

# 重复压裂气井产能模拟研究

任 岚 胡永全 赵金洲 冉乙钧 袁 东

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

**摘 要:** 由于重复压裂气井原有裂缝的失效程度难以评价, 导致重复压裂气井的产能预测常常有很大的误差。为此, 根据重复压裂气井的压前产量和含水率, 拟合了原有裂缝的有效率, 在考虑新裂缝和原有裂缝共同作用的情况下, 建立了气、水两相平面二维的裂缝-油藏数学模型, 通过对模型的数值求解, 对重复压裂气井进行了产能评价。研究表明, 在考虑新、老裂缝共同作用下的产能评价方法, 能更为准确地预测重复压裂后的生产动态情况, 对压裂时机确定、压后经济效益的预测都具有重要的指导意义。

**关键词:** 气井; 重复压裂; 产能预测; 数学模型; 产能评价

**中图分类号:** TE357.1<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890 (2006) 01-0053-03

水力压裂是有效开发低渗透油气藏必不可少的技术措施, 经过水力压裂后的油气井在生产过程中可能由于种种原因导致水力裂缝失效<sup>[1]</sup>, 因而会采取重复压裂措施以保证油气井稳产增产, 并提高油气采收率。早在20世纪五、六十年代, 国内外就开展了大量的重复压裂实践, 但由于重复压裂技术的理论研究工作远远落后于现场要求, 使重复压裂缺乏必要的、科学的、系统的理论指导, 导致大量的重复压裂作业没有取得理想的增产效果。

目前我国多数油气田都已进入开发中后期, 需要实施重复压裂作业的油气井越来越多, 迫切需要对其理论基础进行研究, 以更好地指导现场施工, 特别是对重复压裂后油气井的产能预测, 是评价重复压裂必要性的主要依据。为此, 笔者采用相关方法, 建立了重复压裂气井的产能模型, 并给出了求解方法及产能评价方法。

## 1 裂缝-油藏数学模型

### 1.1 基本假设

- 1) 地层具有岩石可压缩、非均质和各向异性;
- 2) 裂缝高度等于气层厚度;
- 3) 忽略流体的垂向流动, 气、水呈平面二维流动, 气、水间无质量交换;
- 4) 油藏中只有气、水两相, 且气、水相满足达西渗流规律, 忽略流体重力及毛管力作用;
- 5) 流体在油藏中等温渗流, 且在流动过程中不与孔隙介质发生物理化学反应;
- 6) 裂缝导流能力随位置和时间而变化。

### 1.2 数学模型的建立

#### 1.2.1 气、水两相基本渗流方程

根据以上基本假设, 由达西定律和质量守恒原

理<sup>[2]</sup>可推导出气、水两相的基本渗流方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{KK_{rg}\rho_g}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{KK_{rg}\rho_g}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + q_g = \frac{\partial(\phi\rho_g S_g)}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{KK_{rw}\rho_w}{\mu_w} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{KK_{rw}\rho_w}{\mu_w} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + q_w = \frac{\partial(\phi\rho_w S_w)}{\partial t} \quad (2)$$

在式(1)和式(2)中, 注入井 $q$ 取正, 生产井 $q$ 取负。

$$S_g + S_w = 1 \quad (3)$$

#### 1.2.2 边界条件

考虑有限地层封闭外边界:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=x_e} = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y=y_e} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

恒定压力外边界:

$$\begin{cases} p \Big|_{x=x_e} = p_i \\ p \Big|_{y=y_e} = p_i \end{cases} \quad (5)$$

恒定井底压力内边界:

$$p \Big|_{x=0, y=0} = p_{wf} \quad (6)$$

此外, 补充外边界:

收稿日期: 2005-06-06; 改回日期: 2005-11-30

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目“重复压裂工艺研究”(编号: 2001BA605A-05-02-03)及四川省应用基础项目“堵老缝压新缝重复压裂机理研究”(编号: 04JY029-119)资助

