

# 基于井筒多相流理论的复杂结构井 动态压井过程中的井筒压力研究\*

杨鹏飞<sup>1</sup>, 毛良杰<sup>1</sup>, 杨森<sup>2</sup>, 陈雪峰<sup>3</sup>

- (1. 西南石油大学 石油与天然气工程学院, 成都 610500;
2. 中石油西南油气田分公司 开发事业部, 成都 610000;
3. 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京 102200)

**摘要:** 基于井筒多相流理论,并结合井眼轨迹的计算方法,建立了复杂结构井动态压井数学模型,再采用有限差分法求解,对压井过程中井筒压力进行了模拟研究,认识了初始气侵量、压井液排量与密度、水平井段长度对井筒压力的影响.研究表明:在大斜度井和水平井压井过程中,套管承受的压力将会变得更大,且套管承受高压的时间也会明显增长;初始气侵量越大,为平衡井筒压力,压井过程中套管压力和立管压力越大;压井排量越大,压井过程中的套管压力越低,立管压力越大;压井液密度越大,压井过程中套管压力和立管压力越低;水平井段长度越长,压井过程中的套管压力越大,压井时间越长.研究结果对保障复杂结构井的压井作业具有指导意义.

**关键词:** 复杂结构井; 动态压井; 井眼轨迹; 井筒压力

**中图分类号:** TE28 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.450061

## Research on Wellbore Pressure in the Dynamic Killing Process for Complex Structure Wells Based on the Wellbore Multiphase Flow Theory

YANG Pengfei<sup>1</sup>, MAO Liangjie<sup>1</sup>, YANG Sen<sup>2</sup>, CHEN Xuefeng<sup>3</sup>

- (1. School of Oil & Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P.R.China;
2. Development Department, Petro China Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610000, P.R.China;
3. CNPC Engineering Technology Research Company Limited, Beijing 102200, P.R.China)

**Abstract:** Based on the wellbore multiphase flow theory and the calculation method for wellbore trajectories, a dynamic well killing mathematical model for complex well structures was established, and the finite difference method was used to solve it. The wellbore pressures during the well killing process were simulated and studied, and the influences of initial gas influxes, kill fluid displacements and densities, and horizontal well lengths on

\* 收稿日期: 2024-03-06; 修订日期: 2024-07-15

**基金项目:** 国家自然科学基金(52174006);四川省重点研发项目(S0497;2022YFG0119)

**作者简介:** 杨鹏飞(1999—),男,硕士生(E-mail: 2653668723@qq.com);

毛良杰(1987—),男,教授,博士(通讯作者. E-mail: maoliangjie@qq.com).

**引用格式:** 杨鹏飞, 毛良杰, 杨森, 陈雪峰. 基于井筒多相流理论的复杂结构井动态压井过程中的井筒压力研究[J]. 应用数学和力学, 2025, 46(2): 254-270.

the wellbore pressures were studied. The research results show that, for high inclination and horizontal wells, the casing pressures will become larger and the casing time will increase significantly in the process of killing well. The larger the initial gas inflow is, the higher the casing pressures and riser pressures will be, to balance the wellbore pressures. The higher the killing capacity is, the lower the casing pressure and the higher the riser pressure will be. The higher the kill fluid density is, the lower the casing pressures and riser pressures will be. The longer the horizontal section length is, the greater the casing pressures and the longer the kill time will be. The work has guiding significance to ensure the well killing operation of complex structure wells.

**Key words:** complex structure well; dynamic killing well; well trajectory; wellbore pressure

## 0 引 言

为了满足各种油气矿藏开发需求,相继出现了大斜度井及水平井等复杂结构井,用于开发一些通过直井无法开发,经济利益很低的油气藏,如低渗性油气藏、天然裂缝油气藏以及薄层油气藏等复杂性油气藏<sup>[1-4]</sup>。复杂结构井不仅提高了油气藏的开采率,还改善了断块油气藏的连通性,提高了单井产量<sup>[5-7]</sup>。与常规钻井相比,由于大斜度井、水平井井身结构不同,发生溢流时,侵入井底的气体会在水平段或倾斜段聚集并缓慢向前移动,此时侵入的气体对井底压力与环空压力影响较小;当气体运移到直井段后,气体向上运动速度加快,环空压力和井底压力会迅速下降,加剧溢流程度。常规压井方法主要为司钻法与工程师法:司钻法压井分两个循环进行,第一个循环用原钻井液密度循环排出环空内气侵的钻井流体,第二个循环泵入按关井立管压力求得的所需密度的钻井液,置换井筒内的钻井液而恢复建立井筒压力平衡;工程师法压井是根据关井立管压力求得地层压力,待配置好所需的压井密度的压井液后,通过一个循环同时排除环空气侵流体的压井方法。为有效防止井喷失效事故的发生,需要充分认识复杂结构井井身结构特点与两种压井方法的溢流特点进行压井作业。

目前,国内外学者对压井作业已有丰富研究。Blount 等<sup>[8]</sup>建立了可模拟压井工程中井筒环空压力分布的动力压井法的理论模型,能为现场提供压井过程中井筒流体流动压降计算和液柱压力计算。Watson 等<sup>[9]</sup>对动力压井法中最大和最小压井排量的计算方法进行了研究,通过对井筒中气体临界流速的计算,给出了三种计算最大和最小压井排量的方法。刘凯<sup>[10-11]</sup>根据气侵的严重程度和所需使用的压井方法的不同,提出了“临界泥浆池增量”的概念,为压井后泥浆池泥浆增量提供更准确的计算。范军等<sup>[12]</sup>将两相流和地层瞬时渗流结合起来,利用油气井动态井控理论模型模拟了气井压井过程。庞华<sup>[13]</sup>建立了深水钻井和气侵井控过程中井筒温度和压力的计算模型,研究了不同气藏特征和压井参数下压井过程中套管压力的变化特征。付建红等<sup>[14-15]</sup>致力于深水钻井早期溢流监测装置的研发和安全高效的溢流控制技术,形成了包括早期预防和溢流处理在内的一整套深水钻井井控安全理论和控制技术。李治等<sup>[16]</sup>提出了绒囊流体活塞技术,进行不降压力压井修井作业,能够避免常规降压过程中安全性差、产能浪费等问题。孙宝江等<sup>[17-18]</sup>从深水井筒多相流动的角度出发,提出了深水钻完井井筒四相流动理论,进一步揭示了含水合物相变的井涌气侵特征。王江帅等<sup>[19]</sup>考虑密度突变,建立了井筒气液两相变质量流动模型,对最大井口回压的影响因素进行了敏感性分析。郑如森等<sup>[20]</sup>针对塔里木油田库车山前高压气井采用带压灌注法、节流循环法和高压挤注法等综合的非常规压井方法进行现场压井,取得了良好效果。

