

计算机优化压井开环控制软件系统研究及应用

尹邦堂¹ 李相方^{1,2} 隋秀香² 任美鹏¹

(1. 中国石油大学(北京) 机械与储运工程学院, 北京 昌平 102249; 2. 中国石油大学(北京) 石油工程学院, 北京 昌平 102249)

摘要:由于钻井总体技术水平的制约,及缺少先进的井控装置,油田现场主要依靠技术人员的经验判断进行节流调节。但是,这样的操作具有很大的差异性,且存在一定的主观性和盲目性,极易造成地层被压漏或发生溢流,导致井下压力系统复杂化,贻误安全压井时机,并可能酿成事故。基于气液两相流理论,建立了压力实时监测模板,并利用各项技术形成了计算机优化压井开环控制系统。阐述了该系统的工作原理,详细介绍了溢流压井中防地层破裂监测模板、防套管鞋处压裂监测模板、防节流相关装备损坏模板、防泵入相关装备损坏模板等的软件功能设计与实现。该系统在中国石油CPOE3平台进行了模拟开环控制试验,结果表明,该系统计算分析能力强、安全可靠,在压井过程中反应及时、命令果断、执行准确,取得了预期效果。

关键词:计算机控制;溢流;压井;实时监测;模板

中图分类号:TE319 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2011)01-0110-05

Research and Application of Computer Optimization Open-Loop Well Killing Software System

Yin Bangtang¹ Li Xiangfang^{1,2} Sui Xiuxiang² Ren Meipeng¹

(1. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Changping, Beijing, 102249, China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Changping, Beijing, 102249, China)

Abstract: The choke valve adjustment in field was mainly relied on technicians' field experience due to the limit of drilling technology and lack of advanced well control equipment. There is certain subjectivity and blindness and prone to large errors which result in formation leakage and overflow. All these may cause complexity of downhole pressure system, thereby adversely affecting the safety killing time, and may lead to accidents. The real-time pressure monitoring module is established using gas-liquid two-phase flow theory, and an open-loop well killing system was developed. The paper describes working principle of this system. The software design and implement of the following modules were introduced, including prevention fracturing formation, prevention casing shoe broken down, prevention choke valves and associated equipments damage, and prevention pumping equipment damage. The application of this system in CPOE3 drilling platform of Petrochina shows that it is safe and reliable. Its calculation and analysis are correct. The in time response, decisive command and accurate execution meet the expectation.

Key words: computer control; spill; killing well; real-time monitoring; template

钻井平台上的节流控制箱作为压井过程中的重要控制机构,由技术人员通过操纵节流控制箱上的手柄或旋钮,控制节流阀的开度,来实施压井操作^[1]。技术人员主要依据压力箱上显示的参数值对节流阀进行开度调节。就目前现场反映的情况来看,这种操作方式存在一些问题,主要问题为:由于操作人员水平参差不齐,容易造成操作上出现明显差异,且这种依据人的经验判断进行的节流调节存在一定的主观性和盲目性,处理不当就可能造成欠

收稿日期:2010-10-31;改回日期:2010-12-02

基金项目:国家高技术研究发展计划("863"计划)重大项目“深水钻完井关键技术”(编号:2006AA09A106)、国家科技支撑计划项目“三高气田钻完井安全技术体系研究与应用”(编号:2008BAB37B00)资助

作者简介:尹邦堂(1985—),男,山东潍坊人,2007年毕业于中国石油大学(华东)信息与计算科学专业,在读博士研究生,从事井控与多相流理论方面的研究。

联系方式:(010)89734340,yinbangtang@163.com

压、压漏地层等问题^[1-3],导致井下压力系统复杂化,贻误安全压井时机,酿成事故。为此,笔者基于气液两相流理论,建立了压力实时监测模板,利用先进的计算机技术、通信技术,结合硬件系统,形成了计算机优化压井开环控制系统,可以较好地解决以上问题。

1 工作原理

计算机优化压井开环控制系统包括4部分:防爆显示装置、数据采集与处理装置、压力监测软件系统、节流阀控制系统。

该系统根据当前钻井工况建立压力模型,编制压力实时监测模板。该模板为当前压井参数提供合理的压力范围,并配有参数曲线所在的正常波动区间,设定了上下报警限,如果有异常出现,计算机就会自动报警,防爆显示器就是提供关键参数曲线和压力监测模板的平台,显示的曲线不仅有压力模板曲线,也有当前关键参数曲线。在进行压井操作时,工作人员以压力监测模板提供的曲线为依据,观察当前的压力参数变化,进行有效调节使节流阀开度适中,不至于因为调节幅度过大或过小而导致破坏地层、压井失败,为安全压井提供科学依据。图1为计算机优化压井开环控制系统流程。

