

基于停泵压力数据的压裂效果评价方法

曾波¹, 周峰², 阳星³, 周小金¹, 黄永智¹, 宋毅¹

- 1. 中国石油西南油气田公司页岩气研究院 四川成都 610056
- 2. 中国石油西南油气田公司开发事业部 四川成都 610056
- 3. 中国石油西南油气田公司工程技术处 四川成都 610056

通讯作者: Email: zeng_bo@petrochina.com.cn

引用: 曾波, 周峰, 阳星, 等. 基于停泵压力数据的压裂效果评价方法[J]. 油气井测试, 2023, 32(1): 8-15.

Cite: ZENG Bo, ZHOU Feng, YANG Xing, et al. A novel fracturing effect evaluation method based on pump-off pressure data[J]. Well Testing, 2023, 32(1): 8-15.

摘要 为实现大规模体积压裂效果评价、提供裂缝及改造区域相关参数,在停泵压力数据反演方法的基础上,考虑大规模体积压裂造成的改造区域与非改造区域的明显差距,首次加入复合油藏来描述改造区域内的水力微裂缝,运用高压流体压缩性及渗流理论,分析压裂后停泵阶段的压力数据变化,获取裂缝半长、裂缝高度、改造区域平均渗透率、改造区域面积等参数。该方法应用于四川省筠连县某多段压裂水平井,进行了第十二段和第十三段的压裂效果评价,得到了合理的解释结果,为大规模体积压裂效果评价提供了技术支持。

关键词 水平井多级压裂; 压裂效果评价; 停泵压力数据反演; 理论压力解; 复合油藏; SRV 区域; 裂缝半长; 现场应用

中图分类号: TE357 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.01.002

A novel fracturing effect evaluation method based on pump-off pressure data

ZENG Bo¹, ZHOU Feng², YANG Xing³, ZHOU Xiaojin¹, HUANG Yongzhi¹, SONG Yi¹

- 1. Shale Gas Research Institute of PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company, Chengdu Sichuan 610056, China
- 2. Development Division of PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company, Chengdu Sichuan 610056, China
- 3. Engineering Technology Department of PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company, Chengdu Sichuan 610056, China

Abstract: In order to evaluate the effect of large-scale volume fracturing and provide relevant parameters of fractures and reformed areas, this paper considers the obvious gap between the reformed area and the non-reformed area caused by large-scale volume fracturing. For the first time, composite reservoirs were added to describe the hydraulic micro-fractures in the stimulation area. Using the theory of high pressure fluid compressibility and percolation, the pressure data change in the pump stopping stage after fracturing can be analyzed, which can provide parameters such as fracture half length, fracture height, average permeability in the reconstruction area, and the area of the reconstruction area. Finally, the pump-stop pressure data inversion method proposed in this paper is applied to a multi-stage fracturing horizontal well in Junlian County, Sichuan Province, China. The fracturing effect of the twelfth and thirteenth stages is evaluated, and the results are reasonable. This results indicate that the method proposed in this paper plays an important role in the field of large-scale volume fracturing effect evaluation.

Keywords: multi-stage fracturing of horizontal wells; fracturing effect evaluation; pump stop pressure data inversion; theoretical pressure solution; composite reservoir; SRV area; half-length of fracture; field application

水平井多级压裂(MFHW)可以产生复杂的裂缝网络并提高地层渗透率。该技术的广泛应用对致密油气资源开发意义重大。自 21 世纪以来, MFHW 技术的不断发展使原油和天然气产量大大提高^[1], 而 MFHW 的一个核心问题是对裂缝的实时监测和评估^[2]。由于缺乏裂缝参数的直接测量方法以及裂缝形态和流体进入点位置的合理获取方

法,许多学者发展了不同压裂后评估方法以识别裂缝参数,包括微地震响应、井下温度反演、净压力拟合和不稳定试井方法等。

微地震监测方法是目前常用的物理监测手段之一。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。同时,为了提高监测的精度^[3-6],微地震监测常需采用多个检波器,大大增加了施工的成本。

试井解释是压裂效果评价的主要数据反演手段。在过去的十年中,许多学者开展了MFHW的试井研究^[7-12]。ZERZAR^[13]研究了裂缝储存结束后非均质油藏中MFHW的流态,认为该阶段的流动包括线性流动、拟径向流动、复合线性流动、径向流动和稳定流动。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来实现,缺乏时效性。同时试井方法需要一定的时间来首先获取压力上升或下降数据。对于MFHW,由于储层渗透率低,通常需要几个月的时间来测试一口井,导致其经济性上存在一定劣势。

近年来很多学者开展了基于水锤理论解释压裂停泵过程中的压力波动现象来评价压裂效果的研究。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和井筒摩阻引起的压降,压力变化规律一定与裂缝形态有关,因此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^[14-19]。CAREY^[20]专注于瞬时停泵井筒中的水锤效应。PARKHONYUK^[21]提出了一种利用倒谱停泵数据的裂缝监测方法,不需要附加条件。然而,目前关于倒谱方法的研究相对不足。停泵压力与倒谱响应之间的关系不明确,倒谱对现场数据的性能分析有时较差。温杰雄等^[22]在前期工作中提出了基于数字滤波压裂停泵数据反演方法,利用压裂停泵数据进行裂缝参数反演,可以得到裂缝半改造区域渗透率等参数。但对于大规模体积压裂,未考虑改造区域存在带来的影响。

