

# 微流量控压钻井中节流阀动作对环空压力的影响

孔祥伟, 林元华, 邱伊婕

(油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 四川成都 610500)

**摘 要:**为解决窄安全密度窗口的复杂压力剖面问题,基于质量守恒方程及动量守恒方程,建立了节流阀动作引发的环空波动压力模型,并应用中心差分法对模型进行了求解。研究表明,随钻井液排量增大、节流阀动作时间减小,环空所受波动压力呈增大趋势;阀芯所受波动压力大于环空段;钻井液排量从 36 L/s 增至 56 L/s 时,阀芯所受波动压力峰值从 1.26 MPa 增至 1.56 MPa,钻铤段波动压力峰值为 0.22 MPa;节流阀动作时,套管鞋处引发故障的概率比井底高至 35%。研究结果表明,两步、多步线性关阀较一步关阀,不但关阀手段灵活,更可有效减小环空波动压力峰值。

**关键词:**流量控制 节流阀动作 特征线法 波动压力 控压钻井

**中图分类号:**TE254 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2014)03-0022-05

## Effect of Choke Valve Action on Annular Pressure with Micro-Flux Control in MPD Drilling

Kong Xiangwei, Lin Yuanhua, Qiu Yijie

(State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation(Southwest Petroleum University), Chengdu, Sichuan, 610500, China)

**Abstract:** To address effectively the complex pressure profile with narrow density window, the effects of choke valve action on fluctuation pressure in annulus have been studied during drilling operations. Based on the mass and momentum conservation equations, the model was established to simulate fluctuation pressure in annulus caused by choke valve action, and calculated by central difference method. In the calculation example, the fluctuation pressure in annular space will be higher with the increases of flow rate and the shorter time of choke valve action. The fluctuation pressure in the valve core is higher than that in the annulus, and the maximum fluctuation pressure increased from 1.26 MPa to 1.56 MPa with the flow rate of drilling fluids increased from 0.036 m<sup>3</sup>/s to 0.056 m<sup>3</sup>/s. The maximum fluctuation pressure is 0.22 MPa in drill collar section. When adjusting choke valve, the trouble probability at the casing shoe is 35% greater than that at the bottomhole. The research results indicate that the two-step or multi-step valve closing linearly is more flexible than the one-step valve closing, and can effectively lower the peak fluctuation pressure in annular space.

**Key words:** flow control; choke valve control; characteristic method; fluctuation pressure; managed pressure drilling(MPD)

近年来,随着钻井深度的增大,提出了许多井底压力控制方法,微流量控制(MFC)技术就是其中一种<sup>[1-3]</sup>。2003年,Santos等人提出了MFC概念,并阐述了该技术的控制理论<sup>[4]</sup>;2005年,Weatherford公司开发了地面MFC系统,在路易斯安那大学试验井进行了模拟试验<sup>[5]</sup>,2006年在海上复杂钻井环境中进行了试验<sup>[6]</sup>,2012年5月在四川彭州马蓬23-6HF进行

收稿日期:2013-07-06;改回日期:2014-03-25。

作者简介:孔祥伟(1982—),男,黑龙江大庆人,2005年毕业于黑龙江科技大学计算科学专业,2011年获西南石油大学油气井工程专业硕士学位,油气井专业在读博士研究生,从事控压钻井、井筒多相流体复杂流动及数字井控等方面研究工作。

联系方式:13880214723,ml3880214723@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“微流量地面自动控制技术研究”(编号:2011ZX05022-005-005HZ)部分研究内容。

了国内第一口井的现场试验。2013 年 9 月,西南石油大学 MFC 控压项目组成功研制出一套地面 MFC 设备。

MFC 技术控制环空压力的核心是调节节流阀开度,使井口产生一定回压,从而控制环空压力。因此,研究节流阀动作产生的回压尤为重要<sup>[7]</sup>。调节节流阀开度时,由于井口钻井液流速发生改变,在节流阀处产生波动压力,波动压力沿环空向井底传播<sup>[8]</sup>。环空压力增大或减小会引发井漏/溢流等井下故障,在节流阀处也会形成超压/气穴<sup>[9]</sup>。笔者将瞬态流理论<sup>[10-12]</sup>应用到 MFC 封闭水力循环系统中,解决了节流阀动作引发的波动压力计算问题,有助于研究 MFC 控压钻井节流阀动作对环空波动压力的变化规律<sup>[13-14]</sup>。

