

气井非达西流射孔完井的有限元数值模拟研究

唐愉拉 潘迎德 祝渝培

(西南石油学院开发系)

提 要

根据气井射孔非达西流的偏微分方程和边界条件,通过建立离散化的有限元模型,采用迭代法准确求出各部分单元的传导系数,获得了气井非达西流射孔完井在不同参数下的产率比和表皮系数。文中全面分析了12个影响因素与气井产率比的关系,讨论了各因素影响的重要性层次。研究结果得到的气井射孔规律与油井大不相同,许多规律为首次发现。

关键词 射孔 数值模拟 气井 非达西流 有限元法

1 气井射孔渗流场偏微分方程及变分方程

设气体密度为 ρ ,渗流速度为 v ,根据质量守恒原理对稳定渗流有

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0 \quad (1)$$

对高速的非达西流,根据Forcheime方程有

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu v_x}{K_x} + \beta_x \rho v_x^2 \quad (2)$$

式中, p 为压力; K_x 为沿 x 方向的渗透率; v_x 为沿 x 方向的速度; β_x 为沿 x 方向的紊流系数。由Firoozabadi和Katz^[7]关系

$$\beta_x = \frac{2.33 \times 10^{10}}{K_x} \quad (3)$$

由气体状态方程

$$\rho = 28.97 \gamma_g P / (8314.3 T z) \quad (4)$$

式中, T 为温度, z 、 μ 可由经验公式给出。根据(2)式有

$$\rho v_x = T_{xx} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5)$$

式中

$$T_{xx} = K_x \rho / (\mu + \beta_x K_x \rho v_x) \quad (6)$$

同理,在 y 、 z 方向有类似(2)、(3)、(5)、(6)相应的式子,只需将 x 换为 y 或 z 。由(1)式和(5)式并对应 y 、 z 方向,有

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xx} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yy} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(T_{zz} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0 \quad (7)$$

T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{zz} 见(6)式,称为沿 x 、 y 、 z 方向的传导系数。它们是 ρ 、 v 的函数,或者说是 p 的函数。

设在 S_1 面上压力为已知 φ ,而 s_2 是不渗透边界, n_2 为 s_2 的外法线方向,则

$$p|_{s_1} = \varphi \quad (8)$$

$$v|_{n_2} = 0 \quad (9)$$

在渗透率间断面 s_3 上(污染带或压实带边界),设 s_3 左右两侧法线方向为 n_3^- , n_3^+ ,则

$$p|_{s_3^+} = p|_{s_3^-} \quad (10)$$

$$v|_{n_3^-} = v|_{n_3^+} \quad (11)$$

方程(7)~(11)、(6)、(4)、(3)构成了气井射孔非达西流井底渗流的完整偏微分方程。

对理想气体达西流射孔井底渗流场有

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial p^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial p^2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial p^2}{\partial z} \right) = 0 \quad (12)$$

$$p^2|_{s_1} = \varphi^2 = \varphi_1 \quad (13)$$

$$v|_{n_2} = 0 \quad (14)$$

$$p^2|_{s_3^+} = p^2|_{s_3^-} \quad (15a)$$

$$v|_{n_3^-} = v|_{n_3^+} \quad (15b)$$

相应于(7)~(11)的等价变分方程为:寻求一个 p , $p \in C^2(\Omega) \cap v_\varphi$,使对任意 $v \in v_0$ 都有

$$\iiint_{\Omega} [T_{xx} P_x V_x + T_{yy} P_y V_y + T_{zz} P_z V_z] dx dy dz = 0 \quad (16)$$

等价于(12)~(15)的变分方程是:寻求一个 P^* , $P^* = P^2$, $P^* \in C^2(\Omega) \cap V_{\varphi_1}$,使对任意 $V \in V_0$ 有

$$\iiint_{\Omega} [K_x P_x^* V_x + K_y P_y^* V_y + K_z P_z^* V_z] dx dy dz = 0 \quad (17)$$

2 有限元方法构造和求解

变分方程(16)可通过类似于文献[8]的方法构造有限元模型求解,即将研究区域剖分成有限个小单元,在每个单元上用插值函数逼近真实函数,构造单元刚度矩阵,进行总刚度矩阵合成,处理约束边界条件,求解网格节点上的压力,最后求得射孔井的产量、产率比等指标。

但这里问题的复杂性在于 T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{zz} 是压力的函数,在尚未解出压力之前各单元内的 T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{zz} 值为未知数按一般有限元方程将无法求解。

