

水平井筒气水两相流动压降规律研究

彭 壮¹ 汪国琴¹ 徐 磊¹ 何显荣¹ 王春燕² 胡 松³

1. 长江大学石油工程学院, 湖北 武汉 430100;

2. 中国石油辽河油田公司, 辽宁 盘锦 124010;

3. 中国石油新疆油田公司, 新疆 克拉玛依 834000

摘 要:采用水平井开发有水气藏时,由于水平井中复杂的两相渗流规律以及水平井筒中特殊的流动状态,使得当流体从孔眼流入时会对水平流动产生显著影响,造成常规水平圆管气水两相流动规律不适用,其突出表现为流动中的压降变化。为了探索水平井筒气水两相流动压降分布规律,运用划分微元段的思想,建立了水平段一维混合流动井筒压降计算模型,在此基础上建立了水平气井携液模型,并采用 Fluent 流体仿真软件模拟气水同产水平井筒内的混合流动。研究表明,随着主流流速的增大,井壁摩擦压降、孔眼粗糙度压降以及混合压降都增大;井径的增加导致井壁摩擦压降和孔眼粗糙度压降都减小;而流体黏度只对孔眼粗糙度压降产生影响,增加黏度会引起粗糙度压降的增加。数值模拟结果表明,从井筒指端到跟端,流量增大,流速增大,孔眼入流会产生压力降,沿程总压力减小,符合井筒流动压降的原理。

关键词:水平井筒;变质量流;压降;计算模型;数值模拟

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2015.03.017

0 前言

近年来,水平井技术在油气田开发中得到广泛应用。有水气藏在开发中后期,井筒内会出现气水两相流动。此时气水两相的渗流规律以及流动状态与气体单相不同^[1-3],且由于气水两相之间的物性差异,不能照搬已有的油气、油水两相以及油气水三相等相关理论,水平井筒内气水两相流动和压降规律的研究逐渐受到大家的关注。根据经验,在有水气藏开发中,气井一旦产生地层水,气水两相渗流规律就不能再用气体单相渗流规律进行类比,气水同产时的产能分析和井筒流动状态也会发生改变^[4]。近期研究发现,流体在水平井筒中从指端到跟端的流动是在两端具有压差的条件下实现的,而不是以前学者假定的水平井筒为无限导流(即忽略整个水平段的压降)。高渗气藏、长水平段井以及高产井中水平段的流动将会对气藏生产动态产生较大影响,因此不能忽略水平井筒的压降^[5],认为水平井筒内为有限

导流(即考虑整个水平段的压降)。目前,国内外对气水同产水平井的气水两相流动规律和压降分布规律的研究较少,且没有能够与气藏渗流相结合的井筒流动模型,不能真实反映气水两相流动及压降变化对气藏产能的影响^[6-9]。因此进行水平井筒气水两相流动和压降分布规律的研究,对指导气藏开发方案设计、合理开发气藏具有重要的现实意义。

1 井筒气水两相压降计算模型

为了真实反映水平井筒内气水两相流动状态,建立的水平井筒气水两相压降计算模型是基于存在孔眼入流的情况,这时井筒内的流动为质量和流量不断增加的变质量流^[10-12]。当沿着井筒的质量流量增大时,流体的动量也增加,流速随之增加,各种压降也增加。同时,孔眼入流也将对井筒内流体的流动形态产生影响。因此,对井筒内气水两相压降进行计算时,应单独考虑各种流

