

引用格式: 王晓强, 赵立安, 王志愿, 等. 基于水锤效应与倒谱变换的停泵压力分析方法[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(1): 108-116.

WANG Xiaoqiang, ZHAO Li'an, WANG Zhiyuan, et al. Data analysis method of pump shutdown pressure based on water hammer effect and cepstrum transformation[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(1): 108-116.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.01.012

基于水锤效应与倒谱变换的停泵压力分析方法

王晓强¹, 赵立安², 王志愿², 修春红², 贾国龙², 董研¹, 卢德唐¹

(1. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027; 2. 中国石油大港油田, 天津 300280)

摘要: 裂缝实时监测评价是水平井多段压裂过程中的一个核心问题, 长期以来受到大量学者的关注。压裂施工停泵期间的压力包括水锤压力和渗流压力两部分, 通过在井口安装高频压力装置, 不仅可以采集停泵压降曲线, 还可以完整地采集到水锤波波形曲线。通过对井筒水锤控制方程的数值求解, 获得模拟的水锤波压力数据。对模拟的水锤波压力进行倒谱分析验证了水锤波产生的压力具有卷积特性, 根据波阻抗及倒谱分析相关理论, 利用水锤波可判断水平井多簇压裂的裂缝簇数与深度。在四川页岩气井的现场应用表明: 该方法能够发现5个进液点, 其中4个进液点的反演结果与4个射孔位置接近, 设计中剩余的4簇孔对应的进液点在倒谱分析中并没有监测到。

关键词: 高频压力监测; 停泵数据分析; 倒谱分析; 水平井多段压裂; 裂缝参数反演; 进液点位置

中图分类号: TE357

文献标识码: A

Data analysis method of pump shutdown pressure based on water hammer effect and cepstrum transformation

WANG Xiaoqiang¹, ZHAO Li'an², WANG Zhiyuan², XIU Chunhong², JIA Guolong², DONG Yan¹, LU Detang¹

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China;

2 Dagan Oilfield Company, PetroChina, Tianjin 300280, China)

Abstract: Real-time monitoring and evaluation of fractures is one of the core issues in the multi-stage fracturing process of horizontal wells, and has long been a focus of many scholars. During the fracturing construction, the pressure during pump shutdown includes water hammer pressure and seepage pressure. By installing a high-frequency pressure device at the wellhead, not only the pump shutdown pressure drop curve but also the water hammer waveform curve can be completely collected. In this paper, the simulated pressure data are obtained by numerically solving the governing equation of wellbore water hammer. The cepstrum analysis of the simulated water hammer pressure verifies that the pressure generated by the water hammer has convolution characteristics. According to the related theory of wave impedance and cepstrum analysis, the water hammer wave can be used to determine the number of fracture clusters and the depth in multi-cluster fracturing of horizontal wells. The field application in Sichuan shale gas well shows that this method can find five liquid inlet points, of which the inversion results of four liquid inlet points are close to four perforation positions, and the remaining four clusters of holes in the design correspond to the liquid inlet points It was not detected in the cepstrum analysis.

Keywords: high-frequency pressure monitoring; data analysis of pump shutdown; cepstrum analysis; multi-stage hydraulic fracturing for horizontal well; inversion of fracture parameter; liquid inlet location

收稿日期: 2021-11-19。

第一作者简介: 王晓强(1998—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事渗流力学研究。地址: 安徽省合肥市金寨路96号, 邮政编码: 230026。

E-mail: wangxq2020@mail.ustc.edu.cn

通信作者简介: 卢德唐(1965—), 男, 硕士, 教授, 主要从事渗流力学教学和科研方面工作。地址: 安徽省合肥市金寨路96号, 邮政编码:

230026。E-mail: dtlu@ustc.edu.cn

基金项目: 国家科技重大专项“致密油气藏多尺度介质复杂结构井数值试井分析方法及应用研究”(2017ZX05009005-002)。

水平井多段压裂能够产生复杂的缝网,提高地层渗透率。该技术对于致密油气资源的开发有重要意义,因此,被广泛使用^[1-4]。根据美国能源署统计^[5],得益于水平井多段压裂技术的成熟,21世纪以来原油产量得到了大幅提高。水平井多段压裂的一个核心问题是裂缝的实时监测与评价^[6]。由于缺乏裂缝参数的直接测量方法,导致认识裂缝形态和进液点位置成为一个难题。

常见的裂缝评价方法包括微地震响应、净压力拟合与不稳定试井方法。微地震监测方法通过监测地震产生的压缩波(P波)和剪切波(S波),计算进液点位置。尽管微地震监测技术能够直接评估裂缝的形态,但是在监测过程中检波器的精度、油藏中的波速以及P波到达时间的选取都会给最终结果带来不确定性;另外,为了提高监测的精度^[7-8],采用多个检波器也提高了施工成本;这种方法另一个缺陷是无法获得裂缝渗透率与导流能力等影响油气生产的参数。

不稳定试井是瞬时压力反演的主要手段,针对水平井多段压裂的数学模型及瞬时压力响应情况,众多学者给出了各种情况下的解析解^[9-11],并分析了不同流态对应的(如线性流、拟径向流)曲线特征,同时给出了反演裂缝参数的方法。2017年,田树宝等^[12]建立了水平井三线性渗流模型,通过油井日常生产数据反演模型中的参数,但是该方法依赖生产阶段的数据,无法做到在压裂阶段反演裂缝参数。2021年,罗红文等^[13]结合温度预测模型与模拟退火算法对压裂水平井的产出剖面与裂缝参数进行了反演,最终形成了一套裂缝参数的定量解释方法。此后也有部分学者对基于温度反演、机器学习的裂缝评价方法进行了探索^[14-15]。以上方法需要进行不稳定试井分析,只能反演地层相关参数,不能评价裂缝条数、位置。

