

基于水击波的页岩油井压裂套变监测原理与应用

卢志炜¹, 邱金平², 李熙喆¹, 郝有志³, 程诚⁴

1. 中国科学院渗流流体力学研究所 河北廊坊 065007
2. 中国石油天然气和新能源公司 北京 102300
3. 中国科学技术大学近代力学系 安徽合肥 230027
4. 安徽井上天华科技有限公司 安徽合肥 230088

通讯作者:Email: hylzlxg@mail.ustc.edu.cn

项目支持:中国石油天然气股份有限公司十四五重大科技专项“大型碳酸盐岩气田控水提高采收率技术研究”(2021DJ1505)

引用:卢志炜,邱金平,李熙喆,等. 基于水击波的页岩油井压裂套变监测原理与应用[J]. 油气井测试,2023,32(5):1-7.

Cite: LU Zhiwei, QIU Jinping, LI Xizhe, et al. Principle and application of monitoring casing deformation in shale oil well fracturing based on water hammer wave[J]. Well Testing, 2023, 32(5): 1-7.

摘要 大规模体积压裂导致套管变形是影响页岩油气开采的重要因素之一,国内外对压裂期间的套变一直没有切实可行的方法。通过在井口安装高频压力计监测压裂停泵期间的水击波,通过水击波的波形来判断是否套变这一新方法,实现了对套变的有效监测。建立了压裂停泵水击波完备的方程组,通过对不同管径水击波数值解曲线分析,获得套变情况下波形特征。在管径不变的情况下,井口的压力-时间曲线特征为一条整体光滑的,振幅衰减的波动曲线;在有一处管径变小的情况下,曲线整体趋势不变,但振幅频率变高,且无规律性;在有两处管径变小的情况下,曲线的振幅频率及无规律性增加。通过对柴达木盆地 1 口井的实例应用验证了方法的正确性。该方法为页岩油气井压裂改造过程中实时监测套变情况提供了一种新的思路和方法。

关键词 套管变形;高频压力监测;水击波;管道流体波动方程;体积压裂;停泵数据

中图分类号:TE357 文献标识码:A DOI:10.19680/j.cnki.1004-4338.2023.05.001

Principle and application of monitoring casing deformation in shale oil well fracturing based on water hammer wave

LU Zhiwei¹, QIU Jinping², LI Xizhe¹, HAO Youzhi³, CHENG Cheng⁴

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang, Hebei 065007, China
2. PetroChina Oil, Gas and New Energy Company, Beijing 102300, China
3. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China
4. Anhui Inflywell Co., Ltd, Hefei, Anhui 230088, China

Abstract: Casing deformation caused by large-scale volumetric fracturing is one of the important factors affecting shale oil and gas exploitation. There is no practical method for casing deformation during fracturing at home and abroad. In this paper, a new method is put forward to monitor the water hammer wave during the pumping stop of fracturing by installing a high frequency pressure gauge. We establish a complete equation system for the water hammer wave of fracturing pump shutdown. By analyzing the numerical solution curves of water hammer waves with different pipe diameters, the waveform characteristics under casing deformation are obtained. Under the condition of constant pipe diameter, the pressure time curve of the wellhead is characterized by an overall smooth, amplitude attenuated wave curve; In the case where the pipe diameter decreases at one point, the overall trend of the curve remains unchanged, but the amplitude frequency increases without regularity; In two cases where the pipe diameter decreases, the amplitude frequency and irregularity of the curve increase. Finally, the correctness of the method is verified by an example of a well in Qaidam basin.

Keywords: casing deformation; high frequency pressure monitoring; water hammer wave; pipeline fluid wave equation; volume fracturing; pump shutdown data

水平井多段压裂期间,射孔及大量的压力液进入地层,不仅改变了地层原有流体分布、应力分布,

也改变了地层温度分布。从而导致水平段套管处于复杂、极端的力学环境中,极易发生管道变形^[1]。针对页岩油气的开发中的套管变形,美国、加拿大和中国都有较多的套变而导致施工作业成本增加、单井产能降低的研究^[2]。

关于套管变形产生机制、原因等,国内外学者有过大量研究,LIU等^[3]认为,套管附近压力与温度的交变作用形成了局部载荷,导致套管变形;沈新普等^[4]认为,压裂时套管与地层之间的高内压是诱发套管变形的决定因素。此外,于浩等^[5]认为地应力重分布的诱发;宋学锋^[6]认为,温压耦合共同作用等都是产生套变的原因。可见在套管变形机理方面尚无一致结论。

