

# 低渗透气藏多级压裂水平井稳态产能模型

张德良,张烈辉,赵玉龙,刘启国

(西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500)

**摘要:**致密砂岩气藏储层物性差,需要采用水平井配合多级水力压裂技术进行开发,为此,对低渗透气藏多级压裂水平井稳态产能模型进行了研究。首先,由渗流力学基本原理,建立单条裂缝水平井等效井径模型;然后,运用叠加原理,建立了耦合水平井段管流动态的多级压裂水平井稳态产能模型,在 Visual Studio 2008 C#编程环境下,对模型进行了求解,获得了多级压裂水平井产量及压力分布。在此基础上,对多级压裂水平井稳态产能的相关影响因素进行了分析,认为缝长是影响低渗透气藏产能的主要因素,而裂缝导流能力对其影响不大。通过矿场实例,计算得到西部某气藏压裂水平井单井产能为  $11.357 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,与实测产能误差为 15.7%,验证了计算结果的准确性。该井在压裂施工中应尽可能提高缝长,以获得更好的增产效果。

**关键词:**低渗透气藏 压裂水平井 启动压力梯度 稳态产能 耦合模型

**中图分类号:** TE357.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2013)03-0107-04

近年来,针对中国特殊油气藏水平井压裂的实际情况,建立了几种有代表性的压裂水平井产能公式<sup>[1-3]</sup>。李廷礼等利用复位势理论和叠加原理,研究了油气藏的稳态渗流模型<sup>[4-5]</sup>。岳建伟等借鉴前人研究成果,结合质量守恒定律,求解了压裂水平井耦合模型<sup>[6]</sup>。目前,压裂水平井稳态产能模型的研究主要采用保角变换理论、复位势理论和扰动椭圆理论3种方法<sup>[7]</sup>,在求解过程中均未考虑不同裂缝间的物性差异,并且针对气藏压裂水平井的产能计算<sup>[8-9]</sup>,大多采用了压力平方形式的简化公式。为此,笔者在前人耦合模型研究的基础上,引入等效井径模型<sup>[10]</sup>来研究多级压裂水平井稳态产能,这样处理不仅能够考虑多条裂缝间的物性差异,而且采用气藏拟压力形式进行计算使得产能模型的计算结果更为准确。

## 1 稳态产能模型

分析压裂水平井和压裂直井的裂缝渗流规律

可知,压裂水平井裂缝中流线在井筒附近发生径向汇聚。因此,压裂水平井的裂缝稳态渗流场,可以看成是压裂直井的裂缝渗流场与渗流半径为储层厚度一半的平面径向渗流场的复合。

笔者通过压裂直井等效井径模型,推导得到压裂水平井等效井径。由文献[10]可知压裂直井等效井径的表达式为

$$r_{we} = x_f \times \exp \left\{ -1 + \frac{1}{2} \left[ \left( 1 - \frac{x}{x_f} \right) \ln \left| 1 - \frac{x}{x_f} \right| + \left( 1 + \frac{x}{x_f} \right) \ln \left| 1 + \frac{x}{x_f} \right| \right] \right\} \quad (1)$$

式中:  $r_{we}$  为压裂直井的等效井径, m;  $x_f$  为裂缝的半长, m;  $x$  为水平井段上任意一点与水平井跟端的距离, m。

由于裂缝中流量呈均匀分布,根据 Hemanta 的结论<sup>[11-12]</sup>,  $x$  取 0.738,代入式(1),可得

$$r_{we} = 0.446 3 x_f \quad (2)$$

圆形封闭地层中压裂直井稳态产能方程为

$$q_{vf} = \frac{\pi K h T_{sc} (m_e - m_{wf})}{p_{sc} T \left\{ \ln \left( \frac{r_e}{x_f} \right) + 1 - \frac{1}{2} \left[ \left( 1 - \frac{x}{x_f} \right) \ln \left| 1 - \frac{x}{x_f} \right| + \left( 1 + \frac{x}{x_f} \right) \ln \left| 1 + \frac{x}{x_f} \right| \right] \right\}} \quad (3)$$

