

二维有限元热流模型在射孔完井中的应用研究 *

练章华 * * 孟英峰 童 敏

(西南石油学院)

练章华等. 二维有限元热流模型在射孔完井中的应用研究. 天然气工业, 2000; 20(4): 49 ~ 53

摘 要 文章用热流场模拟射孔完井渗流场, 建立了射孔完井热流和裸眼完井热流有限元二维(2D)模型, 根据该模型, 文中分析了理想情况裸眼完井模型的渗流速度场分布, 得到了其模型出口处的线流量(Q_r), 为射孔完井模型出口处线流量(Q_p)提供了比较基准。同时文中研究了射孔深度、有无钻井污染和压实带情况下, 孔眼内流体流速、压实带外边界渗流速度及产能比与孔深、孔密的关系等, 从这些研究中, 对射孔完井得到了一些新认识, 如孔眼内存在不渗透段, 孔密不宜过大等, 为研究射孔完井优化设计、产能预测等提供了理论依据。

主题词 二维 有限元法 热模拟 射孔完井 裸眼完井 研究

油气井射孔是一门较新的边缘性专业技术, 是石油勘探和开发中的一项关键技术, 射孔技术与工艺的完善直接影响到油气井的产能比以及油气层保护问题。射孔完井是国内外油气田使用最广泛的一种油气井完井方法, 因此不少学者在这方面做了许多研究工作, 也发表了不少有关研究成果的文献, 从这些文献可知, 其研究方法主要为三个方面: 室内射孔实验法^[1]; 电模拟实验法^[2,5]; 有限元数值模拟法^[3~5]。其研究的主要参数为: 射孔深度、密度、孔径、相位角、格式、钻井污染深度及程度、孔眼周围压实带厚度及压实损害程度以及地层各向异性渗透率的影响等, 根据这些结果, 用回归方法建立了产能比与各参数之间的关系式^[2,5], 也得出了各参数对产能影响的主次关系, 这无疑对油气田优化射孔提供了理论依据。但在有限元数值模拟方面, 模型的处理及边界条件等还存在许多问题有待于进一步研究, 如这些研究不能反映流体汇流入孔眼和井筒内的流动关系等, 为此本文提出了用热流场来模拟射孔完井中渗流场, 由于射孔完井局部几何对称性和可简化性, 则本文采用 2D 有限元热流模型来模拟射孔完井中渗流场。

与电流场和渗流场一样, 热流场数学模型与渗流场有一样的数学模型, 因此本文以热流场来模拟渗流场, 并建立了二维(2D)有限元热流模型, 用同一

种导热率材料来模拟井筒和孔眼, 若该导热率相对于地层模型导热率为无限大, 即井筒和孔眼有同一数值的温度场, 即有相同的井筒和孔眼压力, 而且能反映流体汇流入孔眼和井筒内的流动关系等。这是研究射孔后渗流场的一种新方法, 也是一种较简便地能得出井筒内流场及流量的一种新方法, 虽然国外也用热流场来模拟渗流场, 但这些研究忽略了井筒和孔眼这一连通通道。

热流 2D 有限元实体模型

1. 射孔完井有限元热流模型

图 1 所示为 方位角的螺旋布孔的二维热流模型及网格划分, 其网格 8 节点四边形单元数为 1552, 节点数为 4850, 图中各结构尺寸及符号意义见附录 A。水泥环和套管不参与渗流工作, 因此模型中把它们去掉, 图 1 所示 r_2 与 r_1 之间仅为孔眼与井筒连通, 此时井筒半径为套管内半径(r_1)。为了把实际射孔模型合理的转换为平面问题, 因此在模型建立中, 取孔眼周围 4 孔中最近路径距离为平面模型图 1 中两孔眼间的研究距离(h_0), 所研究上下孔眼间路径距离为螺距(h_2), 而左右为螺旋线上 相位角内的路径距离(s_0), 其螺旋方程为:

$$x = r_2 \cos \theta, y = r_2 \sin \theta, z = (h_2) / (2\pi) \quad (1)$$

根据数学理论, 螺旋线上任意微段的距离 ds 为: ds

* 本文系中国石油集团总公司(部导 260)和“油气藏地质及开发”国家重点实验室开放基金(PLN9908)资助项目。

* * 练章华, 副教授, 1964 年生; 1989 年、1994 年分别获西南石油学院机械工程系硕士、博士学位, 现在西南石油学院完井中心从事教学与科研工作。地址: (637001) 四川省南充市。电话: (0817) 2642210(办), 2643444(家)。