综上所述,国内外学者针对井筒流体两相流流动状态和不同地层、不同井筒流体、不同工况下进行的压井操作,以及压井过程中井口压力计算等方面已经开展了大量的理论研究和实验研究,但现有研究并未充分考虑大斜度井、水平井等复杂结构井的井眼轨迹对井筒流体流动的影响,不能对复杂结构井井筒溢流及压井进行准确的压力计算。本文在现有研究的基础上,考虑大斜度井、水平井等复杂结构井的井眼轨迹,建立了复杂结构井动态压井数学模型,开展了复杂结构井压井模拟,对井筒压力的部分影响因素进行分析,可为复杂结构井的压井作业提供一定的指导。

## 1 复杂结构井动态压井模型建立

钻井过程中,井底溢流后,气体进入井筒,在井内形成环形多相流,导致泥浆池增量增加。关井后,随着压

井施工的进行,多相流段逐渐向井口迁移.此时,由于温度和压力的变化,环空中的气体仍将膨胀,如图1所示.在这个过程中,复杂的环空多相流将对井筒压力产生很大的影响.为了准确调整套管压力,保证井底压力稳定,有必要建立考虑井筒轨迹的井筒多相流模型,模拟压井过程中井筒多相流的行为,获得合适的套管压力.

为了简化计算,本文做了以下假设:①气体、固体和液体在井筒中的流动是一维的;②钻井液、压井液是不可压缩的;③控制单元中的气相、液相和固相是连续的;④忽略环空偏心的影响;⑤未考虑钻井液中的气体和岩屑.基于这个假设,可以得到简化的连续性方程和动量方程.图2为压井过程的控制体单元.

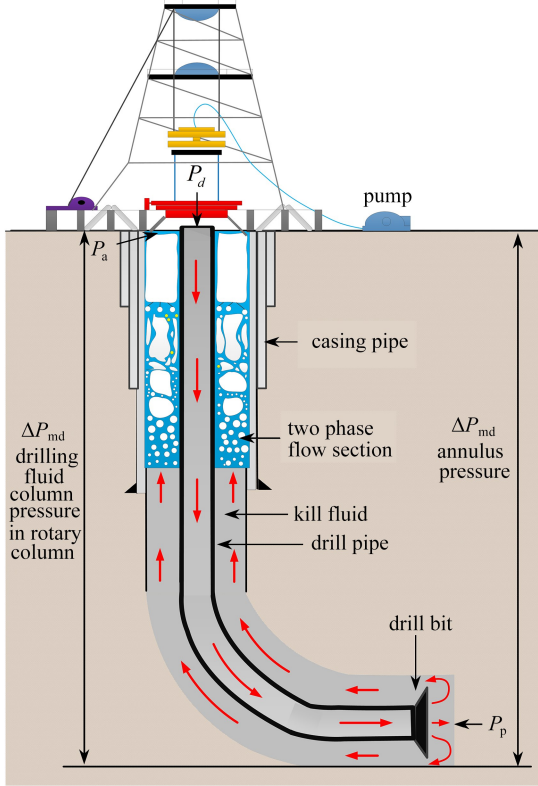


图1 压井过程的物理模型

Fig. 1 The physical model for the kill process

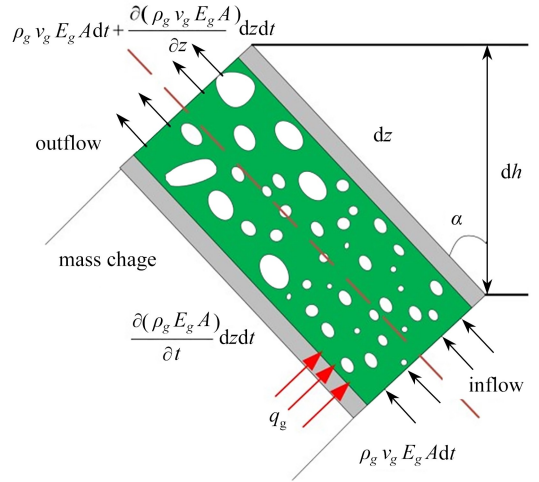


图2 压井过程的控制体单元

Fig. 2 The control unit of the kill process

气相、液相和固相的连续性方程表示如下:

$$\frac{\partial(\rho_g v_g E_g A)}{\partial h} + \frac{\partial(\rho_g E_g A)}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_l v_l E_l A)}{\partial h} + \frac{\partial(\rho_l E_l A)}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_s v_s E_s A)}{\partial h} + \frac{\partial(\rho_s E_s A)}{\partial t} = 0. \quad (3)$$

在控制体单元中,

$$E_g + E_l + E_s = 1, \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial h}\right)_{fr} = \frac{2f_m v_m^2 \rho_m}{D_w - D_p}. \quad (5)$$

根据动量守恒定律,可以得到如下动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l v_l E_l + \rho_g v_g E_g + \rho_s v_s E_s) + \frac{\partial}{\partial h}(\rho_l v_l^2 E_l + \rho_g v_g^2 E_g + \rho_s v_s^2 E_s) \cos \theta + \frac{\partial P}{\partial h} \cos \theta +$$

$$(\rho_l E_l + \rho_g E_g + \rho_s E_s)g + \left(\frac{\partial P}{\partial h}\right)_{fr} = 0, \quad (6)$$

式中,  $\rho_g, \rho_l$  和  $\rho_s$  为气体、液体和岩屑密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $v_g, v_l$  和  $v_s$  为气体、液体和岩屑的速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $E_g, E_l$  和  $E_s$  为气体、液体和岩屑所占体积分数;  $A$  为井筒横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $\theta$  为井斜角, ( $^\circ$ );  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $h$  为垂深,  $\text{m}$ ;  $P$  为压力,  $\text{MPa}$ ;  $f_m$  为混合摩擦系数, 无量纲;  $v_m$  为混合流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\rho_m$  为混合密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $(\partial P/\partial h)_{fr}$  为摩擦压降,  $\text{MPa}/\text{m}$ .

