

文章编号: 1000-0887(2001) 04-0337-08

# 煤层压裂裂缝三维延伸模拟 及产量预测研究\*

郭大立<sup>1</sup>, 纪禄军<sup>2</sup>, 赵金洲<sup>3</sup>, 刘慈群<sup>4</sup>

(1. 西南石油学院 计算机科学系, 四川南充 637001; 2. 西南石油学院 石油工程系, 四川南充 637001;  
3. 西南石油学院 研究生院, 四川南充 637001; 4. 中国科学院 渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007)

(本刊编委刘慈群来稿)

摘要: 针对煤层气井的压裂特点和产出机理, 综合应用流体力学、线弹性断裂力学、传热学、计算数学和软件工程等方面的知识, 提出了煤层压裂裂缝三维延伸模型和产量动态预测模型, 其中裂缝三维延伸模型考虑了煤层、上下遮挡层之间的地应力和岩石力学参数变化的影响, 产量动态预测模型考虑了煤层气先解吸扩散后渗流入井的产出机理。在此基础上研制了煤层气井三维压裂优化设计软件, 并通过实例计算验证了其实用性和可靠性。

关键词: 煤层; 压裂; 裂缝三维延伸; 产量预测; 解吸; 扩散

中图分类号: TE357.1 文献标识码: A

## 符号说明

$A(x, t)$ —— $t$ 时刻缝内 $x$ 处的横截面面积, $m^2$ ;	$K$ —— 煤层绝对渗透率, $\mu m^2$ ;
$B_g, B_w$ —— 煤层气、煤层水的体积系数, 无因次;	$K_{I C1}, K_{I C2}, K_{I C3}$ —— 分别为煤层、盖层和底层的岩石断裂韧性, $MPa \cdot m^{0.5}$ ;
$b$ —— 朗格缪尔常数, $(MPa)^{-1}$ ;	$K_{rw}, K_{rg}$ —— 水相、气相相对渗透率, 无因次;
$C_g, C_R, C_w$ —— 煤层气、煤层岩石、煤层水的压缩系数, $(MPa)^{-1}$ ;	$K'$ —— 压裂液稠度系数, $MPa \cdot s^n$ ;
$C_p$ —— 施工砂比, 无因次;	$L_f$ —— 裂缝单翼长度, $m$ ;
$C_t(x, t)$ —— $t$ 时刻缝内 $x$ 处的综合滤失系数, $m/s^{0.5}$ ;	$n'$ —— 压裂液流态指数, 无因次;
$d_p$ —— 支撑剂粒径, $m$ ;	$p(x, t), p_f(x, t)$ —— $t$ 时刻缝内 $x$ 处的压力、液体的流压, $MPa$ ;
$E_1, E_2, E_3$ —— 分别为煤层、盖层和底层的岩石弹性模量, $MPa$ ;	$P, P_i, P_g, P_w$ —— 煤层压力、原始煤层压力、气相压力、水相压力, $MPa$ ;
$H, H_p$ —— 压裂层深度, 压裂层厚度, $m$ ;	$Q, q(x, t)$ —— 施工排量、 $t$ 时刻缝内 $x$ 处的流量, $m^3/s$ ;
$h(x, t), h_l(x, t), h_u(x, t)$ —— $t$ 时刻缝内 $x$ 处的裂缝总高度、下延缝高、上扩缝高, $m$ ;	$S_1, S_2, S_3$ —— 分别为煤层、盖层和底层的水平主应力, $MPa$ ;
$h$ —— 平均裂缝高度, $m$ ;	

\* 收稿日期: 1999\_07\_09; 修订日期: 2000\_11\_12

作者简介: 郭大立(1967—), 男, 四川人, 副教授;

刘慈群(1930—), 男, 江苏人, 研究员, 博士生导师。

$S_g, S_w$  —— 气相、水相饱和度, 小数;

$t_{inj}$  —— 施工注入时间, s;

$T_i$  —— 煤层温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$V_E, V_f, V_m$  —— 解吸气量、扩散气量、最大含气量,  
 $\text{m}^3/\text{t}$ ;

$V_{inj}$  —— 施工注入体积,  $\text{m}^3$ ;

$w(x, z, t), w(x, 0, t)$  ——  $t$  时刻缝内  $x$  处横截面上  $z$   
处、中心处的宽度, m;

$w$  —— 平均裂缝宽度, m;

