

·油气钻采工程·

## 体积压裂直井油气产能预测模型

陈志明,廖新维,赵晓亮,王欢,叶恒,祝浪涛,陈奕洲

(中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室,北京 102249)

**摘要:**在直井体积压裂过程中,由于地质和工程等因素的影响,压裂井的裂缝分支数和长度具有多样性。但目前提出的分支裂缝井产能预测模型主要针对2分支、4分支和对称多分支无限导流裂缝井,这些都是实际情况的特例,具有很大的局限性,缺乏一个适用于体积压裂后通用的不对称多分支裂缝井产能预测模型。为此,基于稳定流理论,应用保角变换,推导了完全不对称多分支裂缝直井产能预测模型,并利用已有的研究成果来检验模型的准确性。同时,通过实例,分析了地层渗透率、厚度、流体粘度、裂缝长度、裂缝导流能力和裂缝分支数对裂缝井产能的影响。结果表明,经过特殊取值,由新建模型可得到目前常用模型,准确性得以验证。通过分析发现,随着裂缝长度和导流能力的增加,裂缝井产能增大,但产能增幅随供给半径的增大而减小;随着裂缝分支数的增大,裂缝井产能增加,但增幅随分支数的增大而变小。

**关键词:** 体积压裂 多分支裂缝 稳定渗流 保角变换 产能预测 因素分析

中图分类号:TE357.1

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)06-0121-06

## Productivity model of oil/gas productivity of vertical wells in simulated reservoir volume

Chen Zhiming, Liao Xinwei, Zhao Xiaoliang, Wang Huan, Ye Heng, Zhu Langtao, Chen Yizhou

(MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

**Abstract:** Due to geologic and engineering factors, the number and length of the fracture in the vertical wells is various in simulated reservoir volume. Although many productivity models have been proposed for the vertical wells with branch fractures, they are all special cases of two-branch, four-branch and symmetry multi-branch with infinite flow in fractured wells. Thus their reliabilities cannot be guaranteed. Therefore, a new productivity model of the vertical wells with multiple arbitrary fractures needs to be established. Conformal transformation was applied to calculate the productivity of the vertical wells with multiple fractures under steady state flow pattern. Our model is verified by these existing models. In addition, reservoir permeability, thickness, fluid viscosity, length, conductivity, and branch number of the fractures that affect the productivity of the fractured wells were analyzed through cases. The results show that the new built model matches the commonly used models well at a selected value, so its accuracy can be verified. The productivity of the fractured vertical wells increases with the increase of the fracture length, conductivity or branch number, but its increasing range may decrease with the increase of supply radius or branch number.

**Key words:** simulated reservoir volume fracturing; multi-branch fracture; steady flow; conformal transformation; productivity model; parameters analysis

体积压裂技术是改造低渗透油气田、实现增产的一项重要工艺措施<sup>[1]</sup>。由于受地质和工程等因素的影响,直井体积压裂时,裂缝延伸的分支数和长

度具有多样性<sup>[2]</sup>。

目前许多学者提出了多种裂缝井的产能预测模型。他们分别利用保角变换<sup>[3]</sup>、椭圆流<sup>[4]</sup>和双线性

收稿日期:2015-09-07。

作者简介:陈志明(1989—),男,湖北黄冈人,在读博士研究生,从事油气渗流理论方面的研究。联系电话:18810905983, E-mail:zhimingchn@163.com。

基金项目:国家“973”计划“陆相致密油高效开发基础研究”(2015CB250905),国家自然科学基金“超低渗透油藏注气提高采收率理论与技术研究”(U1262101),中国石油大学(北京)科研基金资助“CO<sub>2</sub>驱渗流机理及理论模型研究”(No.00000)。

法<sup>[5]</sup>等方法推导了对称2分支裂缝井产能模型;Rodriguez等建立了不对称2分支裂缝井产能模型<sup>[6-8]</sup>;彭昱强等推导了半对称4分支裂缝井产能模型<sup>[9-10]</sup>。但在体积压裂过程中,由于裂缝分支很多,这些分支裂缝井模型不适用于体积压裂后的直井。