收稿日期:2013-03-06。

作者简介:张德良,男,在读硕士研究生,从事油气藏渗流、油气藏工程及数值模拟研究。联系电话:13558883154, E-mail:690857063@qq.com。

基金项目:国家杰出青年科学基金“油气藏渗流力学”(51125019),西南石油大学研究生创新基金“页岩气压裂井稳态产能研究”(GIFSS0703)。

式中： $q_{vf}$  为压裂直井产量， $m^3/s$ ； $K$  为储层渗透率， $10^{-3} \mu m^2$ ； $h$  为储层厚度， $m$ ； $T_{sc}$  为地面标准状况下温度， $K$ ； $m_e$  为与供给压力相对应的气体拟压力， $MPa^2/(mPa \cdot s)$ ； $m_{wf}$  为与井底压力相对应的气体拟压力， $MPa^2/(mPa \cdot s)$ ； $p_{sc}$  为地面压力， $MPa$ ； $T$  为油藏温度， $K$ ； $r_e$  为供给半径， $m$ 。

将式(1)和式(2)代入式(3)并简化为

$$q_{vf} = \frac{\pi K h T_{sc} (m_e - m_{wf})}{p_{sc} T \ln \frac{r_e}{0.446 26 x_{fi}}} \quad (4)$$

多级压裂水平井的等效井径需要将压裂直井渗流场与渗流半径为  $h/2$  的平面径向流场复合，其数学表达式为

$$r_{wehi} = 0.446 26 x_{fi} \left( \frac{2r_w}{h} \right)^{\frac{K_h}{K_i w}} \quad (5)$$

式中： $r_{wehi}$  为多级压裂水平井第  $i$  条裂缝的等效井径， $m$ ； $i$  为裂缝的编号； $x_{fi}$  为第  $i$  条裂缝的半长， $m$ ； $r_w$  为井眼半径， $m$ ； $K_f$  为裂缝的渗透率， $10^{-3} \mu m^2$ ； $w$  为缝宽， $m$ 。

应用叠加定理考虑多条裂缝干扰，得到不考虑水平井段管流的多级压裂水平井产能公式为

$$\psi_e - \psi_{wfi} = \frac{p_{sc} T}{\pi K h T_{sc}} \left[ Q_{fi} \ln \frac{r_e}{0.446 26 x_{fi} \left( \frac{2r_w}{h} \right)^{\frac{K_h}{K_i w}}} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N Q_{fj} \ln \frac{r_e}{r_{ij}} \right] \quad (6)$$

式中： $\psi_e$  为气藏原始地层压力对应的拟压力， $MPa^2/(mPa \cdot s)$ ； $\psi_{wfi}$  为与第  $i$  条裂缝根部压力相对应的拟压力， $MPa^2/(mPa \cdot s)$ ； $Q_{fi}$  和  $Q_{fj}$  分别为第  $i$  条裂缝和第  $j$  条裂缝的产量 ( $i \neq j$ )， $m^3/s$ ； $j$  为裂缝编号； $N$  为总裂缝条数； $r_{ij}$  为第  $i$  条裂缝和第  $j$  条裂缝之间的距离， $m$ 。

因压裂水平井的供给半径远大于水平井段长度，在此引入启动压力<sup>[13]</sup>，得到考虑启动压力梯度时多级压裂水平井产能模型为

$$\psi_e - \psi_{wfi} - \int_{\frac{L_h}{2}}^{r_e} \frac{2G p_R}{\mu Z} dr = \frac{p_{sc} T}{\pi K h T_{sc}} \left( Q_{fi} \ln \frac{r_e}{r_{wehi}} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N Q_{fj} \ln \frac{r_e}{r_{ij}} \right) \quad (7)$$

