

高含水期五点法压裂井网的动态产能预测方法

崔传智¹,杨经纬¹,吴忠维¹,单高军²,赵凯鑫²

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛266580;

2.中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院,黑龙江大庆163712)

摘要:高含水期井网压裂产能研究对高含水期井网压裂优化及开发调整意义重大。由于储层物性的非均质性,导致高含水期剩余油分布不均。依据五点法压裂井网及其流线分布特征,将五点法注采单元划分为4个注采区域,每个注采区域再细分为多个计算单元;在考虑剩余油分布不均的基础上,运用流线积分法、物质平衡原理及稳定状态逐次替换法,推导出各计算单元的产能计算方法,合并各计算单元产能,获得高含水期五点法压裂井网产能。新建方法的计算结果与实际动态生产数据的对比结果表明,相对误差小于5%,可满足现场需求。通过分析储层系数、储层非均质性、裂缝无因次导流能力、裂缝穿透比和压裂初期剩余油饱和度对产能的影响可知:储层系数越大,压裂初期剩余油饱和度越高,产能越高,裂缝直接控制区域的储层系数和剩余油饱和度对压裂初期产能影响较大;产能随裂缝无因次导流能力和穿透比的增大而增大,但裂缝无因次导流能力对产能的影响随其增大而减小。

关键词:高含水期;压裂;五点法井网;非均质;产能预测

中图分类号:TE341

文献标识码:A

Dynamic productivity prediction method of five-spot fractured well pattern in high water cut stage

CUI Chuazhi¹, YANG Jingwei¹, WU Zhongwei¹, SHAN Gaojun², ZHAO Kaixin²

(1.School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao City, Shandong Province,

266580, China; 2.Research Institute of Exploration and Development, Daqing Oilfield Company

Limited, PetroChina, Daqing City, Heilongjiang Province, 163712, China)

Abstract: The fractured well pattern productivity study is of great significance to optimization and development adjustment in the high water cut stage. Due to the heterogeneity of the reservoir, the remaining oil distribution in the high water cut stage is uneven. According to the streamline distribution characteristics of five-spot well pattern, injection-production units for the five-spot well pattern were divided into 4 injection-production areas, and each area was subdivided into several calculating units. Considering the uneven distribution of the remaining oil, the dynamic productivity prediction method for each calculating unit was proposed by using streamline integral method, material balance principle and steady-state sequential replacement method, and the productivity of five-spot well pattern was further calculated by summarizing the productivity of each calculating unit. The accuracy of the method was verified by comparing with the actual production data with the relative error of less than 5%, which meets the demands of the field. The influences of reservoir coefficient, reservoir heterogeneity, dimensionless fracture conductivity, fracture penetration ratio and remaining oil saturation at early fracturing stage were analyzed. The results show that a better reservoir coefficient and a higher remaining oil saturation lead to the higher productivity. The reservoir coefficient and remaining oil saturation in the fracture control area have great influences on the productivity at initial stage after fractured. The productivity increases with the increase of the dimensionless fracture conductivity and penetration ratio, but the effect of the dimensionless fracture conductivity on the productivity de-

收稿日期:2019-02-25。

作者简介:崔传智(1970—),男,山东青州人,教授,博导,从事油气渗流理论、油气田开发技术方面的研究与教学工作。联系电话:13705469592, E-mail:ccz2008@126.com。

通信作者:杨经纬(1995—),男,山东青岛人,在读硕士研究生。联系电话:18669706543, E-mail:123745146@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项“特高含水期多措施协同优化研究”(2016ZX05010-002-007)。

creases with the increase of the dimensionless fracture conductivity.

Key words: high water cut stage; fracture; five-spot well pattern; heterogeneity; productivity prediction

由于储层非均质性,注入水冲刷后的剩余油分布不均,故在高含水期五点法压裂井网的产能预测中,必须考虑剩余油分布非均质性。郎兆新等运用势叠加方法求解了压裂水平井产能^[1]。王晓冬等在讨论封闭地层中有限导流垂直裂缝井完整的压力动态特征后,推导了中期径向流动和晚期拟稳态流动新公式以及修正的Dupuit型产量计算公式^[2]。孟红霞等基于有限导流能力裂缝,建立了水力压裂油井产能计算模型,研究了裂缝参数对油井产能的影响^[3]。崔传智等推导出矩形五点井网内压裂井与未压裂井的见水时间计算公式,并得到了裂缝不同长度和导流能力下的压裂井产能公式^[4]。熊健等基于渗流理论和保角变换,建立了压裂直井稳态产能模型^[5-8]。以上产能模型均基于储层均质假设,且只适用于单相油流情况。蒲军等基于渗流理论和流管积分法,给出了均质油藏压裂井网的产量计算方法^[9-12],该方法虽然适用于油水两相流动情况,但在方法的建立过程中没有考虑储层非均质性的影响,尤其是高含水期剩余油非均质性的影响。为此,笔者考虑高含水期剩余油非均质性与储层系数非均质性,首先基于井网及流线分布特征,将五点法注采单元划分为4个注采区域,并进一步将各注采区域划分为多个计算单元;然后通过运用流线积分法、物质平衡原理及稳定状态逐次替换法,推导出各计算单元的产能计算方法,合并各计算单元产能,最终获得高含水期五点法压裂井网的动态产能,以期高含水期井网压裂可行性分析及其优化提供理论基础。