程林松等建立了对称多分支裂缝井产能模型<sup>[11]</sup>,但假设条件是:各分支裂缝长度一致且为无限导流,这与实际不符,并且计算裂缝井产能时,裂缝的导流能力也须考虑。Chen Z M等<sup>[12]</sup>虽然考虑了裂缝的不对称性和裂缝导流能力,但方程较为复杂且不够完善。因此,亟需建立适用于任意长度、有限或无限导流能力、裂缝油气井的多分支裂缝井产能预测模型。为此,笔者基于稳定流理论,应用保角变换,推导了适用于体积压裂后任意长度、有限或无限导流能力、裂缝油气井的多分支裂缝井产能预测模型,并利用已有的研究成果检验了模型的准确性。同时,通过实例,重点分析了油藏要素、裂缝导流能力、裂缝长度和裂缝分支数等因素对产能的影响。

## 1 产能计算模型

### 1.1 物理模型

不对称多分支裂缝井的渗流力学模型如图1a,基本假设包括:①裂缝等角度完全不对称分布;②裂缝高度等于地层厚度;③油气藏和裂缝中流体渗流符合达西线性流动;④不考虑地层的垂向流动及裂缝附近的污染,且油气藏的上下封闭;⑤流体为单相、均质不可压缩牛顿流体;⑥流体渗流过程中温度恒定,无任何特殊的物理化学现象发生。

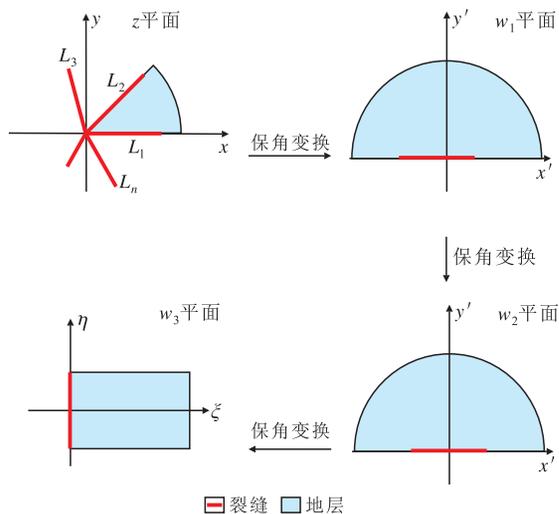


图1 不对称多分支裂缝井保角变换示意图

Fig.1 Sketch map of conformal transformation for the vertical wells with asymmetric multi-branch fractures

### 1.2 保角变换

由保角变换原理可知,变换前后产能不变,边界上的势不变,变化的仅是线段的长度和流体流动形式。以裂缝中心轴为界,任取两相邻裂缝地层进行保角变换,在变换过程中,忽略油井半径和裂缝缝宽的影响。将z平面的阴影区域地层变成w<sub>1</sub>平面半径为r<sub>e</sub><sup>n/2</sup>的半圆地层。保角变换式为

$$w_1 = z^{\frac{n}{2}} \quad (1)$$

将w<sub>1</sub>平面上的原点平移到裂缝中点处,因为r<sub>e</sub>足够大,可认为半圆地层的圆心还在原点上,其半径为r<sub>e</sub><sup>n/2</sup>,得到w<sub>2</sub>平面,保角变换式为

$$w_2 = w_1 - \frac{L_1^{\frac{n}{2}} + L_2^{\frac{n}{2}}}{2} \quad (2)$$

将w<sub>2</sub>平面上的裂缝变换到w<sub>3</sub>平面上,同样认为r<sub>e</sub>足够大,w<sub>2</sub>平面的地层半圆变成w<sub>3</sub>平面上长度为ξ<sub>e</sub>、宽度为η<sub>e</sub>的矩形,保角变换式为

$$\text{ch } w_3 = \frac{2w_2}{L_1^{\frac{n}{2}} + L_2^{\frac{n}{2}}} \quad (3)$$