态的影响。借助划分微元段的思想,将水平井等分为多段,孔眼均匀分布于每个井段,由叠加原理可知,整个水平井段的总压降等于各水平段的压降之和。

1.1 物理模型

水平井筒气水两相变质量流动物理模型见图1。

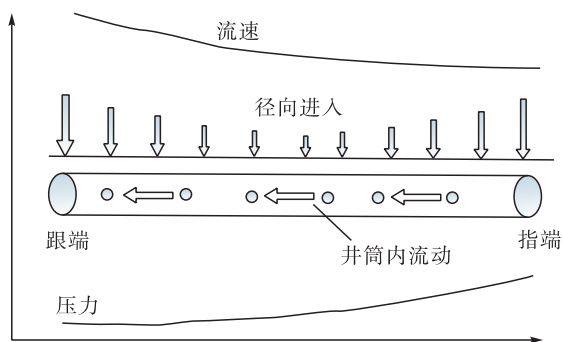


图1 水平井筒气水两相变质量流动物理模型

1.2 数学模型

孔眼入流时的井筒混合流动过程见图2。

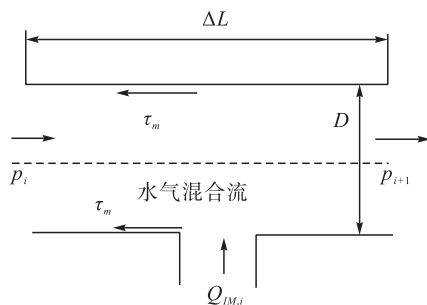


图2 孔眼入流时的井筒混合流动过程

针对图2模型作出如下假设:

- 1) 图2水平井筒中所有介质的流动均为一维流动。
- 2) 气水两相在孔眼和井筒中的流动为稳态流动,忽略温度的影响。
- 3) 不考虑气液之间的传质问题。
- 4) 井筒和孔眼中气水两相流动速度相等,无滑脱现象。

通过对微元段流动过程的压降分析得到,井壁摩擦压降、加速度压降以及混合压降这三种压力损失共同组成了微元段的总压降,即:

$$\Delta p_i = \Delta p_{\text{wall}i} + \Delta p_{\text{acci}} + \Delta p_{\text{mix}i} \quad (1)$$

式中: $\Delta p_{\text{wall}i}$ 为混合流动过程中第*i*个微元段所产生的井壁摩擦压降,kPa; Δp_{acci} 为混合流动过程中第*i*个微元段所产生的加速度压降,kPa; $\Delta p_{\text{mix}i}$ 为混合流动过程中第*i*个微元段所产生的混合压降,kPa。

2 水平井筒压降影响因素分析

根据前人的研究成果可知,井壁的摩擦压降、流体加速度压降以及孔眼入流产生的混合压降共同组成了

水平井筒流动过程中的总压降。下面结合水平井筒气水两相流动的数学模型,对影响以上三种压降的因素进行相应分析。

2.1 井壁摩擦压降的影响因素分析

在水平井筒中,孔眼沿径向的流入以及气水两相混合主流的流动,都要受到井壁摩擦的影响而产生压力损失,且水平井沿程压力损失的大小决定了井壁摩擦压降的大小,因此,通过改变决定沿程压力损失大小的流速以及井筒直径等因素,可以分析流速和井筒直径变化对气水两相变质量流动中井壁摩擦压降的影响。

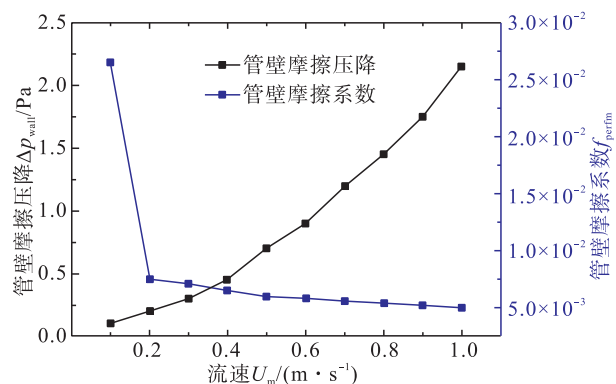


图3 混合流速对井壁摩擦压降及井壁摩擦系数的影响

图3为水平井筒气水两相混合流速对井壁摩擦压降及摩擦系数的影响关系曲线。由图3可见,随着气水两相混合流速的增加,井壁摩擦压降呈现增大的趋势,而井壁摩擦系数呈现减小的趋势。也可以由井壁摩擦系数的变化曲线得出,当气水两相混合流速 U_m 在 $0.1 \sim 0.2$ m/s 时,井壁摩擦系数存在急剧下降的趋势;当 $U_m > 0.2$ m/s 时,井壁摩擦系数的变化趋于平缓,这是由于在其他参数给定时,随着气水混合流速的增加,井筒内的流态会发生变化,从最初的层流转变为紊流,导致井壁摩擦系数大幅降低。同时,流体流动更加紊乱,使得井壁的摩擦压降反而增加;另外,在井壁摩擦系数急剧变化时,由于从层流转变为紊流时存在一个过渡阶段,摩擦压降的变化很小。

