

## 基于数字滤波的压裂停泵数据反演方法

温杰雄<sup>1</sup>, 田伟<sup>1</sup>, 毕全福<sup>2</sup>, 李雪彬<sup>2</sup>, 卢德唐<sup>1</sup>

(1.中国科学技术大学近代力学系,安徽合肥 230027;2.中国石油集团西部钻探工程有限公司试油公司,新疆克拉玛依 834027)

**摘要:**水力压裂是目前开采致密油气的主要方式,压裂施工期间测量的地面压力及流量数据包含地层压力、渗透率和裂缝半长等重要信息,这些参数是判断压裂施工成功率及压后开采制度制定的重要依据.提出了基于数字滤波压裂停泵数据反演方法,首先采用井筒垂直管流方程将变密度和流量的地面压力折算到井底压力,其次采用 FIR 滤波处理停泵后压降数据,消除停泵水锤等噪声干扰,获得反映地层渗流的压降数据,最后采用垂直裂缝井试井分析方法解释滤波后的压降数据,获得地层渗透率、原始地层压力及裂缝半长等重要参数,实现了对裂缝及地层参数的实时分析及评价.通过与关井压力恢复分析结果比较,证明了所提方法的可靠性.

**关键词:**数字滤波;水力压裂;试井分析;压裂评价

**中图分类号:** TE357.1<sup>+</sup>4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.05.008

**引用格式:** 温杰雄,田伟,毕全福,等. 基于数字滤波的压裂停泵数据反演方法[J]. 中国科学技术大学学报,2018,48(5):392-399.

WEN Jiexiong, TIAN Wei, BI Quanfu, et al. A new data inversion analysis method based on digital filtered pump-stop data of hydraulic fracturing[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018,48(5):392-399.

## A new data inversion analysis method based on digital filtered pump-stop data of hydraulic fracturing

WEN Jiexiong<sup>1</sup>, TIAN Wei<sup>1</sup>, BI Quanfu<sup>2</sup>, LI Xuebin<sup>2</sup>, LU Detang<sup>1</sup>

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;  
2. CNPC Xibu Drilling Engineering Company Limited, Karamay 834027, China)

**Abstract:** Hydraulic fracturing is currently the main method of exploiting tight gas and oil. The pump-stop pressure and flow-rate data measured during hydraulic fracturing process contains a great deal of important information, such as the formation pressure, permeability and fracture half-length. These parameters are significant judgment to decide post-fracturing mining system. A new method of pump-stop data-inversion analysis method based on digital filtered pump-stop flow-rate and density-changing pressure data of hydraulic fracturing was presented. Firstly, the ground pressure was converted to the well bottom pressure according to the vertical pipe flow theory. The obtained bottom pressure data, also known as pump-stop pressure data, was processed through the FIR filter to eliminate the interference of water hammer and other noise signals. Finally, the filtered data, which contains the information of formation permeability and initial pressure, was processed according to vertical fracture well test analysis. This new method has

收稿日期:2016-05-25;修回日期:2017-02-16

基金项目:中国科学院战略先导科技专项(XDB10030402)和中国科学院-中石油重大战略合作项目(2015A-4812)资助.

作者简介:温杰雄,男,1990年生,硕士.研究方向:流体动力学.E-mail:wjx2009@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:卢德唐,教授.E-mail:dtlu@ustc.edu.cn

been proved reliable by comparing it with pressure build-up, making real-time evaluation of fracture and formation information possible.

**Key words:** digital filtering; hydraulic fracturing; well test analysis; fracturing evaluation

## 0 引言

水力压裂是目前开采致密油气的主要形式<sup>[1]</sup>.它是通过注水加压,用高压液体将地层压开一条或数条裂缝,从而增加地层向井筒的渗流面积,达到增产增注的目的<sup>[2]</sup>.然而,对压裂效果的评价一直是一个难题,目前常用的手段是微地震<sup>[3]</sup>和电位监测<sup>[4]</sup>,这些监测方法存在施工难度大,成本高等问题.

试井是压裂效果评价的主要手段<sup>[5]</sup>,但目前的试井技术只能在压裂后生产一定时间再通过关井压力恢复<sup>[6]</sup>来实现,对压裂评价效果来说缺乏时效性.虽然正式压裂前要进行小型压裂测试<sup>[7]</sup>,但小型压裂技术一般服务于压裂设计和施工<sup>[8]</sup>,对地层压力及渗透率只是定性描述,裂缝半长也无法给出.压裂施工期间的数据分析方法<sup>[9]</sup>主要包括基于恒速率法的闭合前分析和基于脉冲法的闭合后分析.其中闭合前分析无法获得地层渗透率;而闭合后分析<sup>[10]</sup>只能定性给出渗透率与裂缝半长之间的关系,同时由于直线段的选取是人工凭经验来完成,容易引入偶然误差.