## 1 模型建立

节流阀在井口动作时,导致井口钻井液流速发生改变,钻井液的动能转化为压力势能,井底压力产生波动。在环空中,取任意倾角的微元环空作为控制体(见图 1),考虑摩擦阻力、管壁弹性及钻井液弹性,建立波动压力的运动方程及连续方程。

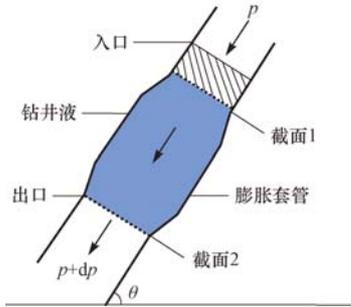


图 1 井筒的微元控制体结构

Fig. 1 Structure of micro-flux control along wellbore

### 1.1 运动方程

设  $dt$  时间内环空横截面积  $A = A(s, t)$ , 钻井液压强  $p = p(s, t)$ , 流速  $v = v(s, t)$ , 压力波传播速度  $c$ , 控制体  $\Delta s = c\Delta t$ 。设压力波通过微元环空  $ds$  前, 控制体内钻井液的速度为  $v_0$ , 压力波通过微元环空后, 流速变为  $v$ , 压强也由  $p$  增至  $p + \Delta p$ , 横截面由  $A$  增至  $A + \Delta A$ , 该微元控制体运动方程为:

$$\rho \left[ A + \frac{\partial A}{\partial s} \frac{ds}{2} \right] ds \frac{dv}{dt} = pA + \rho g \left[ A + \frac{\partial A}{\partial s} \frac{ds}{2} \right] ds \sin \theta + \left[ p + \frac{\partial p}{\partial s} \frac{ds}{2} \right] \frac{\partial A}{\partial s} ds - \left[ pA + \frac{\partial(pA)}{\partial s} ds \right] - \tau X ds \quad (1)$$

式中:  $p$  为压力, Pa;  $A$  为环空有效截面积,  $m^2$ ;  $\rho$  为钻井液密度,  $kg/m^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $s$  为环空长度,  $m$ ;  $\theta$  为环空与水平面夹角,  $(^\circ)$ ;  $\tau$  为环空壁对钻井液摩擦阻力, Pa;  $X$  为流体与壁面接触周界线,  $m$ ;  $v$  为环空中钻井液流速,  $m/s$ 。

考虑  $\frac{\partial H}{\partial s} = -\sin \theta$ ,  $\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s}$ , 式(1)变形

为:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{fv|v|}{8m} = 0 \quad (2)$$

式中:  $H$  为环空垂深,  $m$ ;  $f$  为钻井液沿环空阻力系数;  $m$  为水力半径,  $m$ 。

### 1.2 连续方程

根据质量守恒定律, 控制体中单位时间内流入与流出的钻井液质量差等于控制体质量改变量。  $dt$  时间内, 控制体连续方程为:

$$\left[ \rho A v dt + \frac{\partial(\rho A v dt) ds}{\partial s} \right] + \frac{\partial(\rho A ds)}{\partial t} = \rho A v dt \quad (3)$$

压力波速计算公式为<sup>[15]</sup>:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho \left[ \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dp} \right]}} \quad (4)$$

式中:  $c$  为压力波传播速度,  $m/s$ 。

将式(4)代入式(3), 整理得到连续运动方程:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial s} + \rho c^2 \frac{\partial v}{\partial s} = 0 \quad (5)$$

### 1.3 方程求解

式(2)可简化为:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\rho c^2}{A} \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (6)$$

式中:  $Q$  为钻井液排量,  $m^3/s$ 。

式(5)可简化为:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fv|v|}{8m} = 0 \quad (7)$$

串联环空结构如图 2 所示, 系统时间步长满足环空  $j$  及环空  $j+1$  约束:

$$L_j \geq c_j \Delta t \quad (8)$$

$$L_{j+1} \geq c_{j+1} \Delta t \quad (9)$$

式中:  $L_j$  为  $j$  段环空长度,  $m$ ;  $c_j$  为  $j$  段环空波速,  $m/s$ ;  $\Delta t$  为微元环空压力波传播时间,  $s$ 。