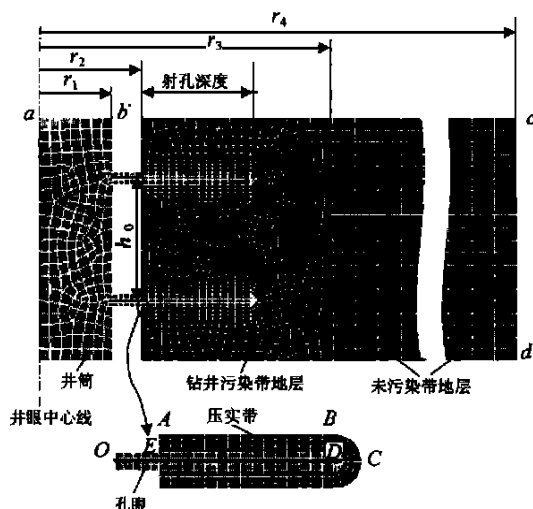


图1 射孔完井二维有限元热流模型及网格划分

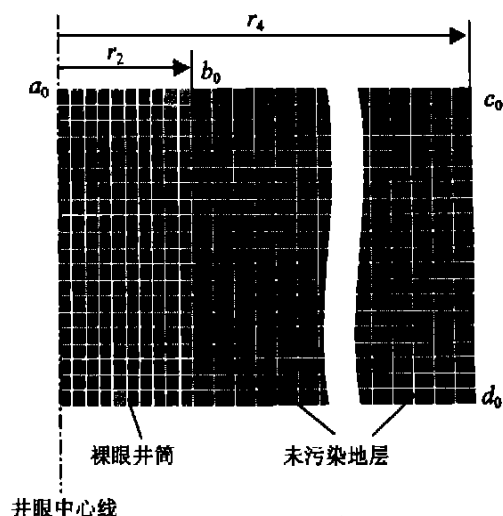


图2 裸眼完井二维有限元热流模型及网格划分

$= \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2}$, 则 相位角内两孔间的路径距离(s_0)为:

$$s_0 = \int_0^{h_2} \sqrt{r_2^2 \sin^2 \theta + (r_2 \cos \theta)^2 + \left(\frac{h_2}{2}\right)^2} d\theta \quad (2)$$

若已知井眼半径(r_2)、每米射孔数及相位角,则可确定螺距(h_2),再由(2)式积分得 s_0 ,然后比较 s_0 与螺距(h_2),取其中最小者作为平面模型图1中两孔眼的研究距离(h_0)。

边界条件:地层热流温度作用于模型中外边界线(cd),即: $T_1|_{cd} = T_d$,井筒温度作用于出口 ab 线上,即: $T_2|_{ab} = T_j$,温差为 $T = T_d - T_j$,则温差 T 模拟地层压差。

2. 裸眼完井有限元热流模型

由于是裸眼完井,此时井筒半径为钻头半径(r_2),图2所示为所建立的裸眼完井2D有限元热流模型及网格划分,8节点四边形单元数为1000,节点数为3141。

边界条件:地层热流温度作用于模型中外边界线($c_0 d_0$)上,即: $T_{01}|_{c_0 d_0} = T_d$,井筒温度作用于出口 $a_0 b_0$ 线上,即: $T_{02}|_{a_0 b_0} = T_j$,则温差为 $T = T_d - T_j$ 模拟地层压差。

二维渗流模型的基本理论计算式

最终研究中得到渗流场量级单位的结果,因此将有限元热流模型结果倒换为渗流数学模型结果,则地层各向异性渗透率 k_x 、 k_y 与热流模型各向异性导热率 λ_x 、 λ_y 的比例关系分别为: $k_x = \mu_x$, $k_y = \mu_y$,式中 μ 为流体的粘度。