现从压裂停泵数据反演方法出发,考虑改造区域内的渗流能力与未改造区域相差极大,加入复合油藏来描述改造区域内的水力微裂缝,利用压裂停泵数据反演裂缝半长、裂缝高度、改造区域平均渗透率、改造区域面积等参数,大大提升了压裂效果评价质量,获取到更多地层信息,从而为我国西部资源开发提供评价技术支持,具有广阔的应用前景。

1 物理数学模型的建立与求解

基于水平井多段压裂技术,运用纽曼乘法与杜哈梅原理,开展理论推导工作,重点针对大规模体积改造SRV区域首次给出其压力分布的理论

推导过程,并以此来反演大规模体积压裂改造效果。

1.1 大规模体积压裂物理与数学模型

大规模体积压裂开发的主要特点是在近井筒地带形成缝网区域,其渗流能力远超未改造基质。对这类问题的求解主要采用复合油藏模型,针对改造区域和基质区域建立复合油藏模型,基于流动比、储容比和界面半径等参数,通过点源叠加得到源汇解,然后使用Laplace变换考虑井筒存储及表皮的影响,再使用Laplace数值反演获得井底压力随时间变化的数值解。

图1给出了大规模体积压裂的物理模型。为便于方程推导和求解,采用如下基本假设:

- (1)地层中沿水平井存在多簇裂缝,每簇裂缝附近都存在若干微裂缝,所有微裂缝集体形成一个SRV区域,如图1所示,而SRV区域外是未改造区域;
- (2)地层及进入地层的压裂液均视作微可压缩;
- (3)地层中压裂液满足达西定律,且忽略重力、毛管力;
- (4)每簇裂缝的性质均保持不变;
- (5)流体不会通过水平井身流入到井筒中,全部从裂缝流入井筒;
- (6)裂缝之间互相平行且垂直于水平井,每簇裂缝的半长无须相同。

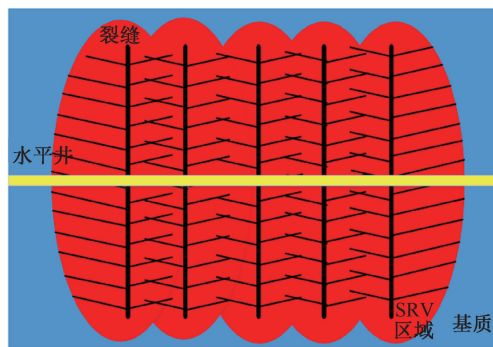


图1 大规模体积压裂物理模型示意图

Fig.1 Physical model of large-scale volumetric fracturing

由于上述物理模型边界形状不规则,无法建立合适的外边界条件,因此将该模型简化为如图2所示的椭圆形改造区域。

图2所示的物理模型中,建立了改造区域与基质不同渗流能力的复合油藏。复合油藏是试井分析中的重要模型之一,通常适用于非均质地层或地层流体黏度变化的油藏。

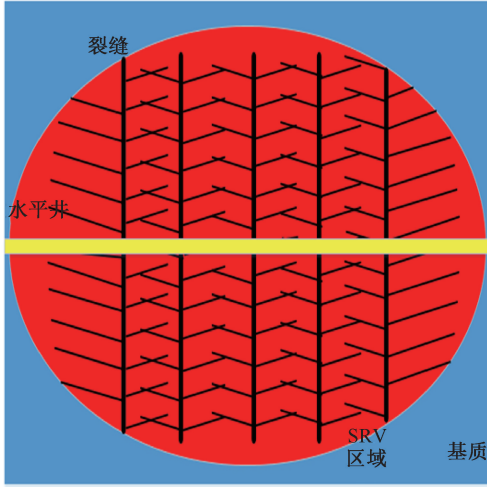


图2 大规模体积压裂数学模型示意图

Fig. 2 Mathematical model of large-scale volumetric fracturing

对图2所示的模型进行求解,发现无法直接建立复合油藏多段压裂水平井的渗流方程进而得到解析解,因此采用如图3所示的思路,首先从均质无限大地层中复合油藏满足的方程及定解条件出发,获得复合油藏垂直裂缝井的解,然后通过杜哈梅原理,进行多裂缝叠加,通过矩阵方程求解的方式获得大规模体积压裂多段压裂水平井理论压力解。

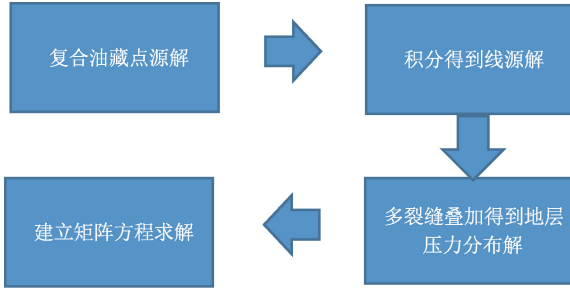


图3 大规模体积压裂多段压裂水平井数学模型求解方法思路

Fig. 3 Solving mathematical model of large-scale volume fractured multi-stage fractured horizontal well

