



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403165

引用格式:王代刚,石宇哲,李国永,等.致密油藏压裂定向井多层合采非稳态产能预测模型[J].科学技术与工程,2025,25(9):3646-3656.

Wang Daigang, Shi Yuzhe, Li Guoyong, et al. Non-steady-state productivity prediction model for multi-layer fractured directional wells in tight oil reservoirs[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(9): 3646-3656.

石油、天然气工业

## 致密油藏压裂定向井多层合采非稳态产能预测模型

王代刚<sup>1</sup>, 石宇哲<sup>1</sup>, 李国永<sup>2</sup>, 牛文娟<sup>1</sup>, 赵耀<sup>2</sup>, 胡哲<sup>1</sup>, 耿文爽<sup>2</sup>, 宋考平<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油天然气股份有限公司冀东油田分公司, 唐山 063000)

**摘要** 中国致密油储层具有薄互层纵向交互发育、储层非均质性严重等特点,为实现产能及经济效益最大化,普遍采用一套井网分层压裂多层合采的开发方式。然而,现有压裂定向井产能模型仅适用于单层开采,忽略层间干扰的影响,对预测多层合采条件下油井的产能适用性差。为了提高产能预测的准确性,将致密油藏压裂定向井附近流场划分为主裂缝区、压裂改造区和基质未改造区,综合考虑致密储层分区流动形态,同时引入干扰系数,建立了致密油藏压裂定向井多层合采非稳态产能预测模型,研究了裂缝半长、裂缝导流能力、启动压力梯度、应力敏感、储层非均质性等因素对压裂定向井产能的影响规律。结果表明:启动压力梯度、应力敏感效应和纵向非均质性对压裂定向井的产能具有显著影响,启动压力梯度越大、应力敏感效应和纵向非均质性越显著,压裂定向井的产能越低;随着裂缝半长、裂缝导流能力及基质渗透率的逐渐增大,压裂定向井的产能越高,但各自存在最优范围。产能影响因素的重要性综合排名依次为:基质渗透率、裂缝导流能力、裂缝半长、启动压力梯度、纵向非均质性、应力敏感效应。

**关键词** 致密油藏;压裂定向井;产能预测;干扰系数;非稳态;敏感因素

**中图分类号** TE348; **文献标志码** A

### Non-steady-state Productivity Prediction Model for Multi-layer Fractured Directional Wells in Tight Oil Reservoirs

WANG Dai-gang<sup>1</sup>, SHI Yu-zhe<sup>1</sup>, LI Guo-yong<sup>2</sup>, NIU Wen-juan<sup>1</sup>, ZHAO Yao<sup>2</sup>,  
HU Zhe<sup>1</sup>, GENG Wen-shuang<sup>2</sup>, SONG Kao-ping<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Jidong Oilfield Branch Company, CNPC, Tangshan 063000, China)

**[Abstract]** China's tight oil reservoirs have distinctive characteristics, including thin interbedded layers with alternate distribution in the longitudinal direction and strong reservoir heterogeneity. In order to maximize productivity and economic benefits, a development approach was commonly employed, involving a well network with layered fracturing for the simultaneous development of multiple layers. However, existing productivity models for fractured directional wells are only applicable to single-layer development and do not consider inter-layer interference, making them unsuitable for predicting well productivity of multi-layer development. In order to improve the accuracy of productivity prediction, the flow field nearby the fractured directional well is divided into the main fracture region, the stimulated reservoir volume region, and the un-stimulated reservoir volume region. Considering the effects of flow patterns in different regions and stress sensitivity, and introducing a disturbance coefficient, a non-steady-state productivity prediction model for multi-layer fractured directional well in tight oil reservoirs was established. After validating the model accuracy, the influence of fracture half-length, fracture conductivity, threshold pressure gradient, stress sensitivity and reservoir heterogeneity on the productivity of fractured directional well was further investigated. The results indicate that the threshold pressure gradient, stress sensitivity and longitudinal heterogeneity significantly affect the productivity of fractured directional well. The larger the threshold pressure gradient, and the more significant the stress sensitivity and longitudinal heterogeneity, the lower the productivity of fractured directional wells. With the gradual increase in fracture half-length, fracture conductivity, and matrix permeability, the productivity of fractured directional wells increases, but each factor has its optimal range. The ranking of factors affecting productivity is as follows: matrix permeability, fracture conductivity,

收稿日期: 2024-04-28 修订日期: 2024-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(52174043); 中国石油科技创新基金(2022DQ02-0208)

第一作者: 王代刚(1988—),男,汉族,山东安丘人,博士,副教授。研究方向:复杂介质油气渗流及提高采收率。E-mail: dgwang@cup.edu.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

ity, fracture half-length, threshold pressure gradient, longitudinal heterogeneity, stress sensitivity.

[Keywords] tight oil; fractured directional well; productivity prediction; disturbance coefficient; non-steady state; sensitive factor

中国致密油储层平面连片分布、范围大,源储共生、含油性好,具有一定的资源潜力。但其纵向薄互层交互发育、油层厚度变化大、物性分布差异大,采用传统方式难以有效开发。目前普遍采用一套井网分层压裂多层合采的开发方式,通过增加井筒与油藏的接触面积、增大控制体积、提高储层流动能力,来实现致密油资源的有效动用<sup>[1-3]</sup>。压裂水平井已广泛应用于致密油开发,现有相关文献多为研究压裂水平井产能预测。但压裂定向井对于多层系油藏和钻井平台不易建设的致密油藏也尤其有效。定向井相对于水平井具有更为复杂的构造和井身轨迹,由于井筒倾斜、钻完井及生产对近井地应力的改变等因素,形成了压裂倾斜缝。Roemershauser等<sup>[4]</sup>、Cinco<sup>[5]</sup>分别研究了斜直井的稳态、非稳态产能;Vandervlis等<sup>[6]</sup>对有效井筒半径进行了修正,推导并建立了相应的产能公式;Khattab等<sup>[7]</sup>、Gill等<sup>[8]</sup>对中、高渗透地层中的单层、多层定向井的压力响应规律进行了研究;杨占伟等<sup>[9]</sup>建立了考虑启动压力梯度和储层损害因素的斜井产能公式;张政等<sup>[10]</sup>基于室内驱替实验,推导得到了定向井非线性启动压力梯度动用半径产能公式;冯沙沙等<sup>[11]</sup>基于测井曲线建立了考虑纵向级差的海上重质油油藏产能预测方法;李辉等<sup>[12]</sup>针对海上砂岩油藏,建立了定向井多层合采的稳态产能模型。

但目前国内外已研究的定向井产能计算公式仅针对单层油藏,未考虑层间干扰,不适用于多层合采定向井的产能预测。而考虑了层间干扰的定向井多层合采产能预测方法中,基于测井曲线的方法预测精度较高,但实际应用流程较为烦琐;而基于稳态渗流理论的方法未考虑流体非线性及非稳态渗流规律,不能准确反映流体实际流动状况。针对这一问题,现考虑致密油藏分区域渗流特征,根据致密油在压裂定向井周围区域的不同流动形态,将储层划分为3个渗流区域:主裂缝区、压裂改造区和基质未改造区,更加符合压裂改造后的流场分布。同时,考虑启动压力梯度和应力敏感效应,符合流体实际流动规律。另外,在单层致密油藏压裂定向井稳态产能预测模型的基础上,引入基质动态泄油半径及干扰系数的概念,建立致密油藏压裂定向井多层合采非稳态产能预测模型,有效解决多层合采条件下层间干扰问题,显著提高预测精度。最后,探究裂缝半长、裂缝导流能力、启动压力梯度、应力敏感等因素对压裂定向井产能的影响,希冀为合理开发致密油藏提供一定理论基础。