1 物理模型

五点法压裂井网注采单元可划分为4个注采区域,其编号分别为I, II, III和IV(图1a)。由于注水井井底压力高,裂缝张开度大,故认为注水井裂缝具有无限导流能力;同理,采油井裂缝张开度小,认为采油井裂缝具有有限导流能力。考虑采油井裂缝为有限导流,将采油井裂缝离散成n份,n值越大,计算结果越准确;再依据流线分布特征,任意一注采区域可以划分为n+2个计算单元。当n为3时,各注采区域可划分为5个计算单元(图1b),计算单元①的流量沿着流线先流向a点,再在驱动压力梯度的作用下沿裂缝流向采油井;计算单元②,③和④

的流量分别流入裂缝中的b,c和d点,与裂缝中的流量汇合后再在驱动压力梯度的作用下沿裂缝流向采油井。假设在各裂缝离散点之间的流动符合达西流动定律。

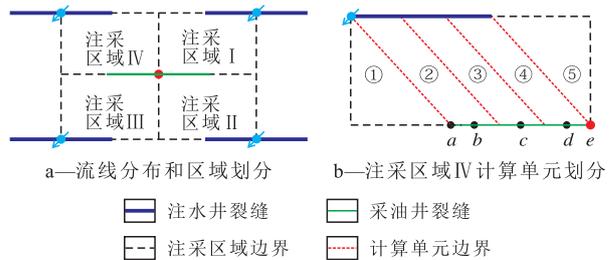


图1 五点法注采区域和计算单元划分

Fig.1 Injection-production area and calculated unit division of five-spot well pattern

2 动态产能预测方法

对于低渗透油藏,存在启动压力梯度^[13],当压力梯度一定时,存在一个确定的启动区域,只有在该区域内,流体能有效流动。完成注采区域和计算单元划分后,需先确定各计算单元的启动区域,再求解各计算单元启动区域内的产能;合并所有注采区域中各计算单元的产能,即可得到井网瞬时产能;最后运用物质平衡原理和稳定状态逐次替换法实现井网产能的动态预测。

2.1 启动区域的确定

在实际开采过程中,由于存在启动压力梯度,在一定压差下,整个注采区域一般不能全部启动,这时就需要确定各计算单元中可启动的区域。

可启动的最长流管长度表达式为:

$$d_{s,max} = \frac{P_h - P_f}{\lambda} \tag{1}$$

对于三角形计算单元(图2),当 $d_{s,max} > l_1 + l_2$ 时,三角形计算单元全部启动;当 $l_1 + l_2 > d_{s,max} > l$ 时,三角形计算单元部分启动,启动角为 θ ;当 $d_{s,max} < l$ 时,三角形计算单元不启动。

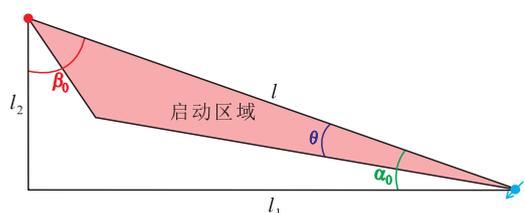


图2 三角形计算单元的启动区域示意

Fig.2 Starting area of triangle calculated unit

根据几何关系,可得最长流管长度的表达式为:

$$d_{s\max} = \frac{\sin\theta + \sin\frac{\theta\beta_0}{\alpha_0}}{\sin\left(\theta + \frac{\theta\beta_0}{\alpha_0}\right)} l \quad (2)$$

由(2)式可解得启动角 θ 值。

对于梯形计算单元,将所有梯形计算单元看做一个整体。设 $d_1 > d_2$,当 $d_{t\max} < l_2$ 时,无法建立驱动体系;当 $l_2 < d_{t\max} < d_2$ 时,启动区域为图3a所示的一个平行四边形;当 $d_2 < d_{t\max} < d_1$ 时,启动区域为图3b所示的一个梯形;当 $d_1 < d_{t\max}$ 时,整个梯形计算单元全部启动。