式中： $L_h$  为水平井段长度， $m$ ； $G$  为启动压力梯

度， $MPa/m$ ； $p_R$  为地层压力， $MPa$ ； $\mu$  为地层气体粘度， $mPa \cdot s$ ； $Z$  为气体偏差因子； $r$  为渗流半径， $m$ 。

由于水平段不存在重力损失，多级压裂水平井任意2条相邻裂缝间水平井段的管流拟压力降可表示为

$$\psi_{wf(i+1)a} - \psi_{wfib} = \Delta\psi_{acc} + \Delta\psi_{fric} \quad (8)$$

式中： $\psi_{wf(i+1)a}$  为第  $i+1$  条裂缝上部的拟压力， $MPa^2/(mPa \cdot s)$ ； $\psi_{wfib}$  为第  $i$  条裂缝下部的拟压力， $MPa^2/(mPa \cdot s)$ ； $\Delta\psi_{acc}$  为动量拟压力损失， $MPa^2/(mPa \cdot s)$ ； $\Delta\psi_{fric}$  为第  $i$  条裂缝的摩阻拟压力损失， $MPa^2/(mPa \cdot s)$ 。

式(8)表明，每个具有代表性的单元管段的拟压力降损失由摩阻拟压力损失和动量拟压力损失构成。由于2条裂缝间管段未进行补孔，无流体流入，故可忽略其动量拟压力损失；而裂缝与水平段交汇节点处距离很短，可忽略其摩阻拟压力损失。因此，完整的相邻裂缝管段间能量损失由相邻裂缝间的摩阻拟压力损失和交汇节点处的动量拟压力损失构成，对于微元管段的摩阻压力损失表达式为

$$G_w = - \frac{f M_{air} \gamma_g}{R} \times \frac{p_{sc}^2 Q_{sc}^2 T Z}{4 \pi^2 p r_w^5 T_{sc}^2} \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} f_1 = \frac{64}{Re} & Re \leq 2000 \\ \frac{1}{\sqrt{f_2}} = -2 \lg \left| \frac{e}{7.4 r_w} + \frac{6.81}{Re^{0.9}} \right| & Re \geq 4000 \\ f_3 = \lambda f_1 + (1 - \lambda) f_2 & 2000 < Re < 4000 \end{cases} \quad (10)$$

式中： $G_w$  为井筒中的压力梯度， $MPa/m$ ； $f$  为摩阻系数； $M_{air}$  为空气相对分子质量； $\gamma_g$  为地层气体相对密度； $R$  为气体常数， $J/(mol \cdot K)$ ； $Q_{sc}$  为地面条件下的管段流量， $m^3/s$ ； $Re$  为管流雷诺数； $f_1$ ， $f_2$  和  $f_3$  分别为层流、紊流和过渡流状态下的摩阻系数。

对式(9)积分，可得

$$\psi_{wf(i+1)b} - \psi_{wfa} = \frac{f}{\mu} \times \frac{M_{air} \gamma_g}{R} \times \frac{p_{sc}^2 Q_{sc(i+1)}^2 T d}{2 \pi^2 p r_w^5 T_{sc}^2} \quad (11)$$

式中： $\psi_{wf(i+1)b}$  为第  $i+1$  条裂缝下部的拟压力， $MPa^2/(mPa \cdot s)$ ； $\psi_{wfa}$  为第  $i$  条裂缝上部的拟压力， $MPa^2/(mPa \cdot s)$ ； $Q_{sc(i+1)}$  为第  $i+1$  条裂缝处的水平管段流量， $m^3/s$ ； $d$  为相邻裂缝间的距离， $m$ 。