串联环空结点满足式(10)及式(11):

$$p_k^{j+1}(t) = p_k^j(t) \quad (10)$$

$$Q_k^{j+1}(t) - Q_k^j(t) = v(t) \Delta A \quad (11)$$

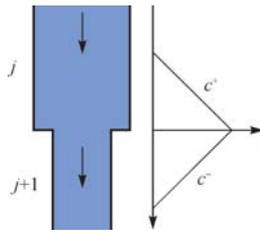


图 2 串联环空结构

Fig. 2 Structure of series annulus

式中： $Q_k^j$  为  $j$  段环空在  $k$  结点流量， $m^3/s$ 。

利用式(8)计算  $j$  段环空波速约束条件，利用式(9)计算  $j+1$  段环空波速约束条件，可得式(6)及式(7)的差分格式方程：

$$[p_{k,t}]_i + \rho \left[ \frac{c_j}{A_j} Q_{k,t}^j \right]_i - [p_{k-1,t-\Delta t}]_i - \rho \left[ \frac{c_j}{A_j} Q_{k-1,t-\Delta t} \right]_i + \frac{\rho \Delta t}{8} \left[ \frac{c_j f_{k-1,t-\Delta t}}{m_j} v_{k-1,t-\Delta t} \mid v_{k-1,t-\Delta t} \right] = 0 \quad (12)$$

$$[p_{k,t}]_i - \rho \left[ \frac{c_{j+1}}{A_{j+1}} Q_{k,t}^{j+1} \right]_i - [p_{k+1,t-\Delta t}]_i + \rho \left[ \frac{c_{j+1}}{A_{j+1}} Q_{k+1,t-\Delta t} \right]_i - \frac{\rho \Delta t}{8} \left[ \frac{c_{j+1} f_{k+1,t-\Delta t}}{m_{j+1}} v_{k+1,t-\Delta t} \mid v_{k+1,t-\Delta t} \right] = 0 \quad (13)$$

钻井液流量的约束条件为：

$$[Q_{k,t}^{j+1} - Q_{k,t}^j]_i - v(t) \Delta A_i = 0 \quad (14)$$

由于钻杆段环空与钻铤段环空的水力半径不一致，为使不同管径环空内边界条件一致，采用增加钻杆段环空网格数、同时保持钻铤段环空网格数不变的方法，表达式为：

$$N_j = \frac{L_j}{\Delta t_{\min} (v_j + c_j)} \quad (15)$$

在钻杆段环空与钻铤段环空结点处，时间步长应满足：

$$\Delta t \leq \frac{\Delta s}{\max |v_j + c_j|} \quad (16)$$

式中： $L_j$  为  $j$  段环空长度， $m$ ； $v_j$  为  $j$  段环空钻井液流速， $m/s$ 。

## 2 环空压力波动的影响因素分析

四川彭州地区某试验井应用 MFC 控压钻井技术钻至井深 3 800 m 时，钻柱组合、井身结构及 MFC 主要元件如图 3 所示，钻井液从井口泵入，流经钻杆到达井底，最后沿环空返回地面，可认为钻井液的流动通道是封闭的。钻井液密度  $1\,460\text{ kg/m}^3$ ，钻井液排量  $0.056\text{ m}^3/\text{s}$ ，管柱弹性模量  $207\text{ GPa}$ ，管柱泊松比  $0.30$ ，管柱粗糙度  $0.15\text{ }\mu\text{m}$ ，大气压为  $0.101\text{ MPa}$ 。

