

不共面裂缝气藏水平井产能预测模型

刘银山¹, 李治平¹, 赖枫鹏¹, 马洪泽¹, 任广磊²

(1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 2. 中国石化华北石油局勘探开发研究院, 河南郑州 450006)

摘要: 考虑到实际压裂水平井得到的裂缝左右两翼并不完全在同一个平面上, 为使产能方程预测结果能更切合实际的产量, 重点研究气藏压裂水平井裂缝左右两翼与水平井筒形成不同夹角时的产能方程。根据点源累加求和的思想将裂缝的左右翼分成 n 等份, 求出地层中任意点的压降模型, 进而推导出裂缝左右两翼与水平井筒成不同夹角时的产能方程, 并利用该产能方程分析了左右两翼形成的不同角度组合对产能的影响。结果表明: 裂缝与水平井筒所形成的夹角越小, 其压裂增产效果越差; 当裂缝左右两翼都垂直或接近于垂直于水平井筒时, 其压裂增产效果最好。因此, 建议在气藏水平井压裂过程中, 应在工艺许可范围内尽量压出与水平井筒垂直的裂缝。

关键词: 气藏 水平井 压裂裂缝 生产能力

中图分类号: TE33⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2012)04-096-06

Productivity Prediction Model of Horizontal Gas Wells with Noncoplanar Fractures

Liu Yinshan¹, Li Zhiping¹, Lai Fengpeng¹, Ma Hongze¹, Ren Guanglei²

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing, 100083, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, North China Petroleum Bureau, Sinopec, Zhengzhou, Henan, 450006, China)

Abstract: Because two wings of a fracture in a fractured horizontal well are not certainly in a line, it's necessary to calculate the production from a fractured horizontal well that fractures in the two wings has varied orientation with the borehole in order to make the prediction more practical. Based on a point source summation, two wings of fractures were divided into n parts then pressure drop model of every point in the formation were built and finally the deliverability equation of a fractured horizontal well was deduced. By analyzing the effects of different angles between the wings and the wellbore, it turned out that the smaller the angles between the fractures and the wellbore, the worse the stimulation results; when the fractures are vertical to the horizontal wellbore, the stimulation effect is optimal. So if possible, fractures perpendicular to horizontal wellbore are preferred.

Key words: gas reservoir; horizontal well; fracture azimuth; productivity

国内外油气田开发实践证实, 水平井压裂技术是目前开发低渗透油气田的一项重要技术手段, 然而水平井压裂后的产能预测是水平井压裂技术的一大难题^[1-7]。压裂后裂缝是影响水平井产能的主要因素, 国内外学者^[5-14]对于裂缝对水平井产能影响的研究主要集中在裂缝数量、裂缝半长和水平井筒长度等方面, 对于裂缝导流能力、裂缝间距特别是水平井筒与裂缝夹角等方面考虑较少。陈杉沁^[7]对影

收稿日期: 2011-12-27; 改回日期: 2012-06-11。

作者简介: 刘银山(1988—), 男, 湖北孝感人, 2011年毕业于中国地质大学(北京)能源学院石油工程专业, 在读硕士研究生, 主要从事油气田开发理论与方法的学习和研究。

联系方式: 15120077410, linjiangyuantiao@qq.com。

通讯作者: 李治平, (010)82320690, lzpswpi@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项专题“碎屑岩储层水平井压裂产能预测及压裂效果评价数据支持系统研究”(编号: 2011ZX05002-005-008HZ)部分研究内容。

响压裂水平气井产能的裂缝数量、裂缝半长、裂缝间距、裂缝导流能力、裂缝与水平井筒夹角以及储层厚度等 7 个方面进行了分析,但没有考虑裂缝两翼不在同一平面时裂缝与水平井筒夹角的影响。调研发现,当地应力比较复杂时,在压裂作业时,会出现裂缝两翼不在同一平面的问题,为此,笔者重点考虑实际压裂得到的裂缝两翼不共面时,裂缝间的压力降落及相互间干扰和裂缝与水平井筒的夹角的影响,利用压降叠加原理,在产能方程推导过程中加入裂缝与水平井筒夹角的影响,推导出了考虑裂缝与水平井筒夹角影响的水平井产能方程。