$x_e, y_e$  —— 矩形煤层气藏的长度、宽度, m;

$V_1, V_2, V_3$  —— 分别为产层、盖层和底层的岩石泊松  
比, 无因次;

$\mu_g, \mu_w$  —— 煤层气、煤层水的粘度,  $\text{MPa}\cdot\text{s}$ ;

$\rho$  —— 压裂液效率, 无因次;

$\tau$  —— 解吸时间, s;

$\tau(x)$  ——  $t$  时刻压裂液到达缝内  $x$  处所需时间, s;

$\Phi$  —— 煤层孔隙度, 无因次。

## 引 言

煤层气作为一种储量巨大的新兴洁净能源日益受到世界各国的关注。煤层属裂缝发育的多孔隙储层, 其渗透性是影响煤层气含量及能否持续高效抽放的重要因素。但煤层渗透率通常很低, 除个别具有较高天然渗透性的区域外, 煤层甲烷生产井一般都需要进行压裂, 以便形成工业性气流。

煤层压裂在压裂流体、裂缝形状和产量预测等方面确实不同于常规地层的压裂<sup>[1~2]</sup>, 具体体现在: 1) 虽然采用清水作为压裂流体进行施工, 具有造缝能力低、携砂能力弱的特点, 但国内外煤层气井的压裂实践已经证实, 采用清水作为压裂流体进行压裂, 由于有效支撑裂缝不足所造成的气产量损失, 可以由避免(采用凝胶作为压裂流体进行压裂所造成的)地层伤害而增加的气产量来弥补; 2) 煤层井下模拟结果表明, 压裂产生的裂缝比预料的更为复杂, 可能出现水平裂缝与垂直裂缝构成的组合裂缝即 T 形裂缝; 3) 与天然气在常规地层中的储集不同, 煤层甲烷在煤层中的储集主要依赖于吸附作用, 当煤层压力降落到一定程度时, 煤中被吸附的甲烷开始从微孔隙表面分离(即所谓的解吸), 解吸后的气体通过基质和微孔隙扩散进入裂缝中, 再经裂缝流入井筒, 这种先解吸扩散后渗流入井的生产过程, 决定了其产量预测与一般的油气井存在很大差别。

## 1 裂缝三维延伸模拟

由于煤层与上下部岩石(如砂岩、泥岩、灰岩等)的岩石力学参数和地应力分布具有显著的差异, 因此对煤层压裂的裂缝三维延伸模型有特殊的要求, 这就是: 模型必须能够适应于各种地应力分布模式, 能够很好地考虑压裂层、上下遮挡层(盖层和底层)岩石力学参数如弹性模量、泊松比、断裂韧性和地应力的差异对裂缝三维延伸的影响。本文在研究国内外裂缝三维延伸模型<sup>[3~9]</sup>的基础上提出了一套新的裂缝三维延伸模型及其解法, 该模型考虑了煤层、上下遮挡层之间的地应力和岩石力学参数变化的影响, 能模拟各种地应力分布模式以及裂缝穿层前后的延伸情况。

### 1.1 裂缝三维延伸模型的建立

#### 1.1.1 缝中流体流动的连续性方程

沿裂缝长度方向取一长度为  $\Delta x$  的单元体, 由体积平衡原理得

$$-\frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = \frac{2h(x, t)C_i(x, t)}{\sqrt{t - \tau(x)}} + \frac{\partial A(x, t)}{\partial t}$$

#### 1.1.2 缝中流体流动的压降方程

参照 Nolte 对平行板中流体流动的压降方程引入管道形状因子  $\Phi(n')$  的方法, 可以确定出三维裂缝中的压降方程, 即

$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial x} = - 2^{n'+1} \left[ \frac{(2n'+1)q(x, t)}{n \Phi(n') h(x, t)} \right]^{n'} \frac{K'}{w(x, 0, t)^{2n'+1}},$$

其中  $\Phi(n') = \int_{-0.5}^{0.5} \left[ \frac{w(x, z, t)}{w(x, 0, t)} \right]^m d \left[ \frac{z}{h(x, t)} \right], \quad m = \frac{2n'+1}{n}.$