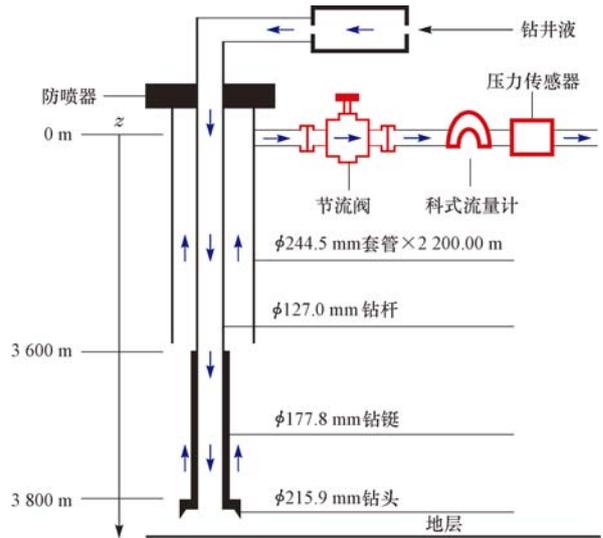


图 3 彭州某微流量控压试验井井身结构

Fig. 3 Casing program of a MPD testing well with MFC in Pengzhou

利用建立的环空波动压力模型，依据节流阀流量系数曲线，借助 VC++ 计算机语言实现编程，得到环空波动压力变化规律。算例中，将 3 800 m 环空分为 6 个计算点，其中钻杆段环空分为 0, 1 200 及 2 400 m 等 3 个点，钻铤段环空分为 3 600, 3 667 及 3 733 m 等 3 个点；以下  $H=0\text{ m}$  处均表示节流阀阀芯点。

试验井采用 T3  $\phi 50.8\text{ mm}$  节流阀，其有效开度区间为  $30\% \sim 70\%$ ，节流阀的流量系数曲线如图 4 所示。

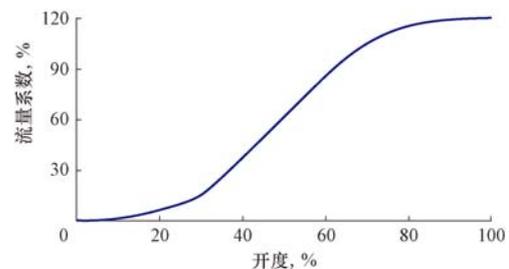


图 4 T3  $\phi 50.8\text{ mm}$  节流阀流量系数

Fig. 4 Flow coefficient of T3  $\phi 50.8\text{ mm}$  choke valve

通过节流阀动作控制环空压力的过程是动态的，不但要考虑回压及静液柱压力，还要考虑节流阀动作引起的波动压力，在控压钻井水力学计算中常忽略波动压力。环空中的各点压力可理解为回压、波动压力(节流阀动作引起)、静液柱压力、钻井液加速度力(钻井液加速运动引起)及环空摩擦力等共同作用的合力，当节流阀驻阀一段时间后，井口压力为节流阀稳定回压。

### 2.1 节流阀线性动作

井口稳定回压为 0.5 MPa, 钻井过程中发现溢流, 经计算需在井口产生 1.5 MPa 稳定回压, 节流阀开度调节为一步线性关闭, 0~5 s 内节流阀开度从 50% 线性调至 40%, 在 5~20 s 内节流阀开度保持 40% 开度, 钻杆段及钻铤段环空所受波动压力变化规律, 结果见图 5 和图 6。

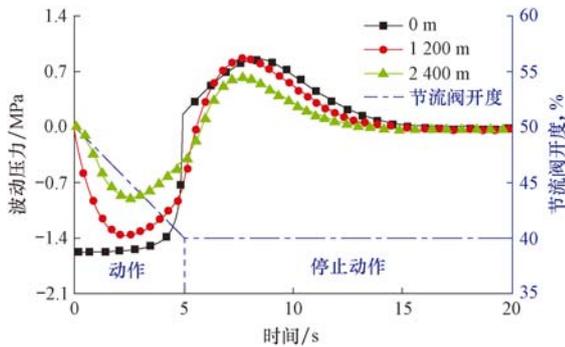


图 5 钻杆段环空中波动压力分布

Fig. 5 Distribution of fluctuation pressure in annulus outside drill pipe

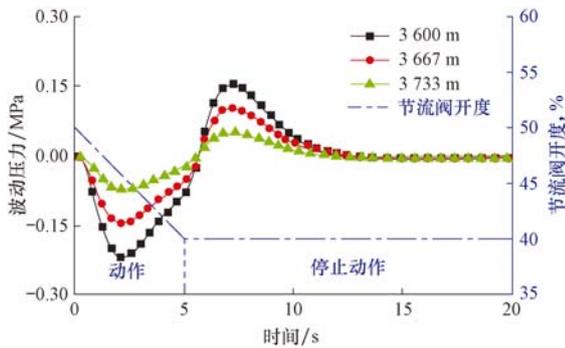


图 6 钻铤段环空中波动压力分布

Fig. 6 Distributions of fluctuation pressure in annulus outside drill collar

从图 5 和图 6 可以看出, 由于环空壁及裸眼井壁粗糙度较大, 压力在较长环空中大量损耗, 压力传递能量迅速衰减, 因此第一个周期内, 钻铤段的最大波动压力相对钻杆段有很大衰减。受波动压力的影响, 套管鞋处引发井下故障的概率比井底更大。第一个周期后, 波动压力衰减值接近 0。