在压裂施工期间,若施工作业受阻,则认为发生套变,但针对套管变形监测研究相对较少,陈朝伟等^[7]以四川盆地页岩气开发区块的H19平台井为例,采用小桥塞尺寸和多臂井径测井(MIT)数据计算了H19平台套管变形的变形量,结合套管变形点处微地震事件点的时空分布和矩震级大小特征,实现套管变形的实时监测与预警。

水力压裂期间,当水力压裂结束时关闭注液泵,流动的流体突然被迫停止,就会产生压力波动(脉冲或波),这种压力脉冲被称为水锤。早在20世纪80年代,Holzhausen等^[8]提出了利用压力波监测压裂作业的方法,并在现场试验中得到了验证。自此之后,利用压力脉冲^[9]及水锤波^[10]进行裂缝诊断在油田应用。当前最新进展是在井口安装高频压力计^[11-12],通过对停泵期间水锤波的监测分析获得裂缝启裂位置、桥塞密封性,同时结合渗流压力分析获得压裂规模、渗透率及地层原始压力等。通过对国内50多口井的高频压力监测分析,发现高频压力可对套变进行监测,采用高频压力监测压裂停泵的水锤波,通过对停泵水锤波波形规律的分析,实现了压裂期间套变的实时监测。

1 模型建立

压裂过程是一个向地层注入大量液体的操作,压裂期间因井底压力高于地层破裂压力而形成裂缝,之后通过加砂对裂缝进行支撑,停泵后短时间内可假设裂缝形态保持不变,这样就可以建立停泵后管道流体流动方程,通过对方程求解获得井口压力随时间关系曲线,通过曲线特征分析,识别套管变形。

1.1 基本方程

压裂停泵水锤波可假设为封闭管道中的一维瞬态流动,其控制方程由运动方程和连续性方程组成,考虑倾斜管道中的流体流动,如图1所示。水锤现象可以使用动量方程和连续性方程描述^[13]

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

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

$$\text{其中 } m = \frac{fv|v|}{2D}$$

式中: v 为流体速度,m/s; p 为井筒中的压强,Pa; t 为时间,s; 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 为阻力系数,无因次; D 为井筒直径,m; ρ 为流体密度,kg/m³; A 为井筒的横截面积,m²; m 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($Re < 2\,300$), $f = 64/Re$;对于湍流,工程应用中有许多计算方法,本文采用Colebrook等^[14]提出的计算公式,即

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \lg \left(\frac{\varepsilon}{3.71D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (3)$$

$$\text{其中 } Re = \rho v D / \mu$$

式中: Re 为管道中流体雷诺数,无量纲; ε 为管壁粗糙度,m。

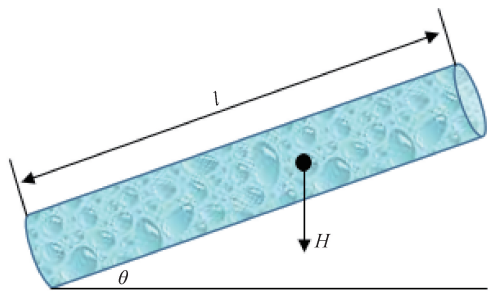


图1 倾斜水管示意图

Fig. 1 Schematic diagram of inclined water pipe

水平井多段压裂停泵后不仅有水锤波(见图2),因压裂液的压缩性及裂缝处的渗流,也必须考虑。

(1) 压裂液的压缩性

压裂期间井口压力很高,一般超过50 MPa,部分压裂井甚至井口压力达120 MPa,对水平井多簇压裂,每个压开簇位置处,因套管中存在大量压裂液,根据流体压缩系数定义

$$C_f = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (4)$$

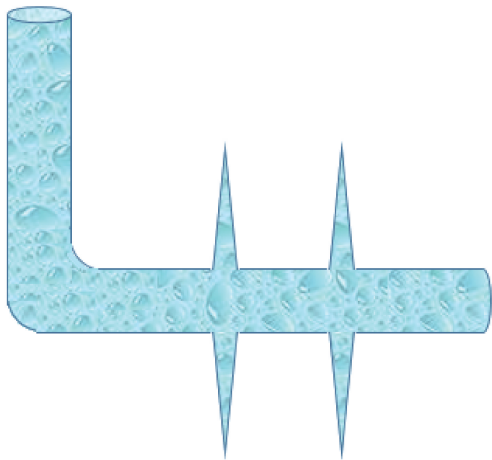


图2 水平井多簇压裂裂缝示意图

Fig.2 Schematic diagram of multiple cluster fracturing fractures in horizontal wells