## 1 压裂定向井产能预测模型

压裂定向井示意图如图1所示。对模型做以下假设条件。

(1) 流体为单相微可压缩。

(2) 储层封闭等厚,厚度为 $H$ 。

(3) 任一层压裂缝均为两翼对称垂直缝,各层裂缝半长 $x_{ij}$ 和裂缝渗透率 $K_i$ 均不相等,且各层压裂缝高度之和与储层厚度 $H$ 相同。

(4) 各层改造区的长度与该层裂缝长度相等,宽度为 $2b_1$ 。

(5) 每层 $x$ 轴方向供给半径为 $x_e$ , $y$ 轴方向供给半径为 $y_e$ 。

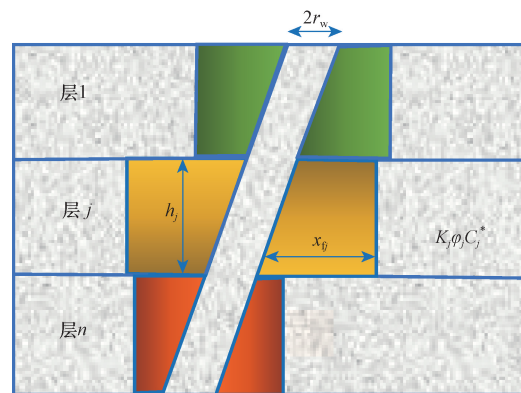
(6) 每层水平等厚状,但各层厚度 $h$ 、储层物性参数(如储层渗透率 $K$ 、孔隙度 $\varphi$ 、综合压缩系数 $C^*$ )不同,每层流体黏度 $\mu$ 、流体密度 $\rho$ 相同,地层压力 $p_i$ 相同,椭圆流和线性流启动压力梯度 $G_1$ 、 $G_2$ 相同。

(7) 流体流动为先流入裂缝,再由裂缝流到井筒。

(8) 基质未改造区考虑启动压力梯度的影响,而主裂缝区及压裂改造区忽略启动压力梯度的影响,均考虑应力敏感的影响。

假设定向井经过压裂改造后,形成一条主裂缝及大量次生裂缝。考虑致密油储层物性及渗流特征<sup>[13-14]</sup>,将压裂定向井附近的流场划分为3个区域:水力压裂主裂缝区、由次生裂缝和基质组成的压裂改造区以及基质未改造区<sup>[15]</sup>,如图2所示。

考虑主裂缝区、压裂改造区和基质未改造区的分区渗流规律,首先推导建立单层致密油藏压裂定



$x_{ij}$  为第 $j$ 层主裂缝半缝长;  $h_j$  为第 $j$ 层储层厚度;  $K_j$ 、 $\varphi_j$ 、 $C_j^*$  分别为第 $j$ 层储层的基质渗透率、孔隙度、综合压缩系数;  $r_w$  为油井半径

图1 压裂定向井示意图

Fig. 1 Schematic of fractured directional well

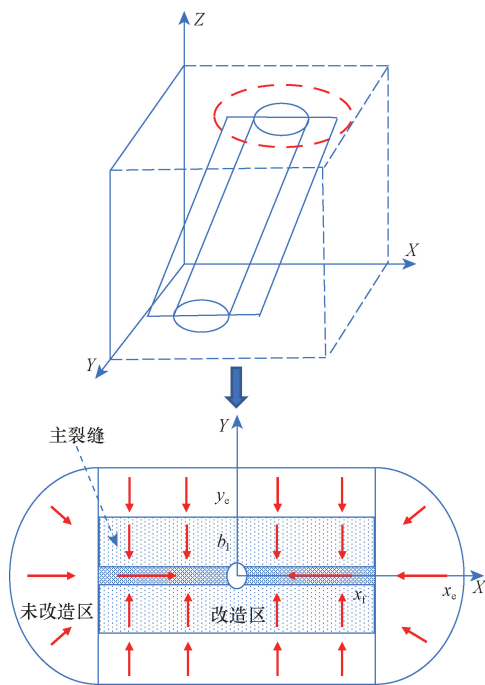


图2 压裂定向井渗流场分区

Fig. 2 Flow field partitioning in fractured directional well

向井稳态产能预测模型,在此基础上引入“基质动态泄油半径”和“干扰系数”的概念,最终提出了致密油藏压裂定向井多层合采非稳态产能预测模型。

### 1.1 单层稳态渗流产能模型

#### 1.1.1 主裂缝区

该区域的流体流动为沿主裂缝的线性流,由 Darcy 定律和边界条件,得到了主裂缝区的压力分布函数<sup>[16]</sup>,表达式为

$$p_{fj} = \frac{p_{ej} - p_{wj}}{x_{fj}}x + p_{wj} \quad (1)$$

式(1)中:  $p_{fj}$  为第  $j$  层主裂缝的压力,MPa;  $p_{ej}$  为第  $j$  层裂缝尖端的压力,MPa;  $p_{wj}$  为第  $j$  层井底流压,MPa;  $x_{fj}$  为第  $j$  层主裂缝半缝长,m。

室内实验<sup>[17]</sup>表明,当地层压力持续下降时,孔隙中的有效应力也随之增加,使得纳微米尺度孔隙喉道发生收缩变形,影响了流体在孔隙介质的流动。研究中,通过改变幂律模型中的应力敏感系数取值,从而表征渗透率应力敏感效应,其关系式如下。

人工压裂裂缝:

$$K_{fj} = K_{f0j}e^{-\alpha(p_i - p)} \quad (2)$$

基质孔隙:

$$K_{mj} = K_{m0j}e^{-\alpha(p_i - p)} \quad (3)$$

式中:  $K_{f0j}$  为第  $j$  层主裂缝初始渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $K_{m0j}$  为第  $j$  层基质初始渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $K_{fj}$  为第  $j$  层主裂缝渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $K_{mj}$  为第  $j$  层基质渗透率,

$10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $p_i$  为原始地层压力,MPa。

结合 Darcy 定律,进一步得到了第  $j$  层主裂缝区的流量,可描述为

$$q_{1j} = \frac{2w_{fj}K_{fj}h_{fj}(p_{ej} - p_{wj})}{\mu x_{fj}} \quad (4)$$

式(4)中:  $q_{1j}$  为第  $j$  层主裂缝区流量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $w_{fj}$  为第  $j$  层主裂缝宽度,m;  $K_{fj}$  为第  $j$  层主裂缝渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $h_{fj}$  为第  $j$  层主裂缝高度,其中  $h_{fj} = h_j/\cos\theta$ ,  $\theta$  为井斜角,  $h_j$  为第  $j$  层储层厚度,m;  $\mu$  为原油黏度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

由式(4),最终确定了第  $j$  层主裂缝区的渗流阻力,表达式为

$$R_{1j} = \frac{\mu x_{fj}}{2w_{fj}K_{fj}h_{fj}} \quad (5)$$

#### 1.1.2 压裂改造区

致密油储层体积压裂改造技术通过在井筒附近形成大规模的缝网,使得流体向井筒流动,将此区域称为改造区。假定改造区内的裂缝平行均匀分布,并沿平面及纵向完全贯通,以平行板理论为基础,对改造区进行表征,求得第  $j$  层改造区的等效渗透率<sup>[18-19]</sup>为

$$K_{ej} = K_{mj} + (K_{sfj} - K_{mj})D_L b_f \quad (6)$$

式(6)中:  $K_{ej}$  为第  $j$  层改造区渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $K_{mj}$  为第  $j$  层基质渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $K_{sfj}$  为第  $j$  层次生裂缝渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $D_L$  为次生裂缝线密度,  $\text{m}^{-1}$ ;  $b_f$  为次生裂缝开度,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

改造区内的流体流动为垂直于主裂缝的线性流,将改造区等分为四块,每块的宽度为第  $j$  层裂缝半长  $x_{fj}$ ,长度为第  $j$  层改造区半宽  $b_{ij}$ 。由 Darcy 定律,得到改造区的流量公式为

$$q_{2j} = 4 \int_0^{x_{fj}} \frac{K_{ej}h_{fj}[p_{mj} - p_{wj}(x)]}{\mu b_{ij}} dx = \frac{4K_{ej}h_{fj}x_{fj}(p_{mj} - \frac{1}{2}p_{ej} - \frac{1}{2}p_{wj})}{\mu b_{ij}} \quad (7)$$

式(7)中:  $q_{2j}$  为第  $j$  层改造区流量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $b_{ij}$  为第  $j$  层改造区半宽,m;  $p_{mj}$  为第  $j$  层改造区的外边界压力,MPa。