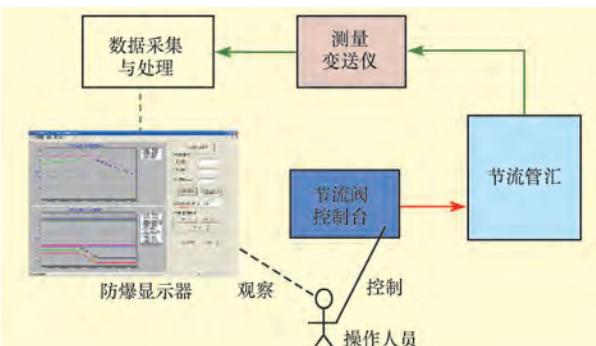


图1 计算机优化压井开环控制系统流程

Fig.1 The flowchart of computer optimization open-loop controlling system of well killing

测量变送仪将现场的立压、套压、阀位开度、泵冲等物理参数转化为电量信号,通过采集与处理,完成对这些参数的监测和分析处理。计算机将采集处理后的数据结合历史数据进行分析,提出可能存在的危险及其严重程度,及时发出预警。并通过显示关键参数和与压力监测模板限进行比较分析,提醒操作人员是否需要继续对节流阀开度进行调节以及调节的幅度。图2为压井过程中计算机数据处理分析流程。

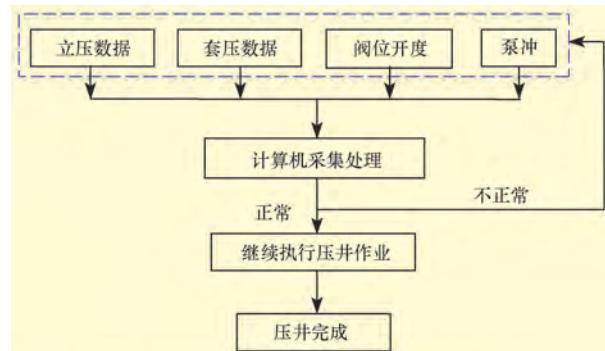


图2 压井过程中计算机数据处理分析流程

Fig.2 The flowchart of computer data processing and analysis in well killing process

2 软件功能设计及实现

计算机优化压井开环控制系统软件主要包括压井实时监测及控制模板,共有11条曲线^[1]:

- 1) 计算曲线2条,包括井底压力计算曲线、套管鞋处流体压力计算曲线。
- 2) 实时监测压力曲线2条,包括压井过程中的立压实测曲线和套压实测曲线。
- 3) 估算曲线3条,包括地层破裂压力估算值曲线、套管鞋处地层破裂压力估算值曲线、地层压力估算值曲线,其中地层破裂压力估算值和套管鞋处地层破裂压力估算值为邻井资料给出或地漏试验给出,地层压力估算值为关井求压值。
- 4) 设定值曲线4条,为井口装备承压值曲线、泵入装置承压限曲线、立压低限曲线、立压低低限曲线,井口装备承压值由装备厂商给出,立压低限为井底常压法的初始循环立压值和终了循环立压报警线,立压低低限为井底常压法的初始循环立压值和终了循环立压切断循环限。

该监测模板集合了4个监测模板的功能:溢流压井防地层破裂监测模板、溢流压井防套管鞋处压裂监测模板、溢流压井防节流相关装备损坏模板及溢流压井防泵入相关装备损坏模板。

2.1 溢流压井防地层破裂监测模板

2.1.1 模板及数学模型

通过溢流压井防地层破裂监测模板(见图3)可以实时监测井底流压。地层压力、地层破裂压力由计算机专家系统通过综合分析地质参数、井身结构参数等给出,监测模板可以保持实时监测的井底流压处于地层压力和地层破裂压力之间,既能防止地