1.2 大规模体积压裂水平井数学模型求解方法

根据图3所示思路,首先给出均质无限大地层中复合油藏满足的方程及源汇解定解条件,假定源汇位于坐标原点,其体积量为 $\Omega(\text{m}^3)$ [23]。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p_1}{\partial r} \right) = \left(\frac{\phi \mu C_i}{k} \right)_1 \frac{\partial p_1}{\partial t} \quad (1 \leq r \leq r_f) \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p_2}{\partial r} \right) = \left(\frac{\phi \mu C_i}{k} \right)_2 \frac{\partial p_2}{\partial t} \quad (r_f \leq r < \infty) \quad (2)$$

$$p_1(r, t = 0) = p_i \quad (3)$$

$$p_2(r, t = 0) = p_i \quad (4)$$

$$p_1(r_f, t) = p_2(r_f, t) \quad (5)$$

$$\left(\frac{k}{\mu} \right)_1 \frac{\partial p_1}{\partial r} \bigg|_{r=r_f} = \left(\frac{k}{\mu} \right)_2 \frac{\partial p_2}{\partial r} \bigg|_{r=r_f} \quad (6)$$

$$p_2(r \rightarrow \infty, t) = p_i \quad (7)$$

$$v(r, t = \tau) = \delta(r = 0, t = \tau) = \begin{cases} 0 & r \neq 0 \\ \infty & r = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: k 为地层渗透率, m^2 ; ϕ 为地层孔隙度; μ 为流体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; C_i 为综合压缩系数, $1/\text{Pa}$; p_i 为原始地层压力, Pa ; r_f 为复合油藏内环半径, m ; 下标: 1, 2 表示复合油藏的两个区域。

式(8)是渗流速度点源的 δ 函数表达式, 由于总体积量为 Ω , 则根据 δ 函数的性质 (δ 函数在整个求解区域上的积分是一个常数)。速度可以转化为流量, 在极短时间内的体积就是 Ω 。因此, 根据达西定律, 式(8)可以表示成压力边界条件

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \left(r \frac{dp_1}{dr} \right) = \frac{\Omega \mu_1}{2\pi k_1 h} \delta \quad (r = 0, t = \tau) \quad (9)$$

定义以下无量纲量:

$$\text{无量纲压力 } p_{Dk} = \frac{2\pi h (\phi C_i)_1 L^2 (p_i - p_k)}{\Omega}, \quad k = 1, 2$$

$$\text{无量纲时间 } t_D = \frac{k_1 t}{(\phi \mu C_i)_1 L^2}$$

$$\text{流度比 } M_{12} = \frac{(k/\mu)_1}{(k/\mu)_2}$$

$$\text{储容比 } \omega_{12} = \frac{(\phi C_i)_1}{(\phi C_i)_2}$$

$$\text{无量纲界面半径 } r_{Dn} = r_f / r_w$$

式中: L 为特征长度, m ; r_w 为垂直井使用井半径, m ; r_f 为垂直裂缝使用裂缝半长, m 。

对式(1)~式(9)无量纲化, 并进行 Laplace 变换, 可以得到 Laplace 空间上两个区域的压力所满足的方程及定解条件, 即

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial r_D} \right) = u \bar{p}_{1D} \quad (1 \leq r_D \leq r_{Dn}) \quad (10)$$

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial r_D} \right) = \frac{\omega_{12}}{M_{12}} u \bar{p}_{2D} \quad (r_{Dn} \leq r_D < \infty) \quad (11)$$

$$\bar{p}_{1D}(r_{Dn}, u) = \bar{p}_{2D}(r_{Dn}, u) \quad (12)$$

$$\frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial r_D} \bigg|_{r_D=r_{Dn}} = \frac{1}{M_{12}} \frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial r_D} \bigg|_{r_D=r_{Dn}} \quad (13)$$

$$\bar{p}_{2D}(r_D \rightarrow \infty, u) = 0 \quad (14)$$

$$\lim_{r_D \rightarrow 0} \left(r_D \frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial r_D} \right) = 1 \quad (15)$$

上述方程可由 Bessel 函数给出其通解,即

$$\bar{p}_{1D}(r_D, u) = AK_0(r_D \sqrt{u}) + BI_0(r_D \sqrt{u}) \quad (16)$$

$$\bar{p}_{2D}(r_D, u) = CK_0(r_D \sqrt{Nu}) + DI_0(r_D \sqrt{Nu}) \quad (17)$$

其中

$$I_0(u) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{u^{2k}}{2^{2k}(k!)^2}$$

$$K_0(u) = - \left(\ln \frac{u}{2} + \gamma \right) I_0(u) +$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(k!)^2} \left(\frac{u}{2} \right)^{2k} \sum_m^k \frac{1}{m}$$

$$N = \omega_{12}/M_{12}$$

$$\bar{p}_D(u) = \int_0^{\infty} p_D(r_D, t_D) e^{-ut_D} dt_D$$

式中: $I_0(u)$ 为第一类零阶虚宗量 Bessel 函数; $K_0(u)$ 为第二类零阶虚宗量 Bessel 函数; u 为 Laplace 变换中的变量。