将公式(4)两边同乘 dt 并移项,同时注意体积对时间导数,得到

$$Q = -\frac{dV}{dt} = C_f V \frac{dp}{dt} \quad (5)$$

式中: C_f 为流体压缩系数, Pa^{-1} ; V 为套管体积, m^3 。

(2) 裂缝簇的渗流方程

停泵后井底压力远高于地层压力,这个压力的存在导致地层渗流发生,对于单段多簇压裂,其渗流方程可采用单相微可压缩流体平面渗流方程为

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \frac{\phi \mu C_f}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (6)$$

式中: k 为地层渗透率, mD ; μ 为流体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ϕ 为地层孔隙度。

1.2 方程求解

方程(1)和方程(2)是管道中流体流动方程,在管道流动过程中还需要考虑开启裂缝簇的流体压缩性及地层渗流特性,这里采用 Ghidaoui (2005) [15] 提出的特征线方法进行求解。

将压力改为水头表达的形式,对上述方程进行进一步化简,方程(2)改写为

$$v \frac{\partial H}{\partial l} + \frac{\partial H}{\partial t} + v \sin \theta + \frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial l} = 0 \quad (7)$$

其中 $H = \frac{p}{\rho g}$

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

式中: H 为压力水头, m ; c 表示声波在薄壁管流体中的传播速度, m/s ; K 为流体的弹性模量, Pa ; D 为薄

壁圆管内径, m ; δ 为壁厚, m ; E 为杨氏模量, Pa 。

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

$$L_1: gA \frac{\partial H}{\partial l} + \frac{\partial Q}{\partial t} + v \frac{\partial Q}{\partial l} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (8)$$

$$L_2: Q \frac{\partial H}{\partial l} + A \frac{\partial H}{\partial t} + Q \sin \theta + \frac{c^2}{g} \frac{\partial Q}{\partial l} = 0 \quad (9)$$

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 ,对方程(8)和方程(9)进行线性组合 $L_1 + \lambda L_2 = 0$,即

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial l} \left(v + \lambda \frac{c^2}{g} \right) + \lambda A \left[\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial l} \left(v + \frac{g}{\lambda} \right) \right] + \lambda Q \sin \theta + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (10)$$

根据 H 和 Q 的物质导数方程将方程(10)转化为常微分方程为

$$\begin{cases} \frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{c} \frac{dH}{dt} + \frac{g}{c} Q \sin \theta + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \\ \frac{dl}{dt} = v + c \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{c} \frac{dH}{dt} - \frac{g}{c} Q \sin \theta + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \\ \frac{dl}{dt} = v - c \end{cases} \quad (12)$$

方程(11)是在特征线 $\frac{dl}{dt} = v + c$ 上成立,该特征

线被定义为 c^+ ;而方程(12)则是在特征线 $\frac{dl}{dt} = v - c$,该特征线被定义为 c^- 。沿特征线对上述方程离散,计算域示意图如下:

在图3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 $l_i \rightarrow l_{i+1}$,于是对方程(11)和方程(12)积分得到

$$c^+: \int_{H_{i-1}}^{H_i} dH + \frac{c}{gA} \int_{Q_{i-1}}^{Q_i} dQ + \frac{\sin \theta}{A} \int_t^{t+\Delta t} Q d\tau + \frac{fc}{2gDA^2} \int_{l_{i-1}}^{l_i} Q|Q| dt = 0 \quad (13)$$

$$c^-: \int_{H_{i+1}}^{H_i} dH - \frac{c}{gA} \int_{Q_{i+1}}^{Q_i} dQ - \frac{\sin \theta}{A} \int_t^{t+\Delta t} Q d\tau + \frac{fc}{2gDA^2} \int_{l_{i+1}}^{l_i} Q|Q| dt = 0 \quad (14)$$

展开方程(13)和(14)进行合并化简,则

$$c^+: H_i^{t+\Delta t} = - (C_c + C_\theta + C_f |Q_{i-1}^t|) Q_i^{t+\Delta t} + H_{i-1}^t + (C_c + C_\theta) Q_{i-1}^t \quad (15)$$