作者简介: 任岚(1979—), 男, 四川南部县人, 2003年毕业于西南石油学院石油工程系, 在读硕士研究生。

联系电话: (028) 83033333

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x}|_{x=0}=0 & y=0 \sim y_e \\ \frac{\partial p}{\partial y}|_{y=0}=0 & x=0 \sim y_e \end{cases} \quad (7)$$

### 1.2.3 初始条件

$$\begin{cases} p_g|_{t=0}=p_{gi} \\ S_g|_{t=0}=S_{gi} \end{cases} \quad (8)$$

式(1)~式(8)描述了重复压裂后裂缝-油藏系统的气、水两相平面二维流动数学模型。

## 2 模型求解及产能评价方法

### 2.1 网格划分及差分方程

考虑地层应力受诱导应力场的影响,井眼及近井地带存在应力重新定向,重压新裂缝垂直于初裂缝起裂,延伸一段距离再转向与初裂缝平行<sup>[1]</sup>。由于压裂井产量主要受裂缝控制区域的影响,只研究其新裂缝延伸区域单元,采用不均匀网格系统,对于靠近井底和裂缝附近,压力梯度大,网格取密一些,向外逐渐取稀疏<sup>[3]</sup>,如图1所示。

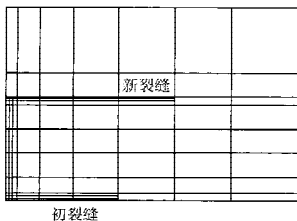


图1 网格系统

由式(1)和式(2),可推导出气、水综合渗流拟压力差分方程:

$$a_{i,j}\Psi_{i-1,j}^{n+1} + b_{i,j}\Psi_{i+1,j}^{n+1} + c_{i,j}\Psi_{i,j}^{n+1} + d_{i,j}\Psi_{i,j-1}^{n+1} + e_{i,j}\Psi_{i,j+1}^{n+1} = h_{i,j} \quad (9)$$

由式(2)可推导出含水饱和度差分方程:

$$A_{i,j}S_{wi-1,j}^{n+1} + B_{i,j}S_{wi+1,j}^{n+1} + C_{i,j}S_{wi,j}^{n+1} + D_{i,j}S_{wi,j-1}^{n+1} + E_{i,j}S_{wi,j+1}^{n+1} = H_{i,j} \quad (10)$$

式中,  $\Psi(p) = \int_0^p \left( \frac{KK_{rg}\rho_g}{\mu_g} + \frac{KK_{rw}\rho_w}{\mu_w} \right) dp$  为定义的气、水综合拟压力;  $a_{i,j}$ 、 $b_{i,j}$ 、 $c_{i,j}$ 、 $d_{i,j}$ 、 $e_{i,j}$ 、 $h_{i,j}$ 、 $A_{i,j}$ 、 $B_{i,j}$ 、 $C_{i,j}$ 、 $D_{i,j}$ 、 $E_{i,j}$ 、 $H_{i,j}$ 是与网格尺寸和地层参数有关的变量,在一定边界条件和初始条件情况下,式(9)和式(10)可以构成两套线性方程组。

### 2.2 边界条件的处理及数值求解方法<sup>[4]</sup>

#### 2.2.1 内边界处理

根据质量守恒原理,井所在网格,产量要作为井的源或汇合并到差分方程中,要处理如下内边界条件:

$$q' = \frac{(\Psi_{2,1} - \Psi_{1,1})\Delta y_1}{\Delta x_1} + \frac{(\Psi_{1,2} - \Psi_{1,1})\Delta x_1}{\Delta y_1} \quad (11)$$

由于定压生产,  $p_{1,1} = p_{wf}$ , 由拟压力定义可以得

到  $\Psi_{1,1}$ , 对  $q'$  分解再与原来系数合并,则需要用  $b_{1,1} - \frac{\Delta y_1}{\Delta x_1}$ ,  $e_{1,1} - \frac{\Delta x_1}{\Delta y_1}$ ,  $h_{1,1} - \left( \frac{\Delta y_1}{\Delta x_1} + \frac{\Delta x_1}{\Delta y_1} \right) \Psi_{1,1}$ , 来代替原方程的  $b_{1,1}$ ,  $e_{1,1}$ ,  $h_{1,1}$ 。