层流体侵入，又不会压开地层。

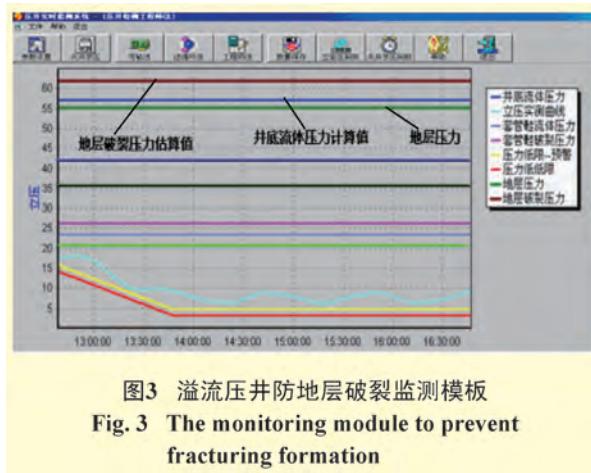


图3 溢流压井防地层破裂监测模板
Fig. 3 The monitoring module to prevent fracturing formation

基于气液两相流理论^[4-6]计算井底的流体压力。取长度为 dH 的管段为微元体,假设:1)两相介质分别有各自按所占界面计算的截面平均流速;2)尽管两相之间可能有质量交换,但两相之间是处于热力学平衡状态,压力和密度均为单值函数。则混相连续性方程为:

$$\frac{\partial[\alpha\rho_g + (1-\alpha)\rho_m]}{\partial t} + \frac{\partial[\alpha\rho_g v_g + (1-\alpha)\rho_m v_m]}{\partial H} = q_{gp} \quad (1)$$

混相动量方程为:

$$\frac{\partial[\alpha\rho_g v_g + (1-\alpha)\rho_m v_m]}{\partial t} + \frac{\partial[\alpha\rho_g v_g^2 + (1-\alpha)\rho_m v_m^2]}{\partial H} + \frac{\partial p}{\partial H} + \left(\frac{\partial p}{\partial H}\right)_{fr} + [\alpha\rho_g + (1-\alpha)\rho_m]g = q_{gp} \quad (2)$$

温度方程为:

$$T_{fout} = T_{eout} + \exp[A(z_{in} - z_{out})](T_{fin} - T_{ein} - g_d/A) + g_d/A \quad (3)$$

式中: T_{fout} 为井筒温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{eout} 为地层温度, $^{\circ}\text{C}$; g_d 为地温梯度, $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$; 其他参数详见文献[7]。

2.1.2 基本参数

1) 气体压缩因子

采用修正的 LXF-RMP 模型计算压缩因子^[8],该模型与 Standing 图版拟合度很高,在此仅列出高压范围内的计算模型。当 $15 \leqslant p_r \leqslant 30$, $1.05 \leqslant T_r \leqslant 3.00$ 时,气体压缩因子为:

$$Z_g = x_1 p_r + x_2 \quad (4)$$

其中:

$$x_1 = 0.015\ 500\ 0 T_r^4 - 0.145\ 836\ 0 T_r^3 + 0.515\ 309\ 1 T_r^2 - 0.832\ 209\ 1 T_r + 0.571\ 100\ 0 \quad (5)$$

$$x_2 = -0.141\ 60 T_r^4 + 1.347\ 12 T_r^3 - 4.775\ 35 T_r^2 -$$

$$7.722\ 85 T_r - 4.206\ 80 \quad (6)$$

2) 流体的混相压缩因子

$$Z = \alpha Z_g + (1-\alpha) Z_l \quad (7)$$

3) 地层侵入气体量^[9]

$$q_{gp} = \frac{Kh(p_e^2 - p_{wf}^2)}{1.24 \times 10^5 \rho_D (T_p Z_g)_p} \quad (8)$$

式中: p_r 为拟对比压力; T_r 为拟对比温度; K 为地层渗透率, μm^2 ; μ 为气体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; p_e 为地层压力, MPa ; p_{wf} 为井底压力, MPa ; $(T_p Z_g)_p$ 为地层压力 p 下的温度、黏度、压缩因子的乘积; $\rho_D = \ln D + 0.81$, $t_D = \max\left[10, \frac{7.317 \times 10^{-5} t}{R_w^2} \left(\frac{K}{\phi \mu C}\right)_p\right]$ 。