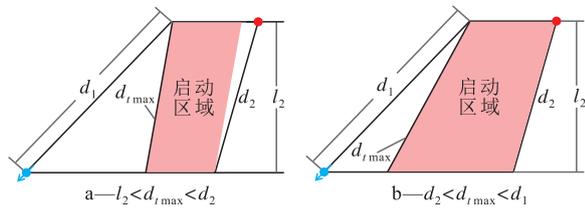


图3 梯形计算单元的启动范围

Fig.3 Starting range of trapezoidal calculated unit

2.2 各计算单元产能公式推导

计算单元的产能等于计算单元中所有流管的产能和。对于单一流管,根据低速非达西渗流的基本公式,在距注水井 ξ 处的截面的流量公式为:

$$\Delta q = -\frac{KA(\xi)}{\mu} \left(\frac{dp}{d\xi} - \lambda \right) \quad (3)$$

对(3)式积分得:

$$\Delta q = -\frac{K}{\mu} \int_L \frac{1}{A(\xi)} dx (p_h - p_f - \lambda L) \quad (4)$$

由于计算单元形状不同,其流管产能计算方法不同,依据图1b可知,注采区域内的计算单元可以分为三角形计算单元与梯形计算单元。

2.2.1 三角形计算单元

对于如图4所示的三角形计算单元,油水井距为 l ,油水井半径为 r_w ,流管中心线 L 由 L_1 和 L_2 组成,角度增量为 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$ 。由 A 端和 B 端出发的流管微元的截面积公式分别为:

$$\text{当 } r_w < \xi < \frac{l \sin \beta_1}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)} \text{ 时, } A_1(\xi) = 2h\xi \tan \frac{\Delta\alpha}{2} \quad (5)$$

$$\text{当 } r_w < \xi < \frac{l \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)} \text{ 时, } A_2(\xi) = 2h\xi \tan \frac{\Delta\beta}{2} \quad (6)$$

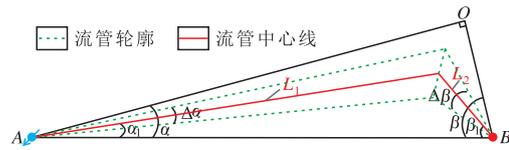


图4 三角形计算单元示意

Fig.4 Triangle calculated unit

将(5)式和(6)式代入(4)式,可得:

$$\Delta q = \frac{K \left[p_h - p_f - \lambda l \frac{\sin \alpha_1 + \sin \beta_1}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)} \right]}{\mu \left[\frac{1}{2h \tan \frac{\Delta\alpha}{2}} \int_{r_w}^{\frac{l \sin \beta_1}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)}} \frac{d\xi}{\xi} + \frac{1}{2h \tan \frac{\Delta\beta}{2}} \int_{r_w}^{\frac{l \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)}} \frac{d\xi}{\xi} \right]} \quad (7)$$

将(7)式积分得三角形计算单元产能为:

$$q = \int_0^\alpha \frac{Kh \left[p_h - p_f - \lambda l \frac{\sin \alpha_1 + \sin \beta_1}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)} \right]}{\mu \left[\ln \frac{l \sin \beta_1}{r_w \sin(\alpha_1 + \beta_1)} + \frac{\alpha}{\beta} \ln \frac{l \sin \alpha_1}{r_w \sin(\alpha_1 + \beta_1)} \right]} d\alpha_1 \quad (8)$$

其中:

$$\beta_1 = \frac{\beta}{\alpha} \alpha_1 \quad (9)$$

2.2.2 梯形计算单元

梯形计算单元如图5a所示,梯形的上底 CD 和下底 AB 分别表示注水井裂缝和采油井裂缝,其长度分别为 L_{CD} 和 L_{AB} 。假设采油井裂缝长度是注水井裂缝长度的 k 倍且两者不相等,即 $L_{AB} = kL_{CD}$,且 $k \neq 1$ 。在梯形计算单元内如图5b所示取微元流管,假设沿注水井裂缝的微元长度为 Δl ,沿采油井裂缝的微元长度为 $k\Delta l$,流管中心线的长度为流管的长度,根据余弦定理,可得流管的长度为:

$$d_l = \sqrt{d_1^2 + \frac{k^2 L^2}{4} - d_1 k l \cos \alpha} \quad (10)$$

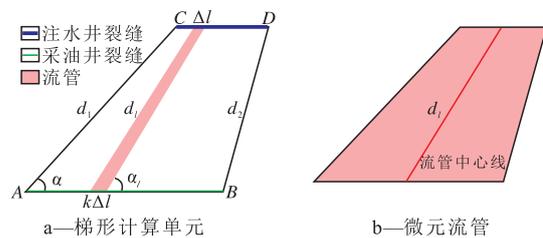


图5 梯形计算单元及微元流管示意

Fig.5 Trapezoidal calculated unit and flow tube diagram

流管中心线与裂缝夹角的计算式为:

$$\alpha_l = \arcsin\left(\frac{d_1}{d_l} \sin\alpha\right) \quad (11)$$

距采油井裂缝 ξ_l 处的流管截面积为:

$$A(\xi_l) = \Delta lh \left[\frac{\xi_l}{d_l} (k-1) + 1 \right] \sin\alpha_l \quad (12)$$

将(11)式代入(4)式可得:

$$\Delta q = \frac{\Delta l K h (p_h - p_f - \lambda d_l) (k-1) \sin\alpha_l}{\mu d_l \ln k} \quad (13)$$

移项得:

$$\frac{dq}{dl} = \frac{K h (p_h - p_f - \lambda d_l) (k-1) \sin\alpha_l}{\mu d_l \ln k} \quad (14)$$

对(13)式积分得梯形计算单元的产能为:

$$q = \int_0^{L_{AB}} \frac{K h (p_h - p_f - \lambda d_l) (k-1) \sin\alpha_l}{\mu d_l \ln k} dl = \frac{L_{AB} K h (p_h - p_f - \lambda d_l) (k-1) \sin\alpha_l}{\mu d_l \ln k} \quad (15)$$

当 $k=1$ 时,即采油井裂缝与注水井裂缝长度相等,计算单元为平行四边形,此时计算单元的产能为:

$$q = \int_0^{L_{AB}} \frac{K h (p_h - p_f - \lambda d_l) \sin\alpha_l}{\mu d_l} dl = \frac{L_{AB} K h (p_h - p_f - \lambda d_l) \sin\alpha_l}{\mu d_l} \quad (16)$$

2.3 注采区域产能公式

通过推导得到各计算单元的产能计算公式,但由于采油井裂缝中各点压力未知,无法直接求解。

根据假设,可以认为计算单元①,②,③和④的产能分别为 a, b, c 和 d 四点处流入裂缝的流量,即出口端压力分别为 a, b, c 和 d 四点处的压力,且流体在裂缝中的流动遵循达西定律,即(1)式。根据流量相等的原则,可知油相和水相在储层和裂缝中的流动均满足如下方程组:

$$\begin{cases} Q_1 = \frac{K_f K_{fr} A_f (p_a - p_b)}{\mu L_{ab}} \\ Q_1 + Q_2 = \frac{K_f K_{fr} A_f (p_b - p_c)}{\mu L_{bc}} \\ Q_1 + Q_2 + Q_3 = \frac{K_f K_{fr} A_f (p_c - p_d)}{\mu L_{cd}} \\ Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = \frac{K_f K_{fr} A_f (p_d - p_e)}{\mu L_{de}} \end{cases} \quad (17)$$

计算单元①—④的产能可由(8)式、(14)式和(16)式联立求解,计算单元⑤的产能可直接由(8)式求解;所用的物性参数为各计算单元的物性参数; K_{fr} 可由各计算单元的出口端含水饱和度和相渗曲线求得。

各注采区域油、水的总产能可通过合并其中各计算单元的产能得到,其表达式分别为:

$$Q_o = Q_{o1} + Q_{o2} + Q_{o3} + Q_{o4} + Q_{o5} \quad (18)$$

$$Q_w = Q_{w1} + Q_{w2} + Q_{w3} + Q_{w4} + Q_{w5} \quad (19)$$

该方法在实际使用时,可划分更多计算单元以提高预测结果的准确性。

2.4 动态产能预测

根据物质平衡原理,采出的油量等于储层内水的增长量,其表达式为:

$$Q_o = \phi A h \frac{dS_w}{dt} \quad (20)$$

当时间步长较小时,根据稳定状态逐次替换法,可认为在该段时间内产能恒定,则各时间步地层平均含水饱和度的关系式为:

$$\bar{S}_w^{i+1} = \bar{S}_w^i + \frac{Q_o t}{\phi A h} \quad (21)$$

动态产能预测步骤主要包括:①划分单位时间,认为在单位时间内含水饱和度不变。②计算各计算单元平均孔隙度和渗透率。③根据相渗曲线和目前平均含水饱和度,计算油相和水相相对渗透率。④根据见水后岩心中平均含水饱和度与出口端含油率的关系,计算前缘含水饱和度。⑤根据(17)式求解产能。⑥根据(21)式计算下一时刻的平均含水饱和度。⑦重复步骤③—⑥,实现一段时间的产能预测。