摩擦压降的求解与多相流的流态相关, 本文后续介绍了流态判别的相关方法, 但具体的摩擦压降求解方法较为冗杂, 未在文中详细表述. 具体的摩擦压降计算方法详见文献[21].

为了实现复杂结构井压井过程中的井筒压力研究, 井斜角的影响是不可避免的, 本文后续采用了三次样条插值对井眼轨迹进行计算, 并简单介绍了关井压力及压井参数的计算方法, 为井筒压力计算提供理论指导.

### 1.1 井眼轨迹计算

由动量方程可知, 井斜角会影响流体的运动, 而井斜角需要由井眼轨迹计算得到, 因此, 要完成对复杂结构井流体运动的模拟, 需要得到该井的井眼轨迹参数<sup>[22]</sup>. 测井得到的井眼轨迹坐标数据是不连续的, 是一系列测深离散点及其对应的井斜角, 不能直接用于分析计算. 本文采用三次样条插值来计算各节点处井斜角, 设从测深  $s_0$  开始至测深  $s_N$  止, 共测得  $N+1$  个点的井深、井斜角, 其中每个测深  $s$  都有其对应的井斜角  $\theta$ . 计算井眼轨迹时, 将井深作为自变量, 井斜角表示为井深的函数. 根据三次样条函数的定义和性质, 可以构造出区间  $[s_{k-1}, s_k]$  ( $k = 1, 2, 3, \dots, N$ ) 上井斜角样条函数  $\theta(s)$  的表达式:

$$\theta(s) = \frac{M_{k-1}(s_k - s)^3}{6L_k} + \frac{M_k(s - s_{k-1})^3}{6L_k} + C_k(s - s_{k-1}) + C_{k-1}(s_k - s), \quad (7)$$

式中

$$C_k = \frac{\theta_k}{L_k} - \frac{M_k L_k}{6}, \quad C_{k-1} = \frac{\theta_{k-1}}{L_k} - \frac{M_{k-1} L_k}{6}, \quad M_k = \theta''(s_k), \quad M_{k-1} = \theta''(s_{k-1});$$

$k$  为测点序号;  $L_k$  为测段长度,  $L_k = s_k - s_{k-1}$ ,  $\text{m}$ ;  $s$  为插值点处的井深,  $\text{m}$ ;  $N$  为测点个数.  $M_k$  不仅与井斜角的实测值有关, 还与井口和井底的边界条件有关. 如果井口和井底井斜角的二阶导数为常数, 则存在

$$M_0 = M_N = 0. \quad (8)$$

对于整口井的  $N+1$  个测点, 可以得到一个包含  $N-1$  个未知数的线性方程组:

$$\begin{bmatrix} 2 & \lambda_0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \mu_1 & 2 & \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \mu_1 & 2 & \lambda_1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \mu_2 & 2 & \cdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \vdots & \cdots & \mu_{N-1} & 2 & \lambda_{N-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \mu_N & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_0 \\ M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_{N-1} \\ M_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_0 \\ D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_{N-1} \\ D_N \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中

$$D_k = \frac{6}{L_k + L_{k+1}} \left( \frac{\theta_{k+1} - \theta_k}{L_{k+1}} - \frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{L_k} \right), \quad \lambda_0 = 1, \quad \lambda_k = \frac{L_{k+1}}{L_k + L_{k+1}}.$$

上述方程组是对角线方程组, 采用追赶法求解, 将解  $M_k = (k = 0, 1, 2, \dots, N)$  代入  $\theta(s)$  的表达式中, 即可求出  $[s_{k-1}, s_k]$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) 井段上任意井深处的井斜角, 从而确定井眼轨迹曲线.

### 1.2 关井压力平衡计算

#### 1.2.1 关井立管压力

##### 1) “U”型管原理

$$P_d + \Delta P_{md} = P_p = P_a + \Delta P_{ma}, \quad (10)$$

式中,  $P_d$  为关井立管压力,  $\text{MPa}$ ;  $P_p$  为地层压力,  $\text{MPa}$ ;  $P_a$  为关井套压,  $\text{MPa}$ ;  $\Delta P_{md}$  为钻柱内钻井液柱压力,

MPa;  $\Delta P_{\text{ma}}$  为环空受气侵钻井液柱压力, MPa.

## 2) 立管压力

循环法: 缓慢启动泵, 调整节流阀, 使其等于关井套管压力; 使泵速达到压井泵速, 且套管压力始终等于关井套管压力; 使用读取的立管压力降低循环压力, 差值为关井立管的压力值<sup>[23]</sup>,

$$P_d = P_t - P_{ci}, \quad (11)$$

式中,  $P_t$  为立管总压力, MPa;  $P_{ci}$  为已知泵速下的循环压力, MPa.

### 1.2.2 关井套管压力

在溢流关闭期间, 最大允许关井套管压力不得超过以下三个值中的最小值:

- 1) 井口装置的额定工作压力;
- 2) 允许关井套管压力为套管抗内压强度的 80%;
- 3) 地层破裂压力所允许的关井套压值.

地层破裂压力梯度、井深和井内液柱压力会影响地层所能承受的关井压力. 通常, 裸眼井段最薄的部分是套管鞋. 因此, 现场最大允许关井套管压力为套管鞋处地层破裂压力, 计算公式如下:

$$P_{\text{amax}} = (\rho_e - \rho_m)gh, \quad (12)$$

式中,  $P_{\text{amax}}$  为最大允许关井套压, MPa;  $\rho_e$  为地层破裂压力当量钻井液密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\rho_m$  为井内钻井液密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $g$  为常数,  $g = 0.00981 \text{ m}/\text{s}^2$ ;  $h$  为地层破裂压力实验层(套管鞋)垂深, m.

## 1.3 压井参数求解

### 1) 根据循环压耗计算立管压力

初始立管总压力为

$$P_{Ti} = P_d + P_{ci} + P_e, \quad (13)$$

式中,  $P_{Ti}$  为初始立管总压力, MPa;  $P_d$  为关井立管压力, MPa;  $P_{ci}$  为初始循环流动阻力, MPa;  $P_e$  为安全附加压力, MPa.