2.1.3 求解方法

根据式(1)、(2)、(3)、(4)、(7)、(8)的特点,解析解很难推导出来。同时考虑到方程的稳定性及收敛性,采用四点全隐式差分格式^[9-10],方程按照图 4 的差分格式离散,计算公式见式(9)~(13)。具体求解方法见图 5。

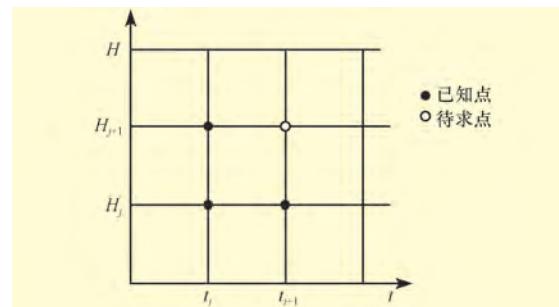


图4 四点差分格式网格划分

Fig.4 Grid of four-point implicit difference scheme

$$p_{j+1}^{i+1} - p_j^{i+1} = T_A + T_B + T_C + T_D \quad (9)$$

$$T_A = \frac{\Delta Z}{2\Delta t} \left\{ [\rho_g \alpha v_g + \rho_m (1-\alpha) v_m]_j^n + [\rho_g \alpha v_g + \rho_m (1-\alpha) v_m]_{j+1}^n - [\rho_g \alpha v_g + \rho_m (1-\alpha) v_m]_{j+1}^{n+1} \right\} \quad (10)$$

$$T_B = [\rho_g \alpha v_g^2 + \rho_m (1-\alpha) v_m^2]_j^{n+1} - [\rho_g \alpha v_g^2 + \rho_m (1-\alpha) v_m^2]_{j+1}^{n+1} \quad (11)$$

$$T_C = (p_{fr})_j^{n+1} + (p_{fr})_{j+1}^{n+1} = \frac{\Delta Z}{2} \left[\left(\frac{\Delta p_{fr}}{\Delta Z} \right)_j^{n+1} + \left(\frac{\Delta p_{fr}}{\Delta Z} \right)_{j+1}^{n+1} \right] \quad (12)$$

$$T_D = G_j^{n+1} + G_{j+1}^{n+1} = \frac{\Delta Z}{2} \left\{ [\rho_g \alpha + \rho_m (1-\alpha)]_j^{n+1} + [\rho_g \alpha + \rho_m (1-\alpha)]_{j+1}^{n+1} \right\} g \quad (13)$$

2.2 溢流压井防套管鞋处压裂监测模板

套管鞋处流体压力计算值<套管鞋破裂压力估

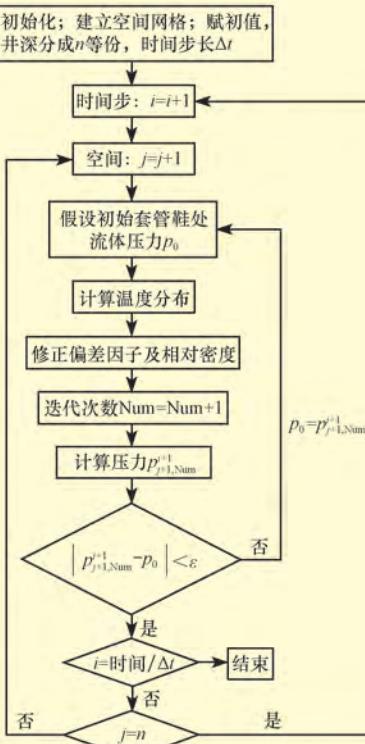


图5 套管鞋流体压力计算框图

Fig. 5 The diagram of calculating fluids pressure at casing shoe

算值。溢流压井防套管鞋处压力监测模板(见图6)通过监测模拟计算套管鞋处的流体压力值,保证该处流体压力小于套管鞋破裂压力而不使套管鞋处的地层被压开。套管鞋处的流体压力同样利用式(1)~(13)进行求解。