由式(7),最终确定了第  $j$  层压裂改造区的渗流阻力,表达式为

$$R_{2j} = \frac{\mu b_{ij}}{4K_{ej}h_{fj}x_{fj}} \quad (8)$$

#### 1.1.3 基质未改造区

基质未改造区是指压裂未波及的渗流区域,该区域内的流体流态包括半椭圆柱体地层的椭圆流和长方体地层的线性流。前人研究表明<sup>[20]</sup>椭圆流

和线性流的流动形态不同,故其启动压力梯度也不同,由此设椭圆流和线性流的启动压力梯度分别为  $G_1$ 、 $G_2$ 。

对半椭圆柱体地层中的椭圆流过程进行求解,以裂缝端点为焦点,其直角坐标与椭圆坐标相互关系为

$$\begin{cases} x = A \cos \eta \\ y = B \sin \eta \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} A = x_f \cosh \xi \\ B = x_f \sinh \xi \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\eta$ 、 $\xi$  为椭圆坐标, m;  $x_f$  为裂缝半长, m。

将两个半椭圆柱拼合,与改造区的接触面看作裂缝面使其转化为半缝长为  $b_1$  的二分支裂缝井。经过保角变换  $z/b_1 = 1/2(\zeta + 1/\zeta)$ , 将  $z$  平面映射为  $\zeta$  平面<sup>[21]</sup>,  $z$  平面上长度为  $2b_1$  的裂缝变为  $\zeta$  平面上的单位圆周,  $z$  平面上的椭圆区域变为  $\zeta$  平面上半径为  $\rho$  的圆,这时椭圆流演变为平面径向流,如图 3 所示。

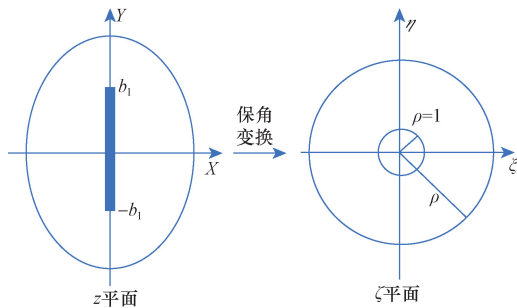


图 3 保角变换示意图

Fig. 3 Schematic of conformal transformation

对于平面径向流,第  $j$  层考虑启动压力梯度的非线性渗流控制方程及边界条件为

$$\frac{\partial^2 p_{3j}}{\partial \rho_j^2} + \frac{1}{\rho_j} \left( \frac{\partial p_{3j}}{\partial \rho_j} - G_1 \right) = 0 \quad (11)$$

$$\rho_j = \begin{cases} 1, & p_{3j} = p_{mj} \\ \sqrt{\frac{y_{ej} + x_{ej} - x_{fj}}{y_{ej} - x_{ej} + x_{fj}}}, & p_{3j} = p_{ej} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $p_{3j}$  为第  $j$  层椭圆柱体地层的压力, MPa。

由于保角变换前后产量不变,求得第  $j$  层椭圆柱体地层的流量为

$$q_{3j} = \frac{2\pi K_{mj} h_{fj} \left[ p_{ej} - p_{mj} - G_1 \left( \sqrt{\frac{y_{ej} + x_{ej} - x_{fj}}{y_{ej} - x_{ej} + x_{fj}}} - 1 \right) \right]}{\mu \ln \sqrt{\frac{y_{ej} + x_{ej} - x_{fj}}{y_{ej} - x_{ej} + x_{fj}}}} \quad (13)$$

式(13)中:  $q_{3j}$  为第  $j$  层椭圆柱体地层流量,  $m^3/d$ ;  $p_{ej}$  为第  $j$  层供给边界压力, MPa;  $x_{ej}$  为第  $j$  层  $x$  轴方向

供给半径, m;  $y_{ej}$  为第  $j$  层  $y$  轴方向供给半径, m;  $G_1$  为椭圆流启动压力梯度, MPa/m。

根据式(13),得到第  $j$  层半椭圆柱体地层的渗流阻力,表达式为

$$R_{3j} = \frac{\mu}{2\pi K_{mj} h_{fj}} \ln \sqrt{\frac{y_{ej} + x_{ej} - x_{fj}}{y_{ej} - x_{ej} + x_{fj}}} \quad (14)$$

对第  $j$  层长方体地层中的线性流过程进行求解,求得流量为

$$q_{4j} = \frac{4x_{fj} K_{mj} h_{fj} [p_{ej} - p_{mj} - G_2 (y_{ej} - b_{fj})]}{\mu (y_{ej} - b_{fj})} \quad (15)$$

式(15)中:  $q_{4j}$  为第  $j$  层长方体地层流量,  $m^3/d$ ;  $G_2$  为线性流启动压力梯度, MPa/m。

根据式(15),得到了第  $j$  层长方体地层的渗流阻力,表达式为

$$R_{4j} = \frac{\mu (y_{ej} - b_{fj})}{4x_{fj} K_{mj} h_{fj}} \quad (16)$$

如果流体的流动符合稳态渗流规律,据等值渗流阻力原理,3 个区域串联供油,则  $q_j = q_{1j} = q_{2j} = q_{3j} + q_{4j}$ ,联立式(4)、式(7)、式(13)和式(15),得单层致密油藏压裂定向井稳态产能预测模型,表达式可描述为

$$q_j = \left[ p_{ej} - p_{wj} - G_1 \frac{R_{4j}}{R_{3j} + R_{4j}} \left( \sqrt{\frac{y_{ej} + x_{ej} - x_{fj}}{y_{ej} - x_{ej} + x_{fj}}} - 1 \right) - G_2 \frac{R_{3j}}{R_{3j} + R_{4j}} (y_{ej} - b_{fj}) \right] \left/ \left( \frac{R_{1j}}{2} + R_{2j} + \frac{R_{3j} R_{4j}}{R_{3j} + R_{4j}} \right) \right. \quad (17)$$

## 1.2 多层合采非稳态渗流产能模型

致密油藏基质动态泄油半径为非稳态值,随时间的推移而逐渐增大<sup>[22]</sup>。为了表征基质泄油半径随时间的变化规律,需要做以下假设条件:①每一瞬间均存在一个有限的基质动用区,在该区中流体向井流动;②在基质动用区内的流体流动是稳定的;③基质动用区的范围可结合物质平衡方程和边界条件求得。

### 1.2.1 基质动态泄油半径的计算

为了求解第  $j$  层基质动态泄油半径  $R(t)_j$ ,基于保角变换后的圆形渗流区建立了一个物质平衡方程<sup>[23]</sup>。当投产  $t$  时刻后,第  $j$  层地层的总采出量  $W_{lj}$  为

$$W_{lj} = \int_{r_w}^{R_{lj}} 2\pi r h_{fj} (\rho_e \varphi_{ej} - \rho \varphi_j) dr \quad (18)$$

根据弹性孔隙介质状态方程  $\varphi_j = \varphi_{0j} + C_{\varphi j} (p_j - p_{ej})$  及弹性流体状态方程  $\rho = \rho_0 [1 + C_{\rho j} (p_j - p_{ej})]$ ,得  $\rho \varphi_j = \rho_0 \varphi_{0j} + \rho_0 (\varphi_{0j} C_{\rho j} + C_{\varphi j}) (p_j - p_{ej}) + \rho_0 C_{\varphi j} C_{\rho j} (p_j - p_{ej})^2$  (19)

因为  $C_{\varphi_j}$  和  $C_{\rho_j}$  都是很小的数,所以可略去  $C_{\varphi_j}C_{\rho_j}$  项,得

$$\rho\varphi_j = \rho_0\varphi_{0j} + \rho_0(\varphi_{0j}C_{\rho_j} + C_{\varphi_j})(p_j - p_{ej}) \quad (20)$$

令  $C_j^* = \varphi_{0j}C_{\rho_j} + C_{\varphi_j}$ ,整理得

$$\rho\varphi_j = \rho_0\varphi_{0j} + \rho_0(p_j - p_{ej})C_j^* \quad (21)$$

即当  $t=0$  时,  $\rho_0\varphi_{0j} = \rho_e\varphi_{ej}$ , 对应供给压力  $p_{ej}$ , 得

$$\rho\varphi_j = \rho_e\varphi_{ej} + \rho_0(p_j - p_{ej})C_j^* \quad (22)$$

将求解点取在井底时,得

$$\rho\varphi_{wj} = \rho_e\varphi_{ej} + \rho_0(p_{wj} - p_{ej})C_j^* \quad (23)$$