由保角变换性质知,z平面上扇形区域地层产能与w<sub>3</sub>平面上矩形产能相等,且流体流动为稳定单向流,由于r<sub>e</sub>足够大,由式(1)一式(3)可推导ξ<sub>e</sub>和η<sub>e</sub>的表达式分别为

$$\xi_e = \ln \frac{4r_e^{\frac{n}{2}}}{L_1^{\frac{n}{2}} + L_2^{\frac{n}{2}}} \quad (4)$$

$$\eta_e = \pi \quad (5)$$

假设地层为油藏,由单向流公式,得到z平面上扇形区域地层对应的产能为

$$Q_1 = \frac{\eta_e K h (p_e - p_f)}{\mu_o B_o \xi_e} \quad (6)$$

将式(4)、式(5)代入式(6),得

$$Q_1 = \frac{2\pi K h (p_e - p_f)}{\mu_o B_o \ln \frac{16r_e^n}{(L_1^{\frac{n}{2}} + L_2^{\frac{n}{2}})^2}} \quad (7)$$

对于其他裂缝间地层而言,同理得到任意两相邻裂缝间扇形区域地层对应的产能为

$$Q_i = \frac{2\pi K h (p_e - p_f)}{\mu_o B_o \ln \frac{16r_e^n}{(L_i^{\frac{n}{2}} + L_j^{\frac{n}{2}})^2}} \quad (8)$$

### 1.3 无限导流产能模型

若裂缝为无限导流能力,不考虑裂缝内流体的流动,裂缝内压力处处相对,且等于井底压力,即p<sub>f</sub> = p<sub>wf</sub>。

对于油藏,裂缝油井总产能为

$$Q_o = \sum_{i=1}^n Q_{oi} = \frac{2\pi Kh(p_e - p_{wf})}{\mu_o B_o} \left[ \frac{1}{\ln \frac{16r_e^n}{(L_1^{\frac{n}{2}} + L_2^{\frac{n}{2}})^2}} + \frac{1}{\ln \frac{16r_e^n}{(L_2^{\frac{n}{2}} + L_3^{\frac{n}{2}})^2}} + \dots + \frac{1}{\ln \frac{16r_e^n}{(L_{n-1}^{\frac{n}{2}} + L_n^{\frac{n}{2}})^2}} + \frac{1}{\ln \frac{16r_e^n}{(L_n^{\frac{n}{2}} + L_1^{\frac{n}{2}})^2}} \right] \quad (9)$$

如果是气藏,则得到的裂缝气井产能公式为

$$Q_g = \sum_{i=1}^n \frac{T_{sc}}{Tp_{sc}} \times \frac{\pi Kh(\psi_e - \psi_{wf})}{\ln \frac{16r_e^n}{(L_i^{\frac{n}{2}} + L_j^{\frac{n}{2}})^2}} \quad (10)$$

其中

$$\psi_e = 2 \int_{p_{sc}}^{p_e} \frac{p}{\mu(p)Z(p)} dp \quad (11)$$

$$\psi_{wf} = 2 \int_{p_{sc}}^{p_{wf}} \frac{p}{\mu(p)Z(p)} dp \quad (12)$$

Wattenbarger 等<sup>[13]</sup>研究结果表明,当  $p < 13.6$  MPa,  $p_{sc} = 0.1$  MPa时,存在

$$\mu(p)Z(p) = \bar{\mu}\bar{Z} \quad (13)$$

对于一般气藏,满足式(13),气井产能公式可简化为

$$Q_g = \sum_{i=1}^n \frac{T_{sc} \pi Kh(p_e^2 - p_{wf}^2)}{\bar{\mu}\bar{Z}Tp_{sc}} \times \left[ \frac{1}{\ln \frac{16r_e^n}{(L_1^{\frac{n}{2}} + L_2^{\frac{n}{2}})^2}} + \frac{1}{\ln \frac{16r_e^n}{(L_2^{\frac{n}{2}} + L_3^{\frac{n}{2}})^2}} + \dots + \frac{1}{\ln \frac{16r_e^n}{(L_{n-1}^{\frac{n}{2}} + L_n^{\frac{n}{2}})^2}} + \frac{1}{\ln \frac{16r_e^n}{(L_n^{\frac{n}{2}} + L_1^{\frac{n}{2}})^2}} \right] \quad (14)$$

### 1.4 有限导流产能模型

对于  $w_3$  平面,若裂缝为有限导流能力,为便于计算,裂缝的导流能力取平均值,计算式为

$$F_{CD(ij)} = \frac{F_{CDi} + F_{CDj}}{4} \quad (15)$$

假设地层为油藏,基于文献[14],根据质量守恒定律,可得裂缝上压力分布的微分方程为

$$\frac{F_{CD(ij)}}{\mu_o} \times \frac{d^2 p_f}{d\eta^2} + v = 0 \quad (16)$$

由单向流公式可知,渗流速度的计算式为

$$v = \frac{2K(p_e - p_f)}{\mu_o \ln \frac{16r_e^n}{(L_i^{\frac{n}{2}} + L_j^{\frac{n}{2}})^2}} \quad (17)$$