2.1 有限元计算思路和步骤

(1) 假设流动符合达西定律。在进行有限元网格剖分和自动生成各单元信息之后,用文献[8]的方法求解变分方程(17)。比较(16)和(17)式,(17)式中 K_x 、 K_y 、 K_z 的作用类似于(16)式中 T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{zz} 的作用。由于每一剖分单元 K_x 、 K_y 、 K_z 都是确定的,故可以求得函数 P^* 在每一剖分结点上的值,而节点的压力 $P = \sqrt{P^*}$,这样就求得了各结点上的压力。

(2) 根据已经解出的压力分布,编制一个子程序求出各单元的传导系数 T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{zz} 。

(3) 利用有限元程序求得变分方程(16)的解 P (用各个结点上的压力值表示),从而

求得气井非达西流射孔井的流量和产率比 PR 。

(4) 由于第二步中传导系数是根据理想气体达西流压力分布计算出的, 因而是 不准确的。为此, 再按第三步所获得的压力分布, 利用求 T 的子程序重新计算一个较准确的传导系数 T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{zz} 。

(5) 重复第三、四步, 逐渐求得准确的压力分布, 产率比和传导系数, 这种迭代过程一直进行到以下条件满足为止:

$$|PR^{(n)} - PR^{(n-1)}| < \varepsilon \quad (18)$$

上式中, $PR^{(n)}$ 、 $PR^{(n-1)}$ ——第 n 次、 $(n-1)$ 次迭代所求得的气井非达西流射孔井的产率比。根据我们的经验, 一般 $n=6$ 时即可。

2.2 传导系数 T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{zz} 的计算

考察(5)式可知 T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{zz} 和 P 、 V_x 、 V_y 、 V_z 有关。每个单元内 P 可由(4)式计算, 关键是要计算单元内的速度 V_x 、 V_y 、 V_z 。

2.2.1 V_x 、 V_y 、 V_z 的计算

根据(2)式, 可以导出

$$V_x = (-\mu + \sqrt{\mu^2 + 4\beta_x K^2 \rho P_x}) / (2\beta_x K \rho) \quad (19)$$

y 、 z 方向类似。

2.2.2 P_x 、 P_y 、 P_z 的计算

以六面体剖分单元为例说明之。在任意单元 e^a 上, 压力函数 P 可用插值基函数 N_i 的线性组合构成的插值函数 P^{e^a} 来近似表示

$$P^{e^a} = \sum_{i=1}^8 N_i P_i \quad (20)$$

上式中 $i=1, \dots, 8$ 表示六面体单元的八个结点, P_i 是 i 结点上的压力值, N_i 是 i 结点上的插值基函数

$$N_i = \frac{1}{8} (1 + \xi_i \xi) (1 + \eta_i \eta) (1 + \zeta_i \zeta), \quad i=1, \dots, 8 \quad (21)$$

式中 ξ 、 η 、 ζ 是局部坐标, 通过等参元坐标变换将总体坐标 x 、 y 、 z 下的任意六面体变换成局部坐标 ξ 、 η 、 ζ 下的标准六面体, ξ_i 、 η_i 、 ζ_i 是标准六面体 i 结点上的局部坐标值(已知), 坐标等参元变换为

$$x = \sum_{i=1}^8 x_i N_i \quad (22a)$$

$$y = \sum_{i=1}^8 y_i N_i \quad (22b)$$

$$z = \sum_{i=1}^8 z_i N_i \quad (22c)$$

由式(20)两端对 x 、 y 、 z 求导得

$$p_x = \sum_{i=1}^8 N_{ix} \cdot p_i \quad (23a)$$

$$p_y = \sum_{i=1}^8 N_{iy} \cdot p_i \quad (23b)$$

$$p_z = \sum_{i=1}^8 N_{iz} p_i \quad (23c)$$

必须将 N_{ix} 、 N_{iy} 、 N_{iz} 表示出来，由 (21) 式两端求导得

$$N_{ix} = \frac{1}{8} \left[\xi_i \xi_x (1 + \eta_i \eta) (1 + \zeta_i \zeta) + \eta_i \eta_x (1 + \xi_i \xi) (1 + \zeta_i \zeta) + \zeta_i \zeta_x (1 + \xi_i \xi) (1 + \eta_i \eta) \right] \quad (24)$$

N_{iy} 、 N_{iz} 类似于 N_{ix} 。上式中涉及到 ξ 、 η 、 ζ 对 x 、 y 、 z 的导数，可由 (22) 式分别对 x 、 y 、 z 两端求导而得。设