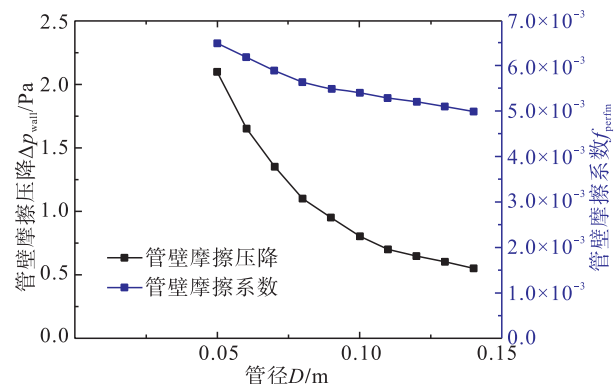


图4 井径对井壁摩擦压降及摩擦系数的影响

图4为水平井筒直径对井壁摩擦压降及摩擦系数影响的关系曲线。图4表明,随着水平井筒直径的增加,在一定范围内,井壁摩擦系数及摩擦压降都表现出减小的趋势;并且,从井壁摩擦系数和摩擦压降的变化曲线可以发现,摩擦压降减小的幅度比摩擦系数减小的幅度大。结合数学模型,通过分析井壁摩擦压降和摩擦系数的计算过程可知,这是由于井壁摩擦压降与井筒直径的平方成反比,而井壁摩擦系数与井筒直径的一次方成反比。

2.2 孔眼粗糙度压降的影响因素分析

当存在孔眼入流时,孔眼处摩擦作用于流体时会产生流动阻力,即孔眼粗糙度压降,对水平井筒总压降会产生一定的影响。由孔眼粗糙度压降的影响因素可以看出,其大小与混合流速、水平井井径和流体黏度有关。下面分别分析气水混物流速、水平井井径和流体黏度对孔眼粗糙度压降和孔眼摩擦系数的影响。

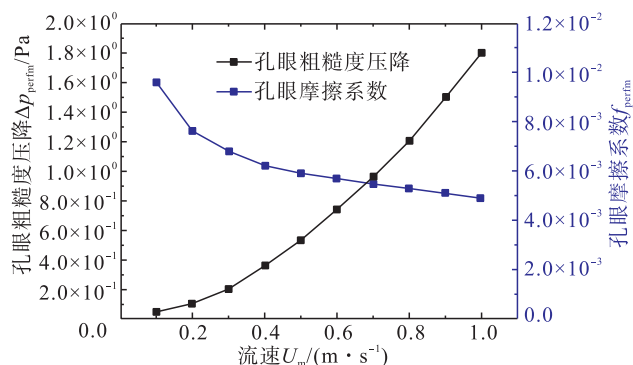


图5 混合流速对孔眼粗糙度压降及孔眼摩擦系数的影响

图5为水平井筒气水两相混合流速对孔眼粗糙度压降及孔眼摩擦系数影响的关系曲线。结果表明,随混合流速的增加,孔眼摩擦系数减小,孔眼粗糙度压降逐渐增大。从摩擦系数的计算式可知,孔眼摩擦系数与流速成反比,因此流速的增加会引起孔眼摩擦系数的减小。由于其减小量赶不上速度平方的增加量,故最终导致孔眼粗糙度压降的增大。

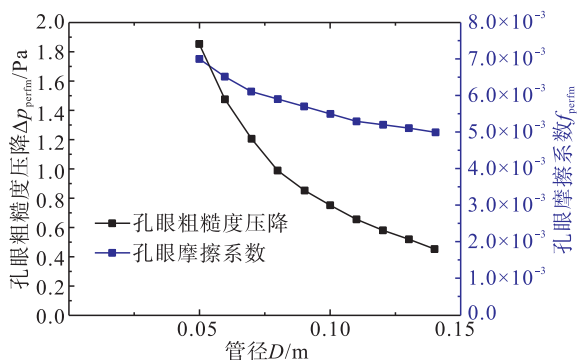


图6 井径与孔眼粗糙度压降及孔眼摩擦系数的影响

图6为水平井筒直径对孔眼粗糙度压降及孔眼摩擦系数影响的关系曲线。由图6可见,随着井筒直径的增

加,孔眼摩擦系数和孔眼粗糙度压降都减小;但是,井径对孔眼粗糙度压降的影响程度比孔眼摩擦系数的大,故合理使用大口径水平井有助于减小摩擦压降和孔眼粗糙度,进而减小井筒的压降。