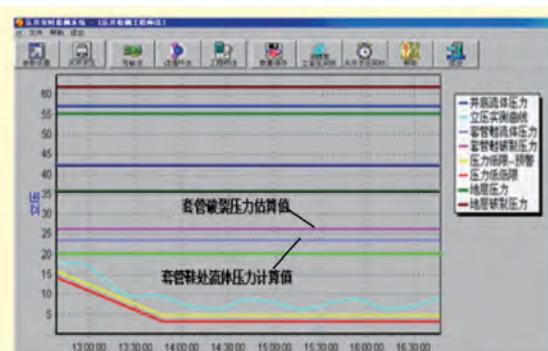


图6 溢流压井防套管鞋处压裂监测模板

Fig. 6 The monitoring module to prevent casing shoe break down

2.3 溢流压井防节流相关装备损坏模板

溢流压井防节流相关装备损坏模板(见图7)通过实时监测套压值保证套压小于井口设备承压限,防止井口设备被损坏和节流设备被严重冲蚀。

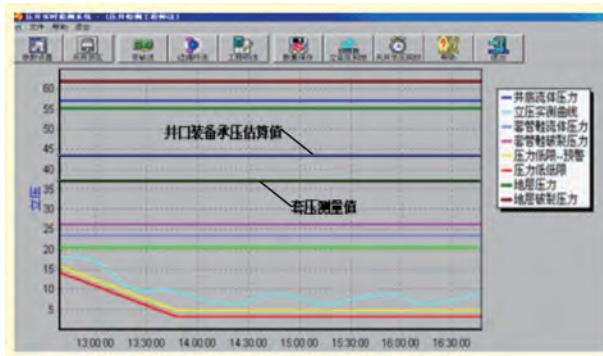


图7 溢流压井防节流相关装备损坏模板

Fig. 7 The template to prevent choke valves and relevant equipment damage

2.4 溢流压井防泵入相关装备损坏模板

立压大小主要由泵能力和钻杆强度来决定。泵能力由各个参数来衡量,不同厂家同型号泵的参数也有一定差别。不同等级钻杆的强度也是不同的。泵能力可以决定立压大小,而钻杆强度又限制了泵压的大小,实际的立压由两者决定,实际压井过程可根据实时监测立压值不断调节档位,保证立压曲线在立压低限和泵入装置承压范围之内,保证井底压力控制流体不再进入井筒,如图8所示。

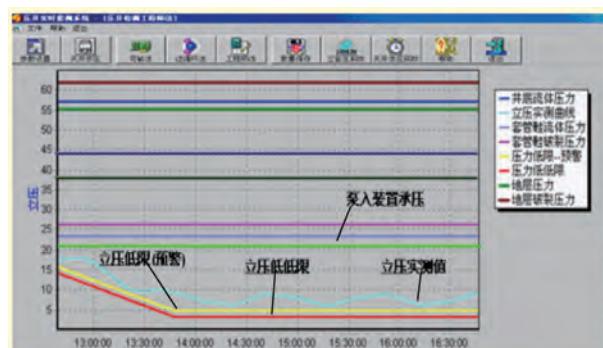


图8 溢流压井防泵入相关装备损坏模板

Fig. 8 The module to prevent pumping equipment damage

以司钻法为例,司钻法压井监测施工单中包括两个循环周的立压报警高限、低限和套压报警高限,施工过程中要求立压实测曲线控制在立压报警高限和低限之间,并且尽量靠近低限,套压实测曲线不能超过套压报警高限,如图9所示。在进行开环控制作业时,当立压曲线高于立压高限时进行预警,要调整压井方案,根据计算机画出的曲线,点击调大按钮,手动调节到适当的节流阀开度,然后点击保持,确定此时的节流阀开度。当立压曲线低于立压低限时,同理调小按钮,调整套压。当立压曲线低于立压低限,或高于立压高限时,现场人员采用