3 方法验证

基于大庆油田X区块的实际储层物性参数和压裂设计参数(表1),运用新建产能预测方法,进行编

表1 大庆油田X区块实际储层物性及压裂设计参数
Table1 Reservoir petrophysical characteristics and fracturing design parameters for Block X in Daqing Oilfield

参数名称及单位	参数值	参数名称及单位	参数值
井距(m)	200	储层渗透率(mD)	10
排距(m)	400	裂缝渗透率(D)	500
注水井裂缝长度(m)	150	地层原油黏度(mPa·s)	2.49
采油井裂缝长度(m)	150	地层水黏度(mPa·s)	0.426
裂缝宽度(m)	0.01	生产压差(MPa)	25
井径(m)	0.1	孔隙度(%)	14.87
储层厚度(m)	16		

程求解动态产能。

将产能预测结果与大庆油田X区块的某高含水油井的实际生产动态数据(表2)对比可知,预测结果与实际生产动态数据的拟合程度较好,平均相对误差为3.7%,在5%以内,可以满足现场需求,验证了本文产能预测方法的准确性。

表2 预测结果与实际动态数据的对比结果

Table2 Comparison of predicted results with actual dynamic data

生产时间(月)	平均日产量(m ³ /d)		相对误差(%)	生产时间(月)	平均日产量(m ³ /d)		相对误差(%)
	实际值	预测值			实际值	预测值	
1	5.98	6.00	0.33	17	4.18	4.40	5.26
3	5.94	5.87	1.18	19	3.93	4.11	4.58
5	5.68	5.74	1.06	21	3.61	3.80	5.26
7	5.44	5.58	2.57	23	2.96	3.10	4.73
9	5.19	5.35	3.08	25	1.88	2.01	6.91
11	4.91	5.15	4.89	27	0.94	0.97	3.19
13	4.70	4.93	4.89	29	0.41	0.40	2.24
15	4.49	4.69	4.45				

4 影响因素分析

根据上述方法,拟定参数进行编程计算,研究压裂规模和储层物性对产能的影响,绘制不同参数下31个月的产能变化曲线。所用参数如表3所示。

表3 产能影响因素分析拟定的储层物性及裂缝参数

Table3 Reservoir petrophysical characteristics and fracture parameters proposed for productivity influence factor

参数名称及单位	参数值	参数名称及单位	参数值
井距(m)	200	地层原油黏度(mPa·s)	2.5
排距(m)	400	地层水黏度(mPa·s)	1.2
注水井裂缝长度(m)	100	注水井压力(MPa)	30
油井裂缝长度(m)	60	采油井压力(MPa)	10
裂缝宽度(m)	0.01	启动压力梯度(10 ⁻¹ MPa/m)	0.01
井径(m)	0.2	计算单元①的平均含水饱和度	0.57
储层厚度(m)	20	计算单元②的平均含水饱和度	0.60
储层渗透率(mD)	50	计算单元③的平均含水饱和度	0.60
裂缝渗透率(D)	200	计算单元④的平均含水饱和度	0.60
孔隙度(%)	20	计算单元⑤的平均含水饱和度	0.57

4.1 储层系数

储层系数与储层的绝对渗透率和厚度有关,主要反映了储层本身有利于渗流的性质。由不同储层系数下的采油井产能变化曲线(图6)可以看出:随着储层系数的增大,产能也明显增大,但产能增加的幅度有所减小;且储层系数越大,产能下降得