1 压降方程

在实际压裂作业中,由于储层岩石应力分布不均以及其他属性的不同,使压裂裂缝的左右翼并不完全在同一个平面上,两翼平面可能和水平井筒成不同的夹角,如图 1 所示。

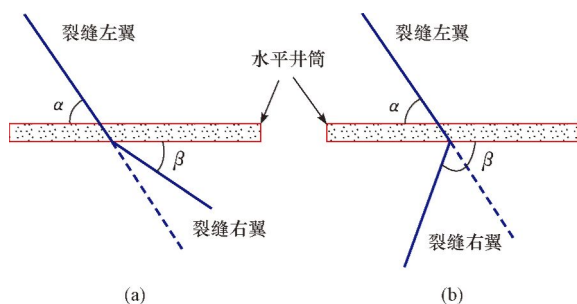


图 1 裂缝左右两翼平面与水平井筒夹角示意

Fig. 1 Angles between the fractures of two wings and horizontal wellbore

笔者以水平井筒方向为 y 轴,以垂直于井筒方向为 x 轴建立坐标系,设裂缝左翼平面与水平井筒成 α ($0 < \alpha < 90^\circ$),而裂缝右翼平面分布则可能出现 2 种情形:一种是裂缝右翼稍偏离裂缝左翼的延伸线,类似于裂缝左翼受到水平井筒的折射而发生

了偏离,其与水平井筒夹角 β 的范围为 $0 < \beta < 90^\circ$ (见图 1(a));另一种是裂缝右翼大致与裂缝左翼关于水平井筒对称分布,其与水平井筒夹角 β 的范围为 $90^\circ < \beta < 180^\circ$ (见图 1(b))。多条裂缝地层中任意一点的压降模型可以将每条裂缝都看成是由无数个点汇构成,利用叠加原理进行求解。裂缝上每一个点汇的坐标不但与裂缝长度有关,还与裂缝平面和水平井筒的夹角 α 和 β 有关。

将裂缝左右两翼分别分成 n 等份,每一等份作为一个点汇研究^[6]。设第 i 条裂缝起裂点的坐标为 $(0, y_{fi})$,裂缝左翼长度为 L_{fi} ,裂缝左翼平面与水平井筒夹角为 $\alpha(i)$;裂缝右翼长度为 L_{fri} ,裂缝右翼平面与水平井筒夹角为 $\beta(i)$,两翼与水平井筒相交处的坐标均为 $(0, y_{fi})$ 。

以每个小段的中点坐标来表示该段的坐标,则第 i 条裂缝左翼上第 j 个点汇的坐标可以表示为:

$$(x_{ij}, y_{ij}) = \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{2n-2j+1}{n} \right) L_{fi} \sin \alpha(i), y_{fi} + \frac{1}{2} \left(\frac{2n-2j+1}{n} \right) L_{fi} \cos \alpha(i) \right] \quad (1)$$

式中: x_{ij}, y_{ij} 分别为第 i 条裂缝左翼横、纵坐标, m ; L_{fi} 为第 i 条裂缝左翼长度, m ; $\alpha(i)$ 为第 i 条裂缝左翼与水平井筒的夹角, ($^\circ$)。

裂缝右翼上第 j 个点汇的坐标可以表示为:

$$(x_{rij}, y_{rij}) = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{2j-1}{n} \right) L_{fri} \sin \beta(i), y_{fi} + \frac{1}{2} \left(\frac{2j-1}{n} \right) L_{fri} \cos \beta(i) \right] \quad (2)$$

式中: x_{rij}, y_{rij} 分别为第 i 条裂缝右翼横、纵坐标, m ; L_{fri} 为第 i 条裂缝右翼长度, m ; $\beta(i)$ 为第 i 条裂缝右翼与水平井筒的夹角, ($^\circ$)。