压裂停泵后,在井口处测得的压力变化主要是由于储层渗流引起的压降,虽然停泵时间短,但注入量大,所以通过对压降数据进行分析应该可以获得地层压力、渗透率及裂缝半长等.通过对大量压裂施工压力数据进行分析,我们发现在压裂停泵期间,往往伴随有剧烈压力波动,这是因为停泵时,井口处压裂液流量在极短时间内降为零,使得井口处压力出现一个突然的下跌,而由于流体具有惯性和可压缩性,这个压力突降将以压力波的形式向井底传播,并在井底反射,形成水锤<sup>[11]</sup>.另外对于某些压裂施工数据,当压力计比较灵敏时,会将地表机械的振动引起的压力波动记录下来.由于压力衰减过程中常伴随有剧烈压力振荡,试井分析方法一直没有应用到压裂期间施工数据分析,使得停泵后的压力数据分析始终是定性分析.

本文通过井筒垂直管流理论和滤波手段,首次将试井分析引入到压裂停泵压力数据分析.采用井筒垂直管流理论将井口压力折算到井底,并采用滤波处理压裂停泵后压力数据,消除水锤压力的影响,

得到的渗流压力便可使用试井方法进行地层参数反演.通过选择适当的低通滤波方法<sup>[12]</sup>,从施工数据中滤除水锤等噪声的干扰,获得储层渗流引起的压降曲线,从而能够对裂缝参数、地层压力及渗透率进行实时分析,不仅可实时对压裂进行评估,而且可直接预测压后的产能,解决了多年来压裂领域一直没有解决的难题.对比于关井压力恢复测试等常规试井分析方法,利用压裂停泵数据反演分析方法,在压裂完成后直接反演得到裂缝半长、地层参数及原始压力等,不需要进行试产、关井等一系列复杂的过程,节省了大量人力、物力和时间.

## 1 理论基础

对压裂停泵后地面压力降落数据反演,需要解决三大问题,首先是井口测得的变排量及变砂浓度的压力数据折算到井底,其次滤除停泵水锤等噪声干扰数据,最后是停泵压降数据反演,这里给出相关方面的基础理论.

### 1.1 井底压力折算

渗流发生在压裂层段的多孔介质中,停泵后井筒流体是静液柱,井口压力折算到井底时两者只相差一个常数(静液柱压力 $\rho g H$ );而刚停泵瞬间井筒中的流体处于运动状态,该点的井口压力折算到井底必须考虑变排量导致摩阻变化及变砂浓度导致流体密度变化的影响.将井口压力折算到井底,一方面是因为试井要求井底压力,更主要的是消除停泵瞬间动压和停泵后静压之间的压力差异.考虑到压裂层段离地面数千米,停泵瞬间井筒中不仅有压裂液还有不同砂比浓度砂(见图 1),因此采用井筒微小管元模型(见图 2),受力分析如图 2(b)所示.

根据动量定理,井筒压力梯度可表示为<sup>[13]</sup>

$$\frac{dp}{dz} = \rho g - \frac{\rho u du}{dz} - \frac{2\rho f u^2}{D} \quad (1)$$

式中, $p$ 为压强,(Pa); $\rho$ 为流体密度,( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $g$ 为重力加速度,( $\text{m}/\text{s}^2$ ); $D$ 为管径,(m); $z$ 为管道沿轴向的坐标,(m); $u$ 为管道内流体沿轴向的速度,(m/s); $t$ 为时间,(s); $f$ 为摩阻系数,无因次,可根据雷诺数 $Re$ 判别后,依据不同流态下摩阻的不同表达式进行计算<sup>[14]</sup>.

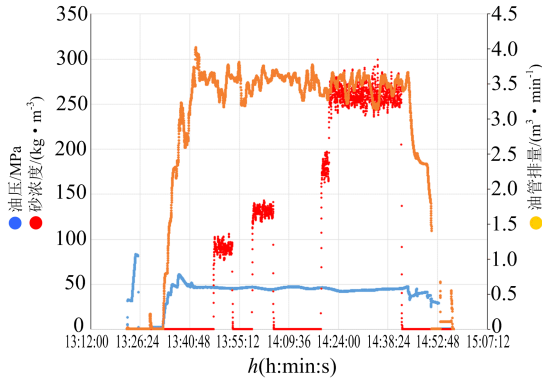


图 1 新疆某井(实例分析中所选取的井)加砂浓度随注入时间变化图

Fig.1 The diagram of the time-variation of sand concentration of a well in Xinjiang (The well selected in the sample analysis)

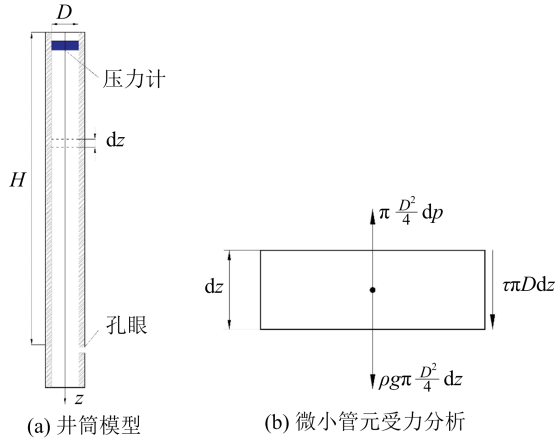


图 2 井筒微小管元模型及受力分析

Fig.2 Micro tube element model of well-bore and force analysis

设注入层段离地面高度为  $H$  ,对式(1)进行积分可得井底与井口之间的压力差为

$$\Delta p = \int_0^H \left( \frac{dp}{dz} \right) dz = \int_0^{H-} \rho g dz - \int_0^{H-} \rho u \frac{du}{dz} dz - \int_0^H \frac{2f}{D} \rho u^2 dz \quad (2)$$

