

夹角断层多段压裂水平井试井求解新方法*

刘启国¹, 徐有杰¹, 刘义成², 齐生芝¹

(1. 西南石油大学 石油与天然气工程学院, 成都 610500;
2. 中国石油西南油气田公司 勘探开发研究院, 成都 610000)

摘要: 我国东部部分油藏含有发育的封闭断层,而断层对于油气井压力变化特征和相关参数的求取具有很大的影响.基于渗流力学基本原理,首先,利用点源函数基本理论和 Laplace 积分变换获得拉氏空间无限导流垂直裂缝井井底压力解,结合导流能力函数获得有限导流垂直裂缝井井底压力解;其次,通过镜像反映原理和压降叠加原则获得不同夹角封闭断层的有限导流多段压裂水平井拉氏空间解析解;利用 Stehfest 数值反演计算实空间井底压力解并绘制压力和压力导数双对数曲线图.研究表明:该典型特征曲线共分为 8 个流动阶段,在断层反映阶段无因次压力导数呈值为“ $0.5 \times 360^\circ/\theta$ ”的水平线;水平井中心到断层的垂直距离越小,断层反映时间越早,径向流动阶段越容易被边界反映所掩盖;裂缝间距越大,早期裂缝拟径向流特征曲线越明显;裂缝条数越多、导流能力越大,早期无因次压力和压力导数曲线位置越低.通过该模型能够很好地对含有封闭断层边界的油气藏做出准确评价和相关参数的求取.

关键词: 夹角断层; 多段压裂水平井; 镜像反映; 有限导流裂缝; 导流能力函数

中图分类号: TE331.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.380297

符号注释

B	原油体积系数(地下原油体积与地面标准状况下体积比值),无因次		
θ	断层与断层之间的夹角	C	井筒储集系数, m^3/MPa
Q	地面储量, m^3/d	q_f	裂缝流量, m^2/d
h	储层厚度, m	W_f	裂缝宽度, m
S	表皮系数,无因次	d_f	水平井中心距离断层的垂直距离, m
r_w	井筒半径, m	x, y	平面任意位置横坐标和纵坐标, m
x_{wi}, y_{wi}	裂缝与井筒交点坐标, m	C_i	介质压缩系数, MPa^{-1}
k	储层渗透率, μm^2	k_f	裂缝渗透率, μm^2
p_e	原始地层压力, MPa	p_w	井底压力, MPa
L_f	裂缝半长, m	ϕ	介质孔隙度,无因次
μ	流体视黏度, $mPa \cdot s$	M	裂缝条数

* 收稿日期: 2017-11-27; 修订日期: 2018-01-15
 基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05009-004;2016ZX05015-003)
 作者简介: 刘启国(1969—),男,博士,教授(E-mail: liuqg2002@163.com);
 徐有杰(1990—),男,硕士生(通讯作者. E-mail: xuyoujie920309@163.com).

s	Laplace 变量	$(\cdot)_D$	无因次变量
i	裂缝序号	$(\bar{\cdot})$	拉氏空间变量
$K_0(x)$	零阶第二类修正 Bessel 函数		
a, b, c, d, e, f	镜像井序号		

引 言

我国东部部分地区含有断层比较发育的含油储层,断层阻挡占主导地位,封闭断层将储层分为两个不同的压力系统.因此,研究不同夹角断层对于合理开发断块油气田具有重要的意义.随着开采技术和水力压裂技术的不断进步,压裂井和水平井成为提高油气田勘探开发综合效益的重要方式,通过试井分析可以获得地层相关参数和裂缝相关参数,对于合理开发效果评价具有重要的作用^[1-3].基于 Ozkan 等^[4-5]推导得到的拉氏空间不同外边界条件下点源函数解,通过对点源函数进行不同方向的积分获得拉氏空间线源解与面源解,获得了水平井和无限导流裂缝井压力解.Heber Cinco 等^[6]和 Riley 等^[7]分别通过椭圆流、三线性流和储层与裂缝耦合的方式,进行了有限导流垂直裂缝井压力解关于夹角断层试井模型的研究.我国学者王晓冬等^[8]建立了直井任意夹角断层下的试井解释模型,利用解析反演求得实空间压力解;雷刚等^[9]采用差分与数值模拟的方法,对夹角断层的试井模型进行了研究;冯纪成等^[10]基于点源函数基本理论,对直线断层有一夹角裂缝的试井解释模型进行了研究;宋付权等^[11]基于实空间点源函数基本理论,对直线断层附近有一水平井的试井解释模型展开了研究;对于多段压裂水平井试井解释模型的研究,樊冬艳等^[12]、刘晓旭等^[13]、尹洪军等^[14]、赵超等^[15]、段永刚等^[16]和王本成等^[17]从不同的角度对多段压裂水平井进行试井模型的建立与求解,李顺初等^[18]关于试井解释模型解的结构进行了分析.