压裂施工期间停泵压力分析类似于注水停注压力降落,利用停泵压力数据反演裂缝参数已经被广泛应用^[16-20]。2018年,温杰雄等^[21]针对压裂停泵数据的水锤效应提出采用FIR(有限冲击响应)滤波方法消除水锤波和停泵压力分析方法。但该方法仍然是渗流方程的反演方法,没有有效利用水锤波信息,同时压力采样频率为1 Hz,这样的采样频率无法获得完整的波形。

1985年,HOLZHAUSEN等^[22]提出了阻抗的概

念,用于解释压裂后的压力震荡现象。此后,基于井筒水锤效应与阻抗分析的井筒事件诊断被国外学者多次应用^[23-25]。2012年,RAHMANI等^[26]提出对裂缝进行简化后计算特征阻抗,从而通过水锤波方程计算简化后的裂缝参数。2018年,PARKHONYUK等^[27]提出基于倒谱方法的裂缝监测技术,解释了压力信号的构成,通过将高频压力信号变换到倒谱域,从而发现裂缝对应的压力信号特征,并根据波速计算进液点位置。2021年,胡晓东等^[28]提出了对水击波信号进行滤波的方法,通过数学函数构造了现场停泵压力信号,研究了不同水击波信号的特征,同时对不同滤波方法进行了对比。以上方法对水锤波信号的分析、解释与降噪进行了充分探索,但这些方法目前仅提取出水锤波信息进行分析,对井筒压力的传播也仅是定性分析。

针对水平井多段压裂中裂缝评价难题,建立控制方程的数值求解,获得停泵后的压力震荡数据,分析停泵后压力的组成,验证了倒谱分析方法的正确性。采用高精度压力监测装置测量井口停泵压力,对于停泵压力中的水锤信号,根据其反射带来的卷积特性,在倒谱域中结合阻抗分析方法能够识别产生反射的位置(对应进液点)。

1 停泵压力数值模拟

在压裂完成后,井口瞬间停泵会导致井筒出现水锤效应,表现为井口压力出现震荡,通过对水锤方程求解能够在一定程度上阐释井口压力震荡的原因。

1.1 模型的建立

井筒的边界条件突然发生改变如停泵等,就会引起井口压力的迅速震荡,该现象称为水锤效应。考虑倾斜管道中的流体流动,水锤现象可以使用动量方程和连续性方程描述^[29]:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial l} + g \sin \theta + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho Av)}{\partial l} + \frac{\partial(\rho A)}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

式(1)一式(2)中: v 为流体速度,m/s; t 为时间,s; p 为井筒中的压强,MPa; l 为距离,m; g 为重力加速度,m/s²; θ 为井筒与水平面夹角,rad; f 为Darcy-Weisbach阻

力系数; D 为井筒直径,m; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; A 为井筒的横截面积, m^2 。

$\frac{fv|v|}{2D}$ 表示在瞬态流动中的摩阻项,仅考虑拟稳态的摩阻项,忽略非稳态的摩阻项。阻力系数的计算方面,对于层流[Re (雷诺数) $<2\ 300$], $f = \frac{64}{Re}$;对于湍流,工程应用中许多计算方法,本研究采用COLEBROOK等^[30]提出的计算公式。

将压力改为水头表达的形式,对上述方程进行进一步化简,式(2)改写为:

$$v \frac{\partial H}{\partial l} + \frac{\partial H}{\partial t} + v \sin \theta + \frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial l} = 0 \quad (3)$$

$$c = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{KD}{E\delta}}}$$

式中: H 为水头,m; c 为声波在薄壁管中的传播速度,m/s; K 为流体的弹性模量,MPa; D 为薄壁圆管内径,m; δ 为壁厚,m; E 为杨氏模量,MPa。

使用流体流量和水头表述控制方程,则动量方程和连续性方程如下:

$$L_1: gA \frac{\partial H}{\partial l} + \frac{\partial Q}{\partial t} + v \frac{\partial Q}{\partial l} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (4)$$

$$L_2: Q \frac{\partial H}{\partial l} + A \frac{\partial H}{\partial t} + Q \sin \theta + \frac{c^2}{g} \frac{\partial Q}{\partial l} = 0 \quad (5)$$

式(4)一式(5)中: Q 为井筒流量, m^3/s 。

上述偏微分方程可以通过特征线法进行求解,定义一个特征参数 λ ,对式(4)、式(5)进行线性组合

$L_1 + \lambda L_2 = 0$,即:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial l} \left(v + \lambda \frac{c^2}{g} \right) + \lambda A \left[\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial l} \left(v + \frac{g}{\lambda} \right) \right] + \lambda Q \sin \theta + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (6)$$

根据 H 和 Q 的物质导数方程将式(6)转化为常微分方程:

$$\begin{cases} \frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{c} \frac{dH}{dt} + \frac{g}{c} Q \sin \theta + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \\ \frac{dl}{dt} = v + c \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{c} \frac{dH}{dt} - \frac{g}{c} Q \sin \theta + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \\ \frac{dl}{dt} = v - c \end{cases} \quad (8)$$