终了循环压力为

$$P_{cf} = \frac{\rho_2}{\rho} P_{ci}, \quad (14)$$

式中,  $P_{cf}$  为终了循环压力, MPa;  $\rho$  为原钻井液密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\rho_2$  为压井液密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $P_{ci}$  为初始循环流动阻力, MPa.

### 2) 初始循环流动阻力计算

当钻井液性能不变, 钻具结构不变, 井身结构大致不变的情况下, 泵压和排量的函数关系式为

$$P = KQ^2, \quad (15)$$

式中,  $P$  为原钻井液循环流动阻力, MPa;  $Q$  为排量,  $\text{L}/\text{s}$ ;  $K$  为钻井液流动系数,  $\text{MPa} \cdot \text{s}^2/\text{L}^2$ .

采用压井排量计算初始循环流动阻力  $P_{ci}$  的公式<sup>[24]</sup>为

$$P_{ci} = KQ_i^2, \quad (16)$$

式中,  $P_{ci}$  为初始循环流动阻力, MPa;  $Q_i$  为压井排量,  $\text{L}/\text{s}$ ;  $K$  为压井初始流动系数,  $\text{MPa} \cdot \text{s}^2/\text{L}^2$ .

## 1.4 流态判别

由于不同流态下的流体产生的摩阻不同, 因此, 需要建立流体流态判别模型. 气体侵入井筒后, 将形成固相、气相和液相的多相流混合物, 而不同流态下的摩阻以及各相流速不同. 本文采用现有的流态判别准则<sup>[25]</sup>:

### 1) 泡状流

$$v_{sg} < 0.429v_{sl} + 0.357v_{\infty}; \quad (17)$$

### 2) 段塞流

$$\begin{cases} v_{sg} < 0.429v_{sl} + 0.357v_{\infty}, \\ \rho_g v_{sg}^2 < 25.41g(v_{sg}^2) - 38.9, & \rho_g v_{sg}^2 > 74.4, \\ \rho_g v_{sg}^2 < 0.0051(\rho_g v_{sl}^2)^{1.7}, & \rho_g v_{sg}^2 \leq 74.4; \end{cases} \quad (18)$$

## 3) 搅动流

$$\begin{cases} v_{sg} < 3.1 \left[ \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{0.25}, \\ v_{sg}^2 < 25.41 g (v_{sl}^2) - 38.9, & \rho_l v_{sl}^2 > 74.4, \\ v_{sg}^2 < 0.005 1 (v_{sl}^2)^{1.7}, & \rho_l v_{sl}^2 \leq 74.4; \end{cases} \quad (19)$$

## 4) 环状流

$$\begin{cases} v_{sg} < 3.1 \left[ \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{0.25}, \\ v_{\infty} = 1.53 \left[ \frac{g (\rho_l - \rho_g) \sigma}{\rho_l^2} \right]^{1/4}, \end{cases} \quad (20)$$

式中,  $v_{sg}$  为气相折算速度, m/s;  $v_{sl}$  为液相折算速度, m/s;  $v_{\infty}$  为单个气泡的极限上升速度, m/s;  $\sigma$  为表面张力, N/m.

## 1.5 岩屑相关参数

岩屑单位时间内的生成体积为

$$Q_s = v_{ROP} \frac{d_b^2}{4} \pi \times 3\,600, \quad (21)$$

岩屑单位时间内的生成质量为

$$W = \frac{\pi}{4} D^2 v_{ROP} \rho_s \times 3\,600, \quad (22)$$

假定岩屑均匀分布于环空中,则由岩屑所产生的附加密度为

$$\Delta \rho_s = \frac{W}{Q_s}, \quad (23)$$

式中,  $v_{ROP}$  是机械钻速, m/h;  $d_b$  是钻头直径, m;  $W$  是岩屑质量, kg;  $\rho_s$  为岩屑密度, kg/m<sup>3</sup>.

## 1.6 边界条件

在关井之后,可以将关井时的流型、气体空隙率和环形压力分布视为压井时期的初始条件.在压井过程中,井底压力等于地层压力,边界条件如下:

$$\begin{cases} P(0, t) = P_p, \\ Q_l(0, t) = Q_l, \\ Q_g(0, t) = 0, \end{cases} \quad (24)$$

其中,  $h$  为井深;  $Q_l$  为泥浆排量;  $P_0$  为井口大气压;  $P_p$  为地层压力.

## 2 模型离散及求解

本文采用有限差分法求解质量和动量控制方程,同时,在求解模型中考虑各控制区边界条件和初始条件的影响.求解过程分为三个步骤:网格离散、构造离散方程、方程求解.

## 1) 网格离散

在有限差分数值计算中,空间域是井筒环形空间.对于溢流模拟,时间域是从溢流到关井的整个时间过程.在压井模拟中,时间域是从关井到多相流下边界到达井口的时间过程.井筒离散网格节点和单元网格集成区域示意图如图 3 所示.

## 2) 构造离散方程

数学模型中的偏微分方程可以写成

$$\frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial Y}{\partial z} = 0, \quad (25)$$

然后,将上述方程积分到面积  $K'$ , 根据 Green 公式,可以得到沿边界  $L$  的曲线积分:

$$\iint \left( \frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial Y}{\partial z} \right) dt dz = \int_L X dz - Y dt = \int_{L_1} + \int_{L_2} + \int_{L_3} + \int_{L_4} = - \int_{t(i)}^{t(i+1)} Y(t, z(j)) dt + \int_{z(j)}^{z(j+1)} X(t(i+1), z) dz + \int_{t(i)}^{t(i+1)} Y(t, z(j+1)) dt - \int_{z(j)}^{z(j+1)} X(t(i), z) dz = 0, \quad (26)$$

将上述方程化简为

$$Y_{i+1}^{j+1} - Y_{i+1}^j = \frac{\Delta z}{2\Delta t} (X_i^j + X_i^{j+1} - X_{i+1}^j - X_{i+1}^{j+1}). \quad (27)$$