假设地层多孔介质为单相液体的稳定达西渗流,无源无汇,地层水平渗透率为 k_x ,地层垂向渗透率为 k_y ,则压力势函数为 $p(x, y)$,渗流速度为 v_x , v_y 。则由达西定律有:

$$v_x = -k_x \frac{\partial p}{\partial x}, \quad v_y = -k_y \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

研究中假定各向渗透率 k_x 、 k_y 为常数,则稳定渗流的微分方程为:

$$k_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 0 \quad (4)$$

在研究的平面区域(s)内,由于无源无汇,由质量守恒,可得压力势函数和速度函数的有限元变分方程为:

$$(k_x p_x v_x + k_y p_y v_y) dx dy = 0 \quad (5)$$

根据前面所建立的有限元热流模型及与之对应的渗流基本理论计算式,应用有限元法可以求出射孔渗流场压力分布、渗流速度场分布、压力梯度、出口线流量及油井产能比等多个参数,为油田优化、优选射孔参数提供理论数据。

射孔完井产能预测计算方法

1. 射孔完井模型出口处线流量计算

由图1热流模型,通过有限元数值模拟计算,可算出井筒出口处 ab 路径单元节点上的流速(v_r),则其流量为:

$$Q_p = \int_0^{r_1} v_r dr \quad (6)$$

2. 裸眼完井模型出口处线流量计算

由热流模型图2,可得模型出口处 $a_0 b_0$ 路径上

单元节点的流速(v_r),则裸眼完井的线流量计算为:

$$Q_r = \int_0^{r_2} v_r dr \quad (7)$$

3. 产能比预测计算式

按定义,产能比(或称产率比)计算式为:

$$PR = \frac{Q_p}{Q_r} \quad (8)$$

应用实例分析

若某油田油井射孔参数、地层性质及井眼结构为附录A所示参数。

1. 裸眼完井的渗流场分析

若地层渗透率 $k_x = 1 \mu\text{m}^2$,垂向地层渗透率 $k_y = 0.5 \mu\text{m}^2$,井筒导热率是地层导热率材料的 10^7 倍,地层与井筒压差为 1.5 MPa ,地层无污染理想情况下的裸眼完井,根据裸眼完井有限元热流模型图2、及其基本理论计算式(3)~(5),得图3裸眼完井井筒内流体速度场分布及地层内速度场分布,图3中可见,地层内的速度场为水平汇流线,在井壁附近流线才发生改变,并往井筒模型出口方向汇流出,在本节模型参数条件下,图3可见出口处最小流速在 a_0 点附近,为 0.005148 m/s ;最大流速在 b_0 点,为 0.010297 m/s ,在数据处理中,可取出口处 a_0 到 b_0 路径上各节点的速度,再由式(7)即可计算出裸眼完井中的线流量(Q_r),作为射孔完井线流量(Q_p)的比较基准,然后由式(8)可得产能比。在分析中通过大量的模拟计算,井筒和孔眼导热率大于地层导热率的 10^4 倍,即可很好地模拟地层渗流场汇流入孔眼和井筒的流动情况。

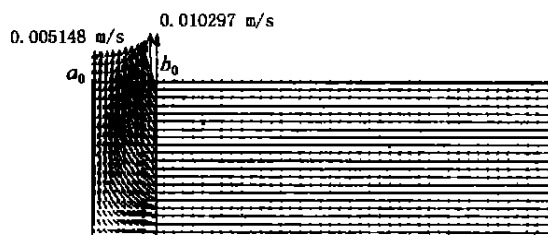


图3 裸眼完井井筒内及地层流场分布

2. 压实带外边界渗流速度及孔眼内流速分析

根据附录各参数值,由射孔完井二维热流模型图1,得图4压实带外边界流速曲线,在孔眼周围压实带局部坐标系中, x 轴沿孔眼方向, y 轴为垂向地层方向,图4所示为沿孔眼深度方向地层压实带边界上(见图1ABC压实带边界上)流体的渗流速度曲线,图4中,横坐标上A、B、C对应图1中压实带上