沿特征线对上述方程离散,计算域示意图如图1。

在图1中,对 $(i,t + \Delta t)$ 节点,按 C^+ 其路径为 $l_{i-1} \rightarrow l_i$;按 C^- 其路径为 $l_{i+1} \rightarrow l_i$,于是对式(7)和式(8)积分得到:

$$C^+: \int_{H_{i-1}}^{H_i} dH + \frac{c}{gA} \int_{Q_{i-1}}^{Q_i} dQ + \frac{\sin \theta}{A} \int_t^{t+\Delta t} Q d\tau + \frac{fc}{2gDA^2} \int_{l_{i-1}}^{l_i} Q|Q| dt = 0 \quad (9)$$

$$C^-: \int_{H_{i+1}}^{H_i} dH - \frac{c}{gA} \int_{Q_{i+1}}^{Q_i} dQ - \frac{\sin \theta}{A} \int_t^{t+\Delta t} Q d\tau + \frac{fc}{2gDA^2} \int_{l_{i+1}}^{l_i} Q|Q| dt = 0 \quad (10)$$

式(9)一式(10)中: τ 为时间积分符号。

展开式(9)和式(10)进行合并化简:

$$C^+: H_i^{t+\Delta t} = -(C_c + C_\theta + C_f |Q_{i-1}^t|) Q_i^{t+\Delta t} + H_{i-1}^t + (C_c + C_\theta) Q_{i-1}^t \quad (11)$$

$$C^-: H_i^{t+\Delta t} = (C_c + C_\theta - C_f |Q_{i+1}^t|) Q_i^{t+\Delta t} + H_{i+1}^t + (C_c - C_\theta) Q_{i+1}^t \quad (12)$$

式中: $C_c = \frac{c}{gA}$; $C_\theta = \frac{\Delta t \sin \theta}{A}$; $C_f = \frac{f\Delta l}{2gDA^2}$ 。

1.2 边界条件

压裂停泵时由于流体惯性产生水击波,停泵时的井口条件可由压裂施工时的流量与时间关系给出。实际生产中,停泵流量并不是瞬间变化为0,而是经过一个相对短暂的时间,则停泵期间可用 $Q(\tau)$ 表示流量变化, $Q(\tau)$ 可由压裂期间的排量确定。

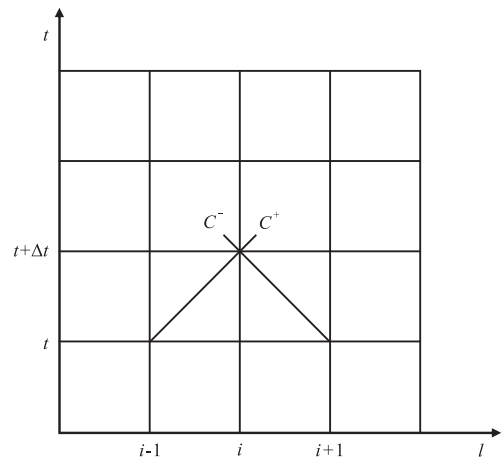


图1 计算域离散示意图

Fig. 1 Discrete diagram of computational domain

裂缝处的节点处理相对复杂:①由于渗流使得井底压力发生变化;②井筒存储效应可以建立流量与压力之间的关系;③井筒中流体流速与裂缝中速度不同产生惯性力。这3者相结合构成裂缝处的压力与流量条件。

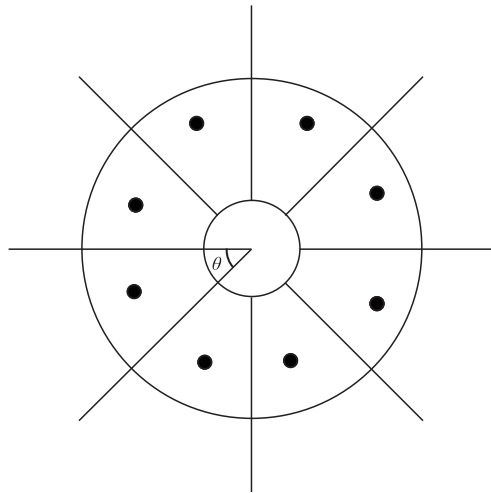
首先裂缝处渗流可采用油藏数值模拟中的Peaceman条件处理,对于直井的情况,如图2所示,假设井筒附近的流动为径向流动,此时流量与压差的关系为:

$$Q = \frac{2\pi Kh\Delta p}{B\mu [\ln(\frac{r_i}{r_w}) + S]} \quad (13)$$

式中: K 为地层的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; h 为地层的厚度, m ; Δp 为压差, MPa ; B 为原油的体积系数; μ 为原油的黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; r_i 为井点到网格的距离, m ; r_w 为井筒半径, m ; S 为表皮系数。

对于裂缝井(图3),裂缝相邻网格进入的流量可以表示为:

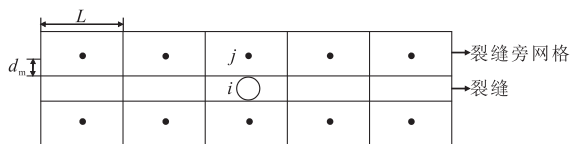
$$Q = \frac{1}{B\mu} \frac{hL}{d_m} \Delta p \quad (14)$$



注: θ 为网格边对井筒的张角。

图2 井网格的边界处理

Fig. 2 Boundary treatment of well grids



注: i 为任一网格; j 为网格*i*相邻的一个网格。

图3 裂缝井模型

Fig. 3 Fractured well model

式中: h 为层的厚度, m ; L 为裂缝分段的网格边长, m ; d_m 为裂缝旁网格到裂缝边的距离, m 。

综合垂直井与裂缝井,压力和流量之间的关系都可以表述为:

$$\Delta p_R = RQ \quad (15)$$

这里 R 相当于油藏数值模拟中的井指数,由于高压导致流体压缩性也会产生流量变化,这种现象称为井储效应,压力变化可以表达为:

$$\Delta p_c = \frac{\int Q(\tau) d\tau}{C_f V} \quad (16)$$

$$C_f = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp}$$

式(15)一式(16)中: R 为井指数, $\text{MPa}/(\text{m}^3/\text{D})$; C_f 为流体压缩因子, MPa^{-1} ; V 为体积, m^3 ; p 为压强, MPa 。

