

文章编号: 0253-2697(2002)02-0068-04

## 低渗透油气藏压裂水平井产能计算方法

宁正福 韩树刚 程林松 李春兰

(石油大学 北京昌平 102200)

**摘要:** 在前人研究的基础上,应用复位势理论、叠加原理和矩阵方程的数值分析求解方法,并考虑裂缝内的渗流阻力及压力损失,对压裂水平井产能预测公式进行了重新推导和修正,使计算结果更加合理和符合实际;利用所推导的计算公式,结合我国一实际的低渗透气田,对影响压裂水平井产能的几个重要因素进行了对比和分析,并得出有益的结论,其结果对实际低渗透油气田压裂水平井的设计具有一定的指导意义。

**关键词:** 低渗透; 水平井; 裂缝; 产能预测; 渗流阻力

**中图分类号:** TE357.1

**文献标识码:** A

对于低渗透油气藏,仅采用水平井开发往往达不到所预期的开发效果,为此,常常进行水力压裂产生多条裂缝以增加水平井的产能。但有关压裂水平井产能研究的文章<sup>[1~4]</sup>并不多,所进行的研究也不是很完善,并且在推导公式的过程中大都进行了一定程度的简化和近似,因而其准确性受到一定程度的影响。文献[1]采用复位势理论和叠加原理推导出压裂水平井产能预测公式,使压裂水平井产能预测的准确性有较大提高,然而,在推导过程中作者作了每条裂缝的产量都相等的假设与实际不相符,并且存在一定误差,按照此公式计算并作出的产能与裂缝条数的关系变化曲线中将会出现一定的跃变。为此,笔者在文献[1]的基础上对压裂水平井的产能预测公式进行了重新推导和修正,并在公式中考虑了裂缝内存在渗流阻力和压力损失这一实际问题,从而使新的产能预测公式更具有实际应用价值;最后利用新公式进行对比计算,对裂缝位置、裂缝条数、裂缝半长及水平井长度(即裂缝间距)等参数对压裂水平井产能的影响进行了分析和对比。

### 1 压裂水平井产能公式的推导

#### 1.1 渗流模型的建立

按照文献[1]中提供的方法作如下假设:

(1) 上下封闭的无限大非均质地层,厚度为  $h$ ,水平渗透率为  $K_h$ ;地层中心有一口水平井,井筒长度为  $L$ ;

(2) 为了提高产量,在水平段进行了压裂,压出  $N$  条垂直裂缝,裂缝等距离分布并且穿过整个油层厚度,设裂缝半长为  $X_f$ ,裂缝的渗透率为  $K_f$ ,宽为  $w$ 。

如果水平段没有进行补孔,则流体将先从地层流入裂缝,然后沿裂缝流入井筒<sup>[2]</sup>,所以压裂水平井的产量即为每条裂缝产量之和。

#### 1.2 公式推导

(1) 裂缝条数  $N$  为奇数时,如图 1 所示,则裂缝中点纵坐标分别为  $0, \pm d, \pm 2d, \dots, \pm N_0d$ ,其中  $N_0 = (N-1)/2$  为  $x$  轴上下裂缝的条数, $d = L/N$  为裂缝与裂缝之间的间距。

根据复位势理论和势的叠加原理,第  $j$  条裂缝的势可近似为  $\varphi_{fi}(0, jd)^{[1]}$

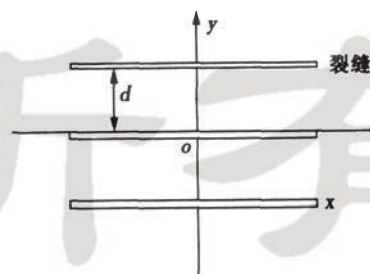


图 1 垂直裂缝分布示意图

Fig.1 Scheme map of vertical fractures

基金项目:中国石油天然气股份公司“西气东输早期评价”项目(CX2000-40)资助。

作者简介:宁正福,男,1965年10月生,1990年毕业于石油大学(北京)石油工程系,获工学硕士学位,主要从事油气田渗流理论研究。

$$\varphi_{fi}(0, jd) = \frac{B}{2\pi h} \sum_{i=-N_0}^{N_0} Q_{fi} \operatorname{arcch} \sqrt{1 + \left(\frac{jd - id}{X_f}\right)^2} + c \quad (1)$$