A、B、C三点。图4中BC为图1中BC弧线长度,图4中 v_x 、 v_y 分别为地层水平和垂向速度, v 为其合速度,即: $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$,射孔深度为 320 mm ,钻井污染深度为 200 mm ,孔眼顶部压实带为BC部分。

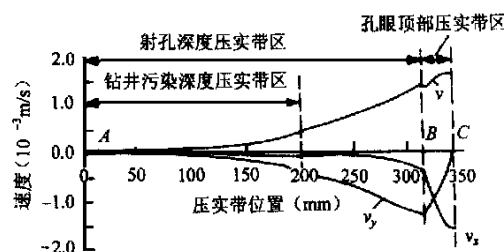


图4 压实带外边界流速

(1) 水平和垂向地层速度 v_x 、 v_y 的分析

由图4可见,在孔眼深度方向约为 80 mm 内, v_x 、 v_y 几乎与横坐标轴重合,即: $v_x \approx v_y \approx 0$,说明这一段内几乎没有流体流入,通过模拟计算,该段渗流入的流量为整段的 0.35% ,本文称该段为孔眼不渗透段,研究中表明,孔眼越深,孔眼不渗透段越长。图4中,从 80 mm 逐渐穿出污染带向孔眼顶部时, v_x 、 v_y 的绝对值均增加,但 v_y 的绝对值远大于 v_x 的绝对值,说明该段孔眼地层的垂向渗流起主要作用。当在孔眼顶部压实带BC区内, v_x 的绝对值迅速增大,到C点时为最大,而 v_y 的绝对值迅速减小,到C点时为0,即在这部分地层水平渗流起主要作用。

(2) 合速度(v)的分析

图4中可见,压实带外边界渗流合速度曲线(v)沿孔眼深度方向逐渐增加,该曲线与横坐标轴AC围成的面积即为压实带上边界的渗流线流量,按质量守恒定律,压实带上下外边界的渗流量总和即为该孔眼出口处的流量。在孔眼穿出污染带后,合速度曲线(v)下面的面积(占总面积,即总流量的 82%)远远大于该曲线污染带内面积(占总面积,即总流量的 18%),说明孔眼内流量的贡献主要来源于污染带以外的孔眼部分。这无疑从理论上证明了孔眼穿出污染带能提高产能比。另外,从大量的有限元渗流模拟研究表明,孔眼内的流量(不论孔眼是否穿出钻井污染带)主要来源于孔眼顶部附近一段压实带。研究表明,孔眼越深,孔眼不渗透段越长,因此当孔眼达到某一深度后,再增加孔眼深度意义不大。

(3) 孔眼内流速分析

图5为上节地层参数下,流体通过压实带渗流

后汇入孔眼内的流体流速与孔深的关系曲线。图5中O、E、D分别对应模型图1中孔眼中心线上O、E、D三点。从图中可知， v_y 与横坐标轴重合，即在孔眼中心只有沿孔眼方向的流速 v_x ，此时 v_x 的绝对值即为合速度 v 。图5中也可以看出，在孔眼顶部D点开始，合速度(v)增加较快，再次证明孔眼内的流量主要来自于孔眼顶部。到井壁E点附近时，由于不渗流段的作用，流速几乎不增加，到孔眼出口EO段时，套管和水泥环不起渗流作用，也就是没有流体介入，则该段流速、流量保持不变，与实际吻合，说明本文模型是正确的。

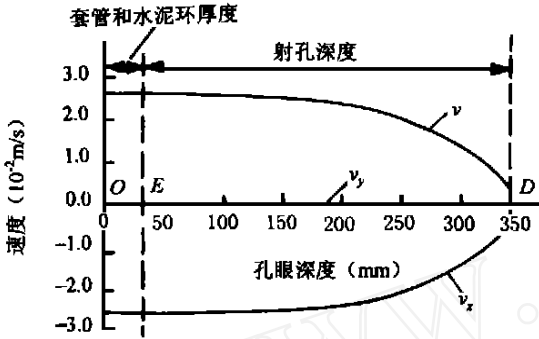


图5 孔眼中心流速

3. 产能比与孔深、孔密的分析

根据本文热流2D有限元法及模型图1、2，以及本文渗流基本理论计算式(3)~(8)，得图6、7产能比与孔深、孔密的关系曲线，图6中 $k_y/k_x=0.5$ 即为各向异性渗透地层，而图7中 $k_y/k_x=1.0$ 即为各向同性地层。