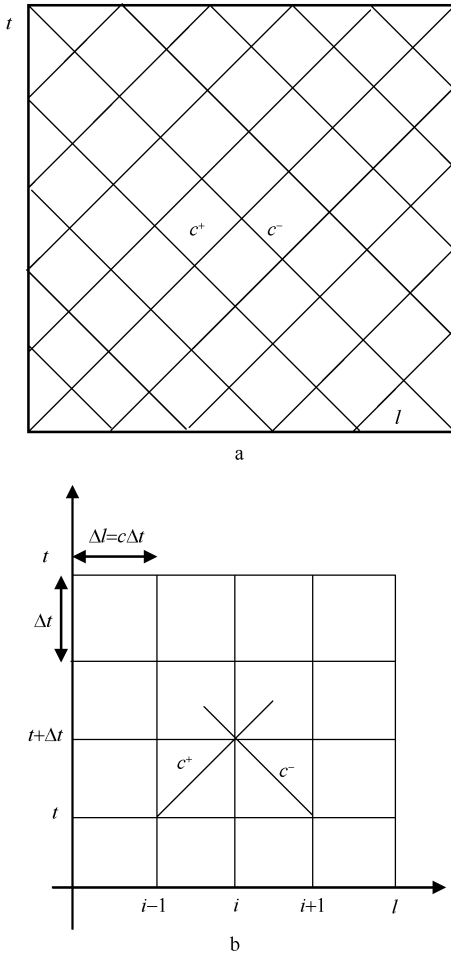


图3 c^+ 与 c^- 特征线及方程离散的计算网格

Fig. 3 c^+ and c^- characteristic lines and computational grid for discretization of equations

$$c^-: H_i^{t+\Delta t} = (C_c + C_\theta - C_f |Q_{i+1}^t|) Q_i^{t+\Delta t} + H_{i+1}^t + (C_c - C_\theta) Q_{i+1}^t \quad (16)$$

进一步求解得到

$$Q_i^{t+\Delta t} = \frac{H_{i-1}^t - H_{i+1}^t + (C_c + C_\theta) Q_{i-1}^t - (C_c - C_\theta) Q_{i+1}^t}{2(C_c + C_\theta) + C_f(|Q_{i-1}^t| - |Q_{i+1}^t|)} \quad (17)$$

$$\text{其中 } C_c = \frac{c}{gA} \quad C_\theta = \frac{\Delta t \sin \theta}{A} \quad C_f = \frac{f \Delta l}{2gDA^2}$$

方程(17)给出了下一个时间步下的流量表达式,将方程(17)代入方程(15)就可以得到下一个时间步下的水头表达式。

方程(15)~(17)给出的是管道中流量及水头的解,在裂缝处还需要考虑井筒存储及地层渗流,由方程(5)可以得到

$$Q_i^{t+\Delta t} = C_f V \frac{P_{wfi}^{t+\Delta t} - P_{wfi}^t}{\Delta t} \quad (18)$$

方程(6)中单一裂缝均匀流量下的无量纲井底

压力^[16]可表示为

$$p_{WD}(t_{Dxf}) = \sqrt{\pi t_{Dxf}} \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{t_{Dxf}}}\right) - \frac{1}{2} E_i\left(-\frac{1}{4t_{Dxf}}\right) \quad (19)$$

$$\text{其中 } t_{Dxf} = \frac{kt}{\phi \mu C_t x_{xf}^2} \quad p_{WD} = \frac{2\pi kh(p_i - p_{wf})}{QB\mu}$$

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

式中: t_{Dxf} 为无量纲时间; p_{WD} 为无量纲井底压力; $\operatorname{erf}(x)$ 为误差函数; $E_i(-x)$ 为幂积分函数; p_i 为原始地层压力, Pa; 对于压裂井可以用 SRV 体积内的平均压力代替。

方程(20)还原为有量纲形式,可以得到井底压力 p_{wf}

$$p_{wf}(t) = p_i - \frac{QB\mu}{2\pi kh} \left[\sqrt{\pi t_{Dxf}} \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{t_{Dxf}}}\right) - \frac{1}{2} E_i\left(-\frac{1}{4t_{Dxf}}\right) \right] \quad (20)$$

采用方程(18)中的井底压力由方程(20)给出。这样就得到了水锤波、流体压缩性及渗流联合方程的离散形式。

2 敏感性分析

压裂停泵水击波方程是沿套管 l 方向的一维问题,因方程含时间项,离散后空间步长为 Δx ,时间步长为 Δt 。由于采用特征线方法离散,不能任意确定空间与时间步长。空间与时间步长之间需要满足 $\Delta x = c\Delta t$,这里 c 是声波在薄壁管流体中的传播速度。在计算中时间步长取 $\Delta t = 1 \text{ ms}$,声波速度 $c = 1400 \text{ m/s}$,空间步长为 $\Delta x = 1.4 \text{ m}$ 。