在  $y$  轴上距原点较远处取点  $(0, R_e)$ , 则供给边界的势  $\varphi_e$  为

$$\varphi_e(0, R_e) = \frac{B}{2\pi h} \sum_{i=-N_0}^{N_0} Q_{fi} \operatorname{arcch} \sqrt{1 + \left(\frac{R_e - id}{X_f}\right)^2} + c \quad (2)$$

式中  $R_e$  为供给半径, m;  $B$  为流体体积系数;  $h$  为地层厚度, m;  $Q_{fi}$  为第  $i$  条裂缝的产量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $X_f$  为裂缝半长, m。

由式(2)和式(1)并整理可得

$$p_e - p_{tj} = \frac{\mu B}{2\pi K_h h} \sum_{i=-N_0}^{N_0} Q_{fi} \left\{ \operatorname{arcch} \sqrt{1 + \left(\frac{R_e - id}{X_f}\right)^2} - \operatorname{arcch} \sqrt{1 + \left(\frac{jd - id}{X_f}\right)^2} \right\} \quad (3)$$

式中  $p_e$  为供给边界压力, MPa;  $p_{tj}$  为第  $j$  条裂缝的压力, MPa;  $K_h$  为水平渗透率,  $\mu\text{m}^2$ 。

(2) 当裂缝条数  $N$  为偶数时, 为了计算方便, 取  $d = L/2N$  (实际裂缝间距的一半), 取  $N_0 = N - 1$ , 则每条裂缝对应的纵坐标为  $(\pm d, \pm 3d, \pm 5d, \dots, \pm N_0 d)$ 。应用同样的方法可得

$$p_e - p_{tj} = \frac{\mu B}{2\pi K_h h} \sum_{i=-N_0}^{N_0} Q_{fi} \left\{ \operatorname{arcch} \sqrt{1 + \left(\frac{R_e - id}{X_f}\right)^2} - \operatorname{arcch} \sqrt{1 + \left(\frac{jd - id}{X_f}\right)^2} \right\} \quad (4)$$

但此处的加和过程中,  $i$  必须从  $-N_0$  以 2 的速度递增。

(3) 根据文献[5]所提出的理论, 由于裂缝的半长远远大于水平井筒的半径, 所以裂缝内的流体从裂缝边缘向井筒周围的聚集, 如果忽略重力的影响, 可近似看做地层厚度为  $w$ 、流动半径为  $h/2$ 、边界压力为  $p_{tj}$ 、井底压力为  $p_{wfj}$  (裂缝底部的压力) 的平面径向流, 不考虑裂缝的表皮因子造成的压降, 则有如下表达式成立

$$p_{tj} - p_{wfj} = \frac{Q_{tj} \mu B}{2\pi K_f w} \ln \frac{h}{2r_w} \quad (5)$$

(4) 设所有裂缝底部的压力都等于井底压力, 即  $p_{wfj} = p_{wf}$ , 则式(3)加式(5)或式(4)加式(5)得

$$p_e - p_{wf} = \frac{\mu B}{2\pi K_h h} \sum_{i=-N_0}^{N_0} Q_{fi} \left\{ \operatorname{arcch} \sqrt{1 + \left(\frac{R_e - id}{X_f}\right)^2} - \operatorname{arcch} \sqrt{1 + \left(\frac{jd - id}{X_f}\right)^2} \right\} + \frac{Q_{tj} \mu B}{2\pi K_f w} \ln \frac{h}{2r_w} \quad (6)$$

由  $\operatorname{arcch} \sqrt{1 + x^2} = \ln(x + \sqrt{1 + x^2})$ , 并进行整理得

$$p_e - p_{wf} = \frac{\mu B}{2\pi K_h h} \sum_{i=-N_0}^{N_0} Q_{fi} \ln \frac{\left(\frac{R_e - id}{X_f}\right) + \sqrt{1 + \left(\frac{R_e - id}{X_f}\right)^2}}{\left|\left(\frac{jd - id}{X_f}\right)\right| + \sqrt{1 + \left(\frac{jd - id}{X_f}\right)^2}} + \frac{Q_{tj} \mu B}{2\pi K_f w} \ln \frac{h}{2r_w} \quad (7)$$