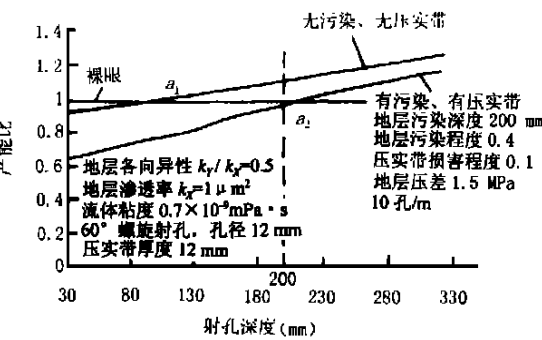


图6 产能比与孔深的关系

图6中可见，当地层无污染、无压实带时，射孔深度约110 mm时，曲线上 a_1 点产能比接近理想情况的产能比1；而此时地层有污染、有压实带时，地层的产能比仅为0.74，后者在射孔穿出污染深度200 mm后，在曲线上 a_2 点产能比才接近1。图7中可

见，孔密由10孔/m增加到20孔/m时，其产能比增加较明显；而再由20孔/m增加到40孔/m时，其产能比增加不显著，因此当孔密达到某一数值时，再增加孔密来提高产能比，意义不大。图6中，有污染、有压实带产能比曲线与图7中20孔/m那条(虚线)产能比曲线，除地层渗透性质(k_y/k_x)和地层压差外，其余参数都相同，图7中可见，各向同性情况下

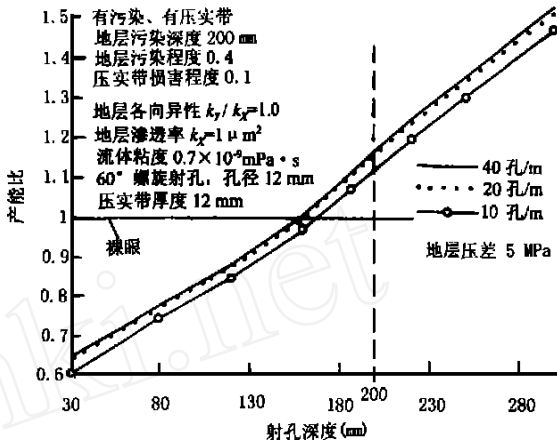


图7 产能比与孔深、孔密的关系

($k_y/k_x=1.0$)，在同样孔深时，地层与井筒压差较大时，其产能比较高，因此，控制井筒压力，提高地层与井筒压差有助于提高产能比。

通过上面分析可见，孔深、孔密、钻井污染带、孔眼压实带对产能比有较明显的直接影响关系，即增加孔深、降低钻井污染程度及减少孔眼压实带，将无疑有助于提高产能比。同理，附录中，如果改变孔径、相位角、地层各向异性渗透率、钻井污染程度、压实带损害程度及地层与井筒的压差等，可得出各参数综合影响下，射孔完井产能比及射孔效率评价等，为优化射孔提高产能提供理论数据。

结 论

- (1) 文中建立的裸眼完井热流模型为射孔完井热流模型分析提供了比较基准。
- (2) 孔眼内流量主要来自于孔眼顶部压实带附近。
- (3) 孔眼达到某一深度时，孔眼出口处压实带地层存在不渗透段，不渗透段长度随着孔眼加深而增长，因此设计中尽量避免存在不渗透段，即避免过深的孔眼。
- (4) 当孔密达到某一数值时，再增加孔密来提高产能比，收效不大。

(5)用相对于地层材料为无限大的导热率材料来模拟井筒和孔眼内流体流动,是研究射孔完后流体汇流入孔眼和井筒的一种新方法。

附 录

(1)螺旋射孔井眼几何结构模型参数

钻井污染厚度,200 mm;

射孔深度,120 mm;

孔径,12 mm;

压实带厚度,12 mm;