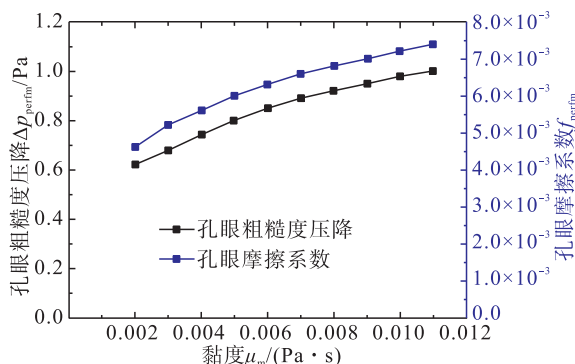


图7 流体黏度对孔眼粗糙度压降及孔眼摩擦系数的影响

图7为水平井筒气水两相混合黏度对孔眼粗糙度压降及孔眼摩擦系数影响的关系曲线。由图7可见,随着混合黏度的增加,孔眼摩擦系数及孔眼粗糙度压降都增加,且它们的变化规律相似。但是,通过对孔眼摩擦系数和孔眼粗糙度压降的分析可知,混合黏度的变化只会对孔眼摩擦系数产生一定的影响,而气水两相混合流速和井筒直径的变化则对孔眼摩擦系数和孔眼粗糙度压降均会有影响。

2.3 混合压降的影响因素分析

孔眼入流时,侧流与井筒中主流混合作用而产生混合损失,造成压力的降低,即混合压降。下面通过改变混合流速的大小来分析其对孔眼入流时混合压降的影响。

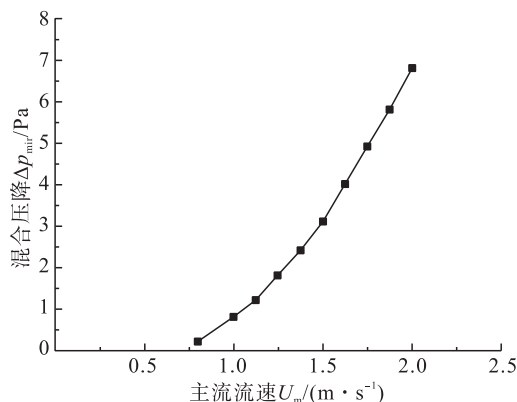


图8 井筒主流流速对混合压降的影响

图8为井筒内气水两相混合流动过程中主流流速对混合压降影响的关系曲线。图8表明,随着井筒中主流流速的增大,孔眼入流时的混合压降也将不断增大。当通过孔眼进入井筒中的流量逐渐增大时,从井筒指端到跟端的流体速度也会增大,由图8可知混合压降也将随之增加。随着孔眼的不断入流,井筒中总流量持续增大,混合压降的增幅也将变大。

3 水平井筒气水两相流场模拟

为了更加直观地探讨孔眼入流时,水平井筒气水两相混合流动过程中流体流动的速度变化以及压力分布规律等流动特性,采用 Fluent 流体仿真软件建立相应的水平井筒变质量流动模型,模拟孔眼入流时气水两相的混合流动过程。

3.1 物理模型

建立带有射孔的水平井筒三维模型,射孔均匀分布在水平井筒的上部。以各射孔以及右端面(指端)入口速度作为速度入口边界条件;左端面(跟端)作为压力出口边界条件。网格化后的水平井筒物理模型见图9。

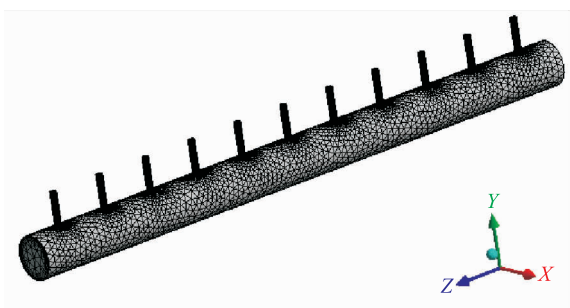


图9 网格化后的水平井筒物理模型

3.2 计算结果及分析

选作模拟的水平井段长 12 m,半径 0.1 m;射孔高度 0.2 m,半径 0.01 m,射孔均匀分布于水平段上,间隔 1 m。选用的气液流动介质分别为甲烷(CH_4)和液态水(体积分数为 5%);设定水平井筒主流速度为 1.2 m/s,孔眼入流速度为 0.5 m/s。将求解器设为定常流动,加入 mixture 多相流模型,选择 Realizable $\kappa - \varepsilon$ 模型,采用 SIMPLEC 算法。迭代计算结果见图 10~13。