对于气相连续性方程, 令

$$\begin{cases} X = \rho_g E_g, \\ Y = \rho_g E_g v_g. \end{cases} \quad (28)$$

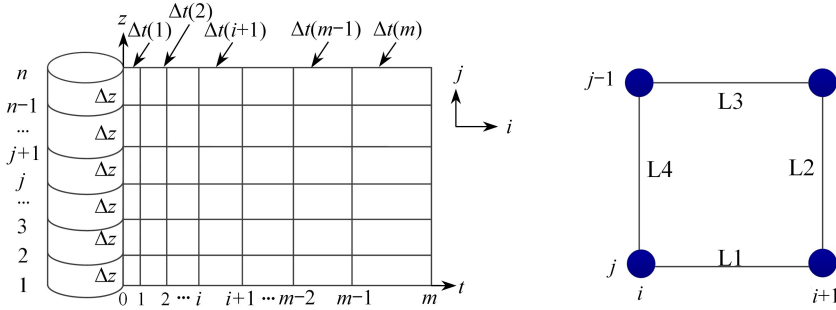


图3 井筒离散网格节点和单元网格集成区域示意图

Fig. 3 The diagram of the integrated area of discrete grid nodes and unit grids for the wellbore

因此, 将式(27)和式(28)结合即可得到气相差分方程:

$$(\rho_g V_g E_g)_{i+1}^{j+1} - (\rho_g V_g E_g)_i^{j+1} = 0.5(\Delta z/\Delta t) [(\rho_g E_g)_i^j + (\rho_g E_g)_i^{j+1} - (\rho_g E_g)_{i+1}^j - (\rho_g E_g)_{i+1}^{j+1}]. \quad (29)$$

同理, 得到的液相差分方程为

$$(\rho_l V_l E_l)_{i+1}^{j+1} - (\rho_l V_l E_l)_i^{j+1} = 0.5(\Delta z/\Delta t) [(\rho_l E_l)_i^j + (\rho_l E_l)_i^{j+1} - (\rho_l E_l)_{i+1}^j - (\rho_l E_l)_{i+1}^{j+1}]. \quad (30)$$

固相差分方程为

$$(\rho_s V_s E_s)_{i+1}^{j+1} - (\rho_s V_s E_s)_i^{j+1} = 0.5(\Delta z/\Delta t) [(\rho_s E_s)_i^j + (\rho_s E_s)_i^{j+1} - (\rho_s E_s)_{i+1}^j - (\rho_s E_s)_{i+1}^{j+1}]. \quad (31)$$

对于混合动量方程, 令

$$\begin{cases} X = \rho_g E_g v_g + \rho_l E_l v_l, \\ Y = \rho_g E_g v_g^2 \cos \alpha + \rho_l E_l v_l^2 \cos \alpha + \rho_s E_s v_s^2 \cos \alpha + \rho_g E_g g + \rho_l E_l g + \rho_s E_s g + P \cos \alpha + P_{fr}. \end{cases} \quad (32)$$

因此, 将式(27)和式(32)结合可得到混合动量差分方程:

$$P_{i+1}^{j+1} - P_{i+1}^j = T_1 + T_2 + T_3 + T_4, \quad (33)$$

其中

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{\Delta z}{2\Delta t \cos \alpha} \{ [\rho_l v_l E_l + \rho_g v_g E_g + \rho_s v_s E_s]_i^j + [\rho_l v_l E_l + \rho_g v_g E_g + \rho_s v_s E_s]_{i+1}^{j+1} - \\ &\quad [\rho_l v_l E_l + \rho_g v_g E_g + \rho_s v_s E_s]_{i+1}^j - [\rho_l v_l E_l + \rho_g v_g E_g + \rho_s v_s E_s]_{i+1}^{j+1} \}, \\ T_2 &= (\rho_l v_l^2 E_l \cos \alpha + \rho_g v_g^2 E_g \cos \alpha + \rho_s v_s^2 E_s \cos \alpha)_{i+1}^j - (\rho_l v_l^2 E_l \cos \alpha + \rho_g v_g^2 E_g \cos \alpha + \rho_s v_s^2 E_s \cos \alpha)_{i+1}^{j+1}, \\ T_3 &= 0.5\Delta z g (\rho_l E_l + \rho_g E_g + \rho_s E_s)_{i+1}^j + 0.5\Delta z g (\rho_l E_l + \rho_g E_g + \rho_s E_s)_{i+1}^{j+1}, \\ T_4 &= 0.5\Delta z \left[ \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right)_{fr} \right]_{i+1}^j + 0.5\Delta z \left[ \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right)_{fr} \right]_{i+1}^{j+1}. \end{aligned}$$

### 3) 方程求解

压井模拟是在溢流关井后进行的, 根据气体是否到达井口, 求解过程可分为气体上升和气体排出两个阶段. 其中, 多相段的边界位置是判别压井阶段的关键参数. 压井模拟求解流程如图4所示.