$$AJJ = \sum_{i=1}^8 x_i \xi_i N_i / (1 + \xi_i \xi) \quad (25a)$$

$$BJJ = \sum_{i=1}^8 x_i \eta_i N_i / (1 + \eta_i \eta) \quad (25b)$$

$$CJJ = \sum_{i=1}^8 x_i \zeta_i N_i / (1 + \zeta_i \zeta) \quad (25c)$$

$$DJJ = \sum_{i=1}^8 y_i \xi_i N_i / (1 + \xi_i \xi) \quad (25d)$$

$$EJJ = \sum_{i=1}^8 y_i \eta_i N_i / (1 + \eta_i \eta) \quad (25e)$$

$$FJJ = \sum_{i=1}^8 y_i \zeta_i N_i / (1 + \zeta_i \zeta) \quad (25f)$$

$$GJJ = \sum_{i=1}^8 z_i \xi_i N_i / (1 + \xi_i \xi) \quad (25g)$$

$$HJJ = \sum_{i=1}^8 z_i \eta_i N_i / (1 + \eta_i \eta) \quad (25h)$$

$$OJJ = \sum_{i=1}^8 z_i \zeta_i N_i / (1 + \zeta_i \zeta) \quad (25q)$$

则有

$$\begin{pmatrix} AJJ, BJJ, CJJ \\ DJJ, EJJ, FJJ \\ GJJ, HJJ, QJJ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_x \\ \eta_x \\ \zeta_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (26a)$$

$$\begin{pmatrix} AJJ, BJJ, CJJ \\ DJJ, EJJ, FJJ \\ GJJ, HJJ, QJJ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_y \\ \eta_y \\ \zeta_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (26b)$$

$$\begin{pmatrix} A_{JJ} & B_{JJ} & C_{JJ} \\ D_{JJ} & E_{JJ} & F_{JJ} \\ G_{JJ} & H_{JJ} & Q_{JJ} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_z \\ \eta_z \\ \zeta_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (26c)$$

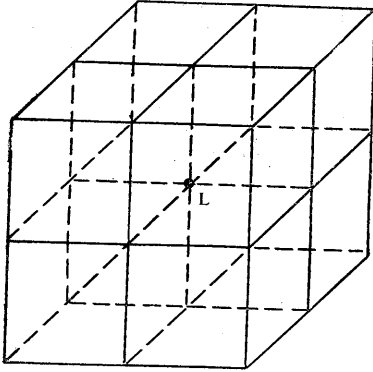


图 1 结点L及其相关单元

Fig.1 Node L and its interrelated element

根据克莱姆法则可求得 ξ 、 η 、 ζ 对 x 、 y 、 z 的偏导数。

2.2.3 计算 P_x, P_y, P_z 的子程序框图

对于任一节点 L ，设可能与其相关的单元为 e^L （例如从单元序号为 $LE1$ 直到 $LE2$ ）。设 e^L 的结点局部编码为 J （ $J=1, \dots, 8$ ），用数组 $II(J, e^L)$ 表示 e^L 单元局部编码为 J 的结点对应的总体结点编号，只有 e^L 单元某一结点局部编码对应的总体编码为 L 时，才认为 e^L 是 L 结点的相关单元。 L 结点周围的相关单元如图1所示。

既然 L 结点有许多个相关单元，那么在每一个相关单元 e^L 上都可按式(25)、(26)求 ξ 、 η 、 ζ 对 x 、 y 、 z 的导数，按(24)式求 N_{ix} 、 N_{iy} 、 N_{iz} ，按(23)式求 P_x 、 P_y 、 P_z 。到底 L 结点上的 P_x 、 P_y 、 P_z 为多大呢？我们可以由每一相关单元 e^L 上求出的 L 结点处的 P_x 、 P_y 、 P_z 按单元的雅可比行列式值进行加权平均^[9]，并将其记录在数组 $P_x(L)$ 、 $P_y(L)$ 、 $P_z(L)$ 中。设区域总结点数为 NGT ，每一结点处的压力用 F 数组表示，