式中的  $j$  按照裂缝条数  $N$  的奇偶性从  $-N_0$  到  $N_0$  依次取值, 这样就会产生一个有  $N$  个未知数、 $N$  个方程的方程组, 所以此方程组可以封闭求解。利用矩阵方程组的数值分析求解方法(一般以列主元高斯—约当法求解即可满足精度要求)求出每条裂缝的产量  $Q_{fi}$ 。

压裂水平井的产量即为全部裂缝的总产量, 则

$$Q = \sum_{i=-N_0}^{N_0} Q_{fi} \quad (8)$$

(5) 如果流体为天然气, 根据压力函数的定义和真实气体的状态方程, 并将裂缝产量换算为地面标准状况下气体产量, 则式(7)可写为

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = \frac{\mu_g p_{sc} Z T}{\pi T_{sc}} \left\{ \frac{1}{K_h h} \sum_{i=-N_0}^{N_0} Q_{gfi} \ln \frac{\left(\frac{R_e - id}{X_f}\right) + \sqrt{1 + \left(\frac{R_e - id}{X_f}\right)^2}}{\left|\left(\frac{jd - id}{X_f}\right)\right| + \sqrt{1 + \left(\frac{jd - id}{X_f}\right)^2}} + \frac{Q_{gfi}}{k_f w} \ln \frac{h}{2r_w} \right\} \quad (9)$$



## 2 实例计算及敏感性分析

某气田,其地层、气体以及裂缝和井参数如表1。

### 2.1 裂缝位置对压裂水平井产能的影响

下面以5条裂缝为例,水平井压裂后不进行补孔,计算和比较每条裂缝对压裂水平井产能的影响,计算结果见表2。

从表2不难看出,在压裂水平井中,实际上每条裂缝的产量是不相等的,而是从两端到中间逐渐递减,并且,处于对称位置上的裂缝的产量相等。因此,在实际生产作业中应特别注意采取措施,提高端部裂缝的生产能力,以获得较好的增产效果。

### 2.2 参数分析

(1) 从图2中可以明显看出,改进后的公式计算出的结果不再随裂缝条数的变化而产生跳动,并且,虽然新公式考虑了裂缝内的渗流阻力,但其计算结果仍然高于文献[3]中公式的计算结果,因为在文献[3]中假设了每条裂缝的产量相等,并以中间裂缝的产量代替了每条裂缝的产量,从表2的分析可知,中间裂缝的产量是偏低的;同时,压裂水平井的产量随裂缝条数的增加而增加,裂缝条数为3~5时即接近最高产量,当 $N > 5$ 时,这种趋势将变的不再明显。

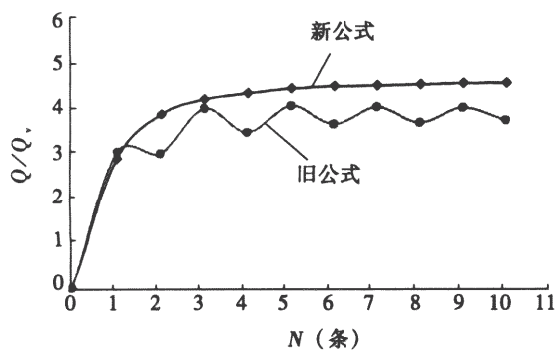


图2 裂缝条数对水平井产能的影响

Fig.2 The numbers of fracture vs. a horizontal well productivity

表1 地层、气体以及裂缝和井参数表

Table 1 The parameters of reservoir, gas, fractures and well

参数名称	数值	参数名称	数值
气层厚度, m	8	气体粘度, mPa·s	0.022
水平渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$	0.8	气体压缩因子	0.964
地层压力, MPa	27.56	裂缝半长, m	100
井底压力, MPa	23.56	裂缝渗透率, $\mu\text{m}^2$	30
地层温度, $^{\circ}\text{C}$	100	裂缝宽度, m	0.005
井筒半径, m	0.1	井筒长度, m	400