1.1.3 裂缝宽度方程

当裂缝上下都不穿层时, 裂缝内净压(流压- 最小水平主应力) 分布为

$$p(z) = p_f(x, t) - S \quad - l \leq z \leq l.$$

当裂缝上下都穿层时, 裂缝内净压分布为

$$p(z) = \begin{cases} p_f(x, t) - S_1 & z_a \leq z \leq l, \\ p_f(x, t) - S_2 & z_b \leq z \leq z_a \\ p_f(x, t) - S_3 & - l \leq z \leq z_b, \end{cases}$$

其中  $l = \frac{h(x, t)}{2}, z_a = \frac{H_p + h_1(x, t) - h_u(x, t)}{2}, z_b = \frac{-H_p - h_1(x, t) + h_u(x, t)}{2}.$

设  $p(z) = f(z) + g(z)$ , 其中  $f(z)$ 、 $g(z)$  分别是裂缝壁面上的偶、奇分布应力函数, 即

$$f(z) = \begin{cases} p_f - (S_2 + S_3)/2, \\ p_f - (S_1 + S_2)/2, \\ p_f - S_1, \\ p_f - S_1, \\ p_f - (S_1 + S_2)/2, \\ p_f - (S_2 + S_3)/2; \end{cases} \quad g(z) = \begin{cases} (S_3 - S_2)/2, & - z_b \leq z \leq l, \\ (S_1 - S_2)/2, & - z_a \leq z \leq - z_b, \\ 0, & 0 \leq z \leq z_a \\ 0, & z_a \leq z \leq 0, \\ - (S_1 - S_2)/2, & z_b \leq z \leq z_a, \\ - (S_3 - S_2)/2, & - l \leq z \leq z_b, \end{cases}$$

其中, 下标 1、2 和 3 分别表示当宽度剖面中心在产层、盖层和底层中时。

根据 England 和 Green 公式计算宽度剖面上任一坐标  $z$  处的宽度

$$w(x, z, t) = - 16 \frac{1 - \nu(z)^2}{E(z)} \int_{|z|}^l \frac{f(\xi) + zG(\xi)}{\sqrt{\xi^2 - z^2}} d\xi,$$

其中  $F(\xi) = - \frac{\xi}{2\pi} \int_0^\xi \frac{f(z)}{\sqrt{\xi^2 - z^2}} dz, G(\xi) = - \frac{1}{2\pi\xi} \int_0^\xi \frac{zg(z)}{\sqrt{\xi^2 - z^2}} dz,$

即可得宽度方程。限于篇幅, 从略。

1.1.4 裂缝高度方程

由于缝内承受的净压可能并不关于产层中心对称, 裂缝上下延伸的程度不一样, 因此裂缝内任一垂直横截面上的裂缝两端的应力强度因子不可能相等, 必须分别计算。由线弹性断裂力学理论, 当裂缝上下都穿层时, 裂缝横截面上的上下两端的应力强度因子可由下式计算

$$K_{I2} = \frac{1}{\sqrt{\pi l}} \left[ \int_{-l}^{z_b} + \int_{z_b}^{z_a} + \int_{z_a}^l \right] p(z) \sqrt{\frac{l+z}{l-z}} dz,$$

$$K_{I3} = - \frac{1}{\sqrt{\pi l}} \left[ \int_l^{z_a} + \int_{z_a}^{z_b} + \int_{z_b}^{-l} \right] p(z) \sqrt{\frac{l-z}{l+z}} dz.$$

综合前式, 并令  $K_{I2} = K_{I2}, K_{I3} = K_{I3}$ , 则得

$$\sqrt{\pi l} K_{I2} = (S_3 - S_1) \left[ \sqrt{l^2 - z_b^2} - \arcsin \frac{z_b}{l} \right] - (S_2 - S_1) \times \left[ \sqrt{l^2 - z_a^2} - \arcsin \frac{z_a}{l} \right] + \pi l \left[ p_f - \frac{S_2 + S_3}{2} \right],$$

$$- \sqrt{\pi l} K_{I C3} = (S_3 - S_1) \left[ \sqrt{l^2 - z_b^2} + l \arcsin \frac{z_b}{l} \right] - (S_2 - S_1) \times \left[ \sqrt{l^2 - z_a^2} + l \arcsin \frac{z_a}{l} \right] - \pi l \left[ p_f - \frac{S_2 + S_3}{2} \right].$$

当裂缝上下都穿层时, 裂缝上下两端的应力强度因子相等, 得

$$K_{I C1} = \frac{1}{\sqrt{\pi l}} \int_{-l}^l (p_f - S_1) \sqrt{\frac{l+z}{l-z}} dz = (p_f - S_1) \sqrt{\pi l}.$$