裂缝左翼与水平井筒成 α 角,右翼与水平井筒成 β 角的 N 条裂缝在 t 时刻对地层中任意一点 (x, y) 产生的压降为:

$$\begin{aligned} & (\phi(p_i) - \phi(p(x, y, t)))|_N = \\ & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n \frac{1.291 \times 10^{-3} T}{2Kh} \left[-\text{Ei} \left[-\frac{\left[x + \frac{1}{2} \left(\frac{2n-2j+1}{n} \right) L_{fi} \sin \alpha(i) \right]^2 + \left[y - \left(y_{fi} + \frac{1}{2} \left(\frac{2n-2j+1}{n} \right) L_{fi} \cos \alpha(i) \right) \right]^2}{4\eta t} \right] q_{nij} - \right. \\ & \left. \text{Ei} \left[-\frac{\left[x - \frac{1}{2} \left(\frac{2j-1}{n} \right) L_{fri} \sin \beta(i) \right]^2 + \left[y - \left(y_{fi} + \frac{1}{2} \left(\frac{2j-1}{n} \right) L_{fri} \cos \beta(i) \right) \right]^2}{4\eta t} \right] q_{rij} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\phi(p_i)$ 为原始地层拟压力, MPa ; $\phi(p(x, y, t))$ 为任意一点 (x, y) 在 t 时刻的拟压力, MPa ; q_{nij} 为第

i 条裂缝左翼第 j 小段的产量, m^3/d ; q_{rij} 为第 i 条裂缝右翼第 j 小段的产量, m^3/d ; η 为地层导压系数,

(D · MPa)/(Pa · s); K 为地层渗透率, mD; h 为储层厚度, m; T 为地层温度, K; t 为渗流时间, d。

2 产能预测模型

由于人工裂缝的产生, 使地层压力重新分布。

设第 i 条裂缝的左翼尖端压力为 p_{li} , 右翼尖端压力为 p_{ri} 。第 i 条裂缝右尖端处产生的压降为所有裂缝左、右两翼上 n 个点汇在第 i 条裂缝右尖端处产生的压降之和, 则在 t 时刻第 i 条裂缝左翼裂缝尖端产生的压降可表示为:

$$\begin{aligned} \psi(p_i) - \psi(p_{li}) = & \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^n \frac{1.291 \times 10^{-3} T}{2Kh} \left[-\text{Ei} \left[-\frac{\left[-\left(1 - \frac{1}{2n}\right) L_{li} \sin \alpha(k) + \frac{1}{2} \left(\frac{2n-2j+1}{n}\right) L_{lk} \sin \alpha(k) \right]^2}{4\eta t} \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. - \frac{\left[(y_{fi} - y_{fk}) + \left[\left(1 - \frac{1}{2n}\right) L_{li} - \frac{1}{2} \left(\frac{2n-2j+1}{n}\right) L_{lk} \right] \cos \alpha(k) \right]^2}{4\eta t} \right] \right] q_{lkj} - \right. \\ & \left. \text{Ei} \left[-\frac{\left[-\left(1 - \frac{1}{2n}\right) L_{li} \sin \alpha(k) - \frac{1}{2} \left(\frac{2j-1}{n}\right) L_{lk} \sin \beta(k) \right]^2}{4\eta t} \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. - \frac{\left[(y_{fi} - y_{fk}) + \left[\left(1 - \frac{1}{2n}\right) L_{li} \cos \alpha(k) - \frac{1}{2} \left(\frac{2j-1}{n}\right) L_{rk} \cos \beta(k) \right] \right]^2}{4\eta t} \right] \right] q_{rkj} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\psi(p_{li})$ 为第 i 条裂缝左翼尖端的拟压力, MPa; q_{lkj} 为第 k 条裂缝左翼第 j 小段的产量, m^3/d ; q_{rkj} 为第 k 条裂缝右翼第 j 小段的产量, m^3/d ; $\alpha(k)$ 为第 k 条裂缝右翼与水平井筒的夹角, ($^\circ$); $\beta(k)$ 为第 k 条裂缝右翼与水平井筒的夹角, ($^\circ$); L_{lk} 为第 k

条裂缝左翼的长度, m; L_{rk} 为第 k 条裂缝右翼的长度, m; y_{fi} 为第 i 条裂缝的纵坐标, m; y_{fk} 为第 k 条裂缝的纵坐标, m。