式中,  $\bar{\rho}$  为  $dz$  段流体的平均密度,考虑到压裂过程中会进行加砂,故井内流体为压裂砂与压裂液混合的固液两相流.则

$$\bar{\rho} = \frac{m_{液} + m_{砂}}{A \cdot dz} = \frac{\rho_L A dz + \eta A dz}{A \cdot dz} = \rho_L + \eta \quad (3)$$

式中,  $\rho_L$  为压裂液密度, ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $\eta$  为砂浓度, ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

假设关井瞬间位于井底的流体从井口到达井底经历的时间为  $t_H$  ,并以关井瞬间作为 0 时刻,则关井瞬间的井底流体是在时刻  $-t_H$  注入井筒的.关井瞬间井筒内各层流体参数取决于  $[-t_H, 0]$  时间段

内流体的注入情况,  $\rho_L$  和  $\eta$  均可映射为时间  $t$  的函数.

根据施工数据,  $\rho_L(t)$ ,  $\eta(t)$  和排量  $Q(t)$  已知,压裂液在井筒中的流速为  $u(t) = \frac{Q(t)}{A}$  ,并将  $[-t_H, 0]$  时间段分割为  $N$  段,每段时间步长为  $\Delta t$  ,则有

$$\int_0^{H-} \rho g dz = \int_0^{-t_n-} \rho g \frac{dz}{dt} dt = - \int_0^{-t_n-} \rho g u dt = \sum_{t=-t_n}^0 [(\rho_L(t) + \eta(t))g \cdot u(t) \cdot \Delta t] = \sum_{k=-N}^0 [(\rho_L(k\Delta t) + \eta(k\Delta t))g \cdot u(k\Delta t) \cdot \Delta t] \quad (4)$$

$$\int_0^{H-} \rho u \frac{du}{dz} dz = \int_0^{-t_n-} \rho u \frac{du}{dt} dt = - \sum_{t=-t_n}^0 [(\rho_L(t) + \eta(t)) \cdot u(t) \cdot \frac{\Delta u(t)}{\Delta t} \Delta t] = - \sum_{k=-N}^0 [(\rho_L(k\Delta t) + \eta(k\Delta t)) \cdot u(k\Delta t) \cdot \Delta u(k\Delta t)] \quad (5)$$

若考虑井筒中流体流态和管径的变化,式(2)中第三项应采取分段计算:

$$\int_0^H \frac{2f}{D} \rho u^2 dz = \sum_i \frac{2f_i}{D_i} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \rho u^2 dz \quad (6)$$

式中,

$$\int_{H_{i-1}}^{H_i} \rho u^2 dz = \int_{-t_{n_i}}^{-t_{n_{i-1}}} \rho u^2 \frac{dz}{dt} dt = - \int_{-t_{n_i}}^{-t_{n_{i-1}}} \rho u^3 dt = \sum_{t=-t_{n_i}}^{-t_{n_{i-1}}} [(\rho_L(t) + \eta(t)) \cdot u^3(t) \cdot \Delta t] = \sum_{k=-N_i}^{-N_{i-1}} [(\rho_L(k\Delta t) + \eta(k\Delta t)) \cdot u^3(k\Delta t) \cdot \Delta t] \quad (7)$$

由  $H$  的值,根据下式可以确定出  $t_H$  和  $N$  的值:

$$\sum_{t=-t_n}^0 [u(t) \cdot \Delta t] = \sum_{k=-N}^0 [u(k\Delta t) \cdot \Delta t] = H \quad (8)$$

同理,若井筒存在流体流态或管径的变化,则可根据  $H_i$  确定  $N_i$  的值.

$\Delta u$  采用中心差分的方法确定:

$$\Delta u(k\Delta t) = \frac{u((k+1)\Delta t) - u((k-1)\Delta t)}{2} \quad (9)$$

将式(4)~(7)代入式(2)即可得到折算后的关

井瞬间井底压力。

### 1.2 停泵水锤

图 3(a)为新疆某致密油井压裂停泵后地面实

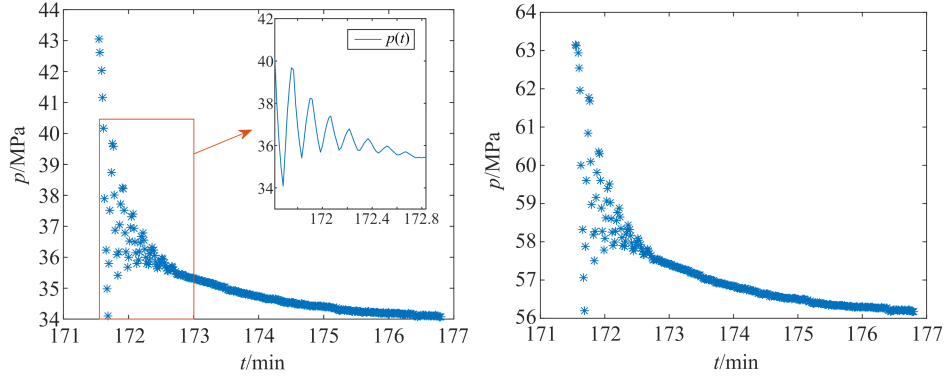


图 3 新疆某井地面实测停泵压力数据曲线(a)和折算到井底的压力数据曲线(b)