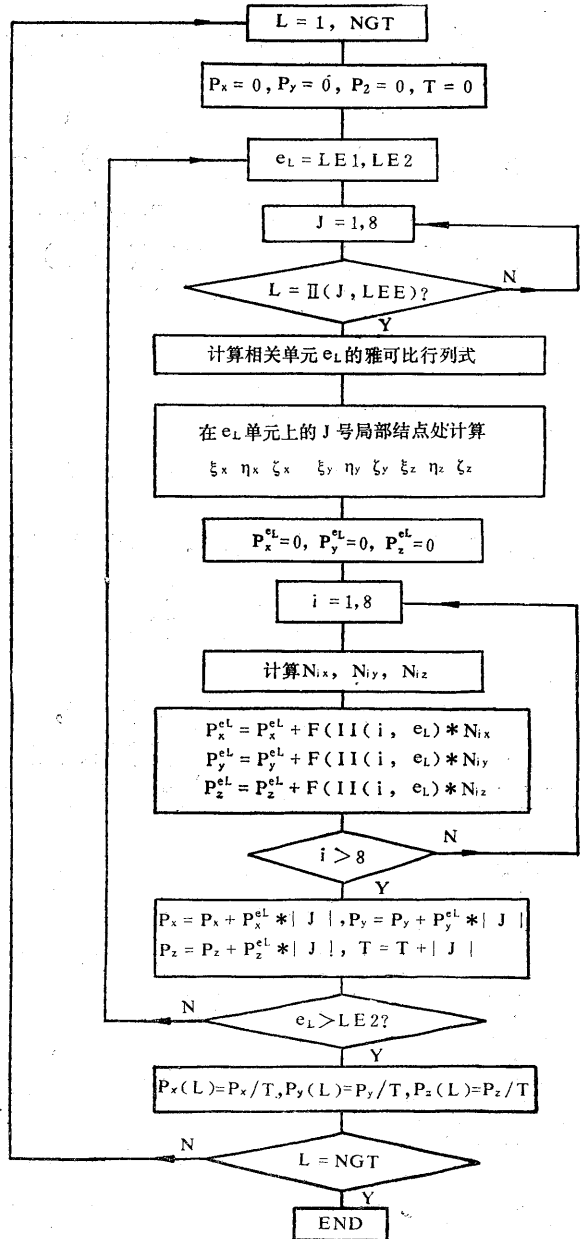


图 2 计算有限元各结点处压力梯度 P_x 、 P_y 、 P_z 的程序框图

Fig.2 Block diagram of computing pressure gradient P_x, P_y, P_z at each node by the method of finite element

下面给出计算 $P_x(L)$ 、 $P_y(L)$ 、 $P_z(L)$ 的程序粗框图(图2)。

计算出了 $P_x(L)$ 、 $P_y(L)$ 、 $P_z(L)$,不妨用六面体八个节点 P_x 、 P_y 、 P_z 的平均值来做为一个单元体内压力 P 对 X 、 Y 、 Z 导数的平均值。最后由(19)、(4)、(3)、(6)可求得 T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{zz} 。

为避免计算过程中因单位混乱可能引起的错误,我们在整个计算中统一采用[cm-g-s]制:

$$\mu - \text{g}/(\text{s}\cdot\text{cm}), 1\text{cp} = 10^{-2}\text{g}/(\text{s}\cdot\text{cm}); \beta - \frac{1}{\text{cm}}, 1 \frac{1}{\text{ft}} = \frac{1}{30.48} \frac{1}{\text{cm}};$$

$$K - \text{cm}^2, 1\mu\text{m}^2 = 10^{-8}\text{cm}^2; P - \text{g}/\text{cm}^3;$$

$$P - \text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}^2), 1\text{MPa} = 10^7\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}^2); T - ^\circ\text{K};$$

$$L - \text{cm}; U_x - \text{cm}/\text{s}; Q - \text{cm}^3/\text{s}$$

3 结果分析

3.1 产率比PR的定义

$$PR = \frac{Q_{pa}}{Q_{ga}}$$

式中, PR 为射孔气井的产率比, Q_{pa} 为射孔气井的非达西流产量, Q_{ga} 为裸眼气井非达西流的产量。

3.2 影响气井射孔产率比的因素及相对重要性次序

3.2.1 影响气井产率比的因素

影响气井射孔产率比主要有13个因素,包括孔深、孔密、孔径、相位、布孔格式,压实厚度,压实程度、污染深度、井筒半径、生产压差、地层渗透率、垂向与径向渗透率比值 K_z/K_r 。值得注意的是,油井处于射孔达西流动时,生产压差、地层渗透率对产率比 PR 没有影响。

3.2.2 影响因素的相对重要(显著性)次序

(1) 孔眼未穿透钻井污染区 此时影响因素的相对重要性次序:污染程度、孔深、孔密、孔径、压实程度,井筒半径、 K_z/K_r 、相位角、生产压差、污染深度、压实厚度、地层渗透率。此时与油井射孔动态大不相同的是钻井污染程度和孔径的影响。在油井射孔时污染程度的影响远没有孔深、孔密的影响显著,而气井由于非达西流的影响使污染程度的作用排在了第1位;油井射孔时孔径的影响并不显著,而气井非达西流射孔时孔径的影响成为很显著的因素,排在第4位。

(2) 孔眼射穿了钻井污染区 此时影响因素的相对重要性秩序依次为:孔密、孔径、污染程度、 K_z/K_r 、井筒半径、生产压差、孔深、地层渗透率、压实程度、相位角、压实厚度、污染深度。此时污染程度的影响已退居第三位,但仍是显著的因素,亦比油井时的作用明显。孔径的作用更显著了,而孔深则处于不显著地位,但在油井达西流射孔时孔深的影响总是比孔径明显的。