井眼直径,215.9 mm;

套管外直径,177.8 mm;

套管壁厚,10.54 mm;

套管内半径(r_1),78.36 mm;

钻头半径(r_2),107.95 mm;

钻井污染带外半径(r_3),307.95 mm;

研究最大外半径(r_4),2 000 mm;

(2)射孔参数

$n = 20$,孔数/m;

$\theta_0 = 60^\circ$,为相位角($^\circ$),0,60,90,120,180;

$h_1 = 1000/n$,为最近相邻两孔的距离,mm;

$n_0 = 360/\theta_0$,为每个螺距内的孔数;

$h_2 = n_0 1000/n$,为螺距,mm;

$height = 2 h_2 + h_1$,为研究模型高度,mm。

(3)地层、地层污染带、压实带的渗透性质

$\mu = 0.7 \times 10^{-9}$,为流体粘度,mPa·s;

$coef_0 = 0.5 (coef_0 = k_y/k_x)$,为地层垂直与水平渗透率之比;

$k_x = 1.0$,为地层水平渗透率, μm^2 ;

$k_y = coef_0 k_x$,为地层垂直渗透率, μm^2 ;

$coef_2 = 0.4$,为钻井污染带损害程度;

$coef_3 = 0.1$,为压实带渗透率损害程度。

(4)地层与井筒压差

$d_p = 1.5$,为地层与井筒的压差,MPa;

$p_d = 32$,为地层油藏压力,MPa;

$p_j = p_d - d_p$,为井筒压力,MPa。

参 考 文 献

1 潘迎德,唐愉拉.射孔岩心靶的流动特性和射孔效率评价标准.石油钻采工艺,1990;(3):1~8
2 孙艾茵,冯跃平等.射孔完井电模拟研究.石油钻采工艺,1988;(6):99~107
3 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):48~58
4 唐愉拉,潘迎德等.气体非达西流射孔完井的有限元数值模拟研究.石油学报,1992;(4):85~96
5 潘迎德,唐愉拉等.使油井产能最高的射孔参数优选.西南石油学院学报,1990;(2):27~36

(收稿日期 1999 - 12 - 28 编辑 钟水清)

川东生物礁气藏研究成果获四川省科技进步一等奖

由四川石油管理局地质调查处成都物探研究中心高级工程师罗蓉主持的《川东上二叠统生物礁气藏形成条件及勘探目标评价研究》,在生物礁地震异常预测技术方面获得新的进展,其成果达到了国内领先水平。今年 6 月,该项成果荣获了四川省人民政府颁发的科技进步一等奖。

《川东上二叠统生物礁地震识别及预测评价研究》项目是国家“九五”攻关项目《川东上二叠统生物礁气藏形成条件及勘探目标评价研究》课题下设的二级专题之一。由于生物礁油气藏属碳酸盐岩性圈闭气藏,是一类复杂难找的隐蔽气藏。礁岩和非礁地层物性差异小,非均质性强,地震识别预测难度大,多解性强。该项目在收集、分析了川东梁平—开江海槽等探区内的 43 口井,对上二叠统生物礁井的地震资料重新对比,在解释了区内上千条二维地震测线资料的基础上,取得了以下主要成果和认识:清楚地划分了上二叠统及相邻地层的地层层序的地震相,分析出了已知礁井处地震资料的反射波特征和速度结构,归纳和建立了从地震资料上识别是否有生物礁的模式。专家们认为:该成果为进一步探索川东地区上二叠统生物礁分布规律奠定了基础。

(陈 敏 摘自《四川石油报》)

.....