套管变形是一个笼统的概念,为计算模拟,采用管径变化来表示套管变形。假设套管变化用管径变小来表示,图4分别给出了不同情况模拟套管变形的管径变化示意图。

由于空间步长是与时间步长及波速有关,如本例中的空间步长为 1.4 m 。对变直径的数值计算,计算网格肯定不会刚好落在变直径的截面处,网格跨越不同直径段是一个大概率的事件。数值计算时为保证质量守恒,在变直径网格中(如图5所示),方程(11)和(13)中截面积 A 需要采用等效截面积来代替圆管面积。假如网格 j 是跨直径网格,网格的空间步长为 Δx , S_{j1} 是变直径网格中网格 j 到变直径界面的距离。网格 j 的等效半径为:

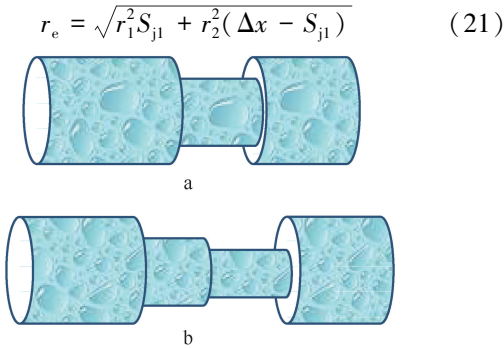


图 4 采用变直径管柱模拟套管变形示意图
Fig. 4 Schematic diagram of simulating casing deformation using a variable diameter pipe column

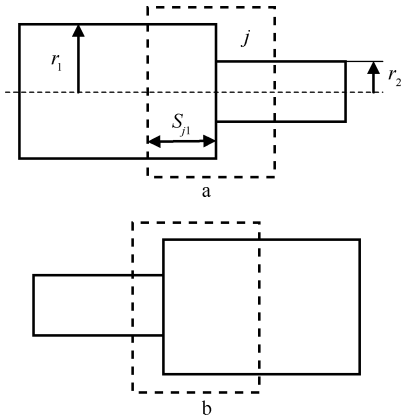


图 5 变直径段跨网格的计算处理
Fig. 5 Calculation and processing of crossing grid for variable diameter segments

将方程(15)和(16)的系数 C_c 、 C_θ 及 C_f 中截面积 A 用等效面积来表示,流量保持不变,流体速度发生变化,公式(3)中计算阻力系数 f 时也要采用等效直径。

假设压裂段中有 1 簇裂缝,裂缝半长 $x_f=60\text{ m}$,地层孔隙度 $\phi=0.08$,流体黏度 $\mu=1\text{ mPa}\cdot\text{s}$,渗透率 $k=3\text{ mD}$,地层有效厚度 $h=10\text{ m}$,综合压缩系数 $C_i=0.001\text{ MPa}^{-1}$,井测量深度 $L=6\,100\text{ m}$,裂缝位于测量深度的 $6\,000\text{ m}$ 处。管道内直径 0.127 m 。停泵时的流量变化,采用 5 秒内流量从 $16\text{ m}^3/\text{min}$ 线性降低到 0 来表示。

时间步长取 1 ms , 100 s 的时间步数就达 10 万,而空间网格数量达 4 360 个,计算耗时较长。图 6 是管道直径不变情况下,采用上述参数计算得到的 100 s 内井口位置处压力随时间变化曲线。从图 6 可以看出:井口压力随时间是一个振幅衰减的波动曲线,波动曲线整体光滑。

图 7 是在 $5\,900\text{ m}$ 有一段长 10 m 且管道直径为 0.08 m 的小管径,其他段的管径及计算参数与图 6 相同。从图 7 可以看出:如果有一段管径变小,停泵

后的井口压力曲线也是波动曲线,但曲线变得没有规律。

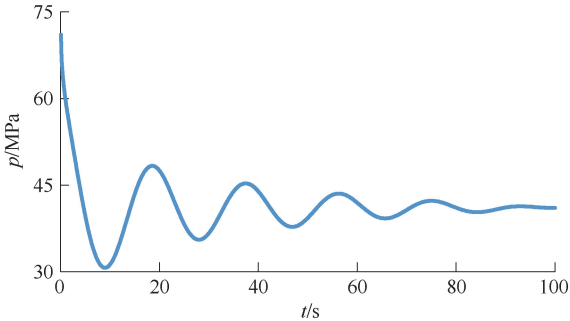


图 6 管道直径不变情况下计算的井口位置压力
随时间变化曲线

Fig. 6 Time varying curve of wellhead position pressure calculated with constant pipeline diameter