## 1.2 裂缝三维延伸模型的求解

上面导出的裂缝三维延伸数学模型经整理可构成下列关于  $p(x, t)$ ,  $h(x, t)$  和  $q(x, t)$  的微分方程组及其边界条件和初始条件

$$\begin{cases} \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = f_1[q(x, t), p(x, t), h(x, t), x, t], \\ \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} = f_2[q(x, t), p(x, t), h(x, t), x, t], \\ \frac{\partial h(x, t)}{\partial x} = f_3[q(x, t), p(x, t), h(x, t), x, t]; \\ \begin{cases} q(x, t) |_{x=L_f} = 0, \\ p(x, t) |_{x=L_f} = S_1, \\ h(x, t) |_{x=L_f} = 0; \end{cases} \begin{cases} q(x, t) |_{t=0} = 0, \\ p(x, t) |_{t=0} = S_1, \\ h(x, t) |_{t=0} = 0. \end{cases} \end{cases}$$

由于上述微分方程组及其边界条件和初始条件中含有未知变量  $L_f$ , 因此由它们所构成的裂缝三维延伸数学模型并不是完备的, 另外还有补充条件

$$q(x, t) |_{x=0} = Q(t)/2.$$

模型的求解方法为: 任意假设裂缝半长  $L$ , 则可对上述微分方程组及其边界条件和初始条件进行求解, 计算出井筒处的流量  $q(x, t) |_{x=0}$ ; 显然, 计算出的井筒处的流量应与裂缝半长  $L$  有关, 即应严格地记为  $q(x, t; L) |_{x=0}$ . 为此, 我们构造目标函数

$$f(L) = \int_0^T [q(x, t; L) |_{x=0} - Q(t)/2]^2 dt,$$

从而, 求裂缝半长的问题转化为求下述最优化问题

$$f(L_f) = \min\{f(L)\},$$

由于目标函数是单峰函数, 因此上述求裂缝长度的最优化问题不准用一般的最优化解法(如黄金分割法)进行求解.

## 2 产量动态预测

与天然气在常规地层中的储集不同, 煤层甲烷在煤层中的储集主要依赖于吸附作用. 当煤层压力降落到一定程度时, 煤中被吸附的甲烷开始从微孔隙表面分离, 即所谓的解吸. 由于割理中的压力降低, 解吸后的气体通过基质和微孔隙扩散进入裂缝中, 再经裂缝流入井筒. 煤层气井压裂后, 这种先解吸扩散后渗流入井的生产过程, 决定了其产量动态预测与一般的油气井<sup>[10]</sup>存在很大差别. 本文从煤层的渗流机理出发, 提出了一套新的带人工裂缝的数值模型, 以此来进行产量动态预测.

### 2.1 产量动态预测模型的建立

研究带人工裂缝的煤层气藏平面渗流系统, 矩形等厚煤层气藏中心有一口完善井, 经压裂

后形成双翼垂直裂缝,煤层气井以定压生产,封闭外边界或定压外边界,则问题归结为在给定的初始和边界条件下求解下列煤层裂缝系统渗流方程组:

$$\text{煤层气相} \quad \left. \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{KK_{rg}}{B_g \mu_g} \cdot P \right] + \frac{q_m}{B_g} = \frac{\phi}{B_g} \left[ \frac{\partial S_g}{\partial t} + S_g(C_R + C_g) \frac{\partial P}{\partial t} \right]; \end{array} \right\}$$

$$\text{煤层水相} \quad \left. \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{KK_{rw}}{B_w \mu_w} \cdot P \right] = \frac{\phi}{B_w} \left[ \frac{\partial S_w}{\partial t} + S_w(C_R + C_w) \frac{\partial P}{\partial t} \right]; \end{array} \right\}$$

$$\text{封闭外边界} \quad \left. \begin{array}{l} \frac{\partial P}{\partial y} \Big|_{y=y_e} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=x_e} = 0; \end{array} \right\}$$

$$\text{定压外边界} \quad P \Big|_{y=y_e} = P_e, \quad P \Big|_{x=x_e} = P_e;$$

$$\text{定压内边界} \quad P \Big|_{y=0} = P_{wf}, \quad P \Big|_{x=0} = P_{wf};$$

$$\text{初始条件} \quad P \Big|_{t=0} = P_i; \quad S_w \Big|_{t=0} = 1 - S_{ge};$$

$$\text{此外} \quad \left. \begin{array}{l} \frac{\partial P}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad (x = 0 \sim x_e), \quad \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (y = 0 \sim y_e). \end{array} \right\}$$