APPLICATION OF LOST CIRCULATION PREVENTION AND CONTROL TECHNOLOGY FOR SUPERHIGH PRESSURE WELL TO WELL YANGDU3

Zhang Daijun (East Sichuan Drilling CO. , Sichuan Petroleum Administration). *NA TUR. GAS IND.* v. 20 , no. 4 , pp. 47 ~ 48 , 7/ 25/ 2000. (ISSN 1000-0976 ; **In Chinese**)

ABSTRACT:For the drilling in high-pressure formation ,it is necessary to use high-density drilling fluid to balance the high-pressure fluid in the formation ,but the high liquid column pressure will cause mud loss in low-pressure formation. When lost circulation occurs ,the appropriate measures must be taken to block off the leakage formation as soon as possible to avoid possible downhole accident and complexity due to the reduced liquid column pressure. In the drilling of well Yangdu3 in superhigh-pressure formation in Yangdusi Structure in the east part of Sichuan basin ,in the light of the different characters of the lost circulation due to the high liquid column pressure ,the leakage prevention was carried out by reducing the density and flow rate of the drilling fluid and by adding temporary blocking agent at the possible leakage interval beforehand. The lost circulation prevention and control technology that the great-dose and high-concentration mixture of different temporary blocking agents is first pumped into borehole ,and then the well is shut-in , the mixture is kept static and intermittently squeezed into the medium to strong leakage intervals to block them has obtained an obvious effect. When the abnormally high-pressure oil and gas wells are drilled ,taking the initiative in preventing drilling fluid loss and scientifically applying the combined leakage prevention and control technology are favourable for identifying , discovering and protecting oil and gas-bearing formation ,being an effective way to reduce the drilling cost and raise the overall effect.

SUBJECT HEADINGS:Sichuan , East , Superhigh pressure well ,Antileakage ,Loss circulation control , Technology , Application

Zhang Daijun (*engineer*) , born in 1948 , graduated in drilling engineering from Southwest Petroleum Institute in 1978. He has been engaged in well drilling for a long time. Add : Petroleum base , Yubei District , Chongqing (401120) , China Tel : (023) 67805503

.....

A STUDY ON APPLICATION OF 2-D FINITE ELEMENT HEAT FLOW MODEL TO PERFORATED

WELL

Lian Zhanghua , Meng Yingfeng and Tong Min (Southwest Petroleum Institute) . *NA TUR. GAS IND.* v. 20 , no. 4 , pp. 49 ~ 53 , 7/ 25/ 2000. (ISSN 1000-0976 ; **In Chinese**)

ABSTRACT:In this paper , the 2-D finite element heat flow models of perforated well and open hole well are established by simulating the flow field of the fluids in perforated wells with heat flow field. Based on this model , the distribution of the fluid flow rate field under the condition of ideal open hole well model is analyzed and the linear flow rate (Q_r) at the exit of the model is obtained , providing a comparative datum for the linear flow rate (Q_p) at the exit of the perforated well model , and the relation between the flow rate in the perforated hole , the fluid flow rate at the outer boundary of compacted zone as well as the productivity ratio and the perforated depth and density under the condition of perforated depth and under the condition that there are (or not) compacted zone and contamination by drilling operation is studied also in the paper. Through study , some new knowledges that there is non-permeability interval in the borehole and too high density of the perforations is inadvisable are obtained , providing a theoretical basis for the optimal design of perforated completion and the productivity prediction.

SUBJECT HEADINGS:Two dimension , Finite element method , Thermal Simulation , Perforated completion , Open hole completion , Research

Lian Zhanghua (*associate professor*) , born in 1964 , received his Master s degree in 1964 and Doctor s degree in 1994 at the Department of Mechanical Engineering of Southwest Petroleum Institute. Now he is engaged in the teaching and researching works at the Well Completion Center of Southwest Petroleum Institute. Add : Nanchong , Sichuan (637001) , China Tel : (0817) 2642210 (O) and 2643444 (H)

.....

THREE DIMENSIONAL MECHANIC ANALYSIS OF THE TESTING STRING IN DEEP WELL WITH HIGH TEMPERATURE AND HIGH PRESSURE

Deng Xiong and Liang Zheng (Southwest Petroleum Institute) and Yu Xiaolin (Huabei Petroleum Administration) . *NA TUR. GAS IND.* v. 20 , no. 4 , pp. 54 ~ 57 , 7/ 25/ 2000. (ISSN 1000-0976 ; **In Chinese**)

ABSTRACT:Along with the development of drilling works to deep reservoirs , more and more deep wells with high temperature and high pressure will be drilled. After seismic exploration , cuttings logging , coring and well logging , the deep well testing is the only method of directly understanding formation fluid char-