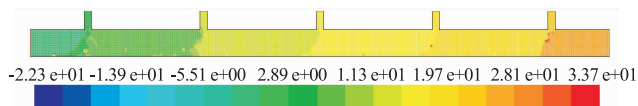
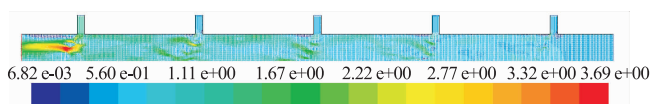


图10 水平井筒的压力分布

由图 10 可以看出,水平井筒在截面上的压力分布都是由井筒指端到跟端逐渐减小,而从井筒指端到跟端的流体速度是增加的,因此,以上变化规律符合流速大、压强小的流动定律,也符合水平井筒流动压降的原理。



a) 整个水平段的流速分布



b) 井筒局部流速分布

图11 井筒内的流速分布

由图 11-a)可以看出,整个水平井筒的流速分布规律为沿着井筒从指端到跟端流体流速逐渐增大。这是由于随着孔眼流体的不断入流,井筒中沿流动方向的流量逐渐增大,导致往下游端流体动量的增大,从而速度也逐渐增大;由图 11-b)可以看出,孔眼及壁面附近的流速较小,孔眼入流处的速度分布较紊乱。这是由于靠近壁面的流体受到井壁摩擦阻,使近壁面处的流动受到阻碍,引起壁面附近的流速降低,形成边界层。

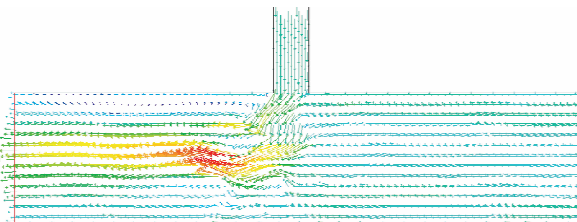


图12 井筒在 $x=0$ 截面上的速度矢量图

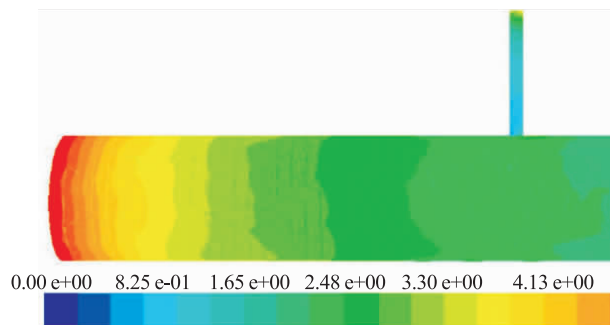


图13 井筒壁面剪切应力分布

从图 12 可以看出,孔眼附近的流速流线相比于其他位置有明显的变化,这是由于孔眼入流与井筒主流在孔眼处混合,发生强烈的相互碰撞和掺混,导致能量损失和速度变化,通过对比图 11-b)可知,孔眼入流时会在孔眼附近产生压力降。

从图 13 可以明显看到,壁面剪切应力的分布规律为沿着井筒从指端到跟端逐渐增大,在井筒跟端具有最大的壁面剪切应力,并且,由于孔眼入流的影响,在井筒跟端的流量最大,由此可得,井筒的壁面剪切应力与流量的大小成正比,该结果与牛顿流体的剪切应力分布规律相一致,牛顿流体的剪切应力计算表达式为 $\tau = \eta D$ (η 为流体黏度, D 为流速梯度)。

4 结论

1) 有水气藏水平气井出水后,流体从孔眼流入时会对水平流动产生显著影响,常规水平圆管气水两相流动规律不适用于水平井筒中气水两相流动。

2) 流体在水平井筒中从指端到跟端的流动是在两端具有压差的条件下实现的,而不是无限导流。

3) 流体在水平井筒中井壁摩擦压降、孔眼粗糙度压

降以及混合压降随着主流流速的增大而增大;井壁摩擦压降和孔眼粗糙度压降随着井筒直径的增加而减小;而流体黏度只对孔眼粗糙度压降产生影响,增加黏度会引起粗糙度压降的增加。