紧急压井预案。

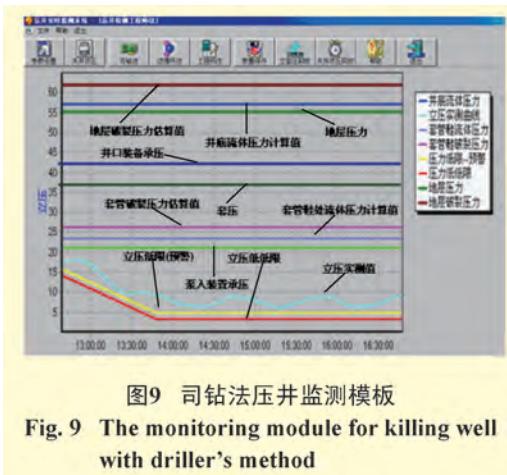


图9 司钻法压井监测模板
Fig. 9 The monitoring module for killing well with driller's method

综上所述,压力监测及控制模板的建立可以避免地层气体再次侵入、压裂地层、压裂套管鞋处地层、破坏井口装备和节流管汇,可以科学地指导压井。

3 现场应用

在中国石油 CPOE3 平台上对计算机压井优化控制系统实施了模拟开环控制,通过电脑手动调节流控制阀,并经现场观察发现,调节阀能够正常动作,曲线能够实时显示,防爆显示器能够在现场工况条件下远距离显示使用。现场试验表明,该系统计算分析能力强、安全可靠,在压井过程中反映及时、命令果断、执行准确,对现场安全生产提供了极大的帮助,取得了预期效果。

4 结论及建议

1) 提出了压井实时监测模版,该模板综合了 4 个模板的功能。4 个模板分别是溢流压井防地层破裂监测模板、溢流压井防套管鞋处压裂监测模板、溢流压井防节流相关装备损坏模板及溢流压井防泵入相关装备损坏模板。

2) 根据建立的监测模版,通过调节节流阀实现压井曲线在合理的范围内波动,可以有效防止压漏地层、防止井底压力低于地层压力、防止压漏套管鞋处地层、防止井口套压超过地面节流装备承受压力及防止井口立压超过地面井口装置承受压力,消除了人为调节带来的盲目性和随意性,为安全生产提供了保障。

3) 计算机优化压井开环控制系统的实时性和有效性为现场工作者提供了指导和决策支持,为科

学压井提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] 隋秀香,李相方,孙晓峰,等.高含硫气井计算机优化压井闭环控制系统[J].石油钻探技术,2010,38(1):26-28.
Sui Xiuxiang, Li Xiangfang, Sun Xiaofeng, et al. Closed-loop well control system with computer optimization for high sulfur gas wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010,38(1):26-28.
- [2] 隋秀香,李相方,齐明伟,等.高产气藏水平井井喷潜力分析[J].石油钻探技术,2004,32(3):34-35.
Sui Xiuxiang, Li Xiangfang, Qi Mingming, et al. Possibility analysis of blowout during horizontal drilling in gas reservoirs with high productivity [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004,32(3):34-35.
- [3] 张新旭,魏学成,李延伟.河坝 1 井高压含硫气层井控技术[J].石油钻探技术,2005,33(4):16-19.
Zhang Xin Xu, Wei Xue Cheng, Li Yan Wei. Well control technology for high pressure gas zone containing sulfide in Heba 1 Well [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005,33(4):16-19.
- [4] 陈庭根,管志川.钻井工程理论与技术[M].山东东营:中国石油大学出版社,2006:232-237.
Chen Tinggen, Guan Zhichuan. Drilling engineering theory and technology[M]. Shandong Dongying: China University of Petroleum Press, 2006:232-237.
- [5] 鲁钟琪.两相流与沸腾传热[M].北京:清华大学出版社,2002:22-27.
Lu Zhongqi. Two-phase flow and boiling heat transfer [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002:22-27.
- [6] 袁恩熙.工程流体力学[M].北京:石油工业出版社,2002:91-97.
Yuan Enxi. Engineering fluid mechanics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002:91-97.
- [7] 薛秀敏,李相方,吴义飞,等.高气液比气井筒温度分布计算方法[J].天然气工业,2006,26(5):102-104.
Xue Xiumin, Li Xiangfang, Wu Yifei, et al. Calculating method of borehole temperature distribution for gas wells with high gas/liquid ratio [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26 (5): 102-104.
- [8] 李相方,任美鹏,胥珍珍,等.高精度全压力全温度范围天然气偏差系数解析计算模型[J].石油钻采工艺,2010,32(6):57-62.
Li Xiangfang, Ren Meipeng, Xu Zhenzhen, et al. A high-precision and whole pressure\temperature range analytical calculation model of natural gas Z-factor [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010,32(6):57-62.
- [9] 李相方.井涌期间气液两相流动规律的研究[D].北京昌平:石油大学(北京)石油工程系,1992.
Li Xiangfang. Study of two-phase gas-liquid flow during gas kick [D]. Beijing Changping: University of Petroleum(Beijing), Petroleum Engineering Department, 1992.
- [10] Nickens H V. A dynamic computer model of a kicking well [J]. SPE Drilling Engineering, 1987,2(2):159-173.