Fig.3 The measured on-the-ground pump-stop pressure data (a)

and the converted pressure data at the bottom (b) of the selected well in Xinjiang

从图 3 可以看到在压裂停泵初期出现了强烈的压力波动,随着时间增加,振幅减小,约在 7 个周期后基本衰减为零;且压力波动周期保持不变,约为 9 s.这些特点符合停泵水锤的特征<sup>[15]</sup>.

压裂停泵水锤是由于停泵产生的压力振荡,而停泵过程持续时间相对于停泵后整个压降的时间域来说极为短暂,可以看作是一种短时激励,因此停泵后实际测得的施工压力数据  $p(t)$  是由渗流引起的压降  $p_i(t)$  在停泵激励  $h_s(t)$  下的输出,三者关系为施工数据是压降和停泵激励的卷积结果,即

$$p(t) = p_i(t) \times h_s(t) \quad (10)$$

而停泵激励在整个时域上的力学表现为逐渐衰减的水锤  $p_h(t)$ ,

$$p(t) = p_i(t) + p_h(t) \quad (11)$$

对施工压力数据  $p(t)$  作傅里叶变换,得到其频域分布  $P(\omega)$  :

$$P(\omega) = \mathcal{F}\{p(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t)e^{-i\omega t} dt \quad (12)$$

同理,对渗流压降  $p_i(t)$ ,停泵激励  $h_s(t)$  和停泵水锤  $p_h(t)$  分别傅里叶变换得到其频域分布  $P_i(\omega)$ ,  $H_s(\omega)$  和  $P_h(\omega)$ .

根据傅里叶变换的卷积性质和线性性质有

$$P(\omega) = \mathcal{F}\{p_i(t) \times h_s(t)\} = \mathcal{F}\{p_i(t)\} \cdot \mathcal{F}\{h_s(t)\} = P_i(\omega) \cdot H_s(\omega) \quad (13)$$

$$P(\omega) = \mathcal{F}\{p_i(t) + p_h(t)\} = \mathcal{F}\{p_i(t)\} + \mathcal{F}\{p_h(t)\} = P_i(\omega) + P_h(\omega) \quad (14)$$

### 1.3 低通滤波滤除停泵水锤的影响

经典滤波方法,是以傅里叶变换为基础,基于频

测的压力数据曲线,图 3(b)为按节 1.1 方法折算后的井底压力数据曲线。

域的处理方法;通过低通滤波,可以把有用信号(渗流造成的压降)和噪声信号(水锤压力波动等)在频域进行分离.理论上,渗流压降的频率趋于零,通过低通滤波可以很好地与水锤波动区分开来。

对实测井底压力数据  $p(t)$  (若实测数据为井口压力,需按节 1.1 方法折算到井底)进行傅里叶变换得到其频域分布  $P(\omega)$ ,再乘以传递函数  $H(\omega)$ ,得到处理后的频域分布  $P_f(\omega)$  :

$$P_f(\omega) = P(\omega) \cdot H(\omega) = \mathcal{F}\{p(t)\} \cdot H(\omega) = \left( \int_{-\infty}^{+\infty} p(t)e^{-i\omega t} dt \right) \cdot H(\omega) \quad (15)$$

式中,传递函数  $H(\omega)$  的理论公式为

$$H(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega < \omega_c; \\ 0, & \omega \geq \omega_c \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\omega_c$  为截止频率。

对式(15)进行傅里叶逆变换得到滤波后的数据信号  $p_f(t)$ ,通过选择适当的传递函数  $H(\omega)$ ,将高频振荡(包括水锤振荡和仪器振荡)全部滤去,可以使得获得的  $p_f(t)$  近似等于渗流压降  $p_i(t)$  :

$$p_i(t) \approx p_f(t) = \mathcal{F}^{-1}\{P_f(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} P_f(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (17)$$

在实际情况下,我们测得的压力数据实际上是时域离散的数据点  $p(n)$ ,而非一条连续的压力曲线;故而在实际处理中,使用离散傅里叶变换代替式(15)和式(17)中的傅里叶变换及逆变换:

$$P(\omega) = \text{DFT}[p(n)] \cdot H(\omega) =$$



$$\left(\sum_{n=0}^{N-1} p(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}\omega n}\right) \cdot H(\omega), \omega = 0, 1, \dots, N-1 \quad (18)$$

$$p_t(n) \approx p_f(n) = \text{DFT}^{-1}[P(\omega)] = \frac{1}{N} \sum_{\omega=0}^{N-1} P(\omega) e^{j\frac{2\pi}{N}\omega n}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (19)$$