两式相除,整理得到

$$\frac{\rho_e\varphi_{ej} - \rho\varphi_j}{\rho_e\varphi_{ej} - \rho\varphi_{wj}} = \frac{p_{ej} - p_j}{p_{ej} - p_{wj}} \quad (24)$$

由比例关系  $\frac{p_{ej} - p_j}{p_{ej} - p_{wj}} = \frac{\ln \frac{R_{lj}}{r}}{\ln \frac{R_{lj}}{r_w}}$ , 式(24)可变换为

$$\rho_e\varphi_{ej} - \rho\varphi_j = \frac{\rho_e\varphi_{ej} - \rho\varphi_{wj}}{\ln \frac{R_{lj}}{r_w}} \ln \frac{R_{lj}}{r} \quad (25)$$

联立式(18)和式(25),可得

$$\begin{aligned} W_{lj} &= 2\pi h_j \frac{\rho_e\varphi_{ej} - \rho\varphi_{wj}}{\ln \frac{R_{lj}}{r_w}} \int_{r_w}^{R_{lj}} r \ln \frac{R_{lj}}{r} dr \\ &= 2\pi h_j (\rho_e\varphi_{ej} - \rho\varphi_{wj}) \left( \frac{R_{lj}^2 - r_w^2}{4 \ln \frac{R_{lj}}{r_w}} - \frac{r_w^2}{2} \right) \quad (26) \end{aligned}$$

由于第  $j$  层原油的总采出量  $W_j$  等于第  $j$  层地层采出量  $W_{lj}$  与第  $j$  层井筒射孔段采出量之和,推导得

$$\begin{aligned} W_j &= \pi h_j (\rho_e\varphi_{ej} - \rho\varphi_{wj}) \frac{R_{lj}^2 - r_w^2}{2 \ln \frac{R_{lj}}{r_w}} \\ &= \pi h_j \rho_0 C_j^* (p_{ej} - p_{wj}) \frac{R_{lj}^2 - r_w^2}{2 \ln \frac{R_{lj}}{r_w}} \quad (27) \end{aligned}$$

基于物质平衡原理,假定到时间  $t$  为止,第  $j$  层原油的总采出量为  $W_j$ , 地层条件下流体的平均密度为  $\rho_0$ , 有

$$\frac{W_j}{\rho_0} = Q_j t \quad (28)$$

当考虑启动压力梯度影响时,第  $j$  层产量  $Q_j$  为

$$Q_j = \frac{2\pi k_j h_j [p_{ej} - p_{wj} - G(R_{lj} - r_w)]}{\mu \ln \frac{R_{lj}}{r_w}} \quad (29)$$

将式(27)和式(29)代入式(28),并引入压力

传导系数  $\eta_j = \frac{K_j}{\mu C_j^*}$ , 可计算得到第  $j$  层基质动态泄

油半径,其表达式为

$$R_{lj} = \sqrt{\frac{4\eta_j [p_{ej} - p_{wj} - G(R_{lj} - r_w)]}{p_{ej} - p_{wj}} t + r_w^2} \quad (30)$$

其中,  $R_{lj} = e^{\xi(t)_j}$ 。据此,椭圆坐标  $\xi(t)_j$  为

$$\xi(t)_j = \ln \sqrt{\frac{4\eta_j [p_{ej} - p_{wj} - G(R_{lj} - r_w)]}{p_{ej} - p_{wj}} t + r_w^2} \quad (31)$$

根据式(31),进一步绘制了椭圆坐标  $\xi(t)_j$  随时间的变化曲线,如图4所示,用于表征压力波向外传播的情况。结果表明,生产初期,主裂缝区和压裂改造区地层渗透率较高,压力波传播速率较快;中后期泄油区域逐步扩大到基质未改造区,地层渗透率降低,压力波传播速率降低,最终达到稳定。

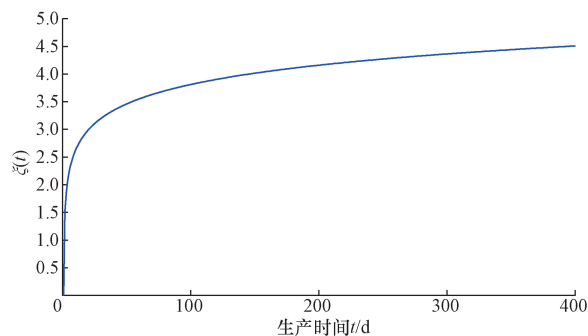


图4  $\xi(t)_j$  随时间的关系

Fig. 4 Correlation between  $\xi(t)_j$  with time

### 1.2.2 多层合采非稳态渗流产能模型

相较于单层致密油藏压裂定向井稳态产能预测模型,单层致密油藏非稳态产能预测模型中椭圆流与线性流的动用范围和渗流阻力随时间的推移而不断改变。

将式(10)中静态椭圆坐标  $\xi$  用动态椭圆坐标  $\xi(t)_j$  代换,得到椭圆流和线性流的动态边界,其表达式为

$$y'_{ej} = b_{ej} \cosh[\xi(t)_j] \quad (32)$$

$$x'_{ej} = b_{ej} \sinh[\xi(t)_j] \quad (33)$$

将式(14)中椭圆流和线性流静态边界  $y_{ej}$ 、 $x_{ej}$  用上述动态边界代换,得到第  $j$  层半圆柱体地层的动态渗流阻力,其表达式为

$$R'_{3j} = \frac{\mu}{2\pi K_{wj} h_{lj}} \ln \sqrt{\frac{y'_{ej} + x'_{ej} - x_{lj}}{y'_{ej} - x'_{ej} + x_{lj}}} \quad (34)$$

将式(16)中椭圆流和线性流静态边界  $y_{ej}$ 、 $x_{ej}$  用上述动态边界代换,得到第  $j$  层长方体地层的动态渗流阻力,其表达式为

$$R'_{4j} = \frac{\mu(y'_{ej} - b_{lj})}{4x_{lj} K_{wj} h_{lj}} \quad (35)$$

将式(17)稳态产能预测模型中的静态边界及渗流阻力  $x_{ej}$ 、 $y_{ej}$ 、 $R_{3j}$ 、 $R_{4j}$  分别用动态边界及渗流阻力  $x'_{ej}$ 、 $y'_{ej}$ 、 $R'_{3j}$ 、 $R'_{4j}$  代换,最终建立了单层致密油藏压裂定向井非稳态渗流产能预测模型,其表达式为

$$q_j = \left[ p_{ej} - p_{wj} - G_1 \frac{R'_{4j}}{R'_{3j} + R'_{4j}} (R_{ij} - 1) - G_2 \frac{R'_{3j}}{R'_{3j} + R'_{4j}} (y'_{ej} - b_{1j}) \right] \left/ \left( \frac{R_{ij}}{2} + R_{2j} + \frac{R'_{3j}R'_{4j}}{R'_{3j} + R'_{4j}} \right) \right. \quad (36)$$

针对致密油藏多层合采的定向井,假定共有  $n$  个小层,根据干扰系数定义<sup>[24-25]</sup>有

$$\alpha_0 = \frac{\sum_{j=1}^n J_{d,j} - J_{h_0}}{\sum_{j=1}^n J_{d,j}} \quad (37)$$

式(37)中: $\alpha_0$ 为层间干扰系数; $J_{h_0}$ 为合采时采油指数,  $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ ;  $J_{d,j}$ 为油藏各层单采时的采油指数,  $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ 。

将式(36)代入式(37),得到考虑层间干扰的致密油藏压裂定向井多层合采非稳态渗流产能预测模型,其表达式为

$$q = (1 - \alpha_0) \sum_{j=1}^n \left[ p_{ej} - p_{wj} - G_1 \frac{R'_{4j}}{R'_{3j} + R'_{4j}} \times (R_{ij} - 1) - G_2 \frac{R'_{3j}}{R'_{3j} + R'_{4j}} (y'_{ej} - b_{1j}) \right] \left/ \left( \frac{R_{ij}}{2} + R_{2j} + \frac{R'_{3j}R'_{4j}}{R'_{3j} + R'_{4j}} \right) \right. \quad (38)$$