裂缝内、外边界条件的表达式为

$$\left. \frac{\partial p_f}{\partial \eta} \right|_{\eta = \frac{\pi}{2}} = 0 \quad (18)$$

$$p_f|_{\eta=0} = p_{wf}$$

对式(18)求解可得

$$p_f = C_1 e^{\lambda_1 \eta} + C_2 e^{-\lambda_1 \eta} + p_e \quad (19)$$

其中

$$C_1 = \frac{p_{wf} - p_e}{e^{\pi\lambda_1} + 1} \quad (20)$$

$$C_2 = \frac{(p_{wf} - p_e)e^{\pi\lambda_1}}{e^{\pi\lambda_1} + 1} \quad (21)$$

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{2K}{F_{CD(ij)} \ln \frac{16r_e^n}{(L_i^{\frac{n}{2}} + L_j^{\frac{n}{2}})^2}}} \quad (22)$$

根据式(8)、式(16)和式(19),裂缝井的产能可表示为

$$Q_i = \frac{F_{CDi} + F_{CDj}}{2\mu_o B_o} h\lambda_1(C_1 - C_2) \quad (23)$$

根据式(20)一式(23),并经过迭加,有限导流裂缝油井和气井产能公式分别为

$$Q_o = \sum_{i=1}^n \frac{(F_{CDi} + F_{CDj})h\lambda_1}{2\mu_o B_o} \times \frac{e^{\pi\lambda_1} - 1}{e^{\pi\lambda_1} + 1} (p_e - p_{wf}) \quad (24)$$

$$Q_g = \sum_{i=1}^n \frac{(F_{CDi} + F_{CDj})T_{sc}h\lambda_2}{4\bar{\mu}\bar{Z}Tp_{sc}} \times \frac{e^{\pi\lambda_2} - 1}{e^{\pi\lambda_2} + 1} (p_e^2 - p_{wf}^2) \quad (25)$$

其中

$$\lambda_2 = \sqrt{\frac{8K}{(F_{CDi} + F_{CDj}) \ln \frac{16r_e^n}{(L_i^{\frac{n}{2}} + L_j^{\frac{n}{2}})^2}}} \quad (26)$$

## 2 模型验证

目前相关研究主要针对对称2分支有限导流裂缝井、不对称2分支有限导流裂缝井、半对称4分支无限导流裂缝井及对称n分支无限导流裂缝井产能

模型,利用这些结果对新建模型进行验证。

对于对称2分支有限导流裂缝井,假设分支裂缝长度为 $L$ ,裂缝导流能力均为 $F_{CD}$ ,代入式(24)和式(25),可得对称2分支有限导流裂缝油井和气井的产能,其表达式分别为

$$Q_o = \frac{2hF_{CD}\lambda_3}{\mu_o B_o} \times \frac{e^{\frac{\pi\lambda_3}{2}} - 1}{e^{\frac{\pi\lambda_3}{2}} + 1} (p_e - p_{wf}) \quad (27)$$

$$Q_g = \frac{T_{sc} hF_{CD}\lambda_3}{\mu Z T p_{sc}} \times \frac{e^{\frac{\pi\lambda_3}{2}} - 1}{e^{\frac{\pi\lambda_3}{2}} + 1} (p_e^2 - p_{wf}^2) \quad (28)$$

其中

$$\lambda_3 = \sqrt{\frac{2K}{K_f W_f \ln \frac{2r_e}{L}}} \quad (29)$$

该模型与蒋廷学等<sup>[3,14]</sup>所建模型一致。

对于不对称2分支有限导流裂缝井,假设分支裂缝长度为 $L_1$ 和 $L_2$ ,裂缝导流能力均为 $F_{CD}$ ,代入式(24)和式(25),可得不对称2分支有限导流裂缝油井和气井产能表达式,分别为

$$Q_o = \frac{2hF_{CD}\lambda_4}{\mu_o B_o} \times \frac{e^{\frac{\pi\lambda_4}{2}} - 1}{e^{\frac{\pi\lambda_4}{2}} + 1} (p_e - p_{wf}) \quad (30)$$

$$Q_g = \frac{T_{sc} hF_{CD}\lambda_4}{\mu Z T p_{sc}} \times \frac{e^{\frac{\pi\lambda_4}{2}} - 1}{e^{\frac{\pi\lambda_4}{2}} + 1} (p_e^2 - p_{wf}^2) \quad (31)$$