以上结果是采用本有限元模型进行正交回归组合性数值分析实验获得的。

3.3 气井非达西流射孔动态的单因素分析

本文将仅限于讨论气井非达西流射孔的特殊性,而对与油井射孔相类似的规律不再赘述。所谓单因素分析是指在给定的参数下,通过改变其中一个参数来考察该参数对射孔井产率比的影响,而其他参数固定不变。给定的参数是:孔密 $DEN=20$ 孔/m、孔径 $PD=13$ mm、相位角 $PHA=90^\circ$ 、压实厚度 $CZH=12$ mm、压实程度 $CZC=0.2$ 、污染深度 $DH=250$ mm、污染程度 $DC=0.5$ 、井筒半径 $R_w=100$ mm、生产压差 $\Delta P=10$ MPa、 $k_z/k_r=1$ 、地层渗透率 $PK=10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3.3.1 孔深 (PA) 与孔密 (DEN) 的影响

图3是孔深与孔密对产率比的关系,横坐标为孔深。在孔深小于污染深度(250mm)时,孔深的增加使产率比明显增加,孔密增加也使产率比明显增加,但当孔密增加到28孔/m后,增产效果逐渐减少。当孔深穿过钻井污染区后,产率比出现大幅度提高,此时,孔密的增产效果一直到32孔/m都很明显,但孔深增加使产能增加的幅度已经很小。

3.3.2 孔径PD的影响

孔径对气井产率比有显著影响,尤其是孔眼穿透污染区后孔径的作用更为显著(图略)。

3.3.3 钻井污染程度DC的影响

污染程度定义为污染带渗透率与原始地层渗透率之比。污染程度对气井产能有明显影响,尤其是孔眼未穿透污染区时影响更为显著(图略)。

3.3.4 地层渗透率PK的影响

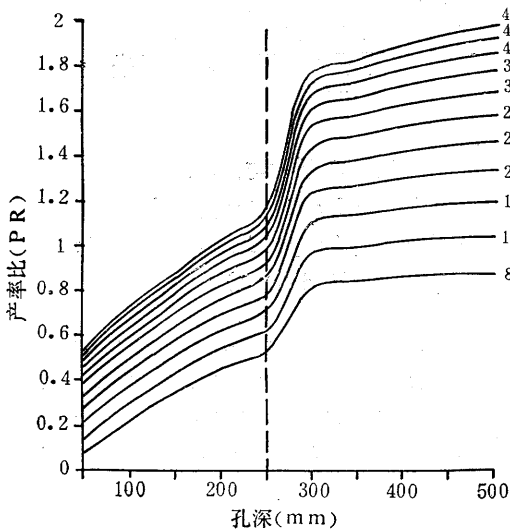


图 3 气井射孔深度密度与产率比关系

Fig.3 Effects of perforation length and density on the productivity ratio

$PD=13$ mm $Pha=90^\circ$ $CZH=12$ mm
 $CZC=0.2$ $DH=250$ mm $DC=0.5$
 $PK=10 \mu\text{m}^2 \times 10^{-3}$ $\Delta P=10$ MPa RW
 $=100$ mm $KZR=1$

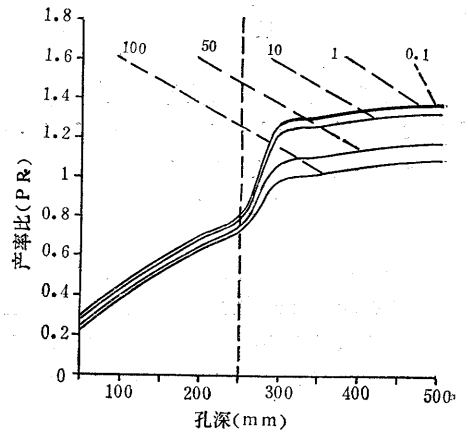


图 4 气层渗透率与产率比的关系

Fig.4 Effect of formation permeability on the productivity ratio

$Den=20$ 1/M $PD=13$ mm $Pha=90^\circ$
 $CZH=12$ mm $CZC=0.2$ $DH=250$ mm
 $DC=0.5$ $PK=Variable \mu\text{m}^2 \times 10^{-3}$
 $\Delta P=10$ MPa $RW=100$ mm $KZR=1$

由图4可见, 渗透率越大, 产率比越小, 这是由于非达西效应的影响。在渗透率很低时接近于达西流的产率比; 在渗透率超过10md以后, 非达西效应不允许忽略。在孔眼未穿过污染区时, 非达西效应不显著, 原因在于低渗透的污染带导致渗流速度降低。

3.3.5 生产压差 ΔP 的影响

由于非达西效应与生产压差、渗流速度有关, 所以生产压差势必影响气井射孔动态。随生产压差的增加射孔井的产率比会减少(图略)。

3.3.6 非均质性 K_z/K_r 的影响

k_z 是垂向渗透率, k_r 是水平方向渗透率。由图5、图6可知 k_z/k_r 越低则产率比越低。 k_z/k_r 的影响与相位角有关。在180°时 k_z/k_r 影响最为显著(图5), 120°时次之, 90°又次之, 60°时再次之, 0°时影响最小(图6)。