## 2 产能预测方法

以压裂定向井多层合采非稳态渗流产能预测模型为基础,建立多层非均质致密油藏压裂定向井非稳态产能预测方法,具体计算步骤总结如下。

**步骤1** 根据多层致密油层储集层特征,将压裂形成的裂缝区域划分为主裂缝区,随着压裂范围的扩大,裂缝连通程度逐渐降低的区域划分为储层改造区,压裂未波及的区域划分为基质未改造区。

**步骤2** 根据分区渗流规律(图1)确定不同区域流体的渗流阻力。

(1)流体从裂缝直接流入井筒,考虑达西渗流,采用式(5)计算各层渗流阻力。

(2)流体从改造区流入裂缝,需考虑次生裂缝的影响,采用式(8)计算各层渗流阻力。

(3)流体从未改造区流入改造区,需考虑启动压力梯度和应力敏感的影响,采用式(34)、式(35)分别

计算半椭圆柱体地层、长方体地层各层渗流阻力。

(4)利用实际生产井分层测试资料,采用式(37)求取干扰系数。

**步骤3** 根据具体开发实践情况,确定该产能预测方法的应用方式如下。

(1)已知储层参数,根据定向井施工参数,运用产能预测方法预测产量。

(2)已知配产要求,采用产能预测方法优化设计定向井及压裂施工参数,使设计产量符合配产要求。

(3)已知生产动态数据,采用本方法进行历史拟合,通过反演诊断分析定向井和压裂施工参数,再用分析得到的参数进行产量预测。

## 3 应用实例

### 3.1 方法验证

选取冀东致密油藏油田1口典型定向井,其基础参数如表1所示。

定向井分层测试数据如表2所示。

表1 定向井基础参数

Table 1 Directional well basic parameters

基本参数	数值
地层原始压力/MPa	18.5
井底流压/MPa	8.5
井径/m	0.1
井斜角/(°)	35
油层厚度/m	7.8
地层综合压缩系数/ $\text{MPa}^{-1}$	$2 \times 10^{-4}$
平均孔隙度/%	0.14
裂缝渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	2 000
基质平均渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	0.11
平均裂缝半缝长/m	200
裂缝宽度/m	0.001
天然裂缝密度/(条· $\text{m}^{-1}$ )	5
改造区初始宽度/m	80
地层原油黏度/( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )	1.43
椭圆流启动压力梯度/( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ )	0.02
线性流启动压力梯度/( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ )	0.01
基质应力敏感系数/ $\text{MPa}^{-1}$	0.018
原油体积系数	1.052

表2 定向井分层测试数据

Table 2 Directional well layered test data

层位	油层厚度/m	平均渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	日产油/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	生产压差/MPa	采油指数/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ )
合试	7.8	0.11	2.14	10.2	0.21
第12层	1.6	0.08	0.5	9.8	0.05
第13层	4	0.14	3.2	10.1	0.32
第14层	2.2	0.06	1.4	10.7	0.13

利用定向井分层测试数据,采用式(37)计算干扰系数  $\alpha_0$  为 0.58。利用定向井基础参数,采用式(5)计算主裂缝区各层渗流阻力  $R_{1j}$ ,采用式(8)计算压裂改造区各层渗流阻力  $R_{2j}$ ,采用式(34)、式(35)分别计算半圆柱体地层、长方体地层各层动态渗流阻力  $R'_{3j}$ 、 $R'_{4j}$ 。将各区渗流阻力、地层原始压力、井底流压、启动压力梯度、干扰系数代入式(38),从而得出不同时间的日产油量  $q$ 。

将不同时间的日产油量与实测生产曲线进行对比(图5),计算结果与实际值基本吻合,该模型可用于致密油藏压裂定向井多层合采的产量预测。

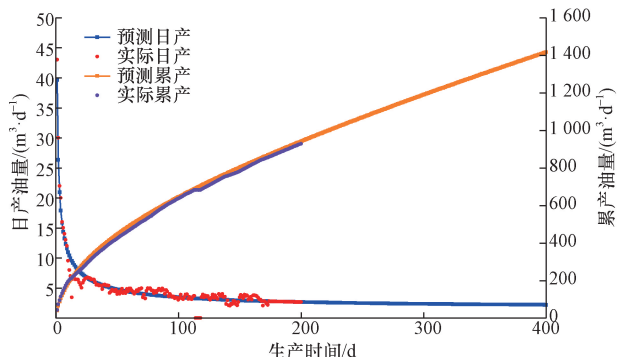


图5 某实例压裂定向井的产能预测结果与生产历史对比  
Fig. 5 Comparison of productivity prediction results and production history for an actual fractured directional well

### 3.2 压裂定向井产能响应规律

为了进一步探究启动压力梯度及应力敏感效应对致密油藏压裂定向井产能的影响规律,以前述国内典型致密油藏已开发压裂定向井的数据为约束,基于本文方法,预测得到启动压力梯度及应力敏感效应影响下的致密油藏压裂定向井产能变化曲线,如图6所示。分析可以看出,生产初期产能较高,但由于基质未改造区渗透率低,基质中流体的输运能力难以供应裂缝中流体的产出量,使得初期产能递减较快,高产期较短;中后期压力逐渐向外传

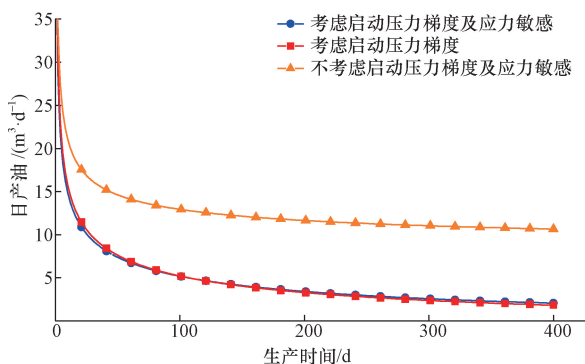


图6 压裂定向井非稳态渗流产能影响规律  
Fig. 6 Influence law of non-steady flow productivity in fractured directional wells

播至基质未改造区,此时渗流阻力较大,产能较低,但递减变缓,后期稳产期较长。以上结果表明,启动压力梯度对油井产能影响较大,而应力敏感效应对产能影响程度较小。

### 3.3 压裂定向井产能影响因素

为了明确致密油藏压裂定向井产能的主控因素,以上述典型井参数为基础参数,采用控制变量法,分别改变裂缝半长、裂缝导流能力、启动压力梯度、应力敏感等因素,每个因素选取不同水平,基于本文方法计算了压裂定向井的产能变化曲线,对比分析了不同敏感因素对压裂定向井产能的影响规律。

#### 3.3.1 裂缝半长的影响

为了研究裂缝半长对压裂定向井产能的影响,裂缝半长分别取值 50、100、150、200、250、300、350 m,其他参数与前述致密油藏典型井基础数据保持一致,基于本文模型计算得到不同裂缝半长条件下压裂定向井产能变化曲线,如图7所示。分析可以看出,随着裂缝半长的增加,产能在不断增加,但增加的值越来越小。这是由于裂缝半长增加使得主裂缝区、压裂改造区的范围扩大,改善了储层渗透率,同时扩大了油井的泄油体积,油井产能升高。但随着渗流范围的扩大,渗流阻力也逐渐增大,导致产能增幅逐渐减小,因此裂缝半长存在一个最优值。