### 2.2 节流阀两步动作

MFC 系统常采取多个控制周期及多次反馈的方法实现, 也就是节流阀经过多次动作来控制环空压力。为了给节流阀多次动作提供指导, 节流阀开度调节分为两步线性关闭, 0~2 s 内节流阀开度从

60% 线性调至 50%, 2~10 s 内节流阀开度从 50% 线性调至 40%, 在 10~30 s 内节流阀开度保持 40%, 实例模拟了两步节流阀动作对环空波动压力的影响规律, 结果见图 7。

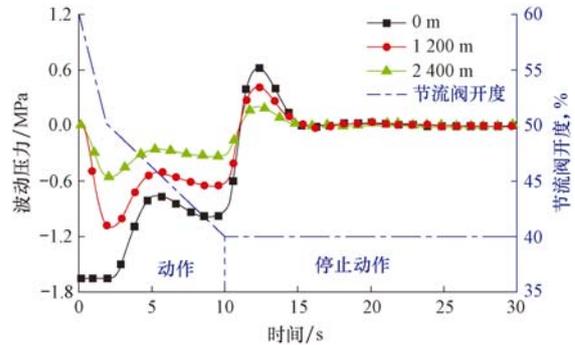


图 7 节流阀两步线性动作对环空波动压力的影响

Fig. 7 Effects of two-step linear closing of choke valve on fluctuation pressure in annulus

从图 7 可以看出, 由于第一次节流阀关闭速度比第二次节流阀关闭速度快, 导致第一步中节流阀动作转换的压力势能比第二步中节流阀动作转换的压力势能大, 因此第二步产生的波动压力减小。环空中各点的波动压力随着节流阀阀芯所受压力波动而变化, 环空壁的摩擦系数越小, 环空中波动压力的跟随性越好。

### 2.3 排量

节流阀开度调节动作与图 5 和图 6 的调节动作相同情况下, 随钻井液排量的变化, 得到节流阀阀芯 ( $H=0$  m) 处所受波动压力的变化规律结果 (见图 8)。

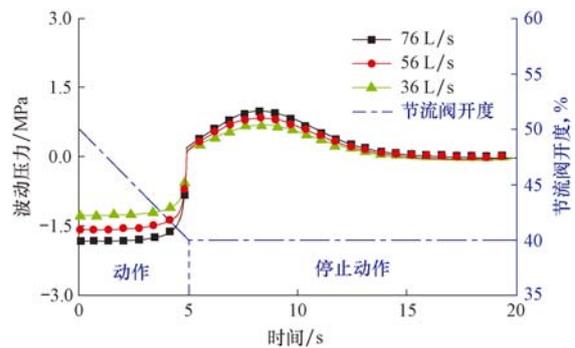


图 8 排量对节流阀阀芯所受波动压力的影响

Fig. 8 Effects of displacement change on fluctuation pressure in valve core

从图 8 可以看出, 随钻井液排量减小, 环空所受波动压力变小。钻井液排量减小, 不仅减小了钻井液动能, 更降低了环空壁对钻井液的摩擦。井口环

芯所受波动压力主要受到钻井液流速影响,而环空波动压力主要受到钻井液流速及摩阻等参数影响。摩阻减小,可使波动压力衰减变缓,随波动压力传播时间增长,钻井液排量引起的波动压力变化逐渐减小,这是环空摩阻大量消耗了钻井液动力势能的缘故。