Bessel 函数有如下性质为

$$I_0 n(x) = I_1(x); K_0 n(x) = -K_1(x) \quad (18)$$

其中

$$I_1(u) = \frac{u}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{u}{2} \right)^{2k+1} \frac{1}{k! (k+1)!}$$

$$K_1(u) = \left(\ln \frac{u}{2} + \gamma \right) I_1(u) - \frac{I_0(u)}{u} -$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(k!)^2 (k+1)!} \left(\frac{u}{2} \right)^{2k+1} \left(\sum_m^{k+1} \frac{1}{m} \right)$$

式中: $I_1(u)$ 为第一类一阶虚宗量 Bessel 函数; $K_1(u)$ 为第二类一阶虚宗量 Bessel 函数。

根据 Bessel 函数表达式、Bessel 函数性质式 (18)、外边界条件式 (14) 及外边界条件式 (15) 可以得到 $D=0, A=1$ 。

根据交界面上压力连续即式 (12), 可以得到以下方程

$$AK_0(r_{1D} \sqrt{u}) + BI_0(r_{1D} \sqrt{u}) = CK_0(r_{1D} \sqrt{Nu}) \quad (19)$$

根据交界面上速度相等即式 (11) 和式 (13), 则可以得到以下方程

$$-AK_1(r_{1D} \sqrt{u}) + BI_1(r_{1D} \sqrt{u}) = \sqrt{N}/M_{12} [-CK_1(r_{1D} \sqrt{Nu})] \quad (20)$$

由式 (19) 和式 (20) 得到

$$B = \frac{F_2}{F_1} \frac{K_0(r_{1D} \sqrt{Nu})}{I_0(r_{1D} \sqrt{u})} - \frac{K_0(r_{1D} \sqrt{u})}{I_0(r_{1D} \sqrt{u})} \quad (21)$$

$$C = \frac{F_2}{F_1} \quad (22)$$

其中

$$F_1 = \frac{K_1(r_{1D} \sqrt{u})}{I_1(r_{1D} \sqrt{u})} + \frac{K_0(r_{1D} \sqrt{u})}{I_0(r_{1D} \sqrt{u})}$$

$$F_2 = \frac{K_0(r_{1D} \sqrt{Nu})}{I_0(r_{1D} \sqrt{u})} + \frac{\sqrt{N} K_1(r_{1D} \sqrt{Nu})}{I_1(r_{1D} \sqrt{u}) M_{12}}$$

如果转换成 XOY 坐标系, 源汇点位于 X 轴, 其坐标为 $(x_w, 0)$, 则 Laplace 空间上复合油藏内外环的无量纲为

$$\bar{p}_{1D}(x_D, y_D, u) = K_0[\sqrt{[(x_D - x_{wD})^2 + y_D^2]u}] + BI_0[\sqrt{[(x_D - x_{wD})^2 + y_D^2]u}] \quad (23)$$

$$\bar{p}_{2D}(x_D, y_D, u) = CK_0[\sqrt{[(x_D - x_{wD})^2 + y_D^2]Nu}] \quad (24)$$

式 (23) 和式 (24) 是垂直井均质地层中无量纲压力分布, 如果是垂直裂缝井, 可以采用沿裂缝方向积分得到裂缝井的压力分布, 但此时无量纲定义中的特征长度 L 应该修改为裂缝半长 x_f 。

$$\bar{p}_{m1} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \bar{p}_{1D}(x_D, y_D, t_D, x_{wD}) dx_{wD} \quad (25)$$

$$\bar{p}_{m2} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \bar{p}_{2D}(x_D, y_D, t_D, x_{wD}) dx_{wD} \quad (26)$$

式 (25) 和式 (26) 分别是复合油藏 1 区和 2 区 Laplace 空间上线段源函数的解 \bar{p}_{m1} 和 \bar{p}_{m2} , 由这两个基本解可以构造水平井多段压裂复合油藏停泵期间压力分布及井底压力解。

对于水平井多段压裂, 采用杜哈梅原理, 将各裂缝的影响进行叠加, 考虑流量的总和即为总产量, Laplace 空间下的流量与井底压力的关系为

$$\sum_{j=1}^n \bar{q}_{Dij} = \frac{1}{s} \quad (27)$$

$$\bar{p}_{wDi}(f(s)) = \sum_{j=1}^n s \bar{q}_{Dij} \bar{p}_{Dij}(f(s)) \quad (28)$$

其中

$$\bar{p}_{Dij}(f(s)) = \pi \int_0^{\infty} p_D(t_D) e^{-f(s)t_D} dt_D$$

由于所有的裂缝都与水平井相连, 可以每个裂缝处的井底压力 \bar{p}_{wDi} 均相等, 因此根据式 (28) 可得下述矩阵方程

$$\begin{bmatrix} f(s)\bar{p}_{D1,1} & f(s)\bar{p}_{D1,2} & f(s)\bar{p}_{D1,3} & \cdots & f(s)\bar{p}_{D1,n} \\ f(s)\bar{p}_{D2,1} & f(s)\bar{p}_{D2,2} & f(s)\bar{p}_{D2,3} & \cdots & f(s)\bar{p}_{D2,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f(s)\bar{p}_{Dk,1} & f(s)\bar{p}_{Dk,2} & f(s)\bar{p}_{Dk,3} & \cdots & f(s)\bar{p}_{Dk,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f(s)\bar{p}_{Dn,1} & f(s)\bar{p}_{Dn,2} & f(s)\bar{p}_{Dn,3} & \cdots & f(s)\bar{p}_{Dn,n} \\ s & s & s & \cdots & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{q}_{1D} \\ \bar{q}_{2D} \\ \cdots \\ \bar{q}_{kD} \\ \cdots \\ \bar{q}_{nD} \\ \bar{p}_{WD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdots \\ 0 \\ \cdots \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