式中,  $N$  为时域离散数据点个数;  $n$  为离散时域变量;  $\omega$  为离散频域变量; 考虑到渗流压降频率趋于零, 截止频率  $\omega_c$  应尽可能小, 故取  $\omega_c = \frac{\pi}{2N \cdot \Delta t}$ ,  $\Delta t$  为测点时间间隔。

在实践编程中, 离散傅里叶变换可以用快速傅里叶变换 (FFT)<sup>[16]</sup> 进行计算. 只需设计合理的传递函数  $H(\omega)$ , 即可完成对实测压力数据的滤波。

从滤波函数  $H(\omega)$  的设计方法上分类, 数字滤波可分为有限冲击响应 (finite impulse response, FIR) 滤波和无限冲击响应 (infinite impulse response, IIR) 滤波. FIR 滤波器通常通过构造窗函数法进行设计传递函数<sup>[17]</sup>, 而 IIR 滤波器一般采用间接的设计方法, 通过设计模拟滤波器获得传递函

数. 对于 IIR 滤波器, 当其选择性越好时, 相位的非线性失真也会越严重; 与 IIR 滤波器相比, FIR 滤波器能够获得严格的线性相位, 这对于后续的试井分析应用是极为重要的。

对水锤进行滤波时, 滤波后压力数据与原数据无论数值还是相位都不可有较大的失真, 并且滤波后的压力曲线应尽可能平滑. 经过对多种滤波器的滤波效果进行比较, 本文最终采用 FIR 滤波器。

对图 3 中的压力数据进行滤波处理, 图 4 和图 5 为处理后得到的渗流压降曲线  $p_t(t)$  和压裂停泵水锤曲线  $p_h(t)$ . 其中图 4(a) 由 FIR 滤波处理, 结果是一条随时间递减的压力曲线, 符合压裂停泵导致的压降曲线特征; 图 4(b) 是由 IIR 滤波处理的结果, 可以看到在保证相位不失真的前提下, 由 FIR 滤波处理得到的曲线更加平滑. 图 5 是压裂停泵激励  $h_s(t)$  及水锤压力  $p_h(t)$  曲线, 可以看到  $p_h(t)$  曲线是阻尼作用下的波动曲线, 这反映了压裂停泵水锤在井筒内传播时受到的阻尼及水锤在压裂裂缝处的能量耗散, 同时  $h_s(t)$  和  $p_h(t)$  振荡周期一致。

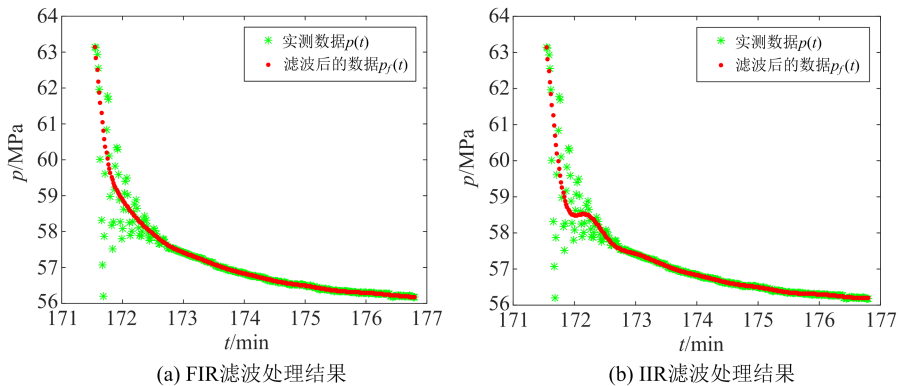


图 4 针对新疆某井停泵水锤的滤波处理结果

Fig. 4 The filtered pressure data of pump-stop water hammer of the selected well in Xinjiang

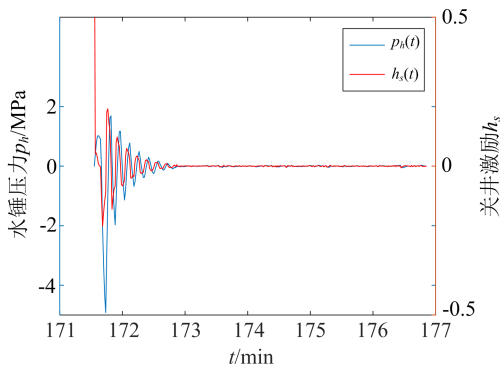


图 5 根据滤波结果计算出的停泵激励与水锤

Fig. 5 Calculated pump-stop stimulation and water hammer based on the filter result

### 1.4 单一裂缝试井原理<sup>[18]</sup>

无限大地层中, 不考虑  $CD$  和  $S$  均匀流量型垂直裂缝, 以单一产量生产时的井底压力  $P_{WD}(t_{Dxf})$  可表示成

$$P_{WD}(t_{Dxf}) = \sqrt{\pi} t_{Dxf} \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{t_{Dxf}}}\right) - \frac{1}{2} E_i\left(-\frac{1}{4t_{Dxf}}\right) \quad (20)$$