#### 2.2.2 外边界处理

对于封闭外边界,在边界网格外虚拟一排网格,令其压力和饱和度与边界网格的压力和饱和度相等;对于定压外边界,在边界网格外虚拟一排网格,令绝对渗透率等于边界上的渗透率,虚拟网格的压力为  $p_i$ , 含水饱和度为  $1 - S_{gm}$ 。

#### 2.2.3 数值求解方法

采用隐式求解拟压力和隐式求解饱和度交替求解的方法求解差分方程,用超松弛迭代法求解拟压力方程,得到气相压力和水相压力,将得到的压力作为已知条件,用超松弛迭代法再求解饱和度方程,得到含水饱和度和含气饱和度,通过这样的交替计算,直到模拟计算完设定的时间。

### 2.3 产量计算

由于取油藏的 1/4 为研究对象,根据前面的数学模型可推导重复压裂气井的产气量为:

$$q_g = 4q_1(1 - f_{w2,1}) + 2q_2(1 - f_{w1,2}) \quad (12)$$

将井下的产气量转化为地面标准状况下的产气量<sup>[5]</sup>:

$$Q_g = \frac{p_{wf}q_g}{ZT} \frac{Z_a T_a}{p_a} \quad (13)$$

$$\text{式(12)中, } q_1 = \frac{(\Psi_{2,1}^{n+1} - \Psi_{1,1})H\Delta y_1}{\Delta x_1}, \quad q_2 = \frac{(\Psi_{1,2}^{n+1} - \Psi_{1,1})H\Delta x_1}{\Delta y_1}, \quad f_w = \frac{K_{rw}S_w/\mu_w}{K_{rw}S_w/\mu_w + K_{rg}S_g/\mu_g}。$$

### 2.4 产能评价方法

已知重复压裂前油藏各参数,考虑地层中只有初裂缝存在,由上面给出的数值求解方法,假设关井后重新打开投产,保持含水饱和度不变,通过调整降低初裂缝的支撑长度和导流能力,使这时候的稳定产量与重复压裂前时刻的产量基本相等,通过这样的拟合,可以得到初裂缝的有效率。再考虑初裂缝和新裂缝的共同作用,由上面给出的数值求解方法就能得到重复压裂后的产能变化情况。

## 3 实例计算分析

基于上述模型的求解方法,笔者开发了一套气、水两相平面二维重复压裂后产能评价数值模拟软件。下面选取某气井的生产数据应用该模型进行实例计算。该井气层厚 11.3 m, 地层渗透率  $0.752 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 地层孔隙度 14.5%, 岩石压缩系数  $0.000\ 448 \text{ MPa}^{-1}$ , 压前日产气  $1.62 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 地层气粘度  $0.018\ 5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , 地层水粘度  $1.24 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , 地层温度  $81^\circ\text{C}$ , 地层水压缩系数  $0.002\ 1 \text{ MPa}^{-1}$ , 气体压缩

因子 0.72, 地层压力 8.6 MPa, 井底流压 6.3 MPa。

### 3.1 初裂缝有效率拟合

在初裂缝完全失效和未完全失效两种情况下, 基于上面的数据, 气井重复压裂前在新投产后产量随时间的变化关系如图 2 所示。从图 2 可以看出, 如果初裂缝完全失效, 稳定产气量大约  $1.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 比重复压裂前产气量  $1.62 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  明显偏低; 如果初裂缝未完全失效, 其稳定产气量与重复压裂前产气量比较一致。由此可以推断该气井初裂缝没有完全失效。通过调整初裂缝的参数, 拟合重复压裂前产气量, 可以得到初裂缝的有效率。

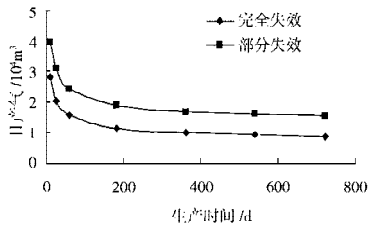


图 2 初裂缝有效率拟合

### 3.2 重复压裂后产能计算

图 3 是在考虑重复压裂形成的新裂缝和没有完全失效的初裂缝共同作用下, 模拟计算压裂后产量和实际生产动态随时间的变化关系。由图 3 可以看出, 考虑双裂缝情况的模拟产能计算与实际生产更加吻合。