裂缝与水平段交汇节点处的动量压力损失为

$$p_{wfia} - p_{wfib} = \rho_{ib} v_{ib}^2 - \rho_{ia} v_{ia}^2 = \frac{M_{air} \gamma_g p_{sc}^2 TZ}{R \pi^2 r_w^4 T_{sc}^2} \left( \frac{Q_{sc(i-1)}^2}{p_{wfib}} - \frac{Q_{sc i}^2}{p_{wfia}} \right) \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} Q_{sc i} = Q_{sc(i+1)} + Q_{scfi} & i < N \\ Q_{sc i} = Q_{scfi} & i = N \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $p_{wfia}$  和  $p_{wfib}$  分别为第  $i$  条裂缝与水平段交汇节点处上、下部压力, MPa;  $\rho_{ia}$  和  $\rho_{ib}$  分别为第  $i$  条裂缝交汇节点处上、下部密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $v_{ia}$  和  $v_{ib}$  分别为第  $i$  条裂缝交汇节点处上、下部流体的流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $Q_{sc(i-1)}$  和  $Q_{sc i}$  分别为第  $i-1$  和第  $i$  条裂缝处的水平管段流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{scfi}$  为第  $i$  条裂缝的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

须注意的是, 流体在距离垂直井段最远的那条裂缝与水平段交汇处的流动可视作弯曲管子中的流体流动, 不会因为质量变化而产生加速度损失, 即  $p_{wfNa} = p_{wfNb}$ 。综上所述, 低渗透气藏多级压裂水平井产能模型由式(7)、式(11)和式(12)构成。

## 2 模型求解

在模型推导过程中, 采用了气体拟压力形式, 求解时需要根据气藏的实际物性参数建立拟压力与压力插值表, 以便随时进行拟压力与压力的转换。

假设有  $N$  条裂缝, 每条裂缝与水平井跟端的距离为  $d_i$ , 第  $i$  条裂缝和第  $j$  条裂缝间的距离为  $d_{ij}$ , 从垂直端开始被裂缝分隔的第  $i$  段水平井段长度为  $L_i$ 。由于最后  $N+1$  段中无流体流动, 为盲段, 故可忽略  $L_{N+1}$ , 即  $L_i = d_{ij}$ 。为了求得每条裂缝的产量, 且降低方程中由于非线性影响而造成的不稳定性, 故采用迭代法进行求解。求解步骤分为4步: ①给定迭代初值,  $Q_{scfi}^0 = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ , 输入计算参数, 由井底压力开始向水平井指端计算压力分布; ②通过式(10)和式(11), 取  $p_{wfi}$  裂缝节点压力等于裂缝节点上部压力和下部压力的平均值, 迭代计算裂缝与水平段交汇节点处的拟压力; ③在计算完  $N$  个管段的裂缝根部压力  $p_{wfi}$  后, 根据压力与拟压力的关系, 将其转换为拟压力形式, 代入式(6), 可得到关于  $Q_{scfi}$  的  $N$  元线性方程组, 求解该方程组, 得到  $Q_{scfi}^n$  解向量 ( $n$  为迭代计算次数), 将该向量作为下一次迭代的初值, 即  $Q_{scfi}^{n+1} = Q_{scfi}^n$ ; ④重复步骤①—③, 直至

迭代满足收敛条件, 即  $\sum_{i=1}^n [Q_{scfi}^{n+1} - Q_{scfi}^n]^2 < 10^{-4}$ ,  $Q_{scfi}^{n+1}$  即为所求结果。

## 3 实例计算与分析

### 3.1 计算结果

在 Visual Studio 2008 C#编程环境中编制了模型及求解的计算程序, 并应用于中国西部某气藏水平井压裂产能研究。

计算参数包括: 气藏温度为  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , 气藏渗透率为  $0.1 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{m}^2$ , 地层压力为  $28.83 \text{ MPa}$ , 井筒半径为  $0.05 \text{ m}$ , 管壁粗糙度为  $0.15 \text{ mm}$ , 气体相对密度为  $0.58$ , 供给半径为  $800 \text{ m}$ , 井底压力为  $23.69 \text{ MPa}$ , 水平段长度为  $450 \text{ m}$ , 储层厚度为  $8 \text{ m}$ , 启动压力梯度为  $1 \times 10^{-3} \text{ MPa}/\text{m}$ , 共4条裂缝, 裂缝半长均为  $50 \text{ m}$ , 裂缝渗透率分别为  $30 \times 10^{-3}$ ,  $35 \times 10^{-3}$ ,  $35 \times 10^{-3}$  和  $30 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{m}^2$ , 裂缝宽度为  $0.005 \text{ m}$ , 裂缝与垂直段距离依次为  $100, 210, 290$  和  $400 \text{ m}$ 。