求解式(29)得出的 \bar{p}_{WD} 是未考虑井筒存储和表皮时(及裂缝线段源)的无量纲井底压力,考虑表皮 S 和井筒存储 C_D 后水平井多段压裂无量纲停泵压力井底压力 \bar{p}_{CWD} 为

$$\bar{p}_{CWD} = \frac{f(s)\bar{p}_{WD}(f(s)) + S}{S\{1 + C_D S[f(s)]\bar{p}_{WD}(f(s)) + S\}} \quad (30)$$

其中

$$C_D = \frac{C}{2\pi\phi C_L h L^2}$$

式中: C_D 为无量纲井筒存储常数; C 为井筒存储常数, Pa/m^3 ; S 为裂缝系统总表皮; $\bar{p}_{Di,j}$ 为第 i 簇线段源,在第 j 簇裂缝位置处产生的无量纲压力。

1.3 大规模压裂理论曲线与敏感参数分析

采用 Laplace 数值反演技术求解式(30),并绘制典型曲线图版,可以看出存在 5 个明显的流动阶段。分别为:井储阶段,表皮阶段,裂缝线性流阶段,复合区域阶段和边界流阶段。其中裂缝线性流阶段后,开始复合区域效应,会将线性流后的裂缝径向流、系统线性流、系统径向流覆盖。由于体积压裂一般会导致复合区域的流度比大于 1,导致复合区域效应阶段导数曲线斜率大幅上升,整体曲线上翘。

如图 4 所示,分别选取复合界面半径为 40、60 和 80 开展了复合界面半径对曲线形态影响的研究。图版参数为 $C_D = 1 \times 10^{-5}$, $S = 0.1$, $x_f = 20 \text{ m}$, $L = 50 \text{ m}$, $M = 2$, $w = 2$ 。从图 4 可以看出,复合界面半径主要影响的是曲线复合区域效应阶段,复合界面半径越大,复合区域效应开始得越晚,而到达边界流后,导数曲线几乎不受到影响。

如图 5 所示,分别选取流度比为 1、2 和 5 对流度比对曲线形态的影响进行了分析。从图 5 可以看出,流度比主要影响的是曲线线性流结束后的阶段,流度比越大,复合区域效应开始得越早,曲线上翘斜率越高,曲线后期数值越大。

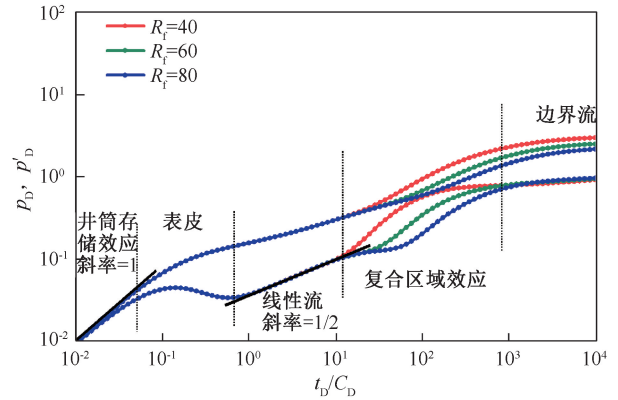


图 4 不同复合界面半径对典型曲线图版的影响
Fig. 4 Influence of different composite radius on type curves

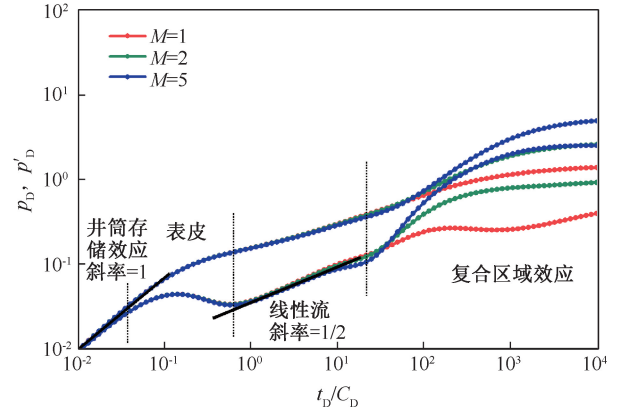


图 5 不同流度比对典型曲线图版的影响
Fig. 5 Influence of different mobility ratio on type curves

2 实例分析

为了验证该方法的正确性和适用性,选取国内的一口多段压裂水平井的停泵数据进行解释反演。

2.1 基本情况

选用四川省筠连县某多段压裂水平井的第十二段和第十三段进行实例分析。实例井完钻井深 4 720 m,垂深 2 248.69 m,井斜 91°,方位 189°,总水平位移 2 461.97 m,全井最大井斜井深 2 790 m,垂深 2 210.1 m,井斜 93.88°,方位 187.38°。共设计压裂 26 段,采用非均匀布孔方式,采用可溶桥塞+电