以上学者分别用不同的方法建立并求解了含有断层的压裂井试井解释模型,对于多段压裂水平井用不同的方法进行了求解.然而,关于夹角断层和直线断层多段压裂水平井目前还没有展开深入研究.对于断层比较发育且不规则分布的储层,其断层的形状对于准确评价储层物性和产量计算又具有很大的影响.对于有限导流多段压裂水平井,计算速度和精度是我们需要考虑的重点.因此,本文基于前人的研究,利用点源函数基本理论、镜像原理、压降叠加原理和王晓冬等^[19]提出的导流能力函数,建立任意夹角断层的有限导流多段压裂水平井试井解释物理模型与数学模型;再利用 Stehfest 数值反演的方法计算得到实空间解,绘制典型压力和压力导数典型特征曲线并进行影响因素分析.

1 试井模型的建立与求解

1.1 有限导流压裂井压力分布

为了更好地建立试井解释物理模型,对于复杂裂缝和地层进行简化处理,得到夹角断层多段压裂水平井的简化物理模型.基本假设条件如下:

1) 油气藏呈水平分布,油气藏的上下边界封闭,外边界为夹角断层或直线断层,油气藏储层厚度为 h .

2) 水平井长度为 L_h ,裂缝与裂缝之间的距离为 ΔL ,流体在井筒内流动为无限导流,水平井与储层上下边界平行.

3) 压裂裂缝条数为 M , 每条裂缝都被完全压开且呈有限导流, 每条裂缝均与井筒呈正交分布。

4) 裂缝半长为 L_f , 裂缝宽度为 W_f , 裂缝沿井筒呈等距或不等距分布。

5) 流体由储层向裂缝渗流后再流入井筒, 流体在储层中的渗流为等温渗流且符合 Darcy (达西) 渗流规律, 忽略流体的重力和毛管压力的影响。

6) 井位于夹角断层的角平分线上。

针对以上模型的假设, 分别以 $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ 和 180° 夹角断层为基础建立试井解释数学模型, 其模型示意图如图 1 所示。

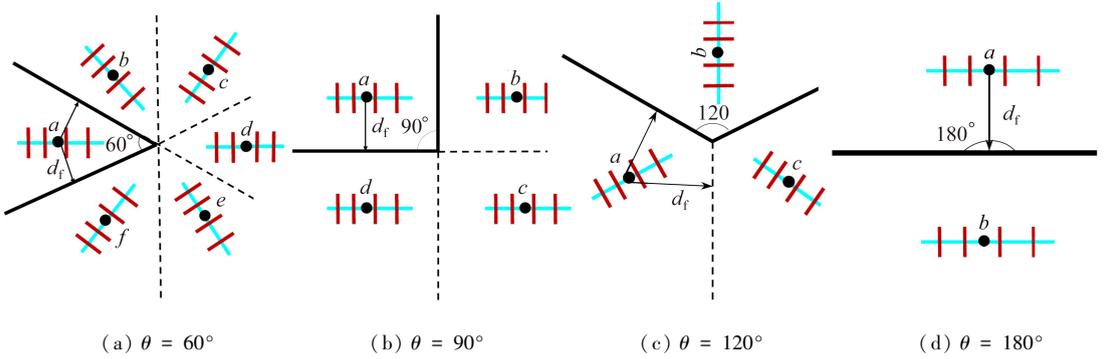


图 1 不同夹角断层多段压裂水平井示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-stage fractured horizontal wells with different included angles