同理求出第 i 条右翼裂缝尖端产生的压降表达式为:

$$\begin{aligned} \psi(p_i) - \psi(p_{ri}) = & \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^n \frac{1.291 \times 10^{-3} T}{2Kh} \left[-\text{Ei} \left[-\frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2n}\right) L_{ri} \sin \beta(i) + \frac{1}{2} \left(\frac{2n-2j+1}{n}\right) L_{lk} \sin \alpha(k) \right]^2}{4\eta t} \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. - \frac{\left[(y_{fi} - y_{fk}) + \left[\left(1 - \frac{1}{2n}\right) L_{ri} \cos \beta(i) - \frac{1}{2} \left(\frac{2n-2j+1}{n}\right) L_{lk} \cos \alpha(k) \right] \right]^2}{4\eta t} \right] \right] q_{lkj} - \right. \\ & \left. \text{Ei} \left[-\frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2n}\right) L_{ri} \sin \beta(i) - \frac{1}{2} \left(\frac{2j-1}{n}\right) L_{rk} \sin \beta(k) \right]^2}{4\eta t} \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. - \frac{\left[(y_{fi} - y_{fk}) + \left[\left(1 - \frac{1}{2n}\right) L_{ri} \cos \beta(i) - \frac{1}{2} \left(\frac{2j-1}{n}\right) L_{rk} \cos \beta(k) \right] \right]^2}{4\eta t} \right] \right] q_{rkj} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\psi(p_{ri})$ 为第 i 条裂缝右翼尖端的拟压力, MPa。

考虑到裂缝不一定关于水平井筒对称, 左右裂缝尖端的压力也不一定相等, 故取左右裂缝尖端的平均压力来表示裂缝尖端压力。

$$p(x_i, y_i, t) = \frac{p_{li} + p_{ri}}{2} \quad (6)$$

式中: $p(x_i, y_i, t)$ 为第 i 条裂缝 t 时刻尖端压力, MPa; p_{li} 为第 i 条裂缝左翼尖端压力, MPa; p_{ri} 为第

i 条裂缝右翼尖端压力, MPa。

虽然裂缝左右两翼所在平面与水平井筒的夹角会不同, 但第 i 条裂缝仍可看成是流动半径为

$\sqrt{\frac{(L_{fi} + L_{fri})h}{\pi}}$ 、裂缝宽度为 ω_i 、边界压力为裂缝尖

端拟压力 $\psi(p(x_{fi}, y_{fi}, t))$ 、井底流动为水平井筒内拟压力 $\psi(p_{wfi})$ 下的平面径向流^[10,11], 气体由裂缝向井筒的渗流过程可以表示为:

$$\psi(p(x_{fi}, y_{fi}, t)) - \psi(p_{wfi}) = \frac{1.291 \times 10^{-3} q_{fi} T}{K_{fi} \omega_i} \left[\ln \sqrt{\frac{(L_{fi} + L_{fri})h}{\pi}} + S \right] \quad (7)$$

式中: $\psi(p(x_{fi}, y_{fi}, t))$ 为第 i 条裂缝 t 时刻拟压力, MPa; q_{fi} 为第 i 条裂缝的产量, m^3/d ; K_{fi} 为第 i 条裂缝的渗透率, mD ; ω_i 为第 i 条裂缝的缝宽, m ; r_w 为

水平井筒半径, m ; S 为总表皮系数。

因为除裂缝与井筒相交处外, 井筒其余的地方均封闭, 所以有:

$$Q_c = \sum_{i=1}^N q_{fi} \quad (8)$$

式中: Q_c 为裂缝累计产量, m^3/d 。

取合理时间间隔来计算累计产量, 设前一时间为 t_i , 后一时间为 t_{i+1} , 则累积产量 Q_c 可以表示为:

$$Q_c = \frac{Q(t_{i+1}) + Q(t_i)}{2} (t_{i+1} - t_i) \quad (9)$$

式中: $Q(t_{i+1})$ 为 t_{i+1} 时刻裂缝累计产量, m^3/d ; $Q(t_i)$ 为 t_i 时刻裂缝累计产量, m^3/d 。

计算出水平井的产量和累计产量。经过推导后得出压裂水平井的产能公式为:

$$\begin{aligned} p_i^2 - p_{2wf} = & \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^n \frac{1.291 \times 10^{-3} q_{fk} \mu Z T}{2 n K h} \left[\frac{L_{fk}}{L_{fk} + L_{frk}} \left[-\text{Ei} \left[-\frac{\left[-\left(1 - \frac{1}{2n}\right) L_{fk} \sin \alpha(k) + \frac{1}{2} \left(\frac{2n-2j+1}{n} \right) L_{fk} \sin \alpha(k) \right]^2}{4 \eta t} \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. - \frac{\left[\left(y_{fi} + \left(1 - \frac{1}{2n}\right) L_{fk} \cos \alpha(k) \right) - \left(y_{fk} + \frac{1}{2} \left(\frac{2n-2j+1}{n} \right) L_{fk} \cos \alpha(k) \right) \right]^2}{4 \eta t} \right] - \right. \right. \\ & \left. \left. \text{Ei} \left[-\frac{\left[-\left(1 - \frac{1}{2n}\right) x_{fk} \sin \alpha(k) - \frac{1}{2} \left(\frac{2j-1}{n} \right) L_{fk} \sin \beta_1(k) \right]^2}{4 \eta t} - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. - \frac{\left[\left(y_{fi} + \left(1 - \frac{1}{2n}\right) L_{fk} \cos \alpha(k) \right) - \left(y_{fk} + \frac{1}{2} \left(\frac{2j-1}{n} \right) L_{frk} \cos \beta_1(k) \right) \right]^2}{4 \eta t} \right] + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{L_{frk}}{L_{fk} + L_{frk}} \left[-\text{Ei} \left[-\frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2n}\right) L_{frk} \sin \beta(k) + \frac{1}{2} \left(\frac{2n-2j+1}{n} \right) L_{fk} \sin \alpha(k) \right]^2}{4 \eta t} \right. \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. - \frac{\left[\left(y_{fi} + \left(1 - \frac{1}{2n}\right) L_{frk} \cos \beta(k) \right) - \left(y_{fk} + \frac{1}{2} \left(\frac{2n-2j+1}{n} \right) L_{fk} \cos \alpha(k) \right) \right]^2}{4 \eta t} \right] - \right. \right. \\ & \left. \left. \text{Ei} \left[-\frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2n}\right) L_{frk} \sin \beta(k) - \frac{1}{2} \left(\frac{2j-1}{n} \right) L_{frk} \cos \beta(k) \right]^2}{4 \eta t} - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. - \frac{\left[\left(y_{fi} + \left(1 - \frac{1}{2n}\right) L_{frk} \cos \beta(k) \right) - \left(y_{fk} + \frac{1}{2} \left(\frac{2n-2j+1}{n} \right) L_{frk} \cos \beta(k) \right) \right]^2}{4 \eta t} \right] \right] \right] + \end{aligned}$$

$$\frac{q_{fi}\mu ZT p_{sc}}{\pi K_{fi}\tau w_i T_{sc}} \left[\sqrt{\frac{(x_{fi} + x_{fri})h}{\pi}} + S \right] \quad (10)$$

式中: p_i 为原始地层压力, MPa; p_{wf} 为井底流动压力, MPa; Z 为天然气偏差系数; μ 为气体黏度, mPa·s; q_{fk} 为第 k 条裂缝的产量, m^3/d 。

该公式非常复杂, 实际上包括 2 方面的内容: 一方面是流体在油藏里的流动, 用解析法求解; 另一方面是流体在裂缝里的流动, 用网格划分法求解, 网格划分越密, 计算精度越高。具体计算过程如下:

- 1) 输入基本参数。油藏几何尺寸、裂缝数量、裂缝位置、裂缝几何尺寸、时间步长、气藏物性参数(渗透率、黏度、密度、初始压力等);
- 2) 按照不同的裂缝方式, 将 N 条裂缝的各微元段累加求和, 同一条裂缝产量前面的系数合并;
- 3) 计算出方程组的系数矩阵;
- 4) 利用高斯消元法对方程组进行求解, 求出每条裂缝的产量;
- 5) 将每条裂缝的产量累加得出水平井的产量;
- 6) 如果计算时间小于生产时间, 返回步骤 2), 继续下一时刻模拟计算, 直至生产时间为止, 并输出每条裂缝和水平井的产量。

3 实例计算分析

徐深气田某压裂水平井水平段长 940 m, 压裂时形成了 4 条裂缝, 其裂缝半长为 95 m, 裂缝渗透率 25 000 mD。利用上述公式进行计算, 首先考虑裂缝左右两翼与水平井筒所形成夹角相等, 结果表明, 当夹角为 90° 时, 计算产量与实际产量相差最小, 但误差仍相对偏大, 且有扩大趋势, 如图 2 中 A 情况。