其中

$$\lambda_4 = \sqrt{\frac{2K}{K_f W_f \ln \frac{4r_e}{L_{f1} + L_{f2}}}} \quad (32)$$

式(30)和式(31)的计算结果与熊健等<sup>[8,10]</sup>的计算结果完全一致。

对于半对称4分支无限导流裂缝井,假设分支裂缝 $L_1=L_3$ 和 $L_2=L_4$ ,代入式(24)和式(25),得半对称4分支无限导流裂缝油井和气井产能公式分别为

$$Q_o = \frac{2\pi Kh(p_e - p_{wf})}{\mu_o B_o \ln \frac{2r_e}{\sqrt{L_1^2 + L_2^2}}} \quad (33)$$

$$Q_g = \frac{T_{sc}}{\mu Z T p_{sc}} \times \frac{\pi Kh(p_e^2 - p_{wf}^2)}{\ln \frac{2r_e}{\sqrt{L_1^2 + L_2^2}}} \quad (34)$$

式(33)和式(34)的计算结果与曹宝军等<sup>[10]</sup>的计算结果是完全一致的。

对于对称多分支无限导流裂缝井,假设分支裂缝长度均为 $L$ ,代入式(24)和式(25),同样可得到对称多分支无限导流裂缝油井和气井的产能分别为

$$Q_o = \frac{2\pi Kh(p_e - p_{wf})}{\mu_o B_o \ln \frac{4^n r_e}{L}} \quad (35)$$

$$Q_g = \frac{T_{sc}}{\mu Z T p_{sc}} \times \frac{\pi Kh(p_e^2 - p_{wf}^2)}{\ln \frac{4^n r_e}{L}} \quad (36)$$

式(35)和式(36)的计算结果与程林松等的计算结果<sup>[11]</sup>完全相同。

综上所述,经过特殊取值,由新建模型可得到目前常用模型,说明所建体积压裂后不对称多分支裂缝井模型是准确的。

### 3 产能影响因素

模拟参数包括:油层厚度为10 m,地层渗透率为 $6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,原始油藏压力为30 MPa,井底流压为20 MPa,供给半径为1 000 m,油井半径为0.1 m,地层原油粘度为5 mPa·s,地层原油体积系数为1.2 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;体积压裂后,分支裂缝10条,裂缝长度为13.3~199.1 m,平均裂缝长度为100 m,裂缝导流能力为0.39~1.08  $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ (表1)。利用推导的 $n$ 分支有限导流裂缝井产能模型对油藏产能影响因素进行分析。

表1 不同分支裂缝参数

| Table1 Parameters for multi-branch fractures |        |  |
|--|--------|--|
| 编号   | 裂缝长度/m | 裂缝导流能力/( $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ ) |
| 1  | 199.1  | 0.70                                       |
| 2  | 129.1  | 1.08                                       |
| 3  | 13.3   | 0.44                                       |
| 4  | 115.5  | 0.39                                       |
| 5  | 14.9   | 1.01                                       |
| 6  | 108.2  | 0.77                                       |
| 7  | 150.7  | 1.04                                       |
| 8  | 134.4  | 0.82                                       |
| 9  | 33.9   | 0.59                                       |
| 10   | 100.9  | 1.02                                       |

#### 3.1 油藏因素

由不同油藏因素与产油量的关系(图2)可以看出,裂缝井产油量随着地层渗透率和地层厚度的增加而增加,随着地层原油粘度的增加而减小。

#### 3.2 裂缝因素

裂缝长度 不同供给半径下不对称裂缝井的产油量与裂缝长度倍数的关系(图3)表明,在各裂缝长度等倍数变化的条件下,随着裂缝长度的增加,油井产油量大致呈线性增大,但裂缝长度对产油量影响随供给半径的增大而变小。这是因为,裂缝长度增加,与油层接触面积增大,渗流阻力减小,驱油能力增强,油井产能进而增大;当裂缝长度变化相同时,供给半径越大,裂缝长度对产能影响也就越小。