越快,但最终不同储层系数的产能将趋于大体一致。因此,储层系数作为对压裂初期产能有较大影响的参数,在选择压裂层位时,应重点考虑。

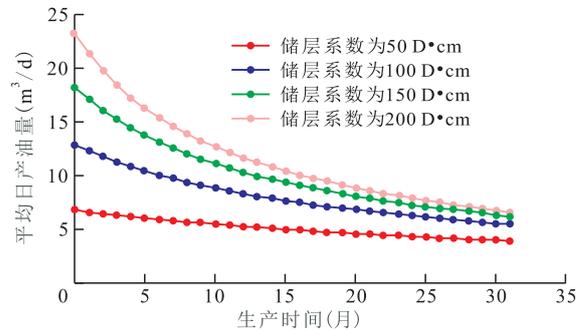


图6 储层系数对产能的影响

Fig.6 Effect of reservoir coefficient on productivity

4.2 储层非均质性

选取4组不同储层系数分别绘制其产能变化曲线,各组的裂缝直接控制区域和非直接控制区域的储层系数分别为:第1组200和200 mD·m,第2组200和100 mD·m,第3组100和200 mD·m,第4组100和100 mD·m。分析储层非均质性对产能的影响(图7)可知,第1组与第3组,第2组与第4组为裂缝直接控制区域的储层系数有所差异,其曲线主要在前期有较大差别,而后期基本重合。说明裂缝直接控制区域的储层系数的大小主要影响压裂初期的产能,对后期影响较小。第1组与第2组、第3组与第4组为非裂缝直接控制区域的储层系数有所差异,产能在31个月内均随储层系数的下降而下降,说明非裂缝直接控制区域的储层系数的大小对压裂后长时间内的产能均有影响。

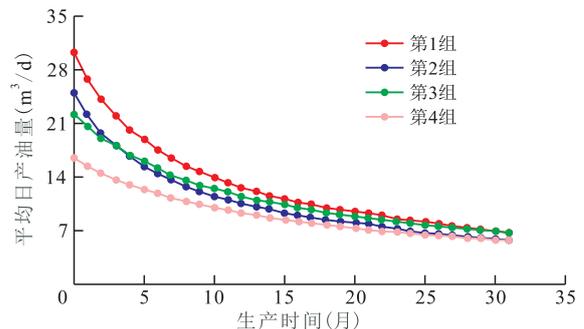


图7 储层非均质性对产能的影响

Fig.7 Effect of heterogeneous reservoir coefficient on productivity

4.3 裂缝无因次导流能力

裂缝无因次导流能力是油井增产作业中的主要参数,它是流体在裂缝中的流动能力与流体从地层中流动至裂缝的流动能力的比值。由不同裂缝无因次导流能力下采油井产能(图8)可以看出:当裂缝无因次导流能力较小时,裂缝无因次导流能力

的增大对产能有明显的提高;当裂缝无因次导流能力较大时,裂缝无因次导流能力的增大对产能影响极小,当其达到一定值时,产能几乎不再随裂缝无因次导流能力的增大而增大;且随着裂缝无因次导流能力的增大,产能下降速度略微增大。因此,在压裂施工中,只需根据储层的实际情况确定适当的裂缝导流能力,即有较好的增产效果。

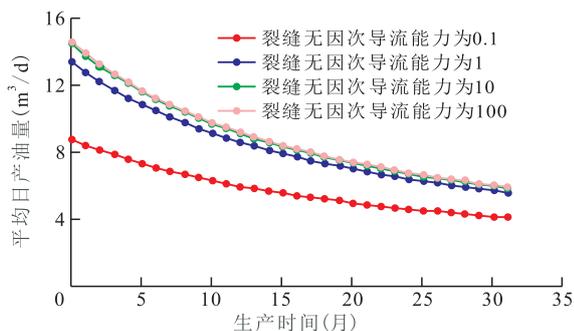


图8 裂缝无因次导流能力对产能的影响

Fig.8 Effect of dimensionless fracture conductivity on productivity

4.4 裂缝穿透比

裂缝穿透比是裂缝长度与井距的比值。为了研究压裂规模对产能的影响,选取4组裂缝穿透比对应的产能变化曲线。结果(图9)表明,随着裂缝穿透比的增大,裂缝控制面积变大,初期产能有一定的提高。但由于产能下降速度也随裂缝穿透比的提高而增大,后期产能提高不明显。

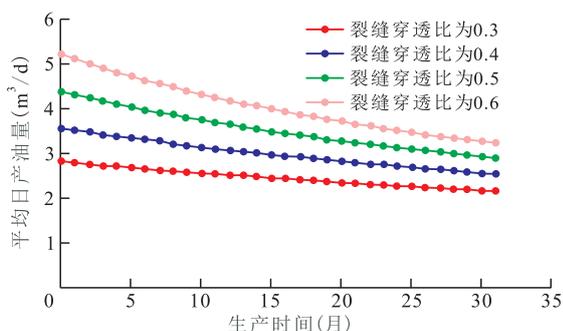


图9 裂缝穿透比对产能的影响

Fig.9 Effect of fracture penetration ratio on productivity

4.5 压裂初期剩余油饱和度分布

为了研究压裂初期剩余油饱和度分布对产能的影响,选取4组不同压裂初期剩余油饱和度分布对应的产能变化曲线,其裂缝直接控制区域和非直接控制区域的剩余油饱和度分别为:第1组0.4和0.4,第2组0.45和0.4,第3组0.4和0.45,第4组0.45和0.45。从图10可以看出,随注采区域整体的压裂初期剩余油饱和度的提高,各时期产能均有明显的提高,其中,裂缝直接控制区域的剩余油饱和度的提高对压裂初期产能影响较为明显。但随着产能