缆带射孔枪分簇射孔为主的作业模式。首段射孔 5 簇,1 m/簇,8 孔/m;其余各段采用 6~8 簇/段,0.5 m/簇,8~12 孔/m,单段总孔数 32~36 孔。根据可压性指数或随钻参数采取非均匀布孔模式。

2.2 第十二段

本段压裂段长 80 m,实际有效段长 80 m,设计加砂强度 3.1 t/m,实际加砂强度 3.13 t/m,设计液量 2 000 m³,实际液量 1 997.5 m³,40/70 目石英砂比例 40.6%。施工及停泵期间的压力、排量和砂浓度数据如图 6 所示。

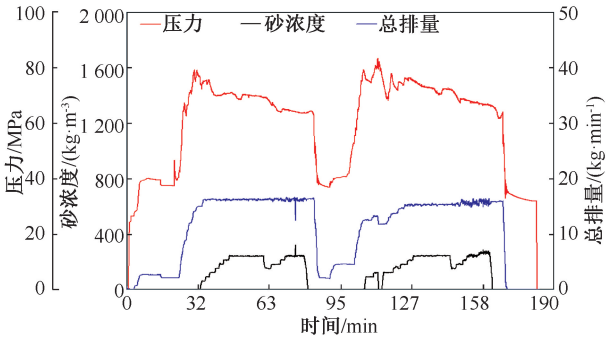


图 6 示例井第十二段压裂施工图
Fig. 6 Fracturing construction data of the 12th stage

对压力及压力导数和时间进行双对数图版分析,采用 4 簇模型进行曲线拟合,拟合效果较好,得到相关压裂效果参数,解释结果:原始压力 34.630 9 MPa,平均压力 60.923 2 MPa,地层渗透率 1.267 5 mD,平均裂缝长度 120.563 2 m,裂缝高度 30.074 2 m,SRV 区域面积 7 456.036 m²。

从图 7 中可以看出导数图不存在明显的线性流直线段,说明为压力后的裂缝网络为缝网缝形式。

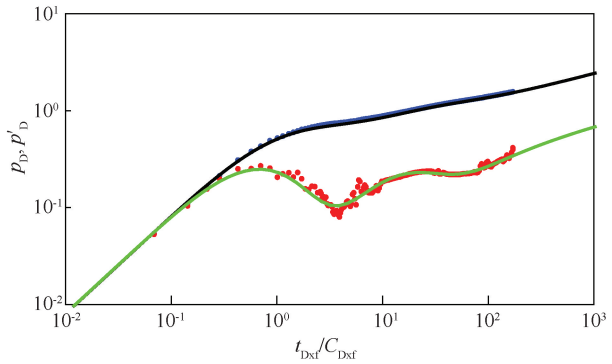


图 7 第十二段停泵压力拟合图
Fig. 7 Pressure fitting diagram of the 12th stage

根据计算结果,可以绘制地层压力分布图,能够形成且直观地观察到裂缝展布情况与地层压裂液流动情况,如图 8 所示。

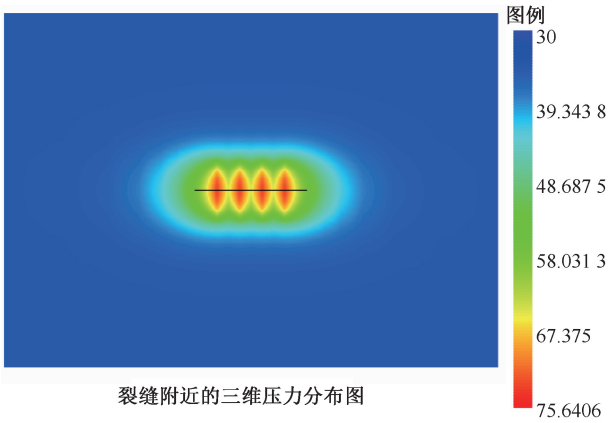


图 8 第十二段裂缝及压裂液分布图
Fig. 8 Fracture and fracturing fluid distribution of the 12th stage

2.3 第十三段

本段压裂段长 82 m,实际有效段长 82 m,设计加砂强度 3 t/m,实际加砂强度 3.09 t/m,设计液量 1 968 m³,实际液量 1 962.7 m³,40/70 目石英砂比例 45.9%,具体压裂施工图如图 9 所示。