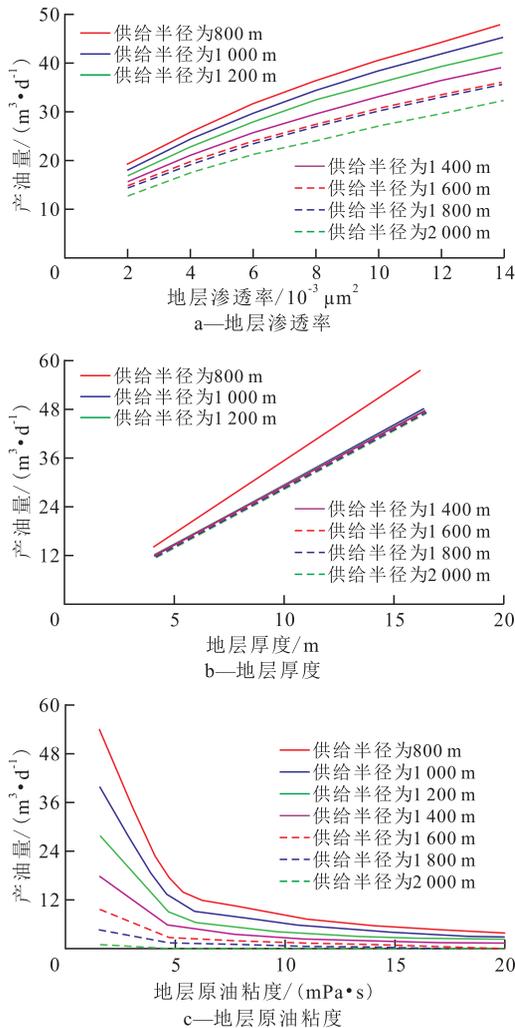


图2 不同油藏因素与产油量的关系

Fig.2 Relationship between fractured well production and reservoir properties

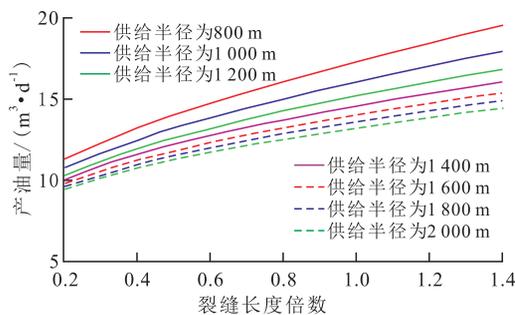


图3 不同供给半径下不对称裂缝井产油量与裂缝长度倍数的关系

Fig.3 Relationship between production and fractures lengths rate of the asymmetry fractured wells under different drainage radius

裂缝导流能力 不同供给半径下不对称裂缝井产油量与裂缝导流能力倍数的关系(图4)表明,在各裂缝导流能力等倍数变化的情况下,随着裂缝导流能力的增加,油井产油量增大,裂缝导流能力对产能影响随供给半径的增大而减弱,尤其当供给半径很大时,裂缝导流能力增大到一定值后,对产

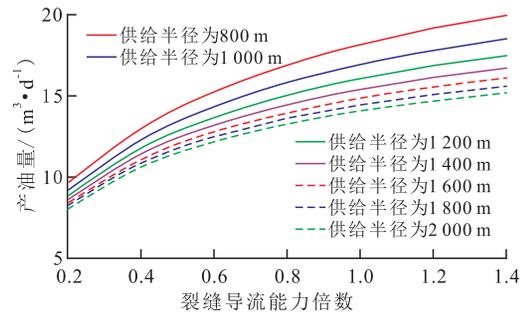


图4 不同供给半径下不对称裂缝井产油量与裂缝导流能力倍数的关系

Fig.4 Relationship between production and fracture conductivity rate of the asymmetry fractured wells under different drainage radius