## 2.2 产量动态预测模型的求解

采用隐压显饱法求解上述煤层裂缝系统渗流方程组的差分方程。将压力与饱和度方程组分开顺序求解,用线松弛法求解气相压力方程后得气相与水相压力  $P_g$ 、 $P_w$ , 将它代入水相饱和度方程,用线松弛法再求得水相饱和度与气相饱和度。在求解过程中,解吸扩散项的差分处理如下:

煤层甲烷的解吸过程遵循朗格缪尔等温吸附方程<sup>[1]</sup>,即

$$V_E = V_m \left( 1 - \frac{bP}{1 + bP} \right).$$

煤层甲烷由基质向割理的扩散过程遵循菲克定律,即

$$\frac{\partial V_f}{\partial t} = - \frac{1}{\tau} [V_f - V_E].$$

由此即得解吸扩散项的差分形式为

$$(q_m)_{i,j}^n = \frac{(V_E)_{i,j}^n - (V_f)_{i,j}^n}{\Delta t},$$

$$(V_f)_{i,j}^n = (V_f)_{i,j}^{n-1} + (1 - e^{-\Delta t/\tau})(V_E)_{i,j}^n.$$

## 3 计算实例

根据上述裂缝三维延伸模型和产量动态预测模型,结合井筒温度场和裂缝温度场数值模型<sup>[11]</sup>、支撑剂运移及分布模型<sup>[12]</sup>、压裂参数优化设计方法等,研制了一套 Windows 环境下的煤层气井三维压裂优化设计软件,进行了大量的实例计算和设计。

表 1 为某一口煤层气井的压裂基本参数,压裂施工采用 5.5" 光套管注液方式,活性水(3% KCL + 0.15% PY\_11 + 清水)作为压裂流体,中等颗粒(0.3~0.6 mm)石英砂作为主要的支撑剂,尾追大颗粒(0.6~1.18 mm)石英砂以增加缝口导流能力,在前置液中加入 1 m<sup>3</sup> 粉砂以降低液体滤失。利用煤层气井三维压裂优化设计软件设计的最优施工程序见表 2。压裂施工按设计要求全部完成,施工一次成功率 100%,加砂符合率 100%,资料录取全准率 100%。在压裂过程中,由于盖层与产层之间的最小主应力相差很小(0.32 MPa),因此裂缝上窜严重,而底层与产层之间的最小主应力相差很大(7.99 MPa),因此裂缝往下延伸受阻,导致缝中压力升高,进一步加剧裂缝上窜。图 1 是软件模拟的压裂过程中裂缝高度的剖面图。由于煤层上部岩石的泊松比小、弹性模量大,形成裂缝上部长而窄;而煤层的泊松比大、弹性模量小,加之裂缝往下

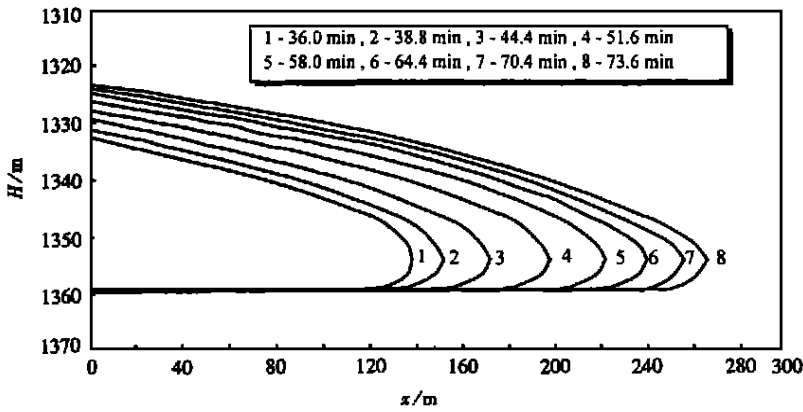


图1 压裂过程中裂缝高度剖面图

延伸受阻, 缝中压力升高, 导致裂缝在煤层内部水平延伸、加宽, 形成裂缝下部短而宽, 形成水平裂缝与垂直裂缝构成的组合裂缝即所谓的 T 形裂缝。图 2 是软件模拟的压裂停泵后井筒处裂缝宽度的剖面图。该井压裂后测试压力, 利用压裂后压力分析软件<sup>[13~14]</sup>处理压后压力递减数据, 获得的有关评价参数结果见表 3, 与软件模拟的结果十分吻合; 利用本文提供的方法模拟的压后产气量和产水量与实际生产情况也较为吻合, 见图 3。