这里 $C = C_f V$ 是井筒存储常数,井筒中流体速度与裂缝中流体速度不同,速度变化产生的力可表示成:

$$\Delta p_I = I_v \frac{dV}{dt} = \frac{I_v}{A} \frac{dQ}{dt} = I \frac{dQ}{dt} \quad (17)$$

这里 I 被定义为惯性系数。综合式(15)一式(17),这些压力差产生的水头变化为;

$$\rho g \Delta H = p_R + p_c + p_I = RQ + \frac{\int Q(\tau) d\tau}{C_f V} + I \frac{dQ}{dt} \quad (18)$$

式(18)离散后变成:

$$\begin{cases} H_i^{t+\Delta t} - H_i^t = \frac{1}{\rho g} \left\{ RQ_i^{t+\Delta t} + \frac{\Delta t}{2C} (Q_i^{t+\Delta t} + Q_i^t) + I \frac{Q_i^{t+\Delta t} - Q_i^t}{\Delta t} \right\} \\ H_i^{t+\Delta t} = \frac{1}{\rho g} \left(R + \frac{\Delta t}{2C} + \frac{I}{\Delta t} \right) Q_i^{t+\Delta t} + H_i^t + \frac{1}{\rho g} \left(\frac{\Delta t}{2C} - \frac{I}{\Delta t} \right) Q_i^t \end{cases} \quad (19)$$

式(19)与式(11)联立即可求解包含裂缝节点处的水头及流量。

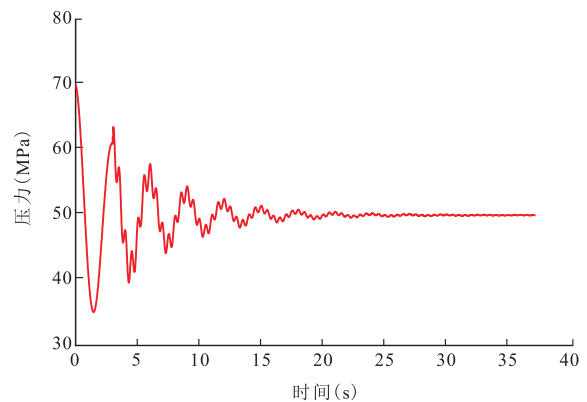


图4 数值模拟得到的井口压力曲线

Fig. 4 Wellhead pressure curve obtained by numerical simulation

1.3 模型的求解

模拟设定包括3条裂缝,分别对该深度的节点进行处理,之后根据上述方程求解,得到井口的压力变化情况(图4),在第三部分会使用该已知模型对倒谱理论进行验证。

2 进液点的倒谱分析方法

水平井多段压裂过程中,由于流量快速变化会产生短暂的不稳定流动,例如,在快速关井、停泵等工况下,流体被强制快速改变流动方向或者瞬间停止流动。此时流体压力会发生快速地震荡,这种压力脉动被称为水锤现象^[23]。射孔、投球、停泵等工况均会产生水锤现象,其中停泵后的压力脉动反映了流体在井下反射的次数。高精度压力监测装置得益于较高的分辨率能够发现压力的短时间脉动,通过对该压力信号进行分析解释,可以计算进液点。

2.1 阻抗分析

在水力学中,震荡压力与震荡流量的比值称为阻抗^[22],阻抗是一个由振幅、频率与相位定义的复数:

$$Z = \frac{He^{i\omega(t+\phi)}}{Qe^{i\omega t}} = \frac{H}{Q}e^{i\omega t\phi} \quad (20)$$

式中: Z 为阻抗, s/m^2 ; H 为水头, m ; Q 为井筒流量, m^3/s ; t 为时间, s ; ω 为角频率, rad/s ; ϕ 为水头与流量相位角, rad 。

阻抗分析中,另一个重要的概念是特征阻抗,用来描述压力与流量运动方向均相同的情况。压力与流量发生震荡的套管中,假设摩擦系数是常数,此时的相位角等于0或 π/ω ,因此,式(20)中的虚部不再存在,其表达式可以简化如下^[22]:

$$Z^c = \frac{\rho c}{A} \quad (21)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; c 为波速, m/s ; A 为导管横截面对应的面积, m^2 。

压力震荡在井筒中传播时,由于井筒几何形状的变化(包括井筒半径变化或者桥塞的存在)以及井筒完整性的变化(包括裂缝与漏失),震荡压力在这些位置会发生变化,可以定义反射系数如下^[24]:

$$R = \frac{Z_2^c - Z_1^c}{Z_2^c + Z_1^c} \quad (22)$$

式中: R 为反射系数; Z_1^c 为压力波通过导管之前的阻抗, s/m^2 ; Z_2^c 为压力波通过导管之后的阻抗, s/m^2 。

考虑压力波在裂缝处的反射,由于裂缝提高了井筒的截面积,此时的反射系数 R 为负值。

2.2 裂缝处压力反射特征

水击波压力在裂缝处发生反射,在数据形式上可以假设为与周期性脉冲响应信号发生作用,周期性脉冲响应中的反射系数就是上述阻抗分析中的反射系数。其数学形式如下:

$$w(t) = \delta(t) + \sum_{n=1}^{+\infty} R^n \delta(t - kT) \quad (23)$$

式中: $w(t)$ 为裂缝处的冲激响应函数; $\delta(t)$ 为单位脉冲函数; k 为压力脉冲的周期数量; T 为压力脉冲的周期。

2.3 压力波的倒谱分析原理

停泵后的地面压力可以被描述为地下压力信号与噪声信号^[25],其表达式为(24)。压力信号 $u(t)$ 是需要处理的有用信号,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,这部分信号就是噪声信号 $n(t)$ 。首先通过FIR低通滤波器对数据进行预处理,过滤高频的噪声信号,保留需要的压力信号。

$$y(t) = u(t) + n(t) \quad (24)$$

式中: $y(t)$ 为采集到的压力信号,MPa; $u(t)$ 为需要处理的有用信号,MPa; $n(t)$ 为噪声信号,MPa。

在水平井压裂停泵瞬间,井口处压裂液流量在极短时间内降为0,使得井口处压力出现一个突然的下跌,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。该压力波在裂缝处发生反射,反射过程可以使用式(25)的卷积过程表示^[25]:

$$u(t) = s(t)*w(t) \quad (25)$$

式中: $s(t)$ 为原始压力信号,MPa; $w(t)$ 为裂缝处反射产生的信号,MPa;*为卷积符号。

对于多段压裂的情景,压力波会在不同的裂缝处均产生反射,多个信号叠加。同时,压力波在井筒传导过程中,其振幅不断地衰减。压力波信号中由反射产生的部分最终会趋于0。

2.3.1 压力卷积信号的倒谱变换

停泵压力由于裂缝处的反射,地面高精度压力监测计信号是由原始水锤波信号与反射信号产生的卷积序列。如果想要得到裂缝的信息,必须通过信号处理方法得到卷积信号中的 $w(t)$ 。倒谱(Cepstrum)技术就是一种能够处理卷积信号的方法,该技术最早用来处理地震波的反射过程^[31]。首先对上述信号进行傅里叶变换:

$$\mathcal{F}[(s*w)(t)] = \mathcal{F}(s)\mathcal{F}(w) \quad (26)$$

傅里叶变换能够将卷积信号变换为乘积信号,但是乘积域信号仍然难以区分2个不同的信号,因此,对乘积信号进行对数变换,成为相加信号。

$$\log[|\mathcal{F}(s)\mathcal{F}(w)|] = \log[\mathcal{F}(s)] + \log[\mathcal{F}(w)] \quad (27)$$

$$\hat{u} = \mathcal{F}^{-1}[\log|\mathcal{F}(u)|] = \hat{s} + \hat{w} \quad (28)$$

通过式(26)将乘积信号变换为相加信号,此时的变换仍然在频率域,需要将信号重新变换回时间域。倒谱变换就是对信号进行上述一系列的处理,变换得到的结果仍然在时间域,为了与原始时间相区别,将自变量称为倒频(Quefreny)。倒谱变换在地震信号处理、声音信号处理中有着广泛的应用,其完整定义见式(28)。

由于裂缝处的阻抗为负值,在时间倒谱图中,阻抗负值较大处是进液点位置;而裂缝对应的位置阻抗有着较小的负值;压力波在井筒反射时(如多段压裂中的桥塞),对应倒谱为正值。在压裂施工期间,考虑将多段压力的倒谱图进行对比分析,能够发现其对应的负值较大处。

2.3.2 进液点位置计算

根据倒谱计算得到了裂缝处的压力波对应的反射时间。建立进液点位置的计算方法:

$$2x_L = ct_p \quad (29)$$

式中: x_L 为液点位置,m; c 为波速,m/s; t_p 为倒谱分析中压力波反射时间,s。

3 实例分析

3.1 模拟数据验证

首先使用水锤波数值模拟数据进行倒谱分析验证倒谱方法确定进液点位置的正确性,数值模拟参

数设置如表1所示。边界条件设定裂缝位置分别在1 200,1 230,1 260 m处。选择图5中的数值模拟数据,由于裂缝位置的冲激响应有固定的统计学特性,并且数值模拟过程中不会产生噪声干扰,为了清晰的说明该理论,选取一个窗口绘制二维图像进行解释。从倒谱图中,能够发现在2.01,2.06,2.11 s存在3个极值,根据井筒中的波速计算公式能够推导裂缝的位置,并且极值的间隔相等,与模型中设定裂缝间隔相等的条件吻合。在4.12 s附近也出现3个极值,并且峰值与之前相比呈现下降趋势,验证了井筒反射冲激响应方程中周期的存在。在算例中,周期 T 对应图中的2.06 s,周期 $2T$ 对应图中的4.12 s,根据对冲激响应函数的分析,倒谱的峰值在每个周期位置按照指数函数衰减。根据波速 $c = 1 194$ m/s 能够计算出裂缝位置分别为1 199,1 229,1 259 m。

实测数据中,存在的裂缝条数较多,即倒谱域中的峰值也较多;另外,每个裂缝反射产生的信号对应的峰值分别在 T 、 $2T$ 、 $3T$ 位置出现,所以在图中呈现的峰值数量多。研究每个裂缝对应的深度仅需要分析第1个 T 对应的时间,仅仅通过二维图像判断第1

表1 数值模拟参数取值

Table 1 Numerical simulation parameter values

参数名称	符号	取值
井指数[MPa/(m ³ ·d ⁻¹)]	R	5×10^{-5}
井筒存储常数(m ³ /MPa)	C	0.02
惯性系数(kg/m ⁴)	I	100
井筒截面积(m ²)	A	1.52×10^{-2}
波速(m/s)	c	1 194