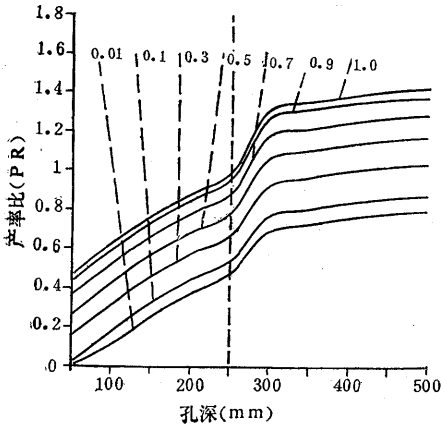


图5 气层非均质性与产率比关系

Fig.5 Effect of anisotropy of the gas reservoir on the productivity ratio (180 degree)

Den=20 1/M PD=13mm Pha=180°
 CZH=12mm CZC=0.2 DH=250mm
 DC=0.5 PK=10 μ m²×10⁻³ Δ P=10MPa
 RW=100mm KZR=Variable

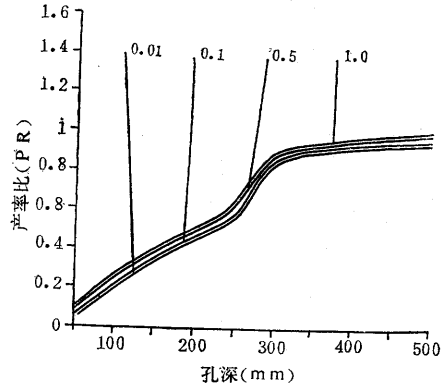


图6 气层非均质性与产率比关系

Fig.6 Effect of anisotropy of the gas reservoir on the productivity ratio (o degree)

Den=20 1/M PD=13mm Pha=0°
 CZH=12mm CZC=0.2 DH=250mm
 DWC=0.5 PK=10 μ m²×10⁻³
 Δ P=10MPa RW=100mm KZR=Variable

3.3.7 相位角的影响

通过有限元模拟研究, 发现相位角是一个复杂的因素。相位角与 k_z/k_r 、与生产压差 ΔP 等因素间相互有联系(表1)。

从表1可以看出, 相位角的优劣与生产压差、非均质性和孔眼是否穿过污染区有关; 地层均质情况下($k_z/k_r=1$), 相位角对产率比的影响非常明显; 而在地层非均质严重时($k_z/k_r=0.01$) 相位角的影响不明显。

表1中的对比是在以下固定参数下进行的: 孔径 $d_p=13$ mm, 孔密 $D_{en}=20$ 孔/m, 压实厚度 $CZH=12$ mm, 压实程度 $CZC=0.2$, 污染程度 $DC=0.5$, 井筒半径 $R_w=100$ mm, 原始渗