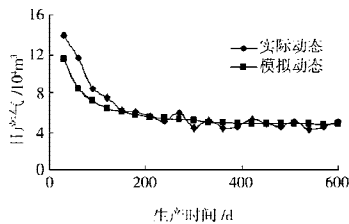


图 3 重复压裂后实际动态与模拟动态对比

## 4 结论及认识

1) 考虑初裂缝没有完全失效的前提下, 建立了

油藏平面二维气、水两相渗流数学模型, 通过数值求解的方法, 拟合了初裂缝的有效率。

2) 考虑初裂缝和重复压裂裂缝共同作用下的产能评价, 既符合油藏的实际情况, 又能有效地预测重复压裂后的气井产能动态。

3) 实例分析表明, 建立的动态模拟软件可较好地预测重复压裂气井的产能, 可为开发方案的优化设计提供依据。

## 符号说明

$K$  为地层渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $H$  为气层厚度,  $\text{m}$ ;  $K_{\text{rg}}$  为气的相对渗透率, 无因次;  $K_{\text{rw}}$  为水的相对渗透率, 无因次;  $\mu_{\text{g}}$  为气的粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $\mu_{\text{w}}$  为水的粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $\rho_{\text{g}}$  为气的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_{\text{w}}$  为水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $S_{\text{g}}$  为含气饱和度, 无因次;  $S_{\text{gi}}$  为重复压裂前含气饱和度, 无因次;  $\Delta y_1$  为纵向第一个网格步长,  $\text{m}$ ;  $S_{\text{w}}$  为含水饱和度, 无因次;  $\Delta x_1$  为横向第一个网格步长,  $\text{m}$ ;  $p$  为地层压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_{\text{a}}$  为标况压力,  $\text{MPa}$ ;  $q_{\text{g}}$  为地下产气量,  $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $p_{\text{i}}$  为重复压裂前地层压力,  $\text{MPa}$ ;  $f_{\text{w}}$  为含水率, 无因次;  $p_{\text{wf}}$  为井底流压,  $\text{MPa}$ ;  $\phi$  为地层孔隙度, 无因次;  $S_{\text{gm}}$  为束缚气饱和度, 无因次;  $Z$  为压缩因子, 无因次;  $T$  为地层温度,  $\text{K}$ ;  $Z_{\text{a}}$  为标况下压缩因子, 无因次;  $T_{\text{a}}$  为标况温度,  $\text{K}$ 。

## 参 考 文 献

- [1] 胡永全, 林辉, 赵金洲, 等. 重复压裂技术研究 [J]. 天然气工业, 2004, 24 (3): 72-75.
- [2] 李治平. 油气层渗流力学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [3] 赵金洲, 郭建春. 水力压裂效果动态预测 [J]. 石油钻采工艺, 1995, 17 (6): 55-61.
- [4] 李允. 油藏模拟 [M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1999.
- [5] 李士伦. 天然气工程 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.

[审稿 李相方]

## Simulation Study on Productivity of Refracted Gas Wells

Ren Lan Hu Yongquan Zhao jinzhou Ran Yijun Yuan Dong

(State Key Laboratory of Reservoir Geology & Development Engineering, Southwest Petroleum Institute, Chengdu, Sichuan, 610500, China)

**Abstract:** It is difficult to evaluate the failure extent of previous fractures in refracted gas wells, which results in a big error in productivity prediction. In order to solve the problem, the validity of previous fractures is matched based on the pre-fracturing yield and water cut data, and a 2D model with water-gas two phases is established to account for the effects of both previous and new fractures. By numerical calculation, the productivity of refracted gas well is estimated. According to the analyses of results derived from the model, the production performance is more precise and the model offers a better guideline for the determination of fracturing initiation and prediction of post-fracturing economic benefits.

**Key words:** gas well; multiple fracturing; productivity forecast; mathematical model; productivity evaluation