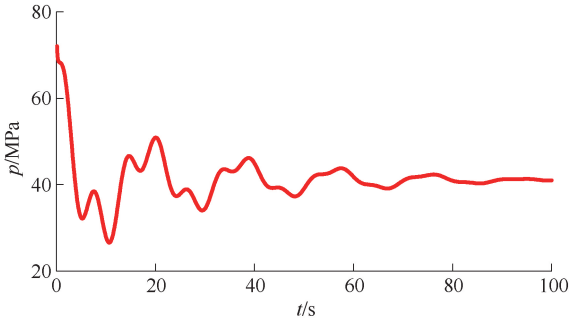


图 7 理论计算中有一处变管径段的井口压力随时间
变化曲线

Fig. 7 Time varying curve of wellhead pressure at a variable pipe diameter section in theoretical calculation

图 8 在 $5\,850\text{ m}$ 和 $5\,900\text{ m}$ 处各有一段长 10 m 且管道直径为 0.08 m 的小管径,其他段的管径及计算参数与图 6 相同。从图 8 可以看出:如果有两处管径变小,停泵后的井口压力曲线也是波动曲线,但曲线变得更加没有规律。

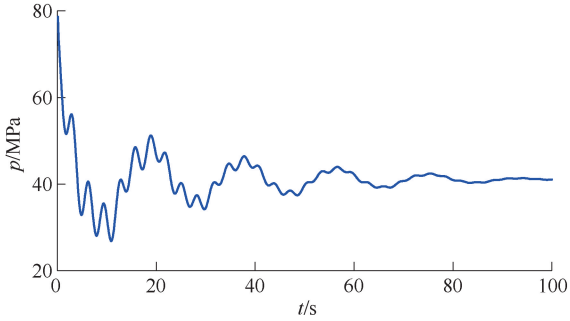


图 8 管道中有两处变管径段的井口压力随时间变化曲线
Fig. 8 Time varying curve of wellhead pressure in two variable diameter sections of the pipeline

3 现场实例

柴达木盆地 1 口页岩油水平井,试油井段 $4\,107.00\sim5\,076.00\text{ m}$ (垂深 $3\,970.27\sim4\,178.30\text{ m}$),

试油水平段长 969.0 m, A 靶点为 4 107.00 m(垂深 3 970.27 m), B 靶点为 5 116.65 m(垂深 4 187.13 m), 水平段长 1 009.65 m。水平段杨氏模量为 31.14~52.54 GPa, 平均值为 43.43 GPa, 泊松比 0.189~0.340 7, 平均值为 0.277, 最大水平主应力 93.44~116.89 MPa, 平均为 106.2 MPa, 最小水平主应力 76.36~96.8 MPa, 平均为 88.64 MPa, 水平应力差 14.23~61.3 MPa, 平均 17.58 MPa。

按照地层岩石力学性质及应力分布, 该井设计 23 段 91 簇, 由于套变影响, 实际压裂 17 段共 72 簇。

该井在井口压裂管线上安装一只高频压力计, 压力计的采样频率为 1 000 Hz, 压力分辨率为 0.000 1 MPa。这种装置不仅可以测量压裂期间压力变化, 而且还可以获得压裂期间的压力波动数值。通过对高频压力数据处理, 可获得裂缝启裂位置、裂缝类型及压裂规模等参数, 实现压裂效果评价。

图 9 是该井第 3 压裂段采用高频压力监测到的井口压力随时间变化曲线, 通过对停泵附近压力曲线的放大, 可以发现第 3 段停泵后的井口压力出现水击波, 水击波曲线变化是按周期为 12 s 有规律的波动, 但其振幅不断衰减, 波动曲线也很光滑。这类曲线与图 6 管径不变的水击波计算结果相一致, 第 4 段压裂前下桥塞以及射孔操作都十分顺利, 这也间接反映了第 3 段压裂时没有导致套管变形。