根据 Ozkan 等^[4-5]提出的拉氏空间点源函数基本理论, 对点源函数分别沿厚度方向和裂缝延伸方向积分得到均匀流量裂缝井无因次井底压力解。

无因次参数定义如下:

$$d_D = \frac{d_f}{L_f}, \quad \bar{p}_D = \frac{542.87kh}{Q\mu B} \Delta\bar{p}, \quad t_D = \frac{86.4kt}{(\phi C_t)\mu L_f^2}, \quad x_{wDi} = \frac{x_{wi}}{L_f}, \quad y_{wDi} = \frac{y_{wi}}{L_f}, \quad x_{Di} = \frac{x_i}{L_f},$$

$$y_{Di} = \frac{y_i}{L_f}, \quad C_{fD} = \frac{k_f W_f}{k L_{ref}}, \quad C_{Df} = \frac{C}{2\pi\phi C_t h L_f^2}, \quad q_{Di} = \frac{q\mu B}{542.87kh\Delta\bar{p}}, \quad \Delta L_{Df} = \frac{\Delta L}{L_f}.$$

其无限导流垂直裂缝井无因次压裂解的表达形式如下:

$$s\bar{p}_{aD} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 K_0(\sqrt{s} \sqrt{(x_D - \alpha)^2 + (y_D - y_{wDi})^2}) d\alpha. \quad (1)$$

上式中 x_D 取 0.732 用于计算有限导流裂缝, 对于 Bessel 函数的积分可以利用 Simpson (辛普森) 或 Gauss-Legendre (高斯-勒让德) 数值积分求解。对于单一裂缝井, 为了提高计算速度, 可以依据文献[5]的计算方法提高计算速度。

利用镜像反映原理^[20], 得到不同夹角断层各镜像井的井底压力解。

60° 夹角断层 ($\theta = 60^\circ$):

$$s\bar{p}_{bD} = s\bar{p}_{fD} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 K_0(\sqrt{s} \sqrt{(d_D - \alpha)^2 + (\sqrt{3}d_D)^2 + (y_D - y_{wDi})^2}) d\alpha, \quad (2)$$

$$s\bar{p}_{cD} = s\bar{p}_{eD} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 K_0(\sqrt{s} \sqrt{(3d_D - \alpha)^2 + (\sqrt{3}d_D)^2 + (y_D - y_{wDi})^2}) d\alpha, \quad (3)$$

$$s\bar{p}_{dD} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 K_0(\sqrt{s} \sqrt{(4d_D - \alpha)^2 + (y_D - y_{wDi})^2}) d\alpha. \quad (4)$$

90°夹角断层 ($\theta = 90^\circ$):

$$s\bar{p}_{bD} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 K_0(\sqrt{s} \sqrt{(2d_D - \alpha)^2 + (y_D - y_{wDi})^2}) d\alpha, \quad (5)$$

$$s\bar{p}_{cD} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 K_0(\sqrt{s} \sqrt{\alpha^2 + (2d_D)^2 + (y_D - y_{wDi})^2}) d\alpha, \quad (6)$$

$$s\bar{p}_{dD} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 K_0(\sqrt{s} \sqrt{(2d_D - \alpha)^2 + (2d_D)^2 + (y_D - y_{wDi})^2}) d\alpha. \quad (7)$$

120°夹角断层 ($\theta = 120^\circ$):

$$s\bar{p}_{bD} = s\bar{p}_{cD} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 K_0(\sqrt{s} \sqrt{(\sqrt{3}d_D - \alpha)^2 + (d_D)^2 + (y_D - y_{wDi})^2}) d\alpha. \quad (8)$$

180°夹角断层 ($\theta = 180^\circ$):

$$s\bar{p}_{bD} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 K_0(\sqrt{s} \sqrt{\alpha^2 + (2d_D)^2 + (y_D - y_{wDi})^2}) d\alpha. \quad (9)$$

根据压降叠加原理得到总的井底压力为

$$s\bar{p}_{Dall} = s\bar{p}_{aD} + s\bar{p}_{bD} + s\bar{p}_{cD} + s\bar{p}_{dD} + s\bar{p}_{eD} + s\bar{p}_{fD}. \quad (10)$$

对于不同的夹角,压降叠加过程中叠加数量稍做调整,例如对于 $\theta = 60^\circ$ 的夹角断层,共有六口压裂井叠加,对于直线断层,只有两口井叠加。

结合试井分析中常用的 Duhamel(杜哈美)原理以及叠加原理,即可求得 Laplace 空间中考虑井筒储集和表皮效应的无因次井底压力:

$$\bar{p}_{wD}(s) = \frac{s\bar{p}_{Dall} + S}{s + C_D s^2 (s\bar{p}_{Dall} + S)}. \quad (11)$$