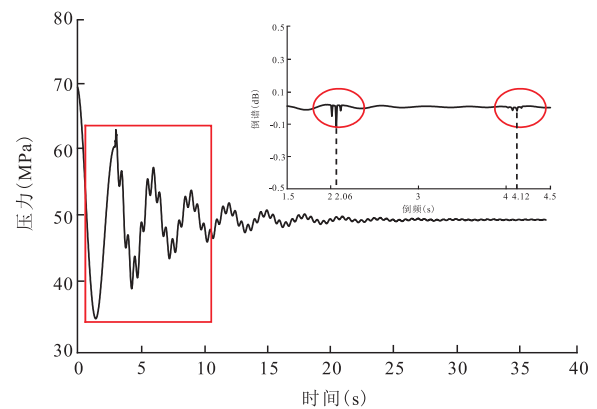


图5 井口压力的倒谱变换图像

Fig. 5 Cepstral transform image of wellhead pressure

个周期的位置比较困难,绘制短时倒谱变换的云图(x轴为时间,y轴为倒频,颜色表示倒谱幅值)能够比较直观地发现裂缝引起的压力波反射情况。

3.2 实测数据解释

在四川盆地某水平井A压裂过程中使用上述倒谱分析方法,2021年6月该井(2 585~4 584 m井段)开始页岩气压裂施工。其中设计水平段长为1 999 m,有效压裂段长为1 849 m,压裂24段;实际压裂23段(原设计第4段舍弃),实际压裂有效段长为1 769 m。原设计的第4段未射开。在压裂过程中,使用高精度压力监测设备记录压力。得到停泵压力后进行短时间倒谱分析。

为了可视化结果更加直观,对计算得到的倒谱

结果归一化,极小值对应裂缝处的反射,在图6中白色亮线表示对应的极小值。使用该方法对龙马溪组页岩地层的一口压裂井进行分析,对应的压力曲线与倒谱图如图6所示,图中根据倒谱压力波动范围与倒谱图中颜色分布情况,判断存在5处裂缝。

图6中共发现5处裂缝,图中的白色表示进液点位置(图中深蓝色条带表示倒谱负值极小位置,为了更直观,使用白色条带进行了标注,读取时根据图中白色条带像素位置结合坐标轴计算得到其对应的深度),读取结果如表2所示。第1簇孔、第4~5簇孔、第7与第9簇孔反演结果与设计方案接近。倒谱图中,介于2 224.5~2 264.5 m没有射孔与压裂,不进行分析。以第1簇孔为例进行分析。设计位置介于2 334.5~2 335.0 m,倒谱反演结果大约在2 363.34 m