式中,

$$t_{Dxf} = \frac{36kt}{\varphi\mu c_i x_f^2}$$

为无量纲时间;

$$P_{WD} = \frac{(P_i - P_{wf})kh}{1.842 \times 10^{-3} qB\mu}$$

为无量纲井底压力；

$$-E_i(-x) = \int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

为指数积分函数；

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \int_0^x e^{-u^2} du$$

为误差函数； $k$  为地层绝对渗透率， $(\mu\text{m}^2)$ ； $B$  为流体体积系数； $q$  为压裂液日注入量， $(\text{m}^3/\text{d})$ ； $C_i$  为综合压缩系数， $(1/\text{MPa})$ ； $x_f$  为水力压裂裂缝半长， $(\text{m})$ ； $h$  为地层有效厚度， $(\text{m})$ ； $\mu$  为流体粘度， $(\text{mPa} \cdot \text{s})$ ； $\varphi$  为地层孔隙度。

在 Laplace 空间上，式(20)可写成

$$\overline{P}_D(u) = \frac{1}{u} \left\{ \frac{\pi}{2} \left[ K_1(\sqrt{u})L_0(\sqrt{u}) + K_0(\sqrt{u})L_1(\sqrt{u}) \right] + K_0(\sqrt{u}) \right\} \quad (21)$$

式中， $u$  为 Laplace 变量； $K_0, K_1$  分别为第二类 0 阶和 1 阶虚宗量 Bessel 函数；

$$L_0(u) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{2}u\right)^{2n+1}}{\Gamma\left(n + \frac{3}{2}\right) \cdot \Gamma\left(n + \frac{3}{2}\right)}$$

为 0 阶修正的 Struve 函数；

$$L_1(u) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{2}u\right)^{2n+2}}{\Gamma\left(n + \frac{3}{2}\right) \cdot \Gamma\left(n + \frac{5}{2}\right)}$$

为 1 阶修正的 Struve 函数；

$$\Gamma(u) = \int_0^\infty e^{-t} \cdot t^{u-1} dt$$

为  $\Gamma$  函数。

考虑  $C_D$  和  $S$  后，采用井底压力卷积形式的解，得到在 Laplace 空间上井底压力的表达式：

$$\overline{P}_{WD}(u) = \frac{u \overline{P}_D(u) + S}{u \{1 + C_D u [u \overline{P}_D(u) + S]\}} \quad (22)$$

式中， $\overline{P}_D(u)$  为 Laplace 空间上不考虑  $C_D$ 、 $S$  瞬态源井底压力，由方程(21)给出； $S$  为表皮因子； $C_D = \frac{C}{2\pi\varphi C_i h x_f^2}$  为无量纲井筒存储常数。

对方程(22)进行数值 Laplace 反演，可以得到均质无限大地层中均匀流量垂直裂缝井底压力的图版，通过双对数压力及导数拟合可以得到地层渗透率  $k$ ，裂缝半长  $x_f$ ，井筒表皮  $S_w$ ，井筒存储常数  $C$ ，总表皮  $S_t$  和附加压降  $\Delta P_s$  等重要参数。

## 2 实例分析

压裂施工地面压力数据由于水锤作用导致停泵后前期数据产生波动，为此本文采用滤波方法滤除早期噪声。为验证滤波方法的正确性，我们对新疆油田某压裂停泵数据进行处理，图 6(a)和图 6(b)分别是新疆油田某井停泵后压力滤波前后双对数压力及导数图。从图 6(a)可以看出，未经滤波的数据由于水锤的干扰，压力及导数双对数图无规则波动，杂乱无章，无法进行理论分析；而经过滤波后的数据绘制的双对数压力及导数图比较平滑，尤其是前部水锤的影响被完全过滤掉，早期数据点基本沿一条斜率为 1 的直线分布，表明停泵后早期压力数据具有井筒存储特征，由此证明采用本文的滤波方法可滤除水锤效应的波动数据。

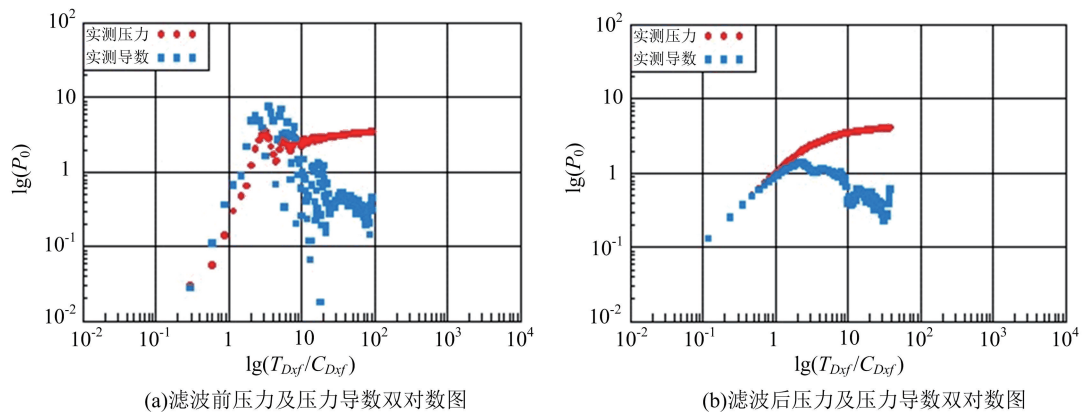


图 6 新疆某井滤波前与滤波后压力及压力导数双对数曲线图

Fig.6 The double-logarithmic graph of before-filtering and after-filtering pressure and pressure derivative of the selected well in Xinjiang