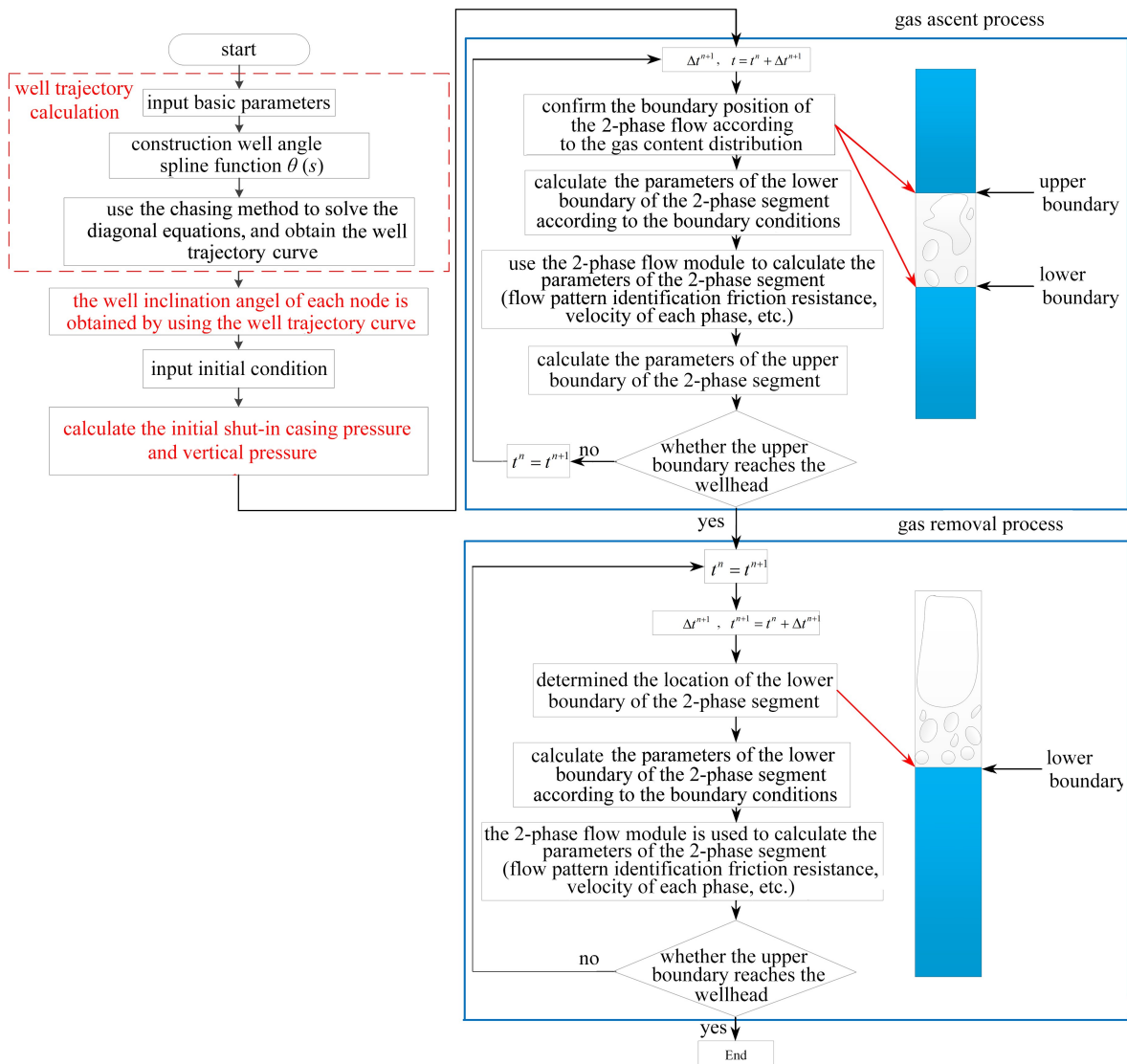


图 4 压井模拟求解流程

Fig. 4 The kill well simulation solution flow chart

### 3 复杂结构井压井过程中井筒压力分析

压井是溢流的循环排出,恢复和重建井内压力平衡的过程.在压井过程中,为了控制地层压力,避免发生新的溢流,必须遵循井底压力大于地层压力的原则,即保持井底压力不变且大于或等于地层压力.根据 U 型管原理,结合气液固三相流的特点,计算压井过程中各种压力与各种参数之间的关系,以控制压井施工过程.

#### 3.1 直井、大斜度井和水平井压井过程对比分析

为比较直井、大斜度井和水平井压井过程中井筒压力特性,选择三口不同井身结构的井进行井筒压井模拟,直井、斜井与水平井相同垂深,采用工程师法进行压井过程模拟.井的井深结构如图 5 所示,基础参数如表 1 所示,初始含气率分布如图 6 所示.

图 7 为三口不同井身结构的井模拟压井时套管压力变化和压井过程中井筒动态压力分布图.从图 7 中可以看出,压井开始后,大斜度井和水平井的套管压力更高.在压井初期,直井套管压力就开始不断升高,而大斜度井和水平井套管压力上升得更多;压井后期,直井、大斜度井和水平井套管压力开始快速降低,其中大斜度井和水平井套管压力降低更快.这是因为在压井初期,由于大斜度井和水平井的井身结构特点,进入井筒的气体不会像直井那样在环空中迅速向上运动,在水平段或造斜段,环空压力变化较小,气体与钻井液之



间没有滑脱或滑脱较小,气体移动缓慢,此时在大斜度井和水平井的井筒中聚集了大量的气体,地面关井后,大量的气体在井筒中不断上升,在套管处聚集,给套管施加较大的压力;当压井开始一段时间后,井筒中的气体不断被排出,套管压力开始迅速降低。

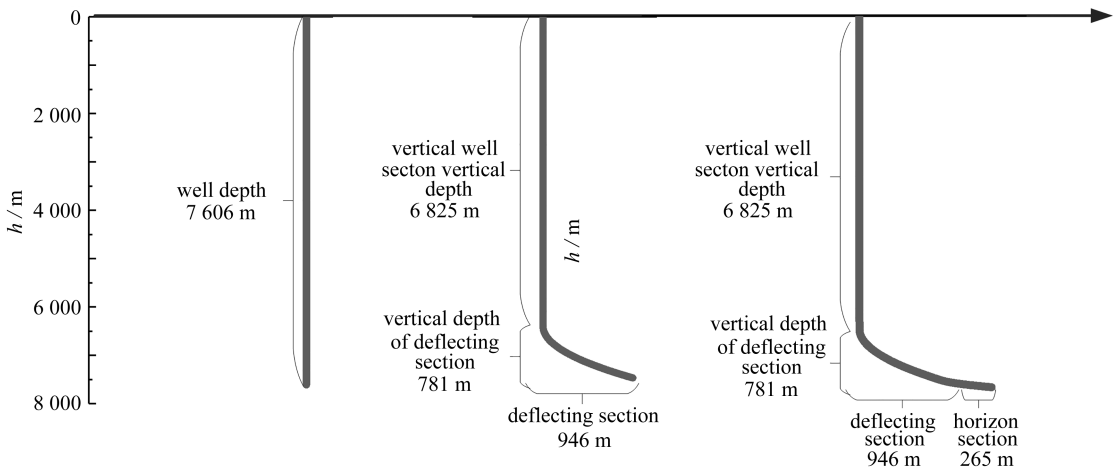


图5 直井、大斜度井和水平井井眼轨迹示意图

Fig. 5 Borehole trajectories of vertical, highly inclined and horizontal wells

表1 基础参数

Table 1 Basic parameters

parameter	value	unit
the straight well depth	7 606	m
the depth of the highly inclined well	7 771	m
the vertical depth of the highly inclined well	7 606	m
the depth of the horizontal well	8 036	m
the vertical depth of the horizontal well	7 606	m
kick-off point	6 825	m
build-up rate	0.32	( $^{\circ}$ )/(30 m)
horizontal section	265	m
gas kick velocity	0.014	$\text{m}^3/\text{s}$
drilling fluid density	1.7	$\text{g}/\text{cm}^3$
drilling fluid displacement	25	L/s
well killing fluid density	1.766	$\text{g}/\text{cm}^3$
kill fluid displacement	25	L/s
geothermal gradient	0.026	$^{\circ}\text{C}/\text{m}$