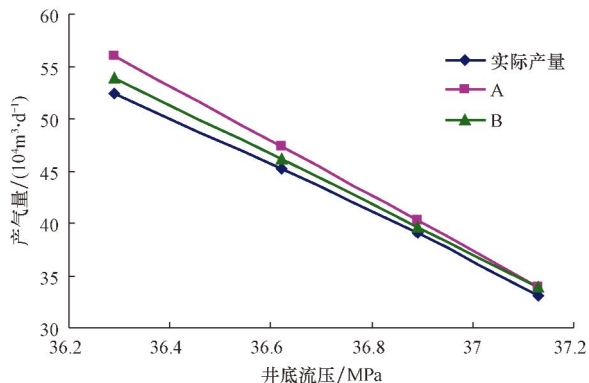


图 2 徐深气田某井的实际产量与计算产量对比

Fig. 2 Comparison of the predicted production versus the practical of a well in Xushen gas field

若考虑左右两翼非直线分布, 调整左右两翼与水平井筒的夹角, 利用公式重新计算, 结果表明, 当 $\alpha=90^\circ$, $\beta=85^\circ$ 时, 计算产量更接近实际产量, 如图 2 中 B 情况。这说明该井压裂的左右两翼并不严格在一条直线上的, 而是存在一定的角度偏差。

利用式(10)编制计算程序, 代入徐深某区块实际压裂水平井的参数, 其中裂缝数量为 4 条、裂缝左右翼长度相等且裂缝间距相同。计算裂缝左右翼与水平井筒夹角不同情况下水平井的产能, 计算结果如图 3 所示。

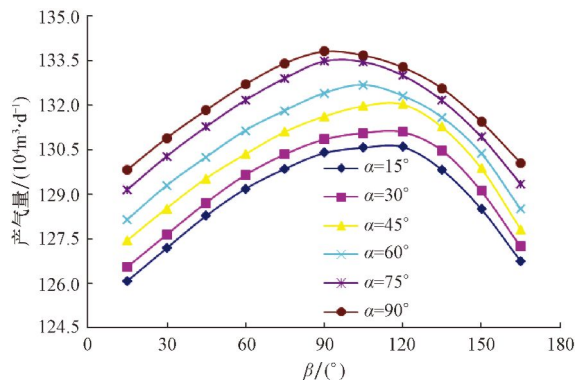


图 3 不同的 α, β 取值对水平井产气量的影响

Fig. 3 The effect of different α, β on the daily gas production of horizontal well

由图 3 可以看出: 在裂缝左翼夹角取值相同时, 随着裂缝右翼夹角的增大, 水平井产能曲线先逐渐上升, 但增幅逐渐变小, 在 90° 左右达到最大后, 随着右翼夹角的增大逐渐减小; 当右翼夹角 β 取值相同时, 水平井产量随着 α 的增大而增大; 从总体上看, 裂缝与水平井筒的夹角对产能的影响不大; 当左翼夹角 α 较小时, 水平井的最大产量在 $\beta=120^\circ$ 左右, 而随着 α 的增大, 水平井最大产量逐渐向 $\beta=90^\circ$ 靠拢。分析认为当 α 较小时, 在 120° 附近裂缝右翼受裂缝左翼以及水平井筒的综合影响最小, 而当 α 增大到 90° 时, 受裂缝左翼以及水平井筒综合影响最小的区域逐渐向与水平井筒垂直方向靠近。从图 3 还可以看出, 当 α 和 β 均为 90° 时, 所得到的水平井产量最大。因此建议压裂施工时应尽量使压出的裂缝与水平井筒垂直。