将计算参数代入新建模型, 计算得到总产量为  $11.357 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  (与实测产能误差为  $15.7\%$ ), 4条裂缝对应的产量分别为  $3.671 \times 10^4$ ,  $2.008 \times 10^4$ ,  $2.008 \times 10^4$  和  $3.670 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

分析裂缝产量分布(图1)发现, 4条裂缝对应产量呈近似对称分布, 指端和跟端裂缝产量最高, 中间裂缝产量偏低。这主要由多条裂缝干扰所致。由于中间裂缝对于总产量的贡献相对较小, 当以经济效益最大化作为单井开采原则时, 可适当缩短中间裂缝的长度, 甚至减少中间裂缝条数, 以获得最佳经济效益。试算结果表明, 在其他条件不变的前提下, 裂缝总数降为3条时, 总产量仅下降  $12.6\%$ 。

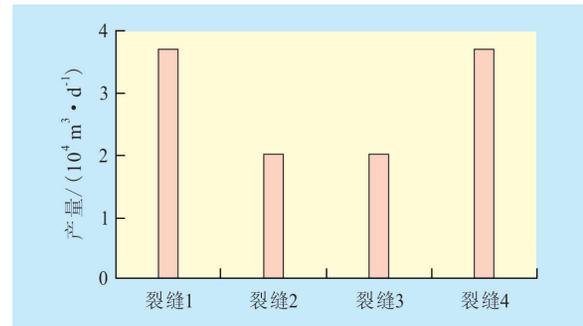


图1 裂缝产量分布

由水平井井筒压力分布(图2)可知, 低渗透气藏产能较低, 总体来说水平井管段压力的变化不大; 越靠近跟端, 压力下降略大, 而在水平井指端由于流量较小, 压力下降平缓。这是由于靠近跟端,

流量增大,摩阻和动量拟压力损失增大所致。

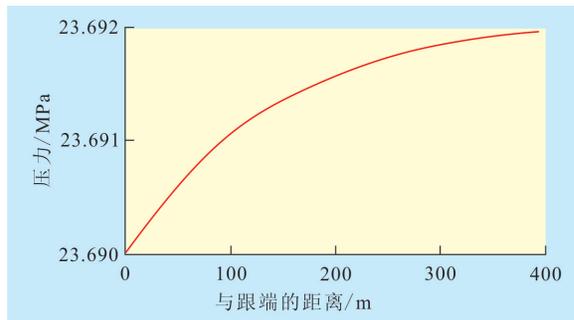


图2 水平井水平段井筒压力分布

### 3.2 影响因素

应用所建模型分析裂缝导流能力和缝长对于不同渗透率气藏多级压裂水平井稳态产能的影响。

在缝长分别为50和100m且其他计算参数保持不变的条件下,由缝长对于不同渗透率气藏单井产能增加倍数曲线(图3)可以看出,储层渗透率越高,缝长倍增后的增产效果越差。

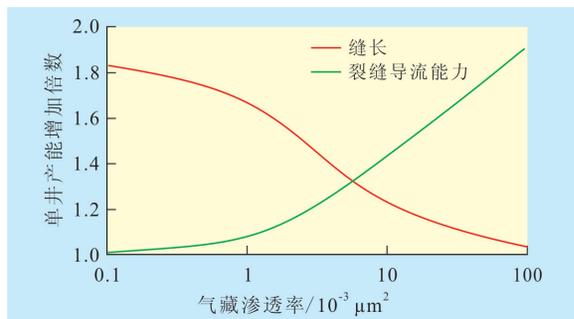


图3 缝长和裂缝导流能力对增产效果的影响

当渗透率为 $30 \times 10^{-3}$ 和 $60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 且保持其他参数不变时,分析裂缝导流能力对于不同气藏渗透率下单井产能增加倍数曲线(图3)可知,储层渗透率越低,裂缝导流能力倍增之后,增产效果越差。因此,对于低渗透气藏,应该采用尽可能延伸缝长的压裂工艺,对于高渗透气藏,尽可能提高裂缝导流能力,是获得良好增产效果的关键。