以上得到的是夹角断层无限导流裂缝井解,对于有限导流垂直裂缝,王晓冬等^[19]提出了裂缝导流函数以此快速计算有限导流垂直裂缝井底压力解并进行了验证,可以在无限导流垂直裂缝的基础上加裂缝导流函数快速计算无限导流垂直裂缝井井底压力解.无限导流函数形式如下:

$$s\bar{f}(C_{fD}) = 2\pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n\pi)^2 C_{fD} + 2\sqrt{(n\pi)^2 + s}} + \frac{0.4063\pi}{\pi(C_{fD} + 0.8997) + 1.6252s}. \quad (12)$$

1.2 有限导流多段压裂水平井压力分布特征

对于多段压裂水平井,压裂产生 M 条裂缝,当 M 条压裂裂缝同时工作时,在储集层任意位置处所产生的压降等于各个裂缝的压降的叠加,根据根据 Duhamel 褶积原理, M 条缝总的压降为

$$\bar{p}_D(x_D, y_D) = \sum_{i=1}^M \bar{q}_{Di} s\bar{F}_{Di}(\beta_D, \beta_{wDi}), \quad (13)$$

式中

$$\beta_{wDi} = (x_{wDi}, y_{wDi}), \beta_D = (x_D, y_D),$$

$$s\bar{F}_{Di} = s\bar{p}_{Dalli} + \delta s\bar{f}(C_{fD}),$$

$$\delta = \begin{cases} 1, & \beta_D = \beta_{wDi} \\ 0, & \beta_D \neq \beta_{wDi} \end{cases}$$

对于无限导流垂直裂缝 $\delta = 0$ 。

根据上述描述构建方程组如下：

$$\begin{bmatrix} \bar{F}_{11D}(\beta_{wD1}, \beta_{wD1}) & \bar{F}_{12D}(\beta_{wD1}, \beta_{wD2}) & \cdots & \bar{F}_{1MD}(\beta_{wD1}, \beta_{wDM}) & -1 \\ \bar{F}_{21D}(\beta_{wD2}, \beta_{wD1}) & \bar{F}_{22D}(\beta_{wD2}, \beta_{wD2}) & \cdots & \bar{F}_{2MD}(\beta_{wD2}, \beta_{wDM}) & -1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \bar{F}_{M1D}(\beta_{wDM}, \beta_{wD1}) & \bar{F}_{M2D}(\beta_{wD2}, \beta_{wDM}) & \cdots & \bar{F}_{MMD}(\beta_{wDM}, \beta_{wDM}) & -1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{q}_{D1} \\ \bar{q}_{D2} \\ \vdots \\ \bar{q}_{DM} \\ \bar{p}_{wD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 1/s \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

通过对上述矩阵的求解,可以得到任意夹角断层多段压裂水平井井底压力解.再通过 Stehfest^[19]数值反演编程计算,获得典型特征曲线并分析每个因素对曲线的影响。

2 典型特征曲线及影响因素分析

通过编程计算获得考虑井储和表皮影响时不同夹角断层的多段压裂水平井典型无因次压力和压力导数曲线,通过压力导数曲线特征划分不同流动阶段,分析每个阶段在典型曲线中所表现出的特征。

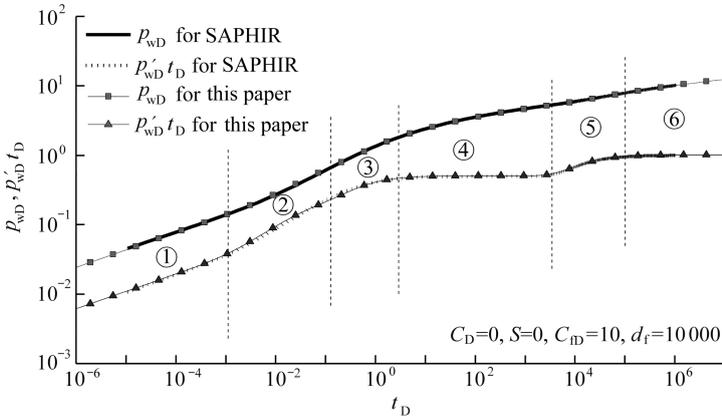


图2 计算结果对比分析

Fig. 2 Comparative analysis of calculation results

为了检验该方法的正确性,在不考虑井储和表皮时,以断层夹角 $\theta = 180^\circ$ 、裂缝条数 $M = 1$ 为例,将所计算的结果与商业软件 SAPHIR 进行对比(见图2)。从图2可以看出,无论是无因次压力曲线(p_{wD})还是无因次压力导数曲线($p'_{wD} t_D$),利用本文方法与商业软件 SAPHIR 计算得到的结果吻合度高.特别是在早期双线性流阶段①、线性流到径向流过渡段③以及径向流阶段④之后的过渡段⑤和断层反映阶段⑥吻合度最高,在双线性流阶段②压力吻合效果略低于前者各个阶段,但是误差也很小,可以忽略.因此,利用该模型可以很好地计算夹角断层多段压裂水平井井底压力。

