 国外油田工程, 2002, 18(5): 42-43.  
SHANG Zhihui. Application and development of frac-pack technology [J]. Foreign Oilfield Engineering, 2002, 18(5): 42-43.
- [10] 刘北奔. 压裂防砂技术进展及存在问题 [J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(4): 105-107.  
LIU Beiyi. Technology progress and issues of fracturing sand control [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(4): 105-107.
- [11] 曲占庆, 张琪, 董长银, 等. 压裂充填防砂井产能预测方法 [J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(5): 51-53.  
QU Zhanqing, ZHANG Qi, DONG Changyin, et al. New model for frac-packed well productivity prediction [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(5): 51-53.
- [12] 董钊, 张崇, 任冠龙, 等. 裂缝对压裂充填井产量的影响研究与应用 [J]. 复杂油气藏, 2016, 9(3): 74-79.  
DONG Zhao, ZHANG Cong, REN Guanlong, et al. Study on effect of fracture on productivity of frac-pack well and its application [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2016, 9(3): 74-79.
- [13] 焦国盈. 压裂充填防砂与增产技术研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2005.  
JIAO Guoying. Study on fracturing packing sand stimulation technology [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2004.
- [14] 陈金先. 压裂充填防砂技术在渤海油田的应用研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2010.

- CHEN Jinxian. Study on application of frac-pack sand control in Bohai Oilfield [D]. Daqing: Northwest Petroleum University, 2010.
- [15] HARRY O, MCLEOD J R, SCOTT W, et al. Multirate well testing to evaluate the effectiveness of frac packing [C]. SPE 31115, 1996.
- [16] WU R, KRESSE O, COHEN C, et al. Modeling of interaction of hydraulic fractures in complex fracture networks [C]. SPE 152052, 2012.
- [17] BIAN Xiaobing, ZHANG Shicheng, ZHANG Jingchen, et al. A new method to optimize the fracture geometry of a frac-packed well in unconsolidated sandstone heavy oil reservoirs [J]. Science China (Technological Sciences), 2012, 6(1): 1725-1731.
- [18] 蔡明金, 贾永禄. 三重介质有限导流垂直裂缝井压力动态分析[J]. 油气井测试, 2007, 16(5): 12-15.  
CAI Mingjin, JIA Yonglu. Dynamic analysis for pressure in limit conductivity vertical fracture wells of tripleporosity reservoir [J]. Well Testing, 2007, 16(5): 12-15.
- [19] 刘鹏程, 王晓冬, 万玉金, 等. 三区复合油藏有限导流垂直裂缝井井底压力动态分析[J]. 油气井测试, 2004, 13(1): 4-7.  
LIU Pengcheng, WANG Xiaodong, WAN Yujin, et al. Dynamic analysis for downhole pressure in limit conductivity vertical fracture wells of the third district composite reservoir [J]. Well Testing, 2004, 13(1): 4-7.
- [20] 付春权, 尹洪军, 贾俊飞. 复合油藏垂直裂缝井压力动态分析[J]. 大庆石油学院学报, 2008, 32(2): 113-115.  
FU Chunquan, YIN Hongjun, JIA Junfei. Dynamic analysis of vertical fracture well pressure in composite reservoir [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2008, 32(2): 113-115.
- [21] 张岩. 稠油热采三区复合油藏试井解释技术及资料的分析应用[J]. 大庆师范学院学报, 2012, 32(3): 97-101.  
ZHANG Yan. Well testing interpretation technique for three districts composite reservoir of data application and analysis in thermal recovery of heavy oil [J]. Journal of Daqing Normal University, 2012, 32(3): 97-101.
- [22] 李道伦, 杨景海, 查文舒, 等. 叠加原理不能求解含启动压力梯度渗流方程[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(4): 81-89.  
LI Daolun, YANG Jinghai, ZHA Wenshu, et al. Unsuitability of using superposition principle to solve equation incorporated with threshold pressure gradient [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2015, 37(4): 81-89.
- [23] 郭康良, 杨丰平, 吕鹏. 利用 Duhamel 原理研究缩短抽油井测压时间[J]. 江汉石油学院学报, 2002, 24(4): 73-75.  
GUO Kangliang, YANG Fengping, LYU Peng. Reducing measuring time in pumping well with duhamel's principle [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2002, 24(4): 73-74.
- [24] 何家欢, 张苏, 刘生国, 等. 关于 Laplace 数值反演 Stehfest 算法适用性的一点思考[J]. 油气井测试, 2015, 24(4): 18-20.  
HE Jiahuan, ZHANG Su, LIU Shengguo, et al. Thinking about the numerical inversion of Laplace transform and usability of Stehfest algorithm [J]. Well Testing, 2015, 24(4): 18-20.
- [25] 蒋海, 杨兆中, 李小刚, 等. 裂缝面滤失对压裂井产能的影响分析[J]. 长江大学学报(自然科学版) 2008, 5(1): 87-89.  
JIANG Hai, YANG Zhaozhong, LI Xiaogang, et al. Analyses on the effect fracture surface leak-off on fractured well productivity [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2008, 5(1): 87-89.

编辑 穆立婷

**第一作者简介:**高杰, 1988 年出生, 硕士, 工程师, 2014 年毕业于西南石油大学油气田开发工程专业, 现主要从事渗流力学、油气藏工程及试井分析等领域的科研工作。电话: 022-59551929, 13920857793; Email: ex\_gaojie@cosl.com.cn。通信地址: 天津市滨海新区塘沽海洋高新技术开发区海川路 1581 号, 邮政编码: 300459。