表 1 压裂基本参数

压裂参数	数值	压裂参数	数值
压裂层段 $H/m$	1 349~ 1 359	底层泊松比 $\nu_3$ (无因次)	0. 16
煤层渗透率 $K/\mu\text{m}^2$	0. 000 14	盖层弹性模量( $E_2/\text{MPa}$ )	15 350
煤层孔隙度 $\Phi/(%)$	2. 77	煤层弹性模量( $E_1/\text{MPa}$ )	3 200
地层压力 $P_i/\text{MPa}$	19. 45	底层弹性模量 $E_3/\text{MPa}$	21 130
地层温度 $T_i/^\circ\text{C}$	50	盖层最小主应力 $S_2/\text{MPa}$	24. 02
盖层泊松比 $\nu_2$ (无因次)	0. 25	煤层最小主应力 $S_1/\text{MPa}$	23. 7
煤层泊松比 $\nu_1$ (无因次)	0. 36	底层最小主应力 $S_3/\text{MPa}$	31. 69

表 2 泵注程序

序号	作业内容	总量 $V_{inj}/\text{m}^3$	砂比 $C_p/(%)$	排量 $Q/\text{m}^3/\text{min}$	时间 $t_{inj}/\text{min}$	支撑剂粒径 $d_p/\text{mm}$	备注
1	前置液	270	0	7. 5	0. 0~ 36. 0	0	活性水
2	前置液	21	5	7. 5	36. 0~ 38. 8	0. 212~ 0. 425	活性水
3	携砂液	42	5	7. 5	38. 8~ 44. 4	0. 3~ 0. 6	石英砂
4	携砂液	54	8	7. 5	44. 4~ 51. 6	0. 3~ 0. 6	石英砂
5	携砂液	51	12	7. 5	51. 6~ 58. 0	0. 3~ 0. 6	石英砂
6	携砂液	48	16	7. 5	58. 0~ 64. 4	0. 3~ 0. 6	石英砂
7	携砂液	45	20	7. 5	64. 4~ 70. 4	0. 3~ 0. 6	石英砂
8	携砂液	24	20	7. 5	70. 4~ 73. 6	0. 6~ 1. 18	石英砂

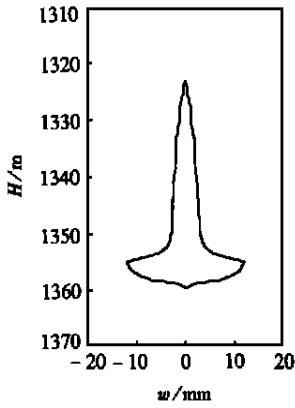


图2 裂缝宽度剖面图

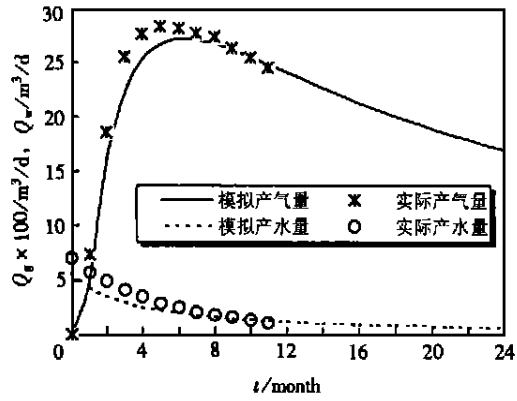


图3 压后产气量和产水量

表3

解释结果与模拟结果对比

压裂参数	裂缝半长 $L_f/m$	裂缝宽度 $w/mm$	裂缝高度 $h/m$	压裂液效率 $\rho/(%)$
解释结果	263	3.88	24.15	8.89
模拟结果	266	3.95	23.42	8.87

## 4 结 论

(1) 针对煤层气井的压裂特点和产出机理,提出了煤层压裂裂缝三维延伸模型和产量动态预测模型,在此基础上研制了煤层气井三维压裂优化设计软件,并通过实例计算验证了其实用性和可靠性。