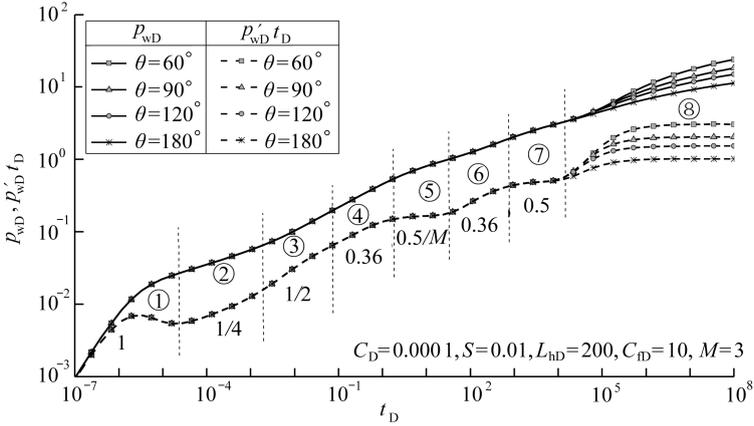
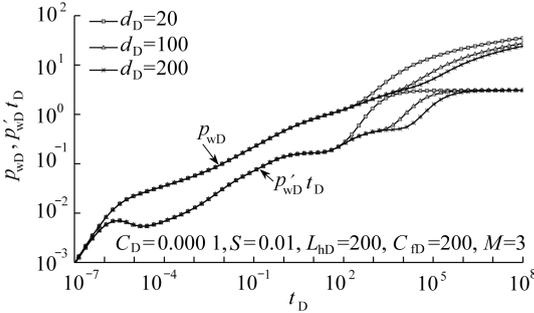


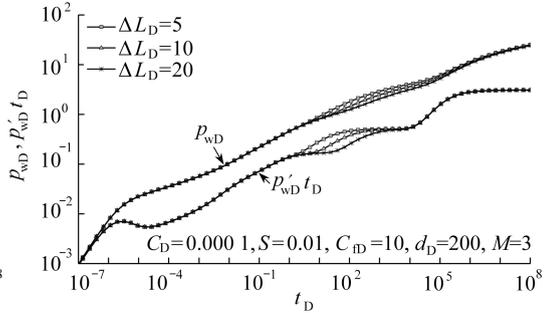
图3 不同夹角断层多段压裂水平井底响应特征曲线

Fig. 3 Typical curves of multi-stage fractures with different included angles



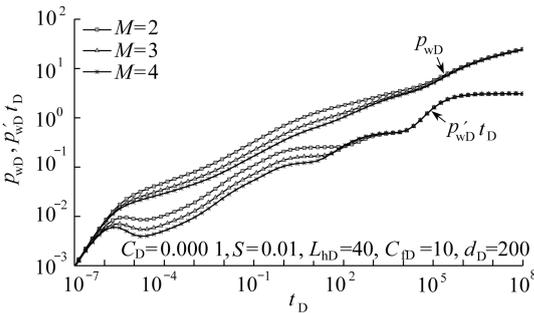
(a) 水平井中心到断层的垂直距离

(a) The vertical distance from the center of the horizontal well to the fault



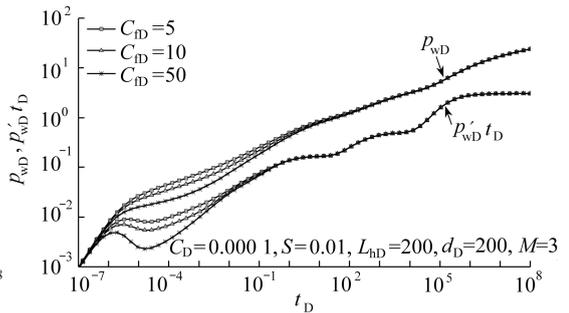
(b) 裂缝间距

(b) The spacing between adjacent fractures



(c) 裂缝条数

(c) The fracture number



(d) 裂缝导流能力

(d) The fracture conductivity

图4 各影响因素对典型特征曲线的影响

Fig. 4 Typical curves influenced by other factors

图3为不同夹角断层多段压裂水平井底响应特征曲线.该典型特征曲线可以划分为8个流动阶段:第①阶段为井储效应阶段,在纯井筒阶段,压力和压力导数曲线重合且呈斜率为1的直线,井储和表皮共同作用阶段压力导数曲线呈一明显的“驼峰”;第②阶段为双线性流阶段,该阶段裂缝中的流体沿裂缝和垂直于裂缝的线性流,理想情况下,该阶段压力和压力导数