表 1 不同条件下射孔相位角优劣序

Table 1 Order in Preference of Phase Angle in Different Conditions

| 生产压差 ΔP (MPa) | $\frac{k_r}{k_f}$ | 是否穿透 钻井污染带 | 相位角的优劣序 (从高到低) (括号内为其产率比值PR) | 序号 |
|------------------|-------------------|---------------|--|----|
| 5 | 1 | 未穿透 | 180°(0.953)、120°(0.807)、90°(0.725)、60°(0.637)、0°(0.433)、 | 1 |
| | | 穿透 | 180°(1.415)、120°(1.401)、90°(1.336)、60°(1.232) 0°(0.907) | 2 |
| | 0.525 | 未穿透 | 180°(0.686)、120°(0.622)、90°(0.599)、60°(0.564)、0°(0.420) | 3 |
| | | 穿透 | 120°(1.175)、90°(1.164)、60°(1.115)、180°(1.080)、0°(0.898) | 4 |
| | 0.1 | 未穿透 | 120°(0.463)、90°(0.459)、180°(0.454)、60°(0.449)、0°(0.41) | 5 |
| | | 穿透 | 90°(1.007)、60°(1.006)、120°(0.970)、0°(0.887)、180°(0.777) | 6 |
| | 0.01 | 未穿透 | 90°(0.425)、60°(0.423)、120°(0.422)、0°(0.400)、180°(0.397) | 7 |
| | | 穿透 | 60°(0.974)、90°(0.965)、120°(0.917)、0°(0.875)、180°(0.704) | 8 |
| 10 | 1 | 未穿透 | 180°(0.827)、120°(0.708)、90°(0.640)、60°(0.565)、0°(0.399) | 9 |
| | | 穿透 | 180°(1.351)、120°(1.337)、90°(1.272)、60°(1.168)、0°(0.843) | 10 |
| | 0.525 | 未穿透 | 180°(0.656)、120°(0.619)、90°(0.592)、60°(0.559)、0°(0.389) | 11 |
| | | 穿透 | 120°(1.110)、90°(1.099)、60°(1.050)、180°(1.015)、0°(0.833) | 12 |
| | 0.1 | 未穿透 | 60°(0.439)、90°(0.436)、0°(0.380)、120°(0.376)、180°(0.355) | 13 |
| | | 穿透 | 90°(0.941)、60°(0.940)、120°(0.904)、0°(0.821)、180°(0.711) | 14 |
| | 0.01 | 未穿透 | 0°(0.370)、60°(0.365)、90°(0.354)、120°(0.337)、180°(0.285) | 15 |
| | | 穿透 | 60°(0.910)、90°(0.901)、120°(0.853)、0°(0.810)、180°(0.640) | 16 |
| 20 | 1 | 未穿透 | 180°(0.669)、120°(0.605)、90°(0.564)、60°(0.517)、0°(0.368) | 17 |
| | | 穿透 | 180°(1.272)、120°(1.259)、90°(1.194)、60°(1.09)、0°(0.765) | 18 |
| | 0.525 | 未穿透 | 120°(0.396)、90°(0.396)、60°(0.39)、180°(0.379)、0°(0.360) | 19 |
| | | 穿透 | 120°(1.031)、90°(1.020)、60°(0.97)、180°(0.936)、0°(0.754) | 20 |
| | 0.1 | 未穿透 | 0°(0.350)、60°(0.306)、90°(0.276)、120°(0.24)、180°(0.149) | 21 |
| | | 穿透 | 90°(0.864)、60°(0.863)、120°(0.826)、0°(0.744)、180°(0.634) | 22 |
| | 0.01 | 未穿透 | 0°(0.340)、60°(0.281)、90°(0.243)、120°(0.199)、180°(0.101) | 23 |
| | | 穿透 | 60°(0.832)、90°(0.823)、120°(0.774)、0°(0.733)、180°(0.562) | 24 |

透率 $PK = 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。穿透污染时，孔深 $PA = 300\text{mm}$ ，污染深度 $DH = 250\text{mm}$ ；未穿透时，孔深 $PA = 200\text{mm}$ ，污染深度 $DH = 250\text{mm}$ 。

3.4 不同射孔方案现场效果对比

以四川磨溪气田的射孔现场试验为例来说明优化射孔对保护储层、提高气井产能的重要性 (表2表3)。

由上表可知，与方案2相比，方案1的 PR 大。酸化增产倍比较低 (说明地层和孔眼受污

表2 四川磨溪气田的两种射孔方案

Table 2 Two of Perforating Project in Moxi Gas field of sicun

| 射孔方案 | 枪弹型 | 井号 | 相位 | 孔深 (mm) | 孔密 (孔/m) | 射孔式 格 | 负压差 (MPa) | 射孔液 |
|------|--------------------|--------------|----|------------|-------------|----------|--------------|-----|
| 1 | 斯仑贝谢公司 SIBHJ-II | 磨70.60.63.53 | 60 | 466 | 16 | 螺旋 | 15 | 清水 |
| 2 | 四川测井公司 SYD-II | 磨56.85等10口井 | 90 | 178 | 20 | 平面 | 5 | 清水 |

* $r_g=0.58$, $r_w=0.079m$, $r_e=200m$

表3 两种射孔方案效果对比

Table 3 The Effects Comparison of Two Perforating Project

| 方案 | 条件 与效果 | 井号 | 地层 压力 (MPa) | 流动 压力 (MPa) | 有效 厚度 (m) | 原始 渗透率 ($\mu m^2 \times 10^{-3}$) | 地层 温度 (°K) | 射孔后稳定 产量 ($10^4 m^3/d$) | 射孔 产率比 PR | 平均 产率比 PR | 酸化平均 增产倍比 |
|----|-----------|-----|-------------------|-------------------|-----------------|---|------------------|---------------------------------|-----------------|-----------------|--------------|
| | | | | | | | | | | | |
| 1 | | 磨53 | 32.66 | 27.50 | 8.40 | 0.61 | 361.0 | 2.0576 | 0.9796 | 1.05 | 1.81 |
| | | 磨60 | 31.96 | 25.58 | 3.70 | 1.46 | 359.0 | 1.3493 | 0.5123 | | |
| | | 磨63 | 32.15 | 28.59 | 9.50 | 0.47 | 358.5 | 2.4251 | 1.8970 | | |
| | | 磨70 | 32.33 | 23.14 | 5.80 | 0.37 | 358.3 | 1.1864 | 0.8140 | | |
| 2 | | 磨56 | 32.33 | 20.78 | 9.60 | 0.339 | 361.8 | 0.6214 | 0.2345 | 0.7232 | 1.98* |
| | | 磨85 | 32.78 | 30.54 | 10.40 | 1.92 | 359.0 | 4.5527 | 1.2120 | | |