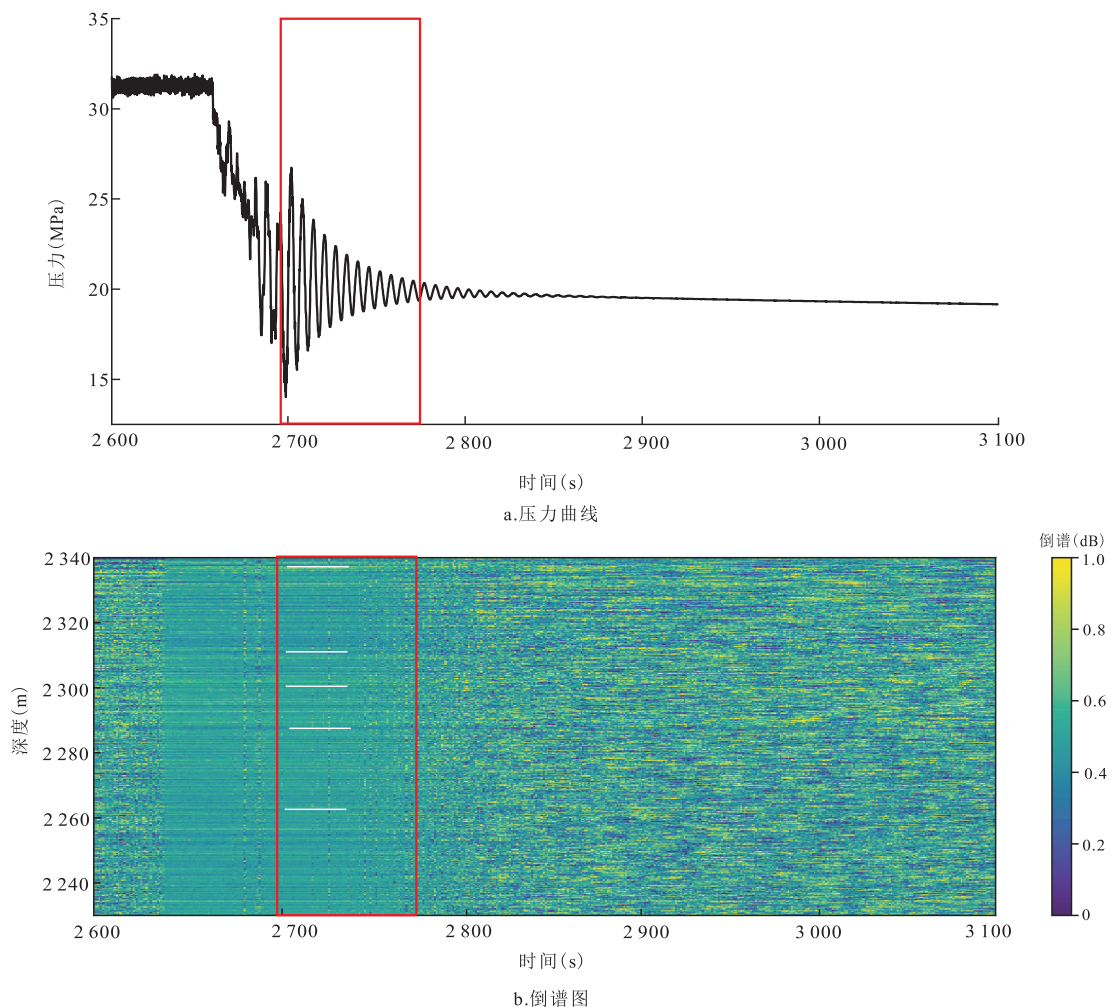


图6 龙马溪组研究区一口压裂井的压力曲线与倒谱图

Fig. 6 Pressure curve and cepstrum diagram

表2 射孔位置与倒谱反演结果
Table 2 Perforation location and cepstrum inversion result

簇号	射孔顶、底(m)	倒谱峰值时间(s)	倒谱反演位置(m)
1	2 334.5 ~ 2 335.0	3.91	2 336.43
2	2 326.0 ~ 2 326.5		
3	2 317.5 ~ 2 318.0		
4	2 309.0 ~ 2 309.5	3.87	2 311.20
5	2 300.5 ~ 2 301.0	3.85	2 300.01
6	2 292.0 ~ 2 292.5		
7	2 283.5 ~ 2 284.0	3.83	2 286.57
8	2 274.0 ~ 2 274.5		
9	2 264.5 ~ 2 265.0	3.79	2 268.37

附近,反演结果与设计位置存在较大差异;对于第4、5、7与9簇孔,反演结果与设计位置差异较小,较大的误差仅存在于第1簇孔的反演。分析原因主要包括井筒中复杂环境导致压力波的传导与理论认识存在差异;另一方面,压力波的传导速度也存在一定的误差,目前压力波相关的计算公式均依赖于流体与套管的相关参数,较多的误差叠加导致了最终反演结果不是非常准确。对于第2、3、6与8簇孔,倒谱反演没有发现裂缝存在,与其他簇压裂相比压裂效果不理想,导致没有出现裂缝的相关信号。原因可能是压裂初期压裂液迅速进入导流能力较好的孔眼,随后井筒压力快速降低(远低于压裂前的憋压),由于流体压力低于剩余部分孔眼的破裂压力,因此,没有被压开;另一方面,压裂液压开部分孔眼后,导致周围地层应力增大,岩石进一步压实,造成未被压开的孔眼压裂难度增加。

4 结论

建立了基于水锤效应的停泵压力模型,通过数值模拟方法研究了水平井多段压裂井口停泵压力的变化情况,对倒谱分析方法进行了严格验证。采用高频、高精度压力计对压裂施工中压力数据进行监测,主要结论如下:

1) 压裂施工停泵后产生水锤波,水锤波在套管中传播呈现卷积特性,引入阻抗概念及倒谱分析技术处理卷积信号,负阻抗最大位置为进液点位置。

2) 通过人为设置裂缝位置与间隔,使用自主研发的水锤数值模拟程序产生一组数据,在模拟数据的倒谱图中,能够清晰发现极值呈现出相同的间隔,与数值模拟的进液点设置相同,验证了该方法的正确性。

3) 通过对四川盆地1口多段压裂井进行实例分析,证明了该方法的有效性。与原始设计方案相比,第1簇裂缝进液点位置解释存在差异,其余4条裂缝进液点位置反演结果与设计方案相差不大。在压裂施工的初期,该方法能够获得多簇压裂井的进液点位置,是对微地震等监测技术的重要补充。

参考文献

- [1] ABOU-SAYED I S, SCHUELER S, EHRL E, et al. Multiple hydraulic fracture stimulation in a deep horizontal tight gas well [J]. Journal of Petroleum Technology, 1996, 48(2): 163-168.
- [2] LOVE T G, MCCARTY R A, SURJAATMADJA J B, et al. Selectively placing many fractures in openhole horizontal wells improves production[J]. SPE Production & Facilities, 2001, 16(4): 219-224.
- [3] CHAMBERS M R, MUELLER M W, GROSSMANN A. Well completion design and operations for a deep horizontal well with multiple fractures[C]// Paper SPE-30417-MS presented at the SPE Offshore Europe, Aberdeen, United Kingdom, September 1995.
- [4] 雷群,胥云,才博,等.页岩油气水平井压裂技术进展与展望[J].石油勘探与开发,2022,49(1):166-172.
LEI Qun, XU Yun, CAI Bo, et al. Progress and prospects of horizontal well fracturing technology for shale oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 166-172.
- [5] U.S. Energy Information Administration. Annual energy outlook 2010[R]. U.S. Energy Information Administration: Washington, 2010.
- [6] LE CALVEZ J H, GRANT W D, MCCARLEY D L, et al. Hydraulic-fracture monitoring as a tool to improve reservoir management[C]// Paper SPE-94048-MS presented at the SPE Production Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, April 2005.
- [7] 邢岳堃,黄炳香,陈大勇,等.压裂裂缝非线性断裂的声发射全波形多参量监测[J].煤炭学报,2021,46(11):3470-3487.
XING Yuekun, HUANG Bingxiang, CHEN Dayong, et al. Nonlinear fracturing characterization of hydraulic fracture: Utilizing full-waveform and multi-parameter analysis method of acoustic emission[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3470-3487.
- [8] 段银鹿,李倩,姚韦萍.水力压裂微地震裂缝监测技术及其应用[J].断块油气田,2013,20(5):644-648.
DUAN Yinlu, LI Qian, YAO Weiping. Microseismic fracture monitoring technology of hydraulic fracturing and its application [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(5): 644-648.