曲线特征呈斜率为 $1/4$ 的直线;第③阶段为早期线性流阶段,该阶段只有地层向裂缝的线性流,压力和压力导数曲线特征呈斜率为 $1/2$ 的直线;第④阶段为早期裂缝椭圆流阶段,该阶段压力导数曲线呈斜率为 0.36 的直线;第⑤阶段为早期径向流阶段,压力导数曲线主要特征为 $0.5/M$ 的水平线;第⑥阶段为系统椭圆流阶段,该阶段压力导数曲线呈斜率为 0.36 的直线;第⑦阶段为系统径向流阶段,压力导数主要曲线特征为 0.5 的水平线;第⑧阶段为外边界反应阶段,不同夹角断层,压力导数曲线呈不同值的水平线.其总的规律为:外边界反应阶段水平线的值为 $0.5 \times 360^\circ/\theta$.

图 4 为各影响因素对典型特征曲线的影响.从图中可以看出,随着井中心到断层的距离不断增大,压力波传播到断层所需要的时间就越长,系统径向流阶段持续时间越长,其压力导数曲线特征也越明显;随着井中心到断层的距离不断减小,压力波迅速传播到断层,早期径向流、系统椭圆流和线性流压力导数曲线特征越不明显(图 4(a)).在裂缝条数不变的情况下,裂缝与裂缝之间的距离越大,裂缝径向流持续的时间就越长,早期线性流特征越明显(图 4(b)).在水平井长度不变且裂缝均匀分布的情况下,裂缝条数越多,裂缝与裂缝之间的距离就越小,裂缝条数的增加会显著改善水平井井筒附近地层的渗透率,水平井井筒压力越低,水平井井筒与裂缝之间的压差越大,对于定产生产的油井,原油流过该区域时所消耗的压降就更小,所以,早期和中期压力和压力导数曲线越低,系统径向流阶段压力导数曲线对裂缝条数并不敏感,说明系统径向流阶段主要反映的是压力波传播到距离水平井井筒比较远的区域的渗流特征(图 4(c)).裂缝导流能力越大,说明流体在裂缝中的流动阻力越小,裂缝导流能力对试井曲线的影响主要在双线性流阶段和第一线性流动阶段.裂缝导流能力越大,井筒附近压差就越大,流体流过该区域时所消耗的压降就越小,沿裂缝方向流体流动阻力就越小,双线性流结束时间越早.因此,裂缝导流能力越大,早期压力和压力导数曲线位置越低;当裂缝导流能力为无穷大时,双线性流阶段消失,早期阶段曲线特征为无限导流曲线特征(图 4(d)).

3 结 论

1) 相比裂缝网格划分计算获得的有限导流多段压裂水平井井底压力,利用裂缝导流函数计算夹角断层有限导流多段压裂水平井井底压力能有效地提高计算速度.

2) 边界反映阶段,双对数坐标中压力导数呈 $0.5 \times 360^\circ/\theta$ 的水平线,裂缝到边界的距离越小,边界反映时间越早,径向流阶段压力导数曲线特征越不明显.

3) 裂缝条数越多,早、中期压力和压力导数曲线位置越低;裂缝间距越小,早期径向流压力导数 $0.5/M$ 值的水平线特征线越不明显;裂缝导流能力越大,早期双线性流阶段压力和压力导数曲线位置越低.