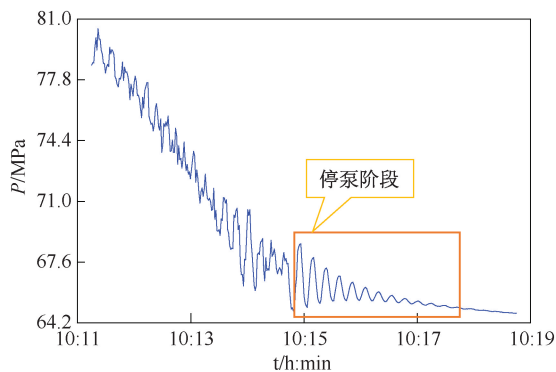


图 9 没有套变压裂段井口压力随时间变化曲线

Fig. 9 Time dependent curve of wellhead pressure with non-casing deformation in any fracturing section

图 10、图 11 及图 12 分别是第 5、第 11 和第 16 段停泵时刻附近井口压力随时间变化图, 这些段停泵水击波波形都非常不规则。图 10 在每个周期的波峰及波谷处压力又出现震荡, 这类图与理论计算的图 7 相似。在下第 6 段桥塞时遇阻, 只能重新设计压裂段。图 11 及图 12 停泵水击波曲线也不规

则, 在下第 12 和第 17 段桥塞时也遇阻, 后下连续油管也遇阻, 证实第 11 和第 16 段压裂期间套管变形。

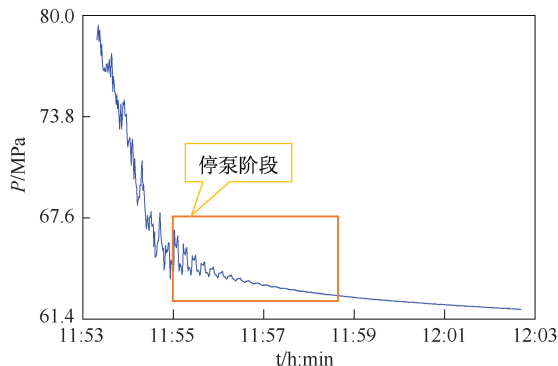


图 10 第 5 段发生套变的压裂段井口压力随时间变化曲线
Fig. 10 Time varying curve of wellhead pressure in the fracturing section with casing deformation in the fifth section

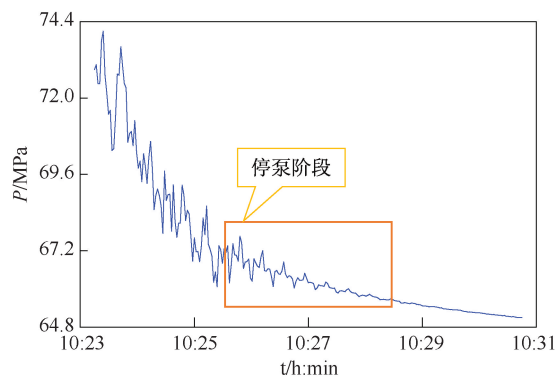


图 11 第 11 段发生套变的压裂段井口压力随时间变化曲线
Fig. 11 Time varying curve of wellhead pressure in the fracturing section with casing deformation in the 11th section

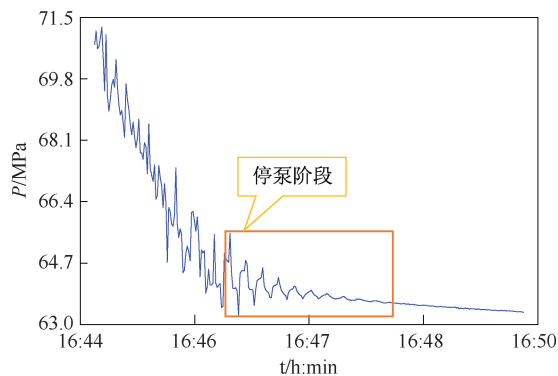


图 12 第 16 段发生套变的压裂段井口压力随时间变化曲线
Fig. 12 Time varying curve of wellhead pressure in the fracturing section with casing deformation in the 16th section

4 结论

(1) 基于水击波监测压裂作业的方法在国内 50 多口井的数据分析中, 发现出现套变的情况下,

停泵压力曲线会变得杂乱且无规律,形成了基于水击波的压裂过程套变的监测方法。

(2)通过在实际页岩油井的使用,井口压力波形杂乱的压裂段,在下一压裂段下桥塞受阻证实套变的存在,从而验证了该方法的有效性,因为本方法是基于停泵后压裂液降压的分析,所以也可应用于页岩气井。