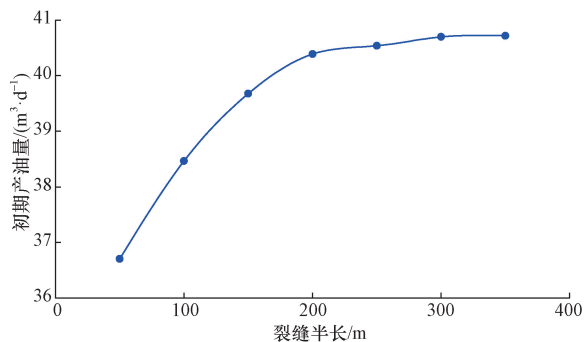


图7 裂缝长度对油井产能的影响  
Fig. 7 Influence of fracture length on well productivity

#### 3.3.2 裂缝导流能力的影响

为了研究裂缝导流能力对压裂定向井产能的影响,裂缝导流能力分别取值 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5  $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ ,其他参数与前述致密油藏典型井基础数据保持一致,基于本文模型计算得到不同裂缝导流能力条件下压裂定向井产能变化曲线,如图8所示。分析可以看出,产能随裂缝导流能力的增加而增加,但增加幅度逐渐变小。这是由于基质未改造区的渗透率远小于压裂改造区、主裂缝区的渗透率,基质中流体的输运能力远不足以供应裂缝中流

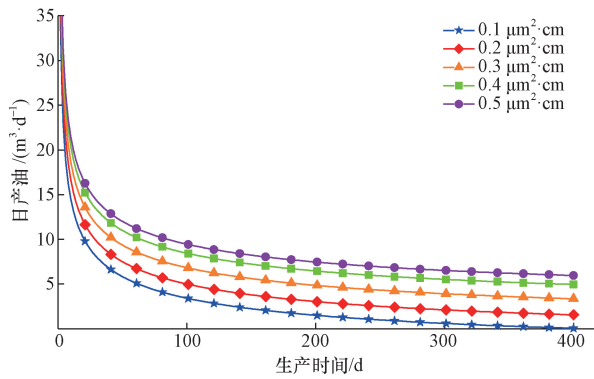


图8 裂缝导流能力对油井产能的影响

Fig. 8 Influence of fracture conductivity on well productivity

体的产出量,导致产能增长幅度较为缓慢,因此裂缝导流能力存在一个最佳范围。

### 3.3.3 基质平均渗透率的影响

为了研究基质平均渗透率对压裂定向井产能的影响,基质平均渗透率分别取值  $0.005 \times 10^{-3}$ 、 $0.01 \times 10^{-3}$ 、 $0.05 \times 10^{-3}$ 、 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,其他参数与前述致密油藏典型井基础数据保持一致,基于本文模型计算得到不同基质平均渗透率条件下压裂定向井产能变化曲线,如图9所示。分析可以看出,基质平均渗透率越大,基质未改造区与压裂改造区之间渗透率差异越小,基质未改造区向压裂改造区供液能力越强,产能越大。但随着基质平均渗透率逐渐增大,产能增加幅度逐渐减小。因此,储层改造时基质渗透率存在一个最优范围。

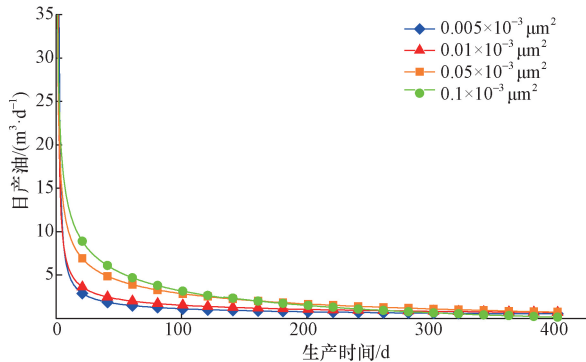


图9 基质平均渗透率对油井产能的影响

Fig. 9 Influence of matrix permeability on well productivity

### 3.3.4 启动压力梯度的影响

为了研究启动压力梯度对压裂定向井产能的影响,启动压力梯度分别取值 0.1、0.01、0.005、0.0005 MPa/m,其他参数与前述致密油藏典型井基础数据保持一致,基于本文模型计算得到不同启动压力梯度条件下压裂定向井产能变化曲线,如图10所示。分析可以看出,早期压力波未传播到基质未改造区,启动压力梯度对产能影响不大;而中后期压

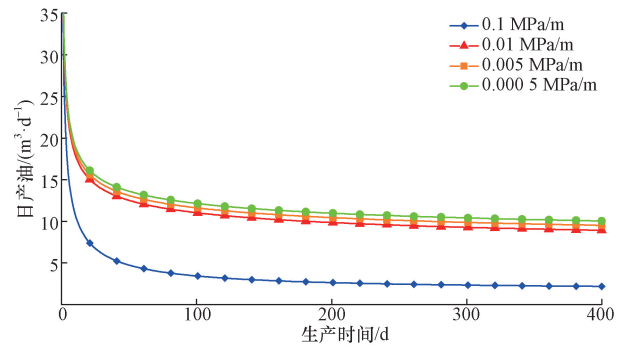


图10 启动压力梯度对油井产能的影响

Fig. 10 Influence of threshold pressure gradient on well productivity

力波到达基质未改造区,启动压力梯度越大,流体在储层中流动阻力越大,产能越小。但启动压力梯度对压裂定向井的影响有一个临界值,当启动压力梯度小于0.01 MPa/m时,压裂定向井的产能变化很小,而大于0.01 MPa/m后,其产能变化显著。

### 3.3.5 应力敏感效应的影响

为了研究应力敏感效应对压裂定向井产能的影响,应力敏感系数分别取值 0.1、0.5、0.9 MPa<sup>-1</sup>,其他参数与前述致密油藏典型井基础数据保持一致,基于本文模型计算得到不同应力敏感系数条件下压裂定向井产能变化曲线,如图11所示。分析可以看出,在生产初期,地层压力较高,主裂缝的渗透率是影响产能的主要因素,应力敏感效应导致裂缝导流能力下降较快,影响了初期产能;在压力波向地层边界传播的中后期,地层压力下降,应力敏感效应的影响减小,产能下降趋势减缓。

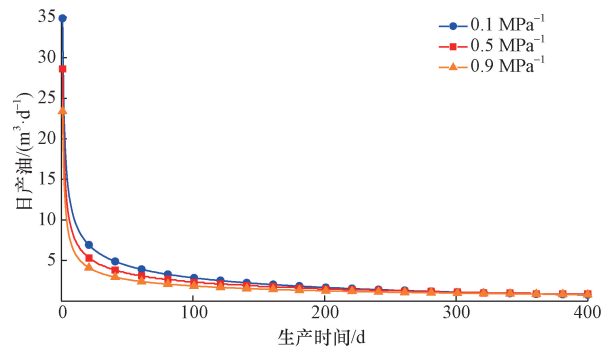


图11 应力敏感效应对油井产能的影响

Fig. 11 Influence of stress sensitivity on well productivity

### 3.3.6 纵向非均质性的影响

为了研究纵向非均质性对压裂定向井产能的影响,渗透率级差分别取值 1、3、5、7、9,其他参数与前述致密油藏典型井基础数据保持一致,基于本文模型计算得到不同渗透率级差条件下压裂定向井产能变化曲线,如图12所示。分析可以看出,渗透率级差为1,考虑储层为均质时,压裂定向井产能最

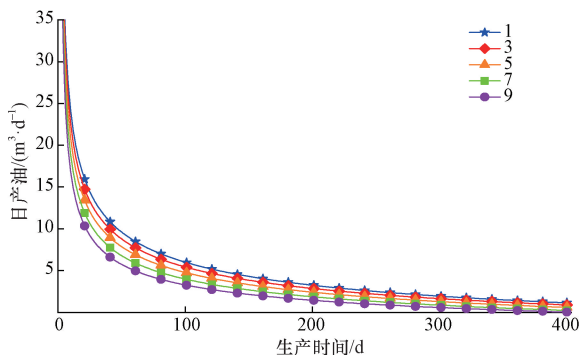


图 12 渗透率级差对油井产能的影响

Fig. 12 Influence of permeability level difference on well productivity

大,而随着渗透率级差增大,储层纵向非均质性增强,层间干扰加剧,压裂定向井的产能越小。因此,考虑薄互层渗透率分布影响,油井产能降低,更符合油层实际地质情况。

### 3.4 产能影响因素评价

#### 3.4.1 Spearman 相关系数分析

Spearman 相关系数是衡量两个变量依赖性的非参数指标,它利用单调方程评价两个统计变量的相关性<sup>[26]</sup>。Spearman 相关系数计算公式为