### 3 结论与建议

1) 随着钻井液排量的增大,环空所受波动压力增大;环空摩阻对节流阀阀芯处的压力波动影响较小;节流阀动作时,套管鞋处引发井下故障的概率比井底更大。

2) 模拟了节流阀一步、两步线性动作时的波动压力变化规律。在实际MFC控压过程中,可按现场记录节流阀动作规律,根据具体工况对节流阀动作产生的波动压力进行仿真。

3) 节流阀动作产生的回压可分为稳定回压与波动回压,控压钻井采用无模型自适应稳定控制回压方法,常忽略节流阀动作产生的波动回压,不利于精细化控压钻井。现场施工时,要考虑节流阀动作产生的波动压力,建立完善的节流阀动作目标函数,使控压钻井更精细化。

4) 当已知井口所需回压时,节流阀动作可采取线性、非线性等途径实现,需要优化出波动压力最小的一种动作途径。节流阀动作时,要考虑稳定回压与波动回压对井底压力影响;节流阀驻阀时,需考虑稳定回压对井底压力的影响。

### 参 考 文 献

#### References

- [1] 于继飞,李丽,何保生,等.海上自喷油井关井井口压力预测方法[J].石油钻探技术,2012,40(1):83-86.  
Yu Jifei, Li Li, He Baosheng, et al. Wellhead pressure prediction method during well shut-in for offshore flowing oil wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(1): 83-86.
- [2] 李宗清,燕修良,陈永明,等.三参数自动控压钻井系统的研制与试验[J].石油钻探技术,2012,40(6):99-103.  
Li Zongqing, Yan Xiuliang, Chen Yongming, et al. Development and test of three-parameter automatic pressure control drilling system [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(6): 99-103.
- [3] 金业权,孙泽秋,刘刚.控压钻井液节流压力控制系统仿真分析与试验研究[J].石油钻探技术,2013,41(2):109-113.  
Jin Yequan, Sun Zeqiu, Liu Gang. Simulation analysis and experimental study of managed pressure drilling hydraulic throttle pressure control system [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(2): 109-113.
- [4] Santos H, Leuchtenberg C, Shayegi S. Micro-flux control: the next generation in drilling process [R]. SPE 81183, 2003.
- [5] Santos H, Reid P, Leuchtenberg C, et al. Micro-flux control method combined with surface BOP creates enabling opportunity for deep-water and offshore drilling [R]. OTC 17451, 2005.
- [6] Santos H M, Catak E, Kinder J I, et al. First field applications of microflux control show very positive surprises [R]. SPE 108333, 2007.
- [7] 苏勤,赵向阳.一种精细控压钻井流动模型的研究与应用[J].石油钻探技术,2013,41(1):8-13.  
Su Qin, Zhao Xiangyang. The research and application of a fine MPD flow model [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(1): 8-13.
- [8] Kong Xiangwei, Lin Yuanhua, Qiu Yijie, et al. A new model for predicting dynamic surge pressure in gas and drilling mud two-phase flow during tripping operations [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, Article ID916798: 1-16.
- [9] 李相方,郑权方.硬关井水击压力计算及其应用[J].石油钻探技术,1995,23(2):1-4.  
Li Xiangfang, Zheng Quanfang. Calculation and application of surge pressure for hard closing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 1995, 23(2): 1-4.
- [10] 张涛,柳贡慧,李军,等.精细控压多级并联节流管汇系统研究[J].石油钻探技术,2012,40(2):98-103.  
Zhang Tao, Liu Gonghui, Li Jun, et al. Research on multi-level parallel choke manifold system [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(2): 98-103.
- [11] Xuan Lijun, Mao Feng, Wu Jiezh. Water hammer prediction and control: the Green's function method [J]. Acta Mechanica Sinica, 2012, 28(2): 266-273.
- [12] Zhang Yongliang, Miao Mingfei, Ma Jiming. Analytical study on water hammer pressure in pressurized conduits with a throttled surge chamber for slow closure [J]. Water Science and Engineering, 2010, 3(2): 174-189.
- [13] Weyler M E, Streeter V L, Larsen P S. An investigation of the effect of cavitation bubbles on the momentum loss in transient pipe flow [J]. Journal of Fluids Engineering, 1971, 93(1): 1-7.
- [14] Freddy Crespo, Ramadan Ahmed. A simplified surge and swab pressure model for yield power law fluids [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 101: 12-20.
- [15] Lin Yuanhua, Kong Xiangwei, Qiu Yijie, et al. Calculation analysis of pressure wave velocity in gas and drilling mud two-phase fluid in annulus during drilling operations [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, Article ID318912: 1-17.

[编辑 滕春鸣]