能几乎无影响。因此,在直井压裂施工时,当油藏供给半径较小时,增加裂缝导流能力,可有效提高油井产能。但是,当供给半径较大时,过分追求裂缝导流能力是没有必要的。

裂缝分支数 分析不同生产压差下不对称裂缝井产油量与裂缝分支数的关系(图5)发现:当各裂缝分支长度为100 m时,随着裂缝分支数的增加,油井产油量增大;裂缝分支数对产油量的影响随生产压差的增大而增大,随着分支数增大而减小。这是因为,随着分支数的增大,裂缝间干扰增大,对生产造成不利。

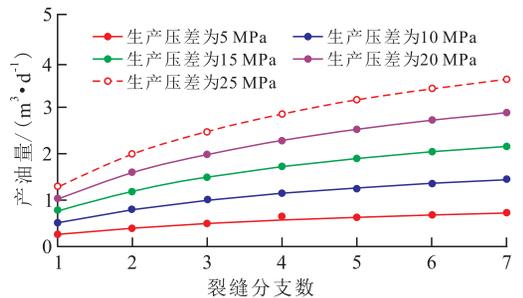


图5 不同生产压差下裂缝井产油量与裂缝分支数的关系

Fig.5 Relationship between production and branch numbers of the fractured wells under different drawdown pressures

## 4 结论

推导了任意多分支无限导流和有限导流裂缝井的产能预测模型,并利用对称2分支裂缝井、不对称2分支裂缝井、半对称4分支裂缝井及多分支对称裂缝井4类已有的产能预测模型对新建模型进行验证,结果完全一致。

在此基础上,分析了完全不对称分支裂缝井的产能影响因素,主要包括油藏因素、裂缝导流能力、裂缝长度和裂缝分支数等,结果表明:随着地层渗透率和地层厚度的增加,裂缝井产能增加;随着地

层原油粘度的增加,裂缝井产能减小;随着裂缝长度和导流能力的增加,不对称裂缝井产能增大,但其对产能影响随供给半径的增大而减弱;随着裂缝分支数的增大,裂缝井产能增加,但增幅随分支数的增大而变小;当供给半径很大时,裂缝导流能力增大到一定值后,对不对称裂缝井产能几乎无影响。因此,在直井体积压裂时,当油藏供给半径较大时,过分追求裂缝导流能力是没有必要的。

#### 符号解释:

$z$ ——初始平面;  $w_1$ ——保角变换平面1;  $w_2$ ——保角变换平面2;  $w_3$ ——保角变换平面3;  $L_1$ ——裂缝1的长度, m;  $L_2$ ——裂缝2的长度, m;  $L_n$ ——任意裂缝的长度, m;  $n$ ——裂缝总数;  $r_e$ ——供给半径, m;  $\xi_e$ ——矩形长度;  $\eta_e$ ——矩形宽度;  $Q_1$ ——裂缝1与裂缝2间扇形区域地层对应的产能,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $K$ ——地层渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $h$ ——油层厚度, m;  $p_e$ ——供给边界压力, MPa;  $p_f$ ——裂缝压力, MPa;  $\mu_o$ ——地层原油粘度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $B_o$ ——地层原油体积系数,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $Q_i$ ——裂缝  $L_i$  和  $L_j$  间扇形区域地层对应的产能,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $i$  和  $j$ ——相邻裂缝编号;  $L_i$  和  $L_j$ ——两相邻裂缝长度, m;  $p_{wf}$ ——油井井底流压, MPa;  $Q_o$ ——不对称多分支裂缝的油井总产能,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_{oi}$ ——任意相邻裂缝间地层的产油量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_g$ ——不对称多分支裂缝的气井总产能,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $T_{sc}$ ——标准条件下温度, K;  $T$ ——油藏温度, K;  $p_{sc}$ ——标准条件下压力, 0.1 MPa;  $\psi_e$ ——供给边界气体拟压力,  $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ ;  $\psi_{wf}$ ——井底气体拟压力,  $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ ;  $p$ ——流体压力, MPa;  $\mu(p)$ ——气体粘度函数,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $Z(p)$ ——气体压缩因子函数;  $\bar{\mu}$ ——平均地层气体粘度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $\bar{Z}$ ——平均压缩因子;  $F_{cd(i)}$ ——平均裂缝导流能力,  $\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ ;  $F_{cdi}$ ——裂缝  $i$  的导流能力,  $\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ ;  $F_{cdj}$ ——裂缝  $j$  的导流能力,  $\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ ;  $\eta$ —— $w_3$  平面纵坐标值;  $v$ ——流体由基质向裂缝流动的速度, m/h;  $C_1$  和  $C_2$ ——方程系数;  $K_f$ ——裂缝渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $W_f$ ——裂缝宽度, m。