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n D_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (39)$$

式(39)中:  $r_s$  为 Spearman 相关系数;  $D_i$  为对应变量的秩之差;  $n$  为观测对象的数量。

采用 Spearman 相关系数法评价裂缝半长、裂缝导流能力、基质渗透率、启动压力梯度、应力敏感效应、纵向非均质性 6 类影响因素对产能影响的重要性,并综合其结果对 6 类影响因素进行重要性综合排名,得到相应的重要性综合排名图。由图 13 可知,产能影响因素的重要性综合排名依次为:基质渗透率、裂缝半长、裂缝导流能力、启动压力梯度、纵向非均质性、应力敏感效应。

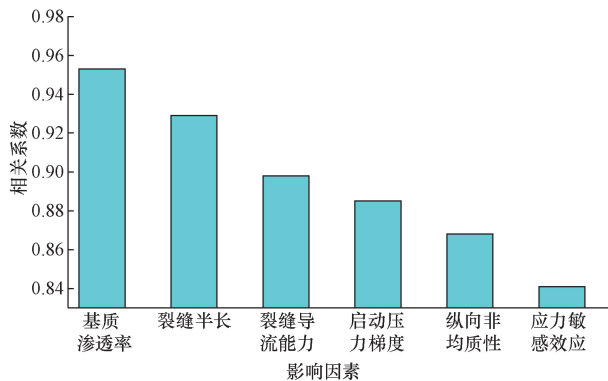


图 13 Spearman 方法排序

Fig. 13 Spearman method sorting

#### 3.4.2 灰色关联分析

灰色关联分析法是一种基于灰色系统理论的数据分析方法,用于处理数据中存在的不确定性和信息不完全性<sup>[27]</sup>。它通过比较序列数据之间的关联程度,揭示出它们之间的内在联系。设  $X_0 = \{X_0(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$  为参考序列,  $X_i = \{X_i(k) | k = 1, 2, \dots, n\} (i = 1, 2, \dots, m)$  为比较序列,则关联系数  $\gamma$  为  $\gamma_i(k) = \frac{\min_i \min_k \Delta_i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_i(k)}$ ,  $\rho$  为分辨系数,在(0,1)内取值。

分辨系数越小,关联系数间差异越大,区分能力越强,通常取 0.5。分别计算其各个指标与参考序列对应元素的关联系数的加权平均值,称其为关联度,记为  $r_{oi} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n W_k \gamma_i(k)$ 。

采用灰色关联分析法,以产能数据作为参考序列,裂缝半长、裂缝导流能力、基质渗透率、启动压力梯度、应力敏感效应、纵向非均质性 6 类影响因素为比较序列,得到各参数的关联度排序。由图 14 可知,产能影响因素的重要性综合排名依次为:裂缝半长、基质渗透率、裂缝导流能力、纵向非均质性、启动压力梯度、应力敏感效应。

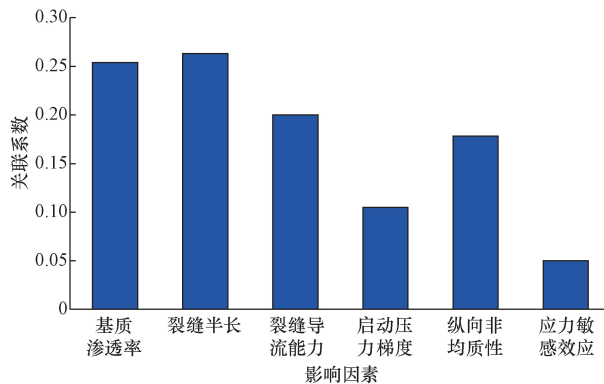


图 14 灰关联度排序

Fig. 14 Gray relational degree sorting

#### 3.4.3 随机森林分析

随机森林是一种集成学习方法,通过构建多个决策树来完成分类或回归任务。它的原理在于通过“装袋”(Bagging)的方式,对训练数据进行有放回的随机抽样,构建多棵树并采用随机特征选择,最后整合各个树的结果,从而实现分类评价<sup>[28]</sup>。采用随机森林分析法评价 6 类影响因素对产能影响的重要性,得到相应的重要性综合排名图。由图 15 可知,产能影响因素的重要性综合排名依次为:基质渗透率、裂缝半长、裂缝导流能力、启动压力梯度、纵向非均质性、应力敏感效应。

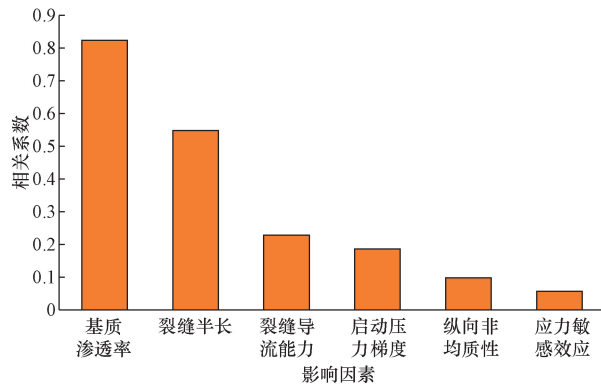


图 15 随机森林排序

Fig. 15 Random forest algorithm sorting

### 3.4.4 结果对比分析

以上3种方法分析过程与原理各有不同,但其结果相似度较高,如图16所示。分析可以看出,裂缝半长、裂缝导流能力、基质渗透率这3个因素的影响程度基本在前3位,这是由于致密油藏自然产能低或无自然产能,人工压裂改造显著提升了其产能。裂缝半长、裂缝导流能力为可控因素,而基质渗透率为地质参数,因此在实际工程操作中,可从这些对产能具有显著影响的可控因素入手,从而提高致密油藏压裂定向井的产能。

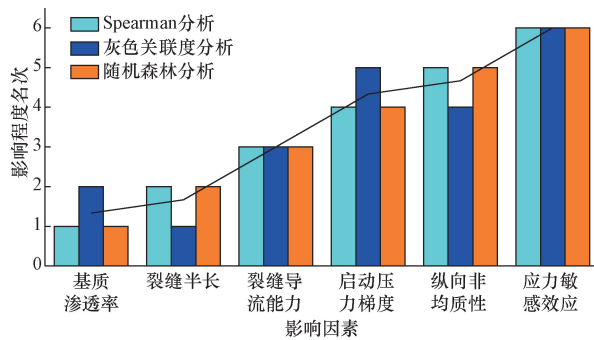


图 16 影响因素综合排名

Fig. 16 Comprehensive ranking of influencing factors

## 4 结论

(1) 将致密油藏压裂开发区域划分为主裂缝区、压裂改造区和基质未改造区,考虑不同渗流区域内的流体流动规律及储层压敏效应的影响,并引入基质动态泄油半径和干扰系数的概念,建立了致密油藏压裂定向井多层合采非稳态产能预测模型。实例表明,该模型能够真实地反映致密油藏压裂后的实际流动规律,符合实际生产情况。

(2) 致密油藏压裂开发过程中,启动压力梯度效应对压裂定向井产能有重要影响。随着启动压力梯度的增大,压裂定向井产能均明显降低,并且当启动压力梯度大于某一临界值时,影响更为显

著,而应力敏感效应对压裂定向井产能影响较小。

(3) 随着裂缝长度和导流能力的不断增加,压裂定向井的产能逐渐增大,但产能增幅将逐渐减小,这表明裂缝长度和导流能力都存在最优范围;基质渗透率越大,压裂定向井的产能越高,但随着基质渗透率持续增加,提产效果逐渐减弱;随着渗透率级差增大,储层纵向非均质性越强,压裂定向井的产能越小。

(4) 采用 Spearman 相关系数法、灰色关联分析法及随机森林分析法对压裂定向井产能影响因素进行综合评价,产能主控因素的影响次序为:基质渗透率、裂缝导流能力、裂缝半长、启动压力梯度、纵向非均质性、应力敏感效应。