(2) 建立的煤层压裂裂缝三维延伸模型考虑了煤层、上下遮挡层之间的地应力和岩石力学参数变化的影响,能模拟各种地应力分布模式以及裂缝穿层前后的延伸情况。

(3) 煤层压裂产生的裂缝比预料的更为复杂,可能出现T形裂缝,这是由于煤层岩石力学参数和地应力分布而引起的,也是煤层压裂的一大特点。

(4) 建立的煤层气井产量动态预测模型考虑了煤层气先解吸扩散后渗流入井的产出机理,因此能够较为准确地预测煤层气井的生产动态。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Palmer I D, Metcalfe R S, Yee D, et al. 煤层甲烷储层评价及生产技术[M]. 秦勇,曾勇译. 江苏:中国矿业大学出版社,1996.
- [2] ZHAO Jinzhou, GUO Dalu, HU Yongquan. Hydraulic fracturing technique for low permeability coalbed methane gas reservoirs[A]. SPE 38095, 1997.
- [3] Van Eekelen. Hydraulic fracture geometry: fracture containment in layered formation[J]. Soc Pet Eng J, 1982, 22(6): 341—349.
- [4] Advani S H. Finite element model simulations associated with hydraulic fracturing[A]. SPE/DOC 8941, 1980.
- [5] Settari A, Cleary M P. Three-dimensional simulation of hydraulic fracturing[J]. J Pet Tech, 1984, 36(7): 1170—1190.
- [6] Settari A, Cleary M P. Development and testing of a pseudo-three-dimensional model of hydraulic

- fracture geometry(P3DH)[ A] . SPE 10505, 1982.
- [7] Palmer I D, Carrol H B. Numerical solution for height and elonged hydraulic fracturing[ A] . SPE 11627, 1983.
- [8] Palmer I D, Craig H R. Modeling of asymeric vertical growth in elongated hydraulic fracture and application to first MWX stimulation[ A] . SPE 12879, 1984.
- [9] 张平, 赵金洲, 郭大立, 等. 水力压裂裂缝三维延伸数值模拟研究[J]. 石油钻采工艺, 1997, **19**(3): 53—59.
- [10] 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.
- [11] 赵金洲, 任书泉. 考虑温度影响时裂缝几何尺寸的数值计算模型和方法[J]. 石油学报, 1987, **8**(1): 71—82.
- [12] ZHAO Jin\_zhou, HU Yong\_quan, GUO Da\_li. Moving and distribution of proppant\_laden slurry in the fracture[ A] . In: The 27th Annual Meeting of the Fine Particle Society [ C] . 1996.
- [13] 郭大立, 陈汶斌, 赵金洲. 压裂后压力递减分析新方法[ J] . 石油钻采工艺, 1997, **19**(4): 70—73.
- [14] 张平, 郭大立, 陈汶斌, 等. 压裂后压力测试资料分析解释技术[ J] . 天然气工业, 1997, **17**(5): 55—57.

## 3D Fracture Propagation Simulation and Production Prediction in Coalbed

GUO Da\_li<sup>1</sup>, Ji Lu\_jun<sup>2</sup>, ZHAO Jin\_zhou<sup>3</sup>, LIU Ci\_qun<sup>4</sup>

(1. Department of Computer Science, Southwest Petroleum Institute, Nanchong, Sichuan 637001, P R China;

2. Department of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum Institute, Nanchong, Sichuan 637001, P R China;

3. Department of Post Graduate, Southwest Petroleum Institute, Nanchong, Sichuan 637001, P R China;

4. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Science, Langfang, Hebei 065007, P R China)

**Abstract:** In accordance with the fracturing and producing mechanism in coalbed methane well, and combining the knowledge of fluid mechanics, linear elastic fracture mechanics, thermal transfer, computing mathematics and software engineering, the three\_dimensional hydraulic fracture propagation and dynamical production predicting models for coalbed methane well is put forward. The fracture propagation model takes the variation of rock mechanical properties and in\_situ stress distribution into consideration. The dynamic performance prediction model takes the gas production mechanism into consideration. With these models, a three\_dimensional hydraulic fracturing optimum design software for coalbed methane well is developed, and its practicality and reliability have been proved by example computation.

**Key words:** coalbed; fracturing; three\_dimensional fracture propagation; production predicting; desorption; diffusion