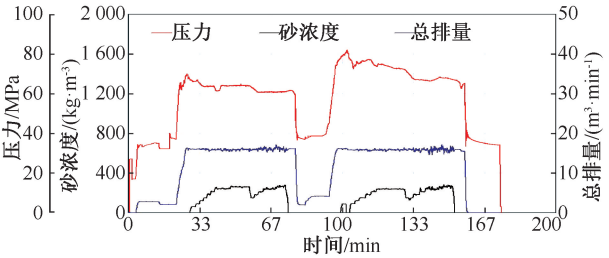


图 9 示例井第十三段压裂施工图
Fig. 9 Fracturing construction data of the 13th stage

对压力及压力导数和时间进行双对数图版分析,采用 6 簇模型进行曲线拟合,拟合效果较好,如图 10 所示得到相关压裂效果参数。

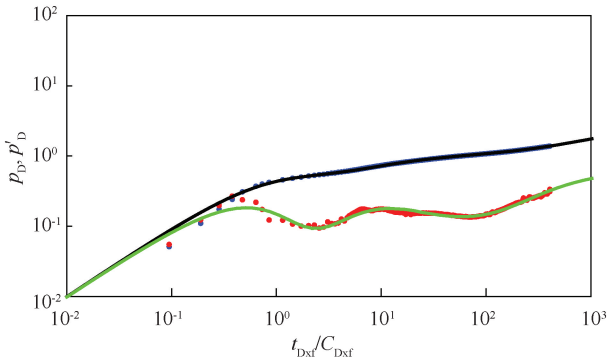


图 10 第十三段停泵压力拟合图
Fig. 10 Pressure fitting diagram of the 13th stage

解释结果:原始压力 34.399 2 MPa,平均压力 60.054 3 MPa,地层渗透率 0.826 45 mD,平均裂缝

长度 94.962 m, 裂缝高度 20.973 8 m, SRV 区域面积 7 941.918 m²。

由图 10 可以看出, 导数图不存在明显的线性流直线段, 同样也说明地下裂缝网络为缝网缝形式。根据计算结果, 可以绘制地层压力分布图, 能够形成且直观地观察到裂缝展布情况与地层压裂液流动情况, 如图 11 所示。

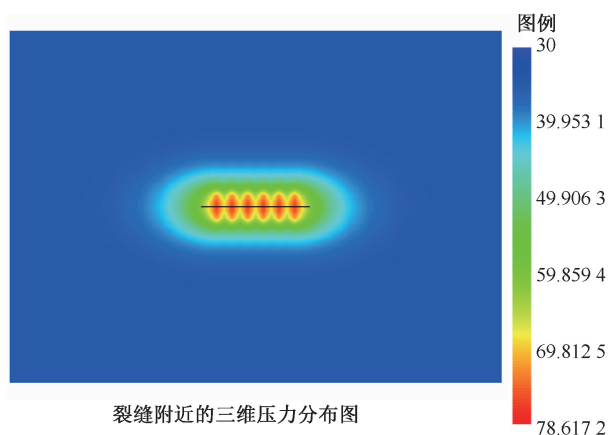


图 11 第十三段裂缝及压裂液分布图

Fig. 11 Fracture and fracturing fluid distribution of the 13th stage

3 结论

(1) 考虑到大规模体积压裂造成的改造区域与非改造区域的明显差距, 首次提出了基于压裂停泵数据的大规模体积压裂改造效果评价方法。

(2) 通过对物理数学模型的求解, 得到了停泵阶段井底压力变化理论解, 并绘制成双对数曲线, 观察该曲线发现, 停泵阶段的双对数曲线可以划分为井储阶段, 表皮阶段, 裂缝线性流阶段, 复合区域阶段和边界流阶段。

(3) 停泵阶段井底压力双对数曲线在复合区域阶段主要受到边界距离、流度比等参数的影响, 其中复合界面半径越大, 复合区域效应开始得越晚; 流度比越大, 复合区域效应开始得越早, 曲线上翘斜率越高。

(4) 对我国四川省筠连县一口多段压裂水平井进行实例分析, 通过计算得到该井第十二段 4 簇裂缝平均裂缝半长 120.6 m, 改造后区域平均渗透率为 1.27 mD, 改造区域面积为 7 456 m², 第十三段 6 簇裂缝平均裂缝半长 95.0 m, 改造后区域平均渗透率为 0.83 mD, 改造区域面积为 7 942 m²。

(5) 提出的压裂效果评价方法具有较好的适用性与时效性, 为大规模体积压裂多段压裂水平井技

术提供了准确适用的压裂效果评价方法, 具有重要的科学意义和广阔的应用前景。

致谢: 本文得到了中国石油前瞻性基础性重大科技项目“储层改造关键技术与装备研究”课题《水平井压裂缝网分布形态监测及诊断新技术研究》(2021DJ4502) 的支持。感谢中国石油西南油气田公司页岩气研究院、西南油气田公司开发事业部、西南油气田公司工程技术处及西南油气田公司蜀南气矿的数据材料支持。

参考文献

- [1] U. S, ENERGY, INFORMATION, et al. Annual energy outlook 2010 [J]. 2010, 114(4): 42-47.
- [2] CALVEZ J L, GRANT W, MCCARLEY D, et al. Hydraulic fracture monitoring as a tool to improve reservoir management; proceedings of the SPE production operations symposium, F [C], 2005.
- [3] 沈骋, 吴建发, 付永强, 等. 页岩气井长水平段压裂一体化动态评估——以长宁国家级页岩气示范区为例 [J]. 天然气工业, 2022, 42(2): 123-132.
- SHEN Cheng, WU Jianfa, FU Yongqiang, et al. Integrated dynamic evaluation of long lateral fracturing in shale gas wells: A case study on the Changning National Shale Gas Demonstration Area [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42 (2): 123-132.
- [4] 朱海燕, 宋宇家, 唐煊赫, 等. 页岩气藏加密井压裂时机优化——以四川盆地涪陵页岩气田 X1 井组为例 [J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 154-168.
- ZHU Haiyan, SONG Yujia, TANG Xuanhe, et al. Optimization of fracturing timing of infill wells in shale gas reservoirs: A case study on well group X1 of Fuling shale gas field in the Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41 (1): 154-168.
- [5] 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.
- [6] 贾利春, 陈勉, 金衍. 国外页岩气井水力压裂裂缝监测技术进展 [J]. 天然气与石油, 2012, 30(1): 101-102.
- JIA Lichun, CHEN Mian, JIN Yan. Technical progress in overseas hydraulic fracture monitoring techniques for shale gas well [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(1): 101-102.
- [7] ZHANG F, EMAMI-MEYBODI H J J O P S, ENGINEERING. A type-curve method for two-phase flowback analysis in hydraulically fractured hydrocarbon reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2022, 209: 109912.
- [8] XU Youjie, LI Xiaoping, LIU Qiguo, et al. Pressure performance of multi-stage fractured horizontal well considering stress