根据滤波及垂直裂缝井试井分析理论,本文对新疆油田某压裂施工数据进行分析,该井于 2015 年 4 月 11 日压裂,压裂液泵注时间为 1.7 h,泵注总量为 259.2 m<sup>3</sup>,之后经过一个多月的退液试产,2015 年 5 月 24 日进行 7 d 的关井恢复压力测试,压力资料完整.通过查阅压裂施工报告及关井压力恢复测试报告,产层地层有效厚度  $h = 4$  m,有效孔隙度  $\Phi = 0.0783$ ;压裂液及原油基本参数如表 1 所示.

表 1 压力恢复测试基本参数及本文所提分析方法输入参数

**Tab.1 essential parameters of pressure build-up test and the digital filtering analysis method presented in this paper**

	压力恢复测试	压裂液参数
流体粘度 $\mu / (\text{mPa} \cdot \text{s})$	7.26	11
体积系数 $B$	1.028	1.1
压缩系数 $C_i / \text{MPa}^{-1}$	$1.248 \times 10^{-3}$	$9.999\ 98 \times 10^{-4}$

根据该井的试油日志,试产时间为 43 d,日产量 42.78 m<sup>3</sup>.分别对停泵后压降数据及关井压力恢复数据进行试井分析,根据双对数图特征选择无限传导垂直裂缝井模型进行试井分析.双对数拟合图如图 7 和图 8 所示,解释结果如表 2 所示.

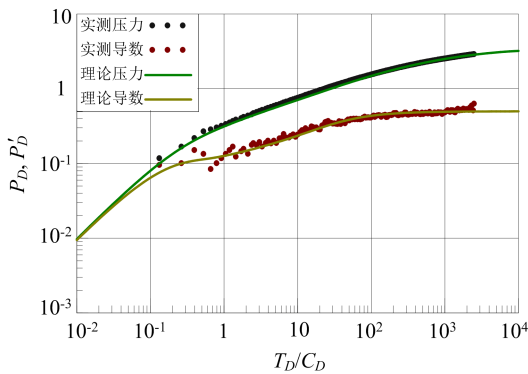


图 7 压力恢复测试结果双对数导数拟合分析图

Fig.7 The double-logarithmic derivative analysis of the result of pressure build-up test

表 2 压力恢复测试结果与本文所提方法计算结果比较

Fig.2 The comparison of analysis result of pressure build-up test and the digital filtering analysis method presented in this paper

	压力恢复测试结果	基于滤波的试井分析
拟合油藏压力 $P_i / \text{MPa}$	55.273 6	54.757 2
地层渗透率 $K / \mu\text{m}^2$	$7.4 \times 10^{-3}$	$8.68336 \times 10^{-3}$
裂缝半长 $X_f / \text{m}$	55.2	55.413 9

从双对数拟合图可以看出,两者拟合效果很好;从表 2 可以看到,由滤波后压力数据试井解释结果

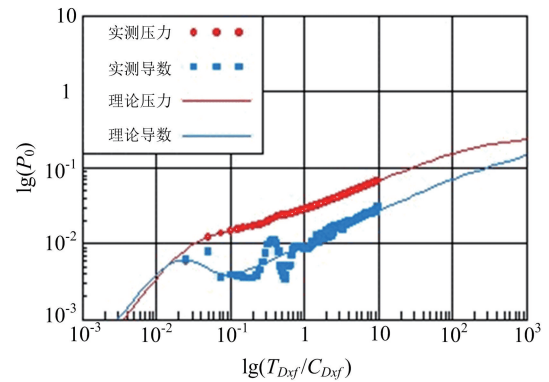


图 8 经滤波后的压力及压力导数数据双对数曲线图

Fig.8 The double-logarithmic graph of filtered pressure and pressure derivative

与压恢测试解释结果基本吻合.不仅原始压力接近,试井解释得到的裂缝半长也几乎一致,说明该井裂缝支撑效果良好,试产一个多月未出现裂缝闭合情况,也说明基于滤波的数据试井分析方法是可信的.

## 4 结论

本文首次提出的基于滤波的试井分析方法,通过井底压力折算和 FIR 低通滤波将水锤等噪声信号从施工数据中滤除,获得了地层渗流引起的压降曲线,并通过选用适当的试井分析模型对滤波后的数据进行分析,得到了裂缝半长、地层压力及渗透率等重要信息.结论如下:

(I) 压裂停泵时易产生水锤现象,此时地面压力变化是由储层渗流引起的压降以及水锤压力波动两部分组成的.

(II) 停泵瞬间井筒中压裂液是运动状态,而停泵后井筒中流体为静液柱.因此,必须采用井筒管流理论将井口压力折算到井底压力.