4)数值模拟结果表明,随着从井筒指端到跟端流量的不断增大,流速不断增大,孔眼入流会产生压力降,沿程总压力减小,符合井筒流动压降的原理,与水平井筒气水两相流动的压降规律吻合。

参考文献:

- [1] 李明,宫敬,李清平.气液两相流管道流固耦合问题[J].油气储运,2010,29(4):245-250.
Li Ming, Gong Jing, Li Qingping. Liquid-solid Coupling Problem in Gas-liquid Two Phase Flow Pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29(4): 245-250.
- [2] Ihara M, Yanai K, Takao S. Two-Phase Flow in Horizontal Wells[J]. Production & Operations, 1995, 10(4): 249-256.
- [3] 刘想平,郭呈柱,蒋志祥,等.油层中渗流与水平井筒内流动的耦合模型[J].石油学报,1999,20(3):82-86.
Liu Xiangping, Guo Chengzhu, Jiang Zhixiang, et al. The Coupling Model Fluid Flow in the Reservoir with Flow in the Horizontal Wellbore[J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(3): 82-86.
- [4] 周生田,张琪,李明忠,等.水平井筒变质量流体流动实验研究[J].石油大学学报(自然科学版),1998,22(5):53-55.
Zhou Shengtian, Zhang Qi, Li Mingzhong, et al. Experimental Study on Variable Mass Fluid Flow in Horizontal Wells[J]. Journal of University of Petroleum, China (Natural Science Edition), 1998, 22(5): 53-55.
- [5] 汪志明,肖京男,王小秋,等.水平井变质量流动压降规律实验研究[J].实验流体力学,2011,25(5):26-29.
Wang Zhiming, Xiao Jingnan, Wang Xiaoqiu, et al. Experimental Study of Pressure Drop of Variable Mass Flow in Horizontal Well[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(5): 26-29.
- [6] 周生田,张琪,李明忠,等.水平井变质量流研究进展[J].力学进展,2002,32(1):119-126.
Zhou Shengtian, Zhang Qi, Li Mingzhong, et al. The Advances on the Variable Mass Flow in Horizontal Wells[J]. Advances in Mechanics, 2002, 32(1): 119-126.
- [7] Schulkes R, Utvik O H. Pressure Drop in Horizontal Wells: Multiphase Flow with Radial Inflow[J]. BHR Group Multiphase, 1997, 20(5): 45-55.
- [8] 李笑萍,赵天奉.考虑变质量湍流影响的水平井流入动态分析[J].石油学报,2002,23(6):63-67.
Li Xiaoping, Zhao Tianfeng. Inflow Performance Analysis on Horizontal Well Bore with Changing Quality Turbulence Effect[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(6): 63-67.
- [9] 周海兵,崔桂香,黄学军.水平井变质量管内流动损失的数值研究(一):单支孔流动[J].石油钻采工艺,2000,22(2):42-45.
Zhou Haibing, Cui Guixiang, Huang Xuejun. Numeric Simulation Study of Flow Loss for Variable Mass Flow in Horizontal Well: Part One—Flow in Single Hole[J]. Oil Drilling Technology, 2000, 22(2): 42-45.
- [10] 罗启源.水平气井气水两相井筒流动压降研究[D].成都:西南石油大学,2011.
Luo Qiyuan. Research on Pressure Drop of Gas Water Two Phase Flow in Horizontal Gas Wells[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2011.
- [11] 江健,邹一峰,周兴付,等.水平井临界携液流量预测及其应用研究[J].天然气与石油,2012,30(3):45-48.
Jiang Jian, Zou Yifeng, Zhou Xingfu, et al. Critical Liquid-carrying Flow Prediction in Horizontal Well and Its Applications[J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(3): 45-48.
- [12] 王永胜,梅海燕,张茂林,等.低渗透水平气井产能分析三项式的推导和应用[J].天然气与石油,2014,32(6):53-57.
Wang Yongsheng, Mei Haiyan, Zhang Maolin, et al. Derivation and Application of Trinomial in Low Permeability Horizontal Gas well Productivity Analysis[J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32(6): 53-57.