* 1.98是由磨18、20、21、55、58、59、61、75-1.85等9口井酸化资料获得；磨56无酸化资料；但磨18、20、21、55、58、59、61、75-1等8口井无试井资料，无法求其产率比PR。

染小），故方案1优于2。限于篇幅，气井射孔优化设计不在此讨论。

4 结论

(1) 本文建立了气井非达西流射孔完井动态分析和预测的有限元模型，研究了非达西流传导系数 T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{zz} 的求解方法、步骤，将非线性流的有限元法转化为线性流的有限元法，通过反复迭代求解压力分布、传导系数和产率比，最后获得非线性有限元模型（非达西流）的收敛解。

(2) 得出各种射孔参数对气井非达西流射孔动态的影响；在未射穿钻井污染区时，最显著的因素依次是污染程度、孔深、孔密、孔径、压实程度，此时污染程度的影响最为明显，孔径的影响也比油井情况显著得多；在射穿钻井污染区以后，最显著的因素依次是孔密、孔径、污染程度、 k_z/k_r ，此时孔径的影响比孔深的影响明显得多，而孔深的影响已下降成次要因素，污染程度的影响仍然比较显著。这种规律与油井规律是大不相同的。

(3) 相位角与非均质性 k_z/k_r 、生产压差 ΔP 之间存在交互作用。这种复杂的情况是油井射孔时所没有的。地层均质时（ k_z/k_r 接近于1）改变相位角的效果不明显。

(4) 非均质性对气井产能有较大影响，在不同相位角时其影响程度不同， 180° 相位时 k_z/k_r 的影响最为明显， 120° 、 90° 、 60° 时又依次下降， 0° 相位时 k_z/k_r 影响最不明显。

(本文收到日期1991年8月30日)

(编辑 徐和坤)

参 考 文 献

- (1) Mcleod H O Jr. The effect of perforating conditions on Well performance. JPT, Jan 1983, 31~39.
- (2) Brown K E. Nodal system analysis of oil and gas well. JPT, Oct, 1985, 1751~1763.
- (3) Tariq S M著, 唐愉拉译. 利用有限元方法研究非线性效应对射孔流动特性的评价. 世界石油科学, 1989, (5).
- (4) Cheng M C A著, 潘迎德译. 射孔损害和孔密分析. 油气井测试, 1989, (4).
- (5) Nguyen T V著, 唐愉拉译. 通过孔眼的非达西流实验研究油气井测试, 1989, (4).
- (6) Ichara M J著, 唐愉拉译. 气田的射孔完井动态. 油气井测试, 1989, (4).
- (7) Firoozabadi A, Katz D L. An analysis of high-velocity gas flow through porous media. JPT, Feb, 1979 211~16.
- (8) 唐愉拉, 潘迎德, 有限元方法在射孔完井中的应用. 石油学报, 1989, (3).
- (9) 李开泰等著. 有限元方法及其应用. 西安交大出版社, 1984.

**A NUMERICAL SIMULATION OF THE PERFORMANCE OF
PERFORATION IN A GAS WELL
INCLUDING NON-DARCY EFFECTS
BY
MEANS OF FINITE ELEMENT METHOD**

Tang Yula Pan Yingde Zhu Yupei
(Southwestern Petroleum Institute)

Abstract

Although many investigation have performed to determine the performance of perforation in an oil well, the study on The performance of perforation in a gas well is fairly poor because of the complexities in the simulation of perforation space, compressibility of gas and non-darcy flow. Based on the partial differential equations and boundary conditions of non-darcy gas flow through perforations and formation, a finite element model was built in this paper. The solution of transfer coefficient T_{xx} , T_{yy} , T_{zz} with non-darcy flow in each element was discussed. This paper analyzes the effects of twelve factors on the productivity ratio of a perforated gas well, including factors such as perforation depth, perforation diameter, shot density, phase angle, crushed zone radius, degree of, crushed damage radius of damaged zone, degree of damage, well radius, drawdown, formation permeability and anisotropy. The relative importance of these twelve factors is given. Results

of this study show that the performance of a perforation in a gas well differs greatly from that in an oil well. Many properties of perforation in gas well found by this paper are reported for the first time.

作者简介

唐愉拉，1962年生。1983年毕业于西南石油学院采油专业。现任该学院开发系副教授。
通讯处：四川省，南充市，西南石油学院开发系。邮政编码637001。