(III) 采用数字滤波可滤除水锤等噪声信号,通过对各种滤波方法进行比较,FIR 滤波最适合处理压裂停泵中的水锤问题.

(IV) 对滤波后的停泵压力数据可进行试井解释,其解释结果经与关井压力恢复测试解释结果比较,证明可靠.

(V) 本文所提的基于滤波的试井分析方法能够有效地滤除压裂停泵数据中噪声信号的干扰;与传统试井分析方法相比,本文所提方法为压裂施工期间的数据分析方法,能够在压裂完成后直接进行分析,具有较好的时效性,实时地对压裂效果进行评估和预测压后产能,节省了大量人力、物力及时间.

(Ⅵ) 本文中所提出的基于数字滤波的压裂停泵数据分析方法,对有多重不同频率波形叠加的压裂停泵数据,滤波效果不理想,解释结果存在误差。同时,停泵时间如果小于 30 min,则解释结果误差较大,建议停泵时间达到 1 h。

(Ⅶ) 本文使用的滤波方法具有通用性,其相关理论可用于水平井多段压裂停泵压力数据分析。

#### 参考文献(References)

- [1] 唐颖,唐玄,王广源,等. 页岩气开发水力压裂技术综述[J]. 地质通报,2011,30: 393-399.  
TANG Ying, TANG Xuan, WANG Guangyuan, et al. Summary of hydraulic fracturing technology in shale gas development [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30: 393-399.
- [2] 丁波. 页岩气水平井压裂技术研究[D]. 西安:西安石油大学,2014.
- [3] 李雪,赵志红,荣军委. 水力压裂裂缝微地震监测测试技术与应用[J]. 油气井测试, 2012, 21(3):43-45.
- [4] 吴柏志,李军. 电位法井间监测技术在压裂裂缝监测中的应用[J]. 石油地质与工程, 2011, 25(2):126-128.  
WU Baizhi, LI Jun. Application of monitoring technology based on the electrometric method inter well in fracturing monitoring [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(2):126-128.
- [5] 姜瑞忠,李林凯,徐建春,等. 低渗透油藏非线性渗流新模型及试井分析[J]. 石油学报,2012,32(2):264-268.  
JIANG Ruizhong, LI Linkai, XU Jianchun, et al. A nonlinear mathematical model for low-permeability reservoirs and well-testing analysis [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 32(2):264-268.
- [6] YAN Q, LEMANSKI C, KARPYN Z T, et al. Experimental investigation of shale gas production impairment due to fracturing fluid migration during shut-in time [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2015, 24:99-105.
- [7] 郭伟,张博,李建勋,等. 通过小型压裂测试对地层渗透率、储层压力和裂缝性能测定新方法[J]. 辽宁化工, 2014,43(2): 210-212.  
GUO Wei,ZHANG Bo,LI Jianxun,et al. New method for determination of formation permeability, reservoir pressure and fracture properties from a minifrac test [J]. Liaoning Chemical Industry, 2014, 43 (2): 210-212.
- [8] BARNHOORN A, MAGALHAES B S, SUBBIAH S K, et al. A novel approach for predicting in-situ breakdown conditions for wireline mini-fracture testing [C]// 2013 SPE European Formation Damage Conference & Exhibition. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 2013: SPE-165186-MS.
- [9] JONES J, BRITT L K. Design and Appraisal of Hydraulic Fractures[M]. Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2009.
- [10] BARREE R D, BARREE V L, CRAIG D, et al. Holistic Fracture Diagnostics[C]// Rocky Mountain Oil & Gas Technology Symposium 2007. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 2007: SPE-107877-MS
- [11] CHOI S K, HUANG W S. Impact of Water Hammer in Deep Sea Water Injection Wells[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition 2011. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 2011: SPE-146300-MS.
- [12] 黄夏,王海. 零相位低通滤波方法试探[J]. 实用测试技术,1999(6):10-13.
- [13] 王晓磊. 低产气井井筒压力分布及流态研究[D]. 西安:西安石油大学, 2010.
- [14] ECONOMIDES M J, MARTIN T. Modern Fracturing: Enhancing Natural Gas Production [M]. Houston, TX: ET Publishing, 2007: 178-179.
- [15] 杨远东,邓志光. 停泵水锤计算及其防护措施[J]. 中国给水排水,2000,16(5): 29-32.
- [16] 李庚银,陈志业,宁宇. 快速傅里叶变换的两种改进算法[J]. 电力系统自动化, 1997,21(12):37-40.  
LI Gengyin, CHEN Zhiye, NING Yu. Two modified algorithms for fast Fourier transform [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(12):37-40.
- [17] 陈劲松,刘艳伟. 基于窗函数的 FIR 数字滤波器设计[J]. 制造业自动化, 2012, 34(17):104-105.  
CHEN Jingsong, LIU Yanwei. Based on the window function of the FIR digital filter design [J]. Manufacturing Automation, 2012, 34(17):104-105.
- [18] 孔祥言,卢德唐. 渗流力学的理论应用及其前沿研究[J]. 中国科学技术大学学报,2007,37(10):1262-1266.  
KONG Xiangyan, LU Detang. Application and development of fluid in multipore media flowing [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(10):1262-1266.