因此,相对于直井,对大斜度井和水平井进行压井,关井后,井筒中存在更多的气体,随着气体不断上升,套管承受的压力将会变得更大;开始压井后,套管压力上升的幅度将会增加,套管承受高压的时间也会明显增长,这给地面压井增加了更多的风险,所以了解复杂结构井关井后及压井过程套管压力和立管变化是保证复杂结构井安全压井的关键。

### 3.2 复杂结构井压井过程中井筒压力影响因素分析

#### 3.2.1 初始气侵量对井筒压力的影响

图8和图9为不同气侵量下工程师法和司钻法压井过程中套管压力和立管压力曲线。由图8和图9可知,气侵量越高,关井后立管压力越高,压井过程中套管压力越高。这是因为:气侵量越高,井底压力越低,要保持井底压力稳定在地层压力所需要增加的立管压力和套管压力就越高。因此,如图8和图9所示,气侵量对立管压力和套管压力的影响十分显著,气侵量越大,立管压力和套管压力越大。值得注意的是,初始气侵量越大,需要施加的套管压力越大,操作难度相应提高,容易引发井喷事故。气侵量越大,在压井过程中,环空内

压力容易超过地层破裂压力,造成井漏等事故.因此,早期的气侵监测十分重要,降低气侵体积有助于提高压井成功率,降低风险.

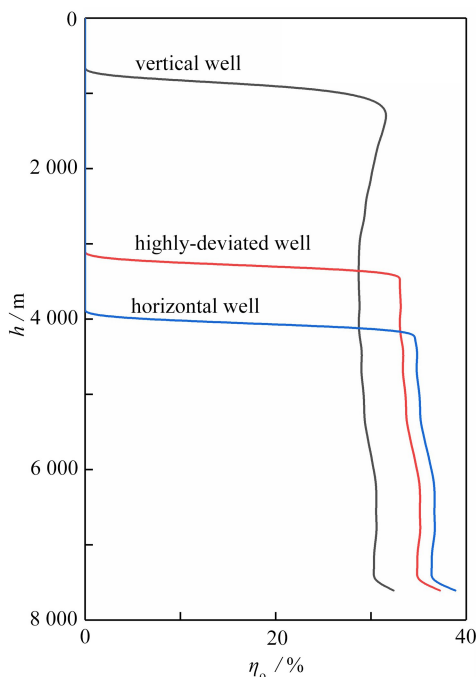


图 6 直井、大斜度井和水平井的初始含气率分布图

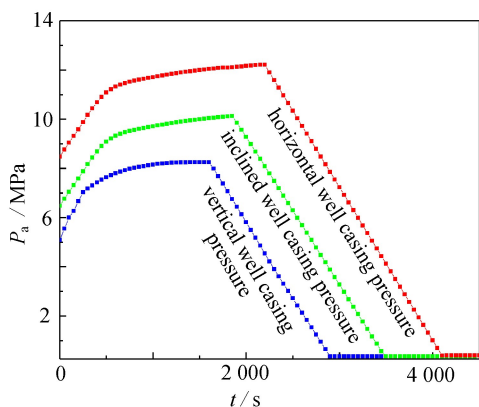
Fig. 6 Initial gas content distributions of vertical, highly inclined and horizontal wells

### 3.2.2 压井液排量对井筒压力的影响

图 10 和图 11 为不同压井排量下工程师法和司钻法压井过程中套管压力和立管压力曲线.由图 10 和图 11 可知,压井排量越大,套管压力越小,立管压力反而越大.这是因为:随着压井排量增大,流体流速会增大,钻井液环空摩阻会不断增大,进而引起压井套压下降,压井立压上升.但总的来说,提高压井排量对套管压力的影响较小,适当提高钻井排量有利于降低压井过程中的环空压力,避免地层破裂.

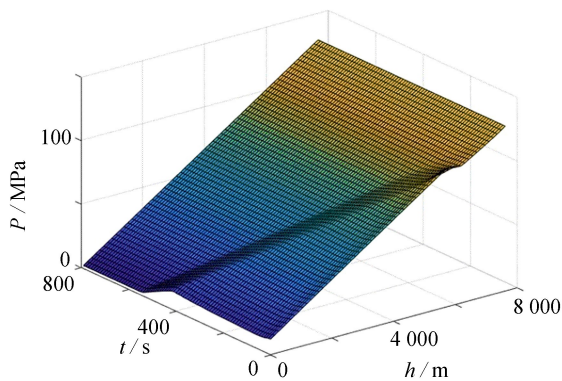
### 3.2.3 压井液密度对井筒压力的影响

图 12 和图 13 为不同压井液密度下工程师法和司钻法压井过程中套管压力和立管压力曲线.由图 12 和图 13 可知,压井液密度越大,压井过程中套管压力和立管压力越小.这是因为:提高压井液密度,压井过程中环空压力会增大,井底压力也会提高,此时需要施加的套管压力和立管越小.因此,使用较大密度的压井液,有利于降低套管压力和立管压力,保障压井作业的实施.