#### 参考文献:

[1] 张德良,张烈辉,赵玉龙,等.低渗透气藏多级压裂水平井稳态产能模型[J].油气地质与采收率,2013,20(3):107-110.  
Zhang Deliang, Zhang Liehui, Zhao Yulong, et al. Study on steady productivity of fractured horizontal well in low permeability gas reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(3): 107-110.

[2] 王锋,刘慧卿,吕广忠.低渗透油藏长缝压裂直井稳态产能预测模型[J].油气地质与采收率,2014,21(1):84-86,91.  
Wang Feng, Liu Huiqing, Lü Guangzhong. Steady-state productivity prediction model for long-length fractured vertical well in low permeability oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1): 84-86, 91.

[3] 蒋廷学,王宝峰,单文文,等.整体压裂优化方案设计的理论模式[J].石油学报,2001,22(5):58-62.  
Jiang Tingxue, Wang Baofeng, Shan Wenwen, et al. Theoretical mode of overall fracturing optimization plan [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(5): 58-62.

[4] 尹洪军,刘宇,付春权,等.低渗透油藏压裂井产能分析[J].特种油气藏,2005,12(2):55-56.  
Yin Hongjun, Liu Yu, Fu Chunquan. Productivity analysis for fractured well in low permeability reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2005, 12(2): 55-56.

[5] 熊健,邱桃,郭平,等.非线性渗流下低渗气藏压裂井产能评价[J].石油钻探技术,2012,40(3):92-96.  
Xiong Jian, Qiu Tao, Guo Ping, et al. Production evaluation of fractured wells in low permeability reservoirs with nonlinear flow [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(3): 92-96.

[6] Rodriguez F, Cinco-Ley H, Samaniego-V F. Evaluation of fracture asymmetry of finite-conductivity fractured wells [J]. SPE Production Engineering, 1992, 7(2): 233-239.

[7] Djebbar T, Jing L, Hung N, et al. Evaluation of fracture asymmetry of finite-conductivity fractured wells [J]. Journal of Energy Resource Technology, 2010, 132(1): 1-7.

[8] 熊健,王小军,吕雷.低渗油藏不对称垂直裂缝井产能模型[J].科技导报,2013,31(22):40-43.  
Xiong Jian, Wang Xiaojun, Lü Lei. Productivity model for asymmetrical vertical fracture well in low-permeability oil reservoirs [J]. Science & Technology Review, 2013, 31(22): 40-43.

[9] 彭显强,何顺利,魏俊之.不完全对称多井底水平井产能研究[J].大庆石油地质与开发,2003,22(2):28-30.  
Peng Yuqiang, He Shunli, Wei Junzhi. The productivity study of horizontal well with non complete symmetry multiple well bore [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003, 22(2): 28-30.

[10] 曹宝军,李相方,姜子杰,等.压裂火山岩气井不对称裂缝产能模型研究[J].天然气工业,2009,29(8):79-81.  
Cao Baojun, Li Xianfang, Jiang Zijie, et al. A research on the asymmetric fracture productivity models for fracturing volcanic gas wells [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(8): 79-81.

[11] 程林松.高等渗流力学[M].北京:石油工业出版社,2011:58-59.  
Cheng Linsong. Advanced mechanics of flow through porous media [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 58-59.

[12] Chen Z M, Liao X W, Huang C H, et al. Productivity estimations for vertically fractured wells with asymmetrical multiple fractures [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21(6): 1 048-1 060.

[13] Wattenbarger Robert A, Ramey J R. Gas well testing with turbulence, damage and wellbore storage [J]. Journal of Petroleum Technology, 1968, 20(8): 877-887.

[14] 汪永利,蒋廷学,曾斌.气井压裂后稳态产能的计算[J].石油学报,2003,24(4):65-68.  
Wang Yongli, Jiang Tingxue, Zeng Bin. Productivity performances of hydraulically fractured gas well [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(4): 65-68.