应用影响因素分析曲线(图3),笔者建立了优选储层造缝方式的定量评价方法。首先,提出定量判定准则:对于不同渗透率的储层,若仅倍增裂缝渗透率或倍增缝长,且改造后的产能增量小于原产能的10%,则认为采用该造缝方式不可取。其次,由图3可知,当产能增加倍数为1.1时,缝长和导流能力影响曲线对应的储层渗透率分别为 $38.95 \times 10^{-3}$ 和 $1.43 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。其意义是:当渗透率大于 $38.95 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,应通过提高裂缝导流能力的方式获得更好的增产效果;而当渗透率小于 $1.43 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,则应尽量采用能够延伸缝长的压裂工艺。因实际

渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,因此,在压裂施工中,应适当增加缝长才能获得更好的增产效果。

## 4 结论

推导了考虑水平井段管流的多级压裂水平井等效井径耦合模型,该模型考虑了多级压裂水平井裂缝物性参数不同的情况,使模型更加符合气藏实际,反映其产能规律。

在Visual Studio 2008 C#编程环境中编制了模型的求解程序,并分析了多级压裂水平井稳态产能的影响因素。结果表明:对于等长等渗的多条裂缝而言,裂缝产量是非均匀的,但呈近似对称分布,且两端裂缝的产量较中部裂缝高;由于低渗透气藏产能较低,因此水平井管段的压力变化不大;越靠近水平井跟端,流量越大,水平段压力梯度也随之变大;缝长是影响低渗透气藏产能的主要因素,而裂缝导流能力对其影响不大。

### 参考文献:

- [1] 何逸凡,廖新维,徐梦雅,等.低渗透气藏压裂水平井产能预测模型及其应用[J].油气地质与采收率,2012,19(4):93-96.
- [2] 杜殿发,侯加根,李冬冬,等.低渗透油藏直井水平井联合井网产能公式[J].油气地质与采收率,2012,19(2):64-66,71.
- [3] 李勇明,翟锐,高瑞民,等.水平井多段压裂后压力递减分析[J].油气地质与采收率,2012,19(4):66-70.
- [4] 李廷礼,李春兰,吴英,等.低渗透油藏压裂水平井产能计算新方法[J].中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(2):48-52.
- [5] 孙福街,韩树刚,程林松,等.低渗气藏压裂水平井渗流与井筒管流耦合模型[J].西南石油学院学报,2005,27(1):32-36.
- [6] 岳建伟,段永刚,青绍学,等.含多条裂缝的水平压裂气井产能研究[J].天然气工业,2004,24(10):102-104.
- [7] Penmatcha V R. Modeling of horizontal wells with pressure drop in the well[D]. Palo Alto: Stanford University, 1997.
- [8] 廉培庆,同登科,程林松,等.垂直压裂水平井非稳态条件下的产能分析[J].中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(4):98-102.
- [9] 郎兆新,张丽华.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.
- [10] 丁一萍,王晓冬,邢静.一种压裂水平井产能计算方法[J].特种油气藏,2008,15(2):64-68.
- [11] Hemanta M, Michael J. A parametric comparison of horizontal well and vertical well performance [J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6(2):209-216.
- [12] Soliman M Y. Fracturing aspects of horizontal wells [J]. Journal of Petroleum Technology, 1990, 42(8):966-973.
- [13] 汪全林,唐海,吕栋梁,等.低渗透油藏启动压力梯度实验研究[J].油气地质与采收率,2011,18(1):97-101.