参考文献(References):

- [1] 王睿,董范,孟召平,等.樊庄区块构造对煤层气井产能的控制机理[J].中国矿业大学学报,2014,43(6):1025-1030.(WANG Rui, DONG Fan, MENG Zhaoping, et al. The controlling mechanism of geological structures on the production of coal bed methane wells in Fanzhuang block[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(6): 1025-1030. (in Chinese))
- [2] 史长林,纪友亮,陈斌,等.复杂断块油田断层封闭性判别:以大港油田 X 断块为例[J].天然

- 气地球科学, 2009, **20**(1): 143-147.(SHI Changlin, JI Youliang, CHEN Bin, et al. Diagnostic method of fault sealing in complex block faulted oil field; a case from X block, Dagang oil field[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, **20**(1): 143-147.(in Chinese))
- [3] 赵卫蕊, 王杰祥, 王庆, 等. 压裂井油层参数对增产效果的影响分析及应用[J]. 断块油气田, 2007, **14**(4): 63-65.(ZHAO Weirui, WANG Jiexiang, WANG Qing, et al. Influence analysis and application of reservoir parameters from fracturing well on incremental result[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2007, **14**(4): 63-65.(in Chinese))
- [4] OZKAN E, RAGHAVAN R. New solutions for well-test-analysis problems, part 1: analytical considerations (includes associated papers 28666 and 29213)[J]. *Society of Petroleum Engineers Formation Evaluation*, 1991, **6**(3): 359-368.
- [5] OZKAN E, RAGHAVAN R. New solutions for well-test-analysis problems, part 2: computational considerations and applications (includes associated papers 18615)[J]. *Society of Petroleum Engineers Formation Evaluation*, 1991, **6**(3): 369-378.
- [6] HEBER CINCO L, SAMANIEGO V F, DOMINGUEZ A N. Transient pressure behavior for a well with a finite-conductivity vertical fracture[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1978, **18**(4): 253-264.
- [7] RILEY M F, BRIGHAM W E, HORNE R N. Analytic solutions for elliptical finite-conductivity fractures[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1991: 35-48. DOI: 10.2118/22656-MS.
- [8] 王晓冬, 穆立婷. 两任意夹角断层的井壁压力计算方法[J]. 油气井测试, 1997, **6**(2): 10-12. (WANG Xiaodong, MU Liting. Algorithms for pressure transient analysis in the presence of two intercept faults with an arbitrary angle[J]. *Well Testing*, 1997, **6**(2): 10-12.(in Chinese))
- [9] 雷刚, 董平川, 饶培玉, 等. 各向异性断块油藏油井压力特征分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, **37**(2): 125-130.(LEI Gang, DONG Pingchuan, RAO Peiyu, et al. Analysis of Pressure characteristics of oil well in anisotropic fault-block oil reservoirs[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2015, **37**(2): 125-130.(in Chinese))
- [10] 冯纪成, 周丽莎, 曹脊翔. 断层附近一口无限导流垂直裂缝压裂井试井典型曲线研究[J]. 钻采工艺, 2013, **36**(3): 42-44.(FENG Jicheng, ZHOU Lisha, CAO Jixiang. Transient pressure analysis of an infinite-conductive vertical fractured well near a fault[J]. *Drilling & Production Technology*, 2013, **36**(3): 42-44.(in Chinese))
- [11] 宋付权, 刘慈群. 单一直线边界油藏中水平井渗流压力动态分析[J]. 石油勘探与开发, 1997, **24**(4): 47-50.(SONG Fuquan, LIU Ciqun. The transient Pressure analysis of a horizontal well in an unlimited reservoir with a linear boundary[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1997, **24**(4): 47-50.(in Chinese))
- [12] 樊冬艳, 姚军, 孙海, 等. 页岩气藏分段压裂水平井不稳定渗流模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, **38**(5): 116-123.(FAN Dongyan, YAO Jun, SUN Hai, et al. Transient flow model of stage-fractured horizontal wells in shale gas reservoirs[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, **38**(5): 116-123.(in Chinese))
- [13] 刘晓旭, 杨学锋, 陈远林, 等. 页岩气分段压裂水平井渗流机理及试井分析[J]. 天然气工业, 2013, **33**(12): 77-81.(LIU Xiaoxu, YANG Xuelin, CHEN Yuanlin, et al. Seepage behavior and well testing in horizontal shale gas wells under multi-stage fracking[J]. *Natural Gas Indus-*