## 参考文献

- [1] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.  
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations; taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [2] 康毅力,田健,罗平亚,等. 致密油藏提高采收率技术瓶颈与发展策略[J]. 石油学报, 2020, 41(4): 467-477.  
Kang Yili, Tian Jian, Luo Pingya, et al. Technical bottlenecks and development strategies of enhancing recovery for tight oil reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(4): 467-477.
- [3] 朱维耀,岳明,刘昫枫,等. 中国致密油藏开发理论研究进展[J]. 工程科学学报, 2019, 41(9): 1103-1114.  
Zhu Weiyao, Yue Ming, Liu Yunfeng, et al. Research progress on tight oil exploration in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(9): 1103-1114.
- [4] Roemershauer E A, Hawkins Jr M F. The effect of slant hole, drainhole, and lateral hole drilling on well productivity[J]. Journal of Petroleum Technology, 1955, 7(2): 11-14.
- [5] Cinco H. Unsteady-state pressure distributions created by a slanted well or a well with an inclined fracture[D]. California: Stanford University, 1974.
- [6] Vandervlis A C, Duns H, Luque R F. Increasing well productivity in tight chalk reservoirs[C]// 10th World Petroleum Congress. Bucharest, Romania: WPC, 1979: 18209.
- [7] Khatteb H A, Yeh N S, Agarwal R G. Pressure transient behavior of slanted wells in single- and multiple-layered systems[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, Texas, USA: SPE, 1991: 22730-MS.
- [8] Gill H, Issaka M, Al-Zayer R. Pressure transient behavior of horizontal and slant wells intersecting a high-permeability layer[C]// SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. Manama, Bahrain: SPE, 2007: 105616-MS.
- [9] 杨占伟,刘继林,杨刚. 储层伤害下的低速非达西斜井产能分析[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(25): 6296-6299.  
Yang Zhanwei, Liu Jilin, Yang Gang. Low-speed non-Darcy inclined well productivity analysis under reservoir damage[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(25): 6296-6299.
- [10] 张政,杨胜来,张希胜,等. 特低渗透油藏定向井动用半径对

- 产能的影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(14): 5595-5600.
- Zhang Zheng, Yang Shenglai, Zhang Xisheng, et al. Influence of producing radius of directional well on productivity in ultra low permeability reservoir under different seepage models[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(14): 5595-5600.
- [11] 冯沙沙, 王坤, 谢明英, 等. 基于测井曲线考虑纵向级差的海上重质油油藏产能预测新方法[J]. 特种油气藏, 2024, 31(2): 136-142.
- Feng Shasha, Wang Kun, Xie Mingying, et al. A new method for productivity prediction of offshore heavy oil reservoirs based on logging curves considering longitudinal permeability ratio[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2024, 31(2): 136-142.
- [12] 李辉, 邓津辉, 韩春林, 等. 海上油田多层砂岩定向井合采初期产能预测方法及应用——以渤中 C 油田为例[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(2): 177-185.
- Li Hui, Deng Jinhui, Han Chunlin, et al. Prediction method and application of initial productivity in combined production of multi-layer sandstone directional well in offshore oilfield; taking Bozhong C oilfield as an example[J]. Advances in Geosciences, 2024, 14(2): 177-185.
- [13] 谢伟伟, 张艳, 丁一萍. 致密油藏直井体积压裂非稳态渗流问题[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(21): 8857-8862.
- Xie Weiwei, Zhang Yan, Ding Yiping. Non-steady flow of volume fracturing for vertical well in tight oil reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(21): 8857-8862.
- [14] 肖尊荣, 赵玉龙, 张烈辉, 等. 基于双重介质嵌入式离散裂缝模型的致密油藏产能影响因素[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(25): 10780-10790.
- Xiao Zunrong, Zhao Yulong, Zhang Liehui, et al. Capacity of compact reservoir based on dual medium embedded discrete crack model[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(25): 10780-10790.
- [15] 朱维耀, 刘响枫, 李忠兴, 等. 致密油多尺度渗流数学模型及影响因素分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2022, 53(6): 2347-2360.
- Zhu Weiyao, Liu Yunfeng, Li Zhongxing, et al. Mathematical model of multi-scale flow in tight oil reservoirs and analysis of influential factors[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(6): 2347-2360.
- [16] 王苏冉, 白玉湖, 徐兵祥, 等. 致密砂岩气井气水两相产能预测半解析模型[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(21): 9105-9114.
- Wang Suran, Bai Yuhu, Xu Bingxiang, et al. Semi-analytical model of production prediction for tight sandstone gas wells considering gas-water two phase flow behavior[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(21): 9105-9114.
- [17] 黎明, 周福建, 李奔, 等. 考虑温度变化的砂岩油藏应力敏感模型[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(34): 14542-14547.
- Li Ming, Zhou Fujian, Li Ben, et al. Stress sensitivity model for sandstone reservoirs considering temperature changes[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(34): 14542-14547.
- [18] 曹楷楠, 胡志明, 端祥刚, 等. 水力压裂多裂缝扩展的近场动力学模拟[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(29): 12806-12812.
- Cao Kainan, Hu Zhiming, Duan Xianggang, et al. Peridynamics simulation of multi-fracture propagation in hydraulic fracturing[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(29): 12806-12812.
- [19] 冯金德, 程林松, 李春兰, 等. 裂缝性低渗透油藏等效连续介质模型[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(5): 94-97.
- Feng Jinde, Cheng Linsong, Li Chunlan, et al. Equivalent continuous medium model for fractured low-permeability reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(5): 94-97.
- [20] 陈元千. 线性流的启动压力梯度不能用于平面径向流方程[J]. 石油学报, 2011, 32(6): 1088-1092.
- Chen Yuanqian. Improper use of the starting pressure gradient of linear flow in the plane radial flow equation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 1088-1092.
- [21] 宋付权, 刘慈群, 吴柏志. 各向异性油藏椭圆不定常渗流近似解[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(1): 57-59.
- Song Fuquan, Liu Ciqun, Wu Bozhi. The elliptic transient flow of vertically fractured well in anisotropic reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(1): 57-59.
- [22] Sun H D, Cao W, Li J, et al. A material balance based practical analysis method to improve the dynamic reserve evaluation reliability of ultra-deep gas reservoirs with ultra-high pressure[J]. Natural Gas Industry B, 2021, 8(1): 79-87.
- [23] 王强, 童敏, 武站国, 等. 致密火山岩气藏压裂水平井产能预测方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(4): 107-115.
- Wang Qiang, Tong Min, Wu Zhanguo, et al. An unsteady productivity prediction method of multi-fractured horizontal well in tight volcanic rock reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2014, 36(4): 107-115.
- [24] 余华杰, 朱国金, 谭先红. 砂岩油藏多层合采层间干扰及开发策略研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(1): 101-106.
- Yu Huajie, Zhu Guojin, Tan Xianhong. Study on interlayer interference caused by commingling production and development strategy in sandstone reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2014, 36(1): 101-106.
- [25] 吴春新, 张言辉, 刘美佳, 等. 多层合采油藏层间干扰规律及应用: 以渤海南部中轻质油藏为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(30): 12936-12941.
- Wu Chunxin, Zhang Yanhui, Liu Meijia, et al. Study and application of interlayer interference law in multi-layer combined production reservoir; taking medium light oil reservoir in the south of Bohai Sea as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(30): 12936-12941.
- [26] 董银涛, 宋来明, 张迎春, 等. 基于物理约束数据挖掘算法的海上油井初期产能预测方法[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(1): 137-144.
- Dong Yintao, Song Laiming, Zhang Yingchun, et al. Initial productivity prediction method for offshore oil wells based on data mining algorithm with physical constraints[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(1): 137-144.
- [27] 蒋宝云, 周玉龙, 陈莉, 等. 滨 425 区块非均质油藏压裂裂缝参数优化[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(22): 9322-9329.
- Jiang Baoyun, Zhou Yulong, Chen Li, et al. Optimization of fracture parameters for heterogeneous reservoir in B425 block[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(22): 9322-9329.
- [28] 李菊花, 陈晨, 肖佳林. 基于随机森林算法的页岩气多段压裂井产量预测[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2020, 17(4): 34-38.
- Li Juhua, Chen Chen, Xiao Jialin. Yield prediction of shale gas multi-stage fracturing wells based on random forest algorithm[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2020, 17(4): 34-38.