的提高,产能下降的速度也明显变快,随着生产的进行,在2 a后产能的差异较小。

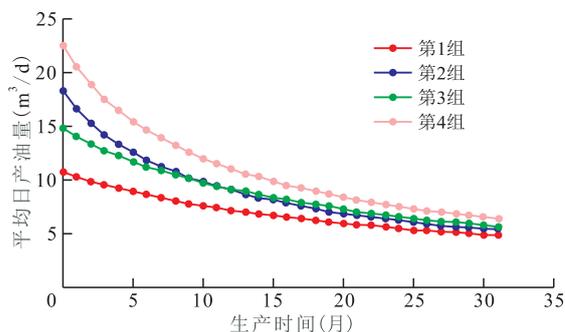


图10 压裂初期剩余油饱和度对产能的影响

Fig.10 Effect of remaining oil saturation on productivity in early fracturing stage

5 结论

考虑高含水期剩余油非均质性、储层系数非均质性,运用流线积分法、物质平衡原理及稳定状态逐次替换法,建立各计算单元的产能计算方法,合并各计算单元产能,最终获得高含水期五点法压裂井网的动态产能。通过与实际生产动态数据进行对比,验证了该方法的准确性。

产能影响因素分析结果表明,储层系数越大,压裂初期剩余油饱和度越高,产能越高。储层系数的变化在压裂初期对产能的影响程度大于压裂后期。产能随裂缝无因次导流能力和穿透比的增大而增大,但是裂缝无因次导流能力对产能的影响随其增大而减小,在考虑经济因素后,可得到裂缝参数的最优值。

符号解释:

n ——裂缝等分份数; a, b, c, d, e ——裂缝离散点; d_s ——三角形计算单元中可启动的流管长度, cm; p_h ——注水井井底压力, MPa; p_f ——采油井井底流压, MPa; λ ——启动压力梯度, 10^{-1} MPa/cm; l_1 ——注水井与采油井的水平距离, cm; l_2 ——注水井与采油井的垂直距离, cm; l ——三角形计算单元中注水井与采油井间距, cm; θ ——三角形计算单元的启动角, ($^\circ$); α_0 ——三角形计算单元注水井处直角边与斜边的夹角, ($^\circ$); β_0 ——三角形计算单元采油井处直角边与斜边的夹角, ($^\circ$); d_1 ——梯形计算单元中长腰长度, cm; d_2 ——梯形计算单元中短腰长度, cm; $d_{l_{max}}$ ——梯形计算单元中可启动的最大流管长度, cm; ξ ——从井点处出发的流线长度, cm; Δq ——单流管中的流量, cm^3/s ; K ——渗透率, mD; A ——流管截面积, cm^2 ; μ ——地层流体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; p ——生产压差, MPa; r_w ——井径, cm; L ——三角形计算单元中流线长度, cm; L_1, L_2 ——三角形计算单元中注水井和采油井出发的流

管的长度, cm; α ——三角形计算单元注水井侧的启动角, ($^{\circ}$); β ——三角形计算单元采油井侧的启动角, ($^{\circ}$); $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ ——角度增量, ($^{\circ}$); α_1 ——三角形计算单元注水井侧某一流线与注水井和采油井连线的夹角, ($^{\circ}$); β_1 ——三角形计算单元采油井侧某一流线与注水井和采油井连线的夹角, ($^{\circ}$); A_1 ——三角形计算单元中由A端出发的流管微元的截面积, cm^2 ; h ——储层厚度, cm; A_2 ——三角形计算单元中由B端出发的流管微元的截面积, cm^2 ; q ——某一计算单元的产能, cm^3/s ; L_{AB}, L_{CD} ——AB和CD长度, 即采油井裂缝和注水井裂缝的长度, cm; k ——采油井裂缝与注水井裂缝的长度比; d_l ——梯形计算单元中流管长度, cm; α_l ——流管中心线与裂缝的夹角, ($^{\circ}$); ξ_l ——由采油井裂缝出发的流管的长度, cm; A ——距采油井裂缝 ξ_l 处的流管截面积, cm^2 ; Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 ——计算单元①, ②, ③, ④和⑤的流量, cm^3/s ; K_f ——裂缝渗透率, D; K_{fr} ——裂缝中的相对渗透率; A_f ——采油井裂缝截面积, cm^2 ; p_a, p_b, p_c, p_d, p_e ——a, b, c, d各点和油井井底的压力, MPa; $L_{ab}, L_{bc}, L_{cd}, L_{de}$ ——ab, bc, cd和de两点间的距离, cm; Q_o ——注采区域中油相的总流量, cm^3/s ; $Q_{o1}, Q_{o2}, Q_{o3}, Q_{o4}, Q_{o5}$ ——计算单元①, ②, ③, ④和⑤中油相的流量, cm^3/s ; Q_w ——注采区域中水相的总流量, cm^3/s ; $Q_{w1}, Q_{w2}, Q_{w3}, Q_{w4}, Q_{w5}$ ——计算单元①, ②, ③, ④和⑤中水相的流量, cm^3/s ; ϕ ——孔隙度; S_w ——含水饱和度; t ——生产时间, s。