- try, 2013, **33**(12): 77-81.(in Chinese))
- [14] 尹洪军, 李兴科, 赵二猛, 等. 体积压裂水平井不稳定试井解释研究[J]. 特种油气藏, 2017, **24**(5): 85-90.(YIN Hongjun, LI Xingke, ZHAO Ermeng, et al. Interpretation of transient well test data in horizontal wells with volumetric fracturing[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2017, **24**(5): 85-90.(in Chinese))
- [15] 赵超, 肖洁, 许正栋, 等. 多段压裂水平井压力动态特征分析[J]. 断块油气田, 2015, **22**(6): 798-802.(ZHAO Chao, XIAO jie, XU Zhengdong, et al. Dynamical pressure characteristics of multi-stage fractured horizontal well[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2015, **22**(6): 798-802.(in Chinese))
- [16] 段永刚, 杨宇, 陈伟, 等. 压裂水平井多裂缝系统不稳定压力动态特征[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, **28**(S1): 44-46.(DUAN Yonggang, YANG Yu, CHEN Wei, et al. Pressure behavioral characteristics of multi-fractures system of horizontal well of post-fracturing in gas reservoir[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2009, **28**(S1): 44-46.(in Chinese))
- [17] 王本成, 贾永禄, 李友全, 等. 多段压裂水平井试井模型求解新方法[J]. 石油学报, 2013, **34**(6): 1150-1156.(WANG Bencheng, JIA Yonglu, LI Youquan, et al. A new solution of well test model for multistage fractured horizontal wells[J]. *Acta Petrolel Sinica*, 2013, **34**(6): 1150-1156.(in Chinese))
- [18] 李顺初, 任丽, 郑鹏社, 等. 基于应力敏感的天然裂缝性页岩气藏双孔模型解的结构[J]. 应用数学和力学, 2017, **38**(2): 233-242 (LI Shunchu, REN Li, ZHENG Pengshe, et al. Similar structure of the solution to the dual-porosity model for naturally fractured shale gas reservoirs based on stress sensitivity[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2017, **38**(2): 233-242.(in Chinese))
- [19] 王晓冬, 罗万静, 侯晓春, 等. 矩形油藏多段压裂水平井不稳态压力分析[J]. 石油勘探与开发, 2014, **41**(1): 74-94.(WANG Xiaodong, LUO Wanjing, HOU Xiaochun, et al. Transient pressure analysis of multiple-fractured horizontal wells in boxed reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, **41**(1): 74-94.(in Chinese))
- [20] STEHFEST H. Algorithm 368: numerical inversion of Laplace transforms[J]. *Communication of the ACM*, 1970, **13**(1): 47-49

A New Well Test Analysis Method for Multi-Stage Fractured Horizontal Wells With Angle Faults

LIU Qiguo¹, XU Youjie¹, LIU Yicheng², QI Shengzhi¹

(1. College of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P.R. China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610000, P.R.China)

Abstract: Closed faults exist in some regions of eastern China, and they have great influence on the pressure characteristics of oil wells. Based on the basic principles of seepage mechanics, firstly, the bottom pressure solution of infinite-conductivity vertical fractured wells in the Laplace space was obtained by means of the basic theory of point source function and the Laplace integral transform. Combined with the conductivity function, the pressure solution of finite-conductivity vertical fractured wells was obtained. Secondly, the solution of multi-stage fractured horizontal wells with different angle faults was obtained with the mirror reflection principle and the pressure drop superposition principle. The pressure solution in the real space was given through the Stehfest numerical inversion, and the typical pressure as well as the pressure-derivative log-log curves were drawn. The results show that, the typical characteristic curve is divided into 8 flow stages, the pressure derivative is a horizontal line of a $0.5 \times 360^\circ/\theta$ in the phase of fault reflection, and the smaller the vertical distance from the horizontal well center to the fault is, because the pressure-derivative curve characteristics of the radial flow are covered by the boundary reflection characteristic curve, the earlier the fault reflection time will be. Moreover, the larger the spacing between adjacent fractures is, the more obvious the early mirror flow characteristic curve will be; the larger the fracture number is, the lower the early pressure and pressure-derivative curve will be; and the larger the bilinear flow stage pressure derivative curve is, the lower conductivity will be. The accurate evaluation of reservoirs with closed fault boundaries and the reliable calculation of relevant parameters can be made through the proposed model.

Key words: angle fault; multi-stage fractured horizontal well; mirror reflection; finite-conductivity fracture; conductivity function

Foundation item: The National Science and Technology Major Project of China(2017ZX05009-004;2016ZX05015-003)

引用本文/Cite this paper:

刘启国, 徐有杰, 刘义成, 齐生芝. 夹角断层多段压裂水平井试井求解新方法[J]. 应用数学和力学, 2018, **39**(5): 558-567.

LIU Qiguo, XU Youjie, LIU Yicheng, QI Shengzhi. A new well test analysis method for multi-stage fractured horizontal wells with angle faults[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, **39**(5): 558-567.