- sensitivity and dual permeability in fractured gas reservoirs [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 201: 108154.
- [9] 韩慧芬, 杨斌, 彭钧亮. 压裂后焖井期间页岩吸水起裂扩展研究——以四川盆地长宁区块龙马溪组某平台井为例[J]. *天然气工业*, 2019, 39(1): 74–80.
HAN Huifen, YANG Bin, PENG Junliang. Fracture initiation & propagation in shale due to imbibition during well shut-in after fracturing: A case study from one well platform in Longmaxi Fm of the Changning block, Sichuan basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(1): 74–80.
- [10] WANG F, ZHANG S. Pressure-buildup analysis method for a post-treatment evaluation of hydraulically fractured tight gas wells [J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2016, 第 Pt1 期.
- [11] KUCHUK F, BIRYUKOV D. Pressure-transient tests and flow regimes in fractured reservoirs [J]. *Spe Reserv Eval Eng*, 2015, 18(2): 187–204.
- [12] 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 Xuefeng, CHEN Yuanlin, et al. Seepage behavior and well testing in horizontal shale gas wells under multi-stage fracking [J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(12): 77–81.
- [13] ZERZAR A, TIAB D, BETTAM Y. Interpretation of multiple hydraulically fractured horizontal wells; proceedings of the abu dhabi international conference and exhibition, F[C]. SPE-88707-MS, 2004.
- [14] RAHMANI A R, SHIRDEL M. Impedance analysis as a tool for hydraulic fracture diagnostics in unconventional reservoirs; proceedings of the SPE international production and operations conference & exhibition, F [C]. SPE-156577-MS, 2012.
- [15] PARKHONYUK S, FEDOROV A, KABANNIK A, et al. Measurements while fracturing: Nonintrusive method of hydraulic fracturing monitoring; proceedings of the SPE hydraulic fracturing technology conference and exhibition, F [C]. D031S007R005, 2018.
- [16] 苏煜彬, 李树生, 崔云群, 等. 水力压裂压后停泵井筒内水锤信号模拟[J]. *节能技术*, 2021, 39(5): 422–425.
SU Yubin, LI Shusheng, CUI Yunqun, et al. Simulation on water hammer signal in wellbore after pumping stoppage in hydraulic fracturing [J]. *Energy Conservation Technology*, 2021, 39(5): 422–425.
- [17] 李培伦, 田伟, 卢德唐. 基于数字滤波的压裂停泵压降分析方法[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(1): 74–78.
- LI Peilun, TIAN Wei, LU Detang. Analyzing method of the fracturing pump-off pressure decline based on the digital filtering [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(1): 74–78.
- [18] 贺培, 熊继有, 陆朝晖, 等. 基于高压脉动水力压裂的脉动波传播机理研究[J]. *水动力学研究与进展 (A 辑)*, 2017, 32(1): 117–123.
HE Pei, XIONG Jiyou, LU Chaohui, et al. Study of pulse wave transmission mechanism based on high pulse hydraulic fracturing [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamic*, 2017, 32(1): 117–123.
- [19] 胡晓东, 周福建, 李宇娇. 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. Filtering methods and characteristic analysis of water hammer pressure—wave signals from fracturing stop pumps [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2021, 6(1): 79–91.
- [20] CAREY M A, MONDAL S, SHARMA M M. Analysis of water hammer signatures for fracture diagnostics; proceedings of the SPE annual technical conference and exhibition, F [C]. D031S034R003, 2015.
- [21] PARKHONYUK S, FEDOROV A, KABANNIK A, et al. Measurements while fracturing: nonintrusive method of hydraulic fracturing monitoring; proceedings of the SPE hydraulic fracturing technology conference and exhibition, F [C]. D031S007R005, 2018.
- [22] 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.
- [23] 陆平, 肖亚峰, 任建斌. 数学物理方程 [M]. 国防工业出版社, 2011: 195–211.

编辑 穆立婷

第一作者简介: 曾波, 男, 1982 年出生, 高级工程师, 硕士, 2005 年毕业于成都理工大学资源勘查工程专业, 2015 年获西南石油大学石油与天然气工程专业工程硕士学位, 主要从事储层改造工艺研究与现场应用工作。电话: 028-86018510; Email: zeng_bo@petrochina.com.cn。通信地址: 四川省成都市中国石化西南油气田公司页岩气研究院, 邮政编码: 610056。