4 结论与建议

- 1) 由于储层岩石应力分布不均以及施工技术等因素影响, 压裂施工得到的裂缝左右两翼并不完

全在同一个平面上,两翼平面可能和水平井井筒成不同的夹角,这会对压裂水平井产能预测造成一定影响。

2) 利用多点压降叠加原理、并引入拟压力推导出的裂缝左右两翼与水平井筒成不同夹角时的产能公式,更加切合实际压裂水平井。

3) 裂缝左右两翼与水平井筒垂直时产量最大,而裂缝与水平井筒夹角越小,产量越低。

4) 建议在进行压裂施工时应尽量使裂缝两翼成直线分布,并垂直于水平井筒,这样裂缝间的干扰最小,产量最大。

参 考 文 献

References

- [1] Giger F M, Reiss L H, Jourdan A P. The reservoir engineering aspects of horizontal drilling[R]. SPE 13024, 1984.
- [2] Babu D K, Odeh A S. Productivity of a horizontal well[R]. SPE 18298, 1989.
- [3] Brown J E, Economides M J. An analysis of hydraulically fractured horizontal wells[R]. SPE 24322, 1992.
- [4] 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.
Ding Yiping, Wang Xiaodong, Xing Jing. A method of productivity calculation for fractured horizontal well[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2008, 15(2): 64-68.
- [5] Soliman M Y, Hunt J L, El Rabaa A M. Fracturing aspects of horizontal wells[J]. JPT, 1990, 42(8): 966-973.
- [6] 张学文, 方宏长, 裴梓楠, 等. 低渗透率油藏压裂水平井产能影响因素[J]. 石油学报, 1994, 20(4): 59-63.
Zhang Xuwen, Fang Hongchang, Qiu Yinan. A study on factors affecting the performance of hydraulically fractured horizontal well in low permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 1994, 20(4): 59-63.
- [7] 陈杉沁. 火山岩气藏水平井产能预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
Chen Shanqin. Study on horizontal well productivity prediction methods of volcanic gas reservoir[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2009.
- [8] 王晓冬, 于国栋, 李治平. 复杂分支水平井产能研究[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6): 729-733.
Wang Xiaodong, Yu Guodong, Li Zhiping. Productivity of horizontal wells with complex branches[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6): 729-733.
- [9] 高海红, 程林松, 曲占庆. 压裂水平井裂缝参数优化研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2006, 21(2): 29-32.
Gao Haihong, Cheng Linsong, Qu Zhanqing. Optimization of the fracture parameters of fractured horizontal wells[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2006, 21(2): 29-32.
- [10] 魏明臻, 王鸿勋, 张士诚. 水平裂缝参数优化技术研究[J]. 断块油气田, 1999, 6(3): 36-39.
Wei Mingzhen, Wang Hongxun, Zhang Shicheng. Technology research on parameters optimization of horizontal fracture[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1999, 6(3): 36-39.
- [11] 曾凡辉, 郭建春, 徐严波, 等. 压裂水平井产能影响因素[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 474-477.
Zeng Fanhui, Guo Jianchun, Xu Yanbo, et al. Factors affecting production capacity of fractured horizontal wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 474-477.
- [12] 李小刚, 杨兆中, 伍晓妮, 等. 油井水力压裂后产量变化的混沌特征分析[J]. 断块油气田, 2009, 16(1): 63-65.
Li Xiaogang, Yang Zhaozhong, Wu Xiaoni, et al. Chaos analysis of oil production rate variation of hydraulically-fractured well[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(1): 63-65.
- [13] 唐汝众, 温庆志, 苏建, 等. 水平井分段压裂产能影响因素研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(2): 80-83.
Tang Ruzhong, Wen Qingzhi, Su Jian, et al. Factors affecting productivity of stage fractured horizontal well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(2): 80-83.
- [14] 王晓泉, 张守良, 吴奇, 等. 水平井分段压裂多段裂缝产能影响因素分析[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(1): 73-76.
Wang Xiaoquan, Zhang Shouliang, Wu Qi, et al. Factors affecting the productivity of multi-section fractures in subsection fracturing of horizontal wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(1): 73-76.

国内首次成功实施深井小井眼定向随钻扩孔作业

中国石化石油工程技术研究院在塔河油田 TH10410CH2 井应用双心钻头成功进行了深井小井眼定向随钻扩孔作业,解决了大斜度、高曲率条件下的定向随钻扩孔技术难题,满足复杂泥岩段的机械封隔需求。

该井随钻扩孔作业井段 5 712~5 865 m,一趟钻完成,井斜角由 14°增大至 42.5°,平均全角变化率 5.55°/30 m,最大全角变化率 10.36°/30 m,平均井径 172 mm,实现了定向井眼轨迹平滑控制、井径大于 165 mm 的设计目标。该井定向随钻扩孔井段平均机械钻速达到 1.32 m/h,而使用 $\phi 149.2$ mm 钻头侧钻时的机械钻速仅为 1.18 m/h,随钻扩孔作业仅历时 6 d,较设计周期缩短约 50%。

TH10410CH2 井是国内首口成功实施小井眼定向随钻扩孔作业的油井,不仅填补了国内技术空白,而且创造了国内定向随钻扩孔作业的井深最深纪录。

[白彬珍 供稿]