参考文献

[1] 郎兆新, 张丽华, 程林松. 压裂水平井产能研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1994, 18(2): 43-46.
LANG Zhaoxin, ZHANG Lihua, CHENG Linsong. Investigation on productivity of fractured horizontal well[J]. Journal of the University of Petroleum, China; Edition of Natural Science, 1994, 18(2): 43-46.

[2] 王晓冬, 张义堂, 刘慈群. 垂直裂缝井产能及导流能力优化研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(6): 78-81.
WANG Xiaodong, ZHANG Yitang, LIU Ciqun. Productivity evaluation and conductivity optimization for vertically fractured wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(6): 78-81.

[3] 孟红霞, 陈德春, 黄新春, 等. 水力压裂油井产能计算模型[J]. 河南石油, 2005, 19(4): 33-35.
MENG Hongxia, CHEN Dechun, HUANG Xinchun, et al. Computation models of productivities of hydraulically fractured oil wells[J]. Henan Petroleum, 2005, 19(4): 33-35.

[4] 崔传智, 丰雅, 张传宝, 等. 基于均衡驱替的低渗透油藏直井压裂缝长优化方法[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(6): 65-71.
CUI Chuanzhi, FENG Ya, ZHANG Chuanbao, et al. Optimization method of fracture length of vertical wells in low-permeability reservoirs based on the equilibrium displacement[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(6): 65-71.

[5] 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.

[6] 林旺, 范洪富, 刘立峰, 等. 工程参数对致密油藏压裂水平井产能的影响[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(6): 120-126.
LIN Wang, FAN Hongfu, LIU Lifeng, et al. Effect of engineering parameters on fractured horizontal well productivity in tight oil reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(6): 120-126.

[7] 陈志明, 廖新维, 赵晓亮, 等. 体积压裂直井油气产能预测模型[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(6): 121-126.
CHEN Zhiming, LIAO Xinwei, ZHAO Xiaoliang, et al. Productivity model of oil/gas productivity of vertical wells in simulated reservoir volume[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(6): 121-126.

[8] 苑志旺, 郭平, 姜彬, 等. 深层火山岩气藏压裂直井复合渗流产能模型[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(3): 71-77.
YUAN Zhiwang, GUO Ping, JIANG Bin, et al. Composite seepage productivity model of the fractured vertical well in deep volcanic gas reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(3): 71-77.

[9] 蒲军, 刘传喜, 尚根华. 基于流线积分法的注水井网非稳态产量模型[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2016, 38(5): 97-106.
PU Jun, LIU Chuanxi, SHANG Genhua. Non-steady water-flooding production model of areal well pattern based on flow line integral method[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2016, 38(5): 97-106.

[10] 计秉玉, 李莉, 王春艳. 低渗透油藏非达西渗流面积井网产油量计算方法[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 256-261.
JI Bingyu, LI Li, WANG Chunyan. Oil production calculation for areal well pattern of low-permeability reservoir with non-Darcy seepage flow[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 256-261.

[11] 计秉玉, 王春艳, 李莉, 等. 低渗透储层井网与压裂整体设计中的产量计算[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 578-582.
JI Bingyu, WANG Chunyan, LI Li, et al. Calculation method for production rate of rectangular well pattern and fracturing integration production mode in low-permeability reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 578-582.

[12] 史晓东. 致密油直井多层缝网压裂产能预测方法[J]. 特种油气藏, 2017, 24(1): 124-127.
SHI Xiaodong. Productivity forecast of vertical well with multi-layer network fracturing in tight oil reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(1): 124-127.

[13] 许建国, 赵晨旭, 宣高亮, 等. 地质工程一体化新内涵在低渗透油田的实践——以新立油田为例[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(2): 37-42.
XU Jianguo, ZHAO Chenxu, XUAN Gaoliang, et al. Application of the new connotation of geology-engineering integration in low permeability oilfields: a case study on Xinli oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(2): 37-42.