- [9] AL-KOBAISI M, OZKAN E, KAZEMI H, et al. Pressure-transient-analysis of horizontal wells with transverse, finite-conductivity fractures[C]// Paper PETSOC-2006-162 presented at the Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, June 2006.
- [10] OZKAN E, BROWN M L, RAGHAVAN R S, et al. Comparison of fractured horizontal-well performance in conventional and unconventional reservoirs[C]// Paper SPE-121290-MS presented at the SPE Western Regional Meeting, San Jose, California, March 2009.
- [11] BROWN M, OZKAN E, RAGHAVAN R, et al. Practical solutions for pressure-transient responses of fractured horizontal wells in unconventional shale reservoirs[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2011, 14(6): 663-676.
- [12] 田树宝, 雷刚, 杨立敏, 等. 微裂缝发育储层分段压裂水平井裂缝参数预测[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(2): 400-406. TIAN Shubao, LEI Gang, YANG Limin, et al. A novel method to interpret fracture parameters of multistage fractured horizontal well in reservoirs with micro-fractures[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(2): 400-406.
- [13] 罗红文, 李海涛, 李颖, 等. 低渗透气藏压裂水平井产出剖面与裂缝参数反演解释[J]. 石油学报, 2021, 42(7): 936-947. LUO Hongwen, LI Haitao, LI Ying, et al. Inversion and interpretation of production profile and fractured horizontal wells in low-permeability gas reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 936-947.
- [14] LUO H, LI H, TAN Y, et al. A novel inversion approach for fracture parameters and inflow rates diagnosis in multistage fractured horizontal wells[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 184: 106585.
- [15] LI W C, LU H, JIN Y C, et al. Deep learning for quantitative hydraulic fracture profiling from fiber optic measurements[C]// Paper URTEC-2021-5583-MS presented at the SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, Houston, Texas, USA, July 2021.
- [16] NOLTE K G. Determination of fracture parameters from fracturing pressure decline[C]// Paper SPE-8341-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Nevada, September 1979.
- [17] NOLTE K G, SMITH M B. Interpretation of fracturing pressures [J]. Journal of Petroleum Technology, 1981, 33(9): 1767-1775.
- [18] NOLTE K G. Fracturing-pressure analysis for nonideal behavior [J]. Journal of Petroleum Technology, 1991, 43(2): 210-218.
- [19] NOLTE K G, MACK M G, LIE W L. A systematic method for applying fracturing pressure decline: Part I [C]// Paper SPE-25845-MS presented at the Low Permeability Reservoirs Symposium, Denver, Colorado, April 1993.
- [20] NOLTE K G, MANIERE J L, OWENS K A. After-closure analysis of fracture calibration tests[C]// Paper SPE-38676-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, October 1997.
- [21] 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.
- [22] HOLZHAUSEN G R, GOOCH R P. Impedance of hydraulic fractures: its measurement and use for estimating fracture closure pressure and dimensions[C]// Paper SPE-13892-MS presented at the SPE/DOE Low Permeability Gas Reservoirs Symposium, Denver, Colorado, May 1985.
- [23] CAREY M A, MONDAL S, SHARMA M M. Analysis of water hammer signatures for fracture diagnostics[C]// Paper SPE-174866-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, September 2015.
- [24] BOGDAN A V, KEILERS A, OUSSOLTSEV D, et al. Real-time interpretation of leak isolation with degradable diverter using high frequency pressure monitoring[C]// Paper SPE-182451-MS presented at the SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Perth, Australia, October 2016.
- [25] KORKIN R, PARKHONYUK S, FEDOROV A, et al. High frequency pressure monitoring and data analytics for stimulation efficiency determination: New perspectives or potential limits[C]// Paper SPE-199762-MS presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, USA, February 2020.
- [26] RAHMANI A R, SHIRDEL M. Impedance analysis as a tool for hydraulic fracture diagnostics in unconventional reservoirs[C]// Paper SPE-156577-MS presented at the SPE International Production and Operations Conference & Exhibition, Doha, Qatar, May 2012.
- [27] PARKHONYUK S, FEDOROV A, KABANNIK A, et al. Measurements while fracturing: Noninvasive method of hydraulic fracturing monitoring[C]// Paper SPE-189886-MS presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, USA, January 2018.
- [28] 胡晓东, 周福建, 李宇娇, 等. 压裂停泵水击压力波信号滤波方法与特征分析[J]. 石油科学通报, 2021, 6(1): 79-91. HU Xiaodong, ZHOU Fujian, LI Yujiao, et al. Filtering methods and characteristic analysis of water hammer pressure—wave signals from fracturing stop pumps[J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(1): 79-91.
- [29] WYLIE E B, STREETER V L, SUO L. Fluid transients in systems[M]. New Jersey: Prentice Hall Englewood Cliffs, 1993.
- [30] COLEBROOK C F, WHITE C M. Experiments with fluid friction in roughened pipes[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series a—Mathematical and Physical Sciences, 1937, 161: 367-381.
- [31] BOGERT B P, HEALY M J R, TUKEY J W. The quefreny alanalysis of time series for echoes: Cepstrum, pseudo-autocovariance, cross-cepstrum and saphe cracking[J]. proceedings of the symposium on time, 1963: 59352135.

(编辑 李青)