(3)基于水击波的压裂过程套变的监测方法可实时监测压裂期间套变的发生。针对降压曲线的变化规律,如何分析出套变直径、位置、数量等,需进一步研究完善。

致谢:感谢中国石油集团工程技术研究院尚立涛,青海油田勘探事业部郭子义、袁贵德,中油测井大庆分公司樊玉秀在论文修改、数据解释和现场验证方面给予的指导。

参考文献

- [1] 席岩,柳贡慧,李军,等. 力-热耦合作用下套管应力瞬态变化研究[J]. 石油机械,2017,45(6):8-12.
XI Yan, LIU Gonghui, LI Jun, et al. Study on Casing Transient Stress under Thermo-mechanical Coupling Effect [J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(6): 8-12.
- [2] ANTHONY R I, MARTIN T W, RENEE L S, et al. Assessment and risk analysis of casing and cement impairment in oil and gas wells in Pennsylvannia, 2000-2012[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(30): 10955-10960.
- [3] LIU K, GAO D L, WANG Y B, et al. Effect of local loads on shale gas well integrity during hydraulic fracturing process[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 37: 291-302.
- [4] 沈新普,沈国晓. 地下储库岩体施工过程及套管与岩石相互作用数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4245-4250.
SHEN Xinpu, SHEN Guoxiao. Numerical simulation of construction process of rock mass of an underground storage and interaction of rock-casing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (extra 2): 4245-4250.
- [5] 于浩,练章华,林铁军,等. 页岩气体积压裂过程中套管失效机理研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(10): 37-43.
YU Hao, LIAN Zhanghua, LIN Tiejun, et al. Study on failure mechanism of casing in stimulated reservoir volume fracturing of shale gas [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(10): 37-43.
- [6] 宋学锋,李军,柳贡慧,等. 温压耦合作用下的套管磨损和应力分布[J]. 断块油气田, 2018, 25(5): 670-674.
SONG Xuefeng, LI Jun, LIU Gonghui, et al. Casing wear

and stress distribution under coupling effects of temperature and pressure [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(5): 670-674.

- [7] 陈朝伟,石林,项德贵. 长宁-威远页岩气示范区套管变形机理及对策[J]. 天然气工业, 2016, 36(11): 70-75.
CHEN Zhaowei, SHI Lin, XIANG Degui. Mechanism of casing deformation in the Changning-Weiyuan national shale gas project demonstration area and countermeasures [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(11): 70-75.
- [8] HOLZHAUSEN G R., EGAN H N. Fracture diagnostics in east texas and western colorado using the hydraulic impedance method [C]//Presented at SPE Unconventional Gas Technology Symposium, Louisville, Kentucky, USA, 18-21 May. 1986, SPE15215-MS.
- [9] AUGUSTINE, J. R., MEIJS, R. 2010. What do the surface pressures tell us during shale fracturing operations [C]//Presented at the SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA, 10-12 February. , 2010, SPE127821-MS.
- [10] CAREY M. A, MONDAL S, SHARMA M. M.. Analysis of water hammer signatures for fracture diagnostics [C]//Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, 28-30 September. 2015, SPE174866-MS.
- [11] PARKHONYUK S, FEDOROV A, KABANNIK A, et al. Measurements while fracturing: nonintrusive method of hydraulic fracturing monitoring [C]//Paper Presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, USA, 23-25 January. , 2018, SPE189886-MS.
- [12] WANG Xiaoqiang, DONG Yan, LI Peichao, et al. Location estimation of subsurface fluid-filled fractures: Cepstral predominant peak analysis and numerical study [J]. Physics of Fluids, 2022, 34(12): 126609.
- [13] WYLIE, E. B., STREETER, V. L. 1993. fluid transients in systems. prentice-hall, New Jersey.
- [14] 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(A906): 67-81.
- [15] GHIDAoui M. S., ZHAO M., MCINNIS D A, et al. A review of water hammer theory and practice [J]. Applied Mechanics Reviews, 2005, 58(1): 49-76.
- [16] 卢德唐. 现代试井理论及应用 [M]. 石油工业出版社, 北京, 2009.

编辑 邵振鹏

第一作者简介:卢志炜,男,1994年出生,博士在读,2019年获美国南加州大学硕士学位,现主要从事页岩气渗流机理方面研究。电话:15956940621 Email: luzhiwei21@mails.ucas.ac.cn。通信地址:河北省廊坊市中国科学院渗流流体力学研究所,邮政编码:065007。