表2 不同位置裂缝的产量

Table 2 The production of each fracture

裂缝编码	-2	-1	0	1	2
产量( $10^4 \text{m}^3/\text{d}$ )	1.977	0.713	0.646	0.713	1.977

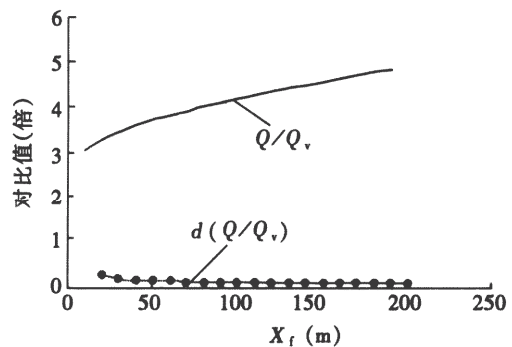


图3 裂缝半长对水平井产能的影响( $N=3$ )

Fig.3 The half length of fractures vs. a horizontal well productivity( $N=3$ )

(2) 图3中 $Q/Q_v$ 为压裂水平井与未压裂直井产能的比值, $d(Q/Q_v)$ 表示压裂水平井与未压裂直井产能比值的增加幅度。图3显示,压裂水平井的产能随裂缝半长的增加而增加,但增长的幅度在逐步下降,因此并不是裂缝越长越好,而是对特定的地层存在一个最佳值,因此,靠提高裂缝长度来大幅度增大增产的效果是不可行的。

(3) 图4显示,水平段长度增加(即裂缝间距增加),压裂水平井的产能增加,但增长幅度变小,这主要是因为随着裂缝间距的增加,裂缝间相互干扰的作用逐步减弱。

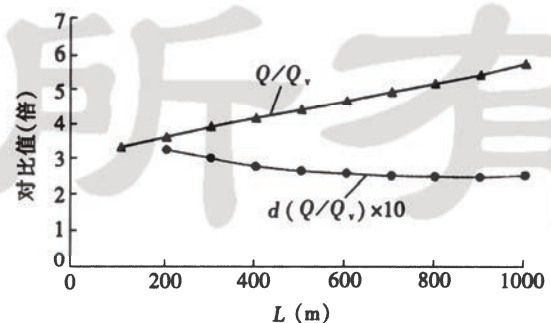


图4 水平段长度对压裂水平井产能的影响( $N=3$ )

Fig.4 The well length vs. a fractured horizontal productivity

### 3 结 论

(1) 本文推导出的计算公式修正了原来公式的错误,并考虑了裂缝内的渗流阻力和压力损失,更加合理和符合实际。

(2) 每条裂缝的产量并不相同,端部裂缝的产量最高,中间裂缝产量最低。

(3) 对于压裂水平井来说,并不是裂缝条数越多越好,一般来说以3~5条最佳。

(4) 压裂水平井的产能随裂缝半长和水平井水平段长度的增加而增加,但增长幅度逐渐减小。

### 参 考 文 献

- [1] 朗兆新,等. 压裂水平井产能研究[J]. 石油大学学报(自然科学版). 1994,18(2):43~46.
- [2] Hujun Li, et al. A new method to predict performance of fractured horizontal wells[C]. SPE37051, 1996:179~185.
- [3] 范子菲,等. 裂缝性油藏水平井稳态解产能公式研究[J]. 石油勘探与开发, 1996,23(3):52~63.
- [4] 李笑萍. 穿过多条垂直裂缝的水平井渗流问题及压降曲线[J]. 石油学报, 1996,17(2):91~96.
- [5] Hemanta Mukherjee, Michale J Economides. A parametric comparison of horizontal and vertical well performance[C]. SPE18303, 1988:209~216.

(收稿日期 2001-06-29

改回日期 2001-12-07

编辑 孟伟铭)

### 中国石油化工集团公司“十五”上中下游业务目标

中国石油化工集团公司总经理李毅中说,在新世纪开始的5~10年,中国石化将跟踪世界石油、石化发展趋势,以结构调整为主线,以提高竞争力为核心,通过改革开放、结构调整、技术创新、规范市场,推动产业升级。

(一) 充分把握石油勘探开发高风险、高技术、高投入、高回报的特点,挖掘中国石化上游业务的巨大潜能。加强老区和西部新区的开发,加快与中海油合作东海的开发,进一步巩固和加强上游业务的基础性地位。到2005年,原油剩余可采储量达到5.2亿~5.4亿t,其中新增探明可采储量3亿~3.5亿t,实现储采平衡有余;天然气剩余可采储量达到2300亿~3300亿m<sup>3</sup>,其中新增探明可采储量1500亿~2500亿m<sup>3</sup>;新建原油产能2500万~3000万t,原油自产量达到4000万~4100万t,获得境外份额油200万~300万t。新建天然气产能100亿m<sup>3</sup>,天然气产量达到100亿~120亿m<sup>3</sup>。

(二) 加大结构调整力度,提升炼油、发展乙烯。到2005年,炼油综合加工能力达到1.55亿t,其中中高含硫原油加工能力5400万t;坚决关停并转小炼油,淘汰落后的炼油装置;乙烯生产能力达到550万t,继续扩大高附加值产品的生产和销售。

(三) 改革营销方式,扩大零售,发展配送,增强市场控制力。到2005年,加油站总数达到3万座,其中自有加油站28000座,建成并完善两级配送网络;销售量达到9000万t,零售加配送占经营总量的比例达到80%,在中国石化主要市场内的零售市场占有率达到75%以上。

摘自《石油综合信息》



searchers to evaluate a reservoir. Since the present model is sensitive to the variation of saturation, mud property, drilling condition and so on, a reservoir can be evaluated through matching time dependent field logging data. Original water saturation (or true formation resistivity) and mud cake permeability are regarded as unknown parameters to be determined from the inversion routine. Field applications for dual-induction logging illustrate that the present model is a reasonable and efficient method for reservoir evaluation.

**Key words:** well logging; inversion; invasion; time; resistivity; saturation

#### THE DEVELOPMENT WELL-PATTERN OF LOW AND ANISOTROPIC PERMEABILITY RESERVOIRS

DING Yun-hong, et al. (*China University of Geosciences, Beijing 100083, China*) ACTA 2002, 23(2): 64~67

**Abstract:** Low permeability reservoirs commercial development is usually obtained by fracturing stimulation. The development of low permeability reservoirs is different from that of normal reservoirs because of the appearance of hydraulic fractures. Severe heterogeneity usually exist due to the permeability anisotropy resulted from developed or tensile natural fractures in low permeability reservoirs. As a result, it is necessary to take into account the effect of heterogeneity of both hydraulic fractured and permeability while planing well pattern. This paper presents the research of inverted nine-spot pattern which is normally used in the development of low permeability reservoirs and modified inverted nine-spot pattern and rectangular pattern. It shows that higher oil recovery and economic efficiency would be achieved by adopting the rectangular pattern if the azimuth of hydraulic fracture is clearly known.

**Key words:** low permeability; development well pattern; rectangle; inverted nine-spot; anisotropy

#### PRODUCTIVITY CALCULATION METHOD OF FRACTURED HORIZONTAL WELLS IN LOW PERMEABILITY OIL OR GAS FIELD

NING Zheng-fu, et al. (*Petroleum University, Beijing 102200, China*) ACTA 2002, 23(2): 68~71

**Abstract:** This paper revise the formula presented and deduce a new formula on productivity forecast of fractured horizontal well, applying potential function principles, superposition principle, and mathematical method for solving matrix, considering flow resistance and pressure drop in fracture. As an example, the productivity of fractured horizontal well in a low permeability gas reservoir has been tested by using this formula, and some useful conclusions have been drawn from comparing and analyzing some factors. These conclusions are instructive in designing fractured horizontal well for low permeability reservoir.

**Key words:** low permeability; horizontal well; fracture; productivity forecast; flow resistance

#### PETROLEUM ENGINEERING

##### A NEW METHOD OF PATH-CORRECTION PLANNING WITH THE DESIRED DIRECTION

LIU Xiu-shan, SHI Zai-hong (*Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China*) ACTA 2002, 23(2): 72~76

**Abstract:** During the process of directional drilling, the direction of well trajectory and its change are key parameters to monitor and control a well trajectory. As an important part of monitoring and controlling a well trajectory, the path-correction planning is generally required to reach a desired direction at its target. According to the characteristics of directional drilling technology, a three-section profile with two planar turns and one straight line is constructed in this paper to solve the problem on path-correction planning with the given direction in theory, which lays a