(a) 套管压力

(a) Casing pressures



(b) 井筒动态压力分布(直井)

(b) Dynamic wellbore pressures (straight well)

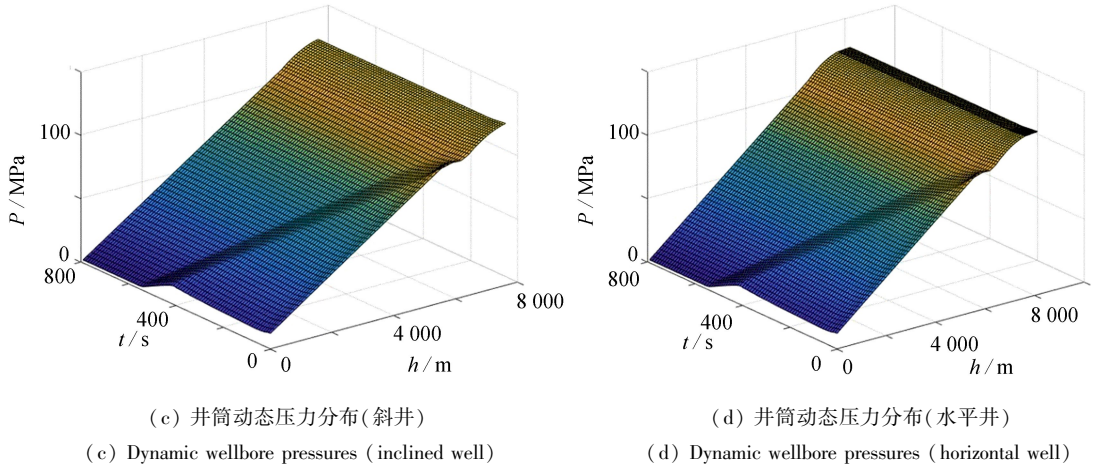


图7 压井过程中套管压力和井筒动态压力分布曲线

Fig. 7 Casing pressure and wellbore dynamic pressure distribution curves during killing

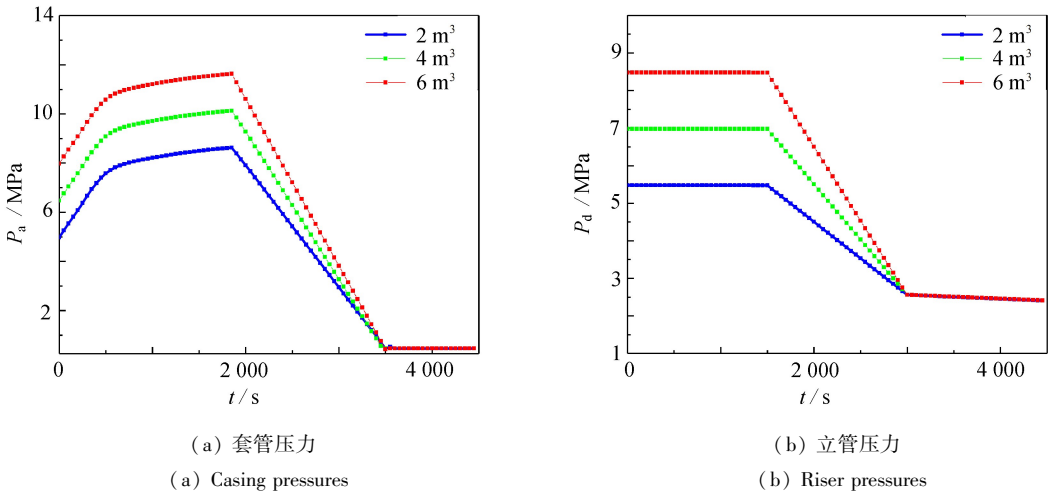


图8 不同气侵体积下工程师法压井过程中的套管压力和立管压力

Fig. 8 Casing pressures and riser pressures in the process of killing well with the engineer method for different gas cut volumes

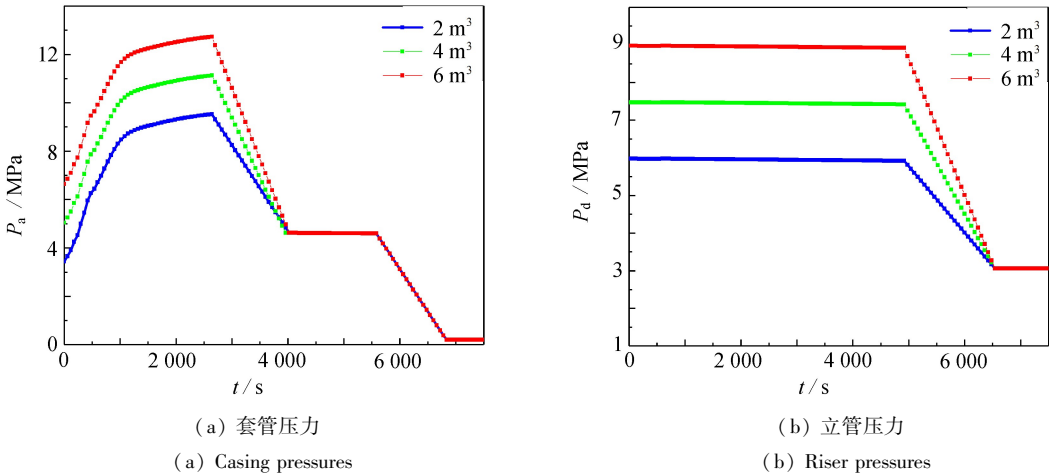
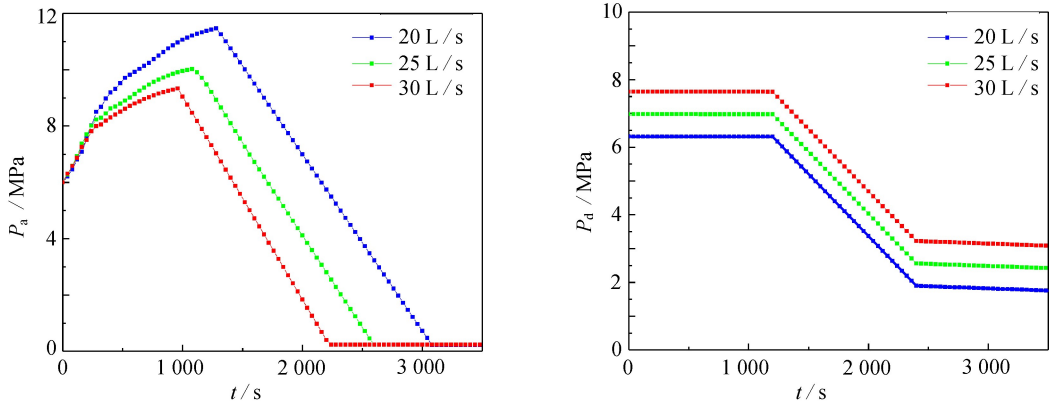


图9 不同气侵体积下司钻法压井过程中的套管压力和立管压力

Fig. 9 Casing pressures and riser pressures in the process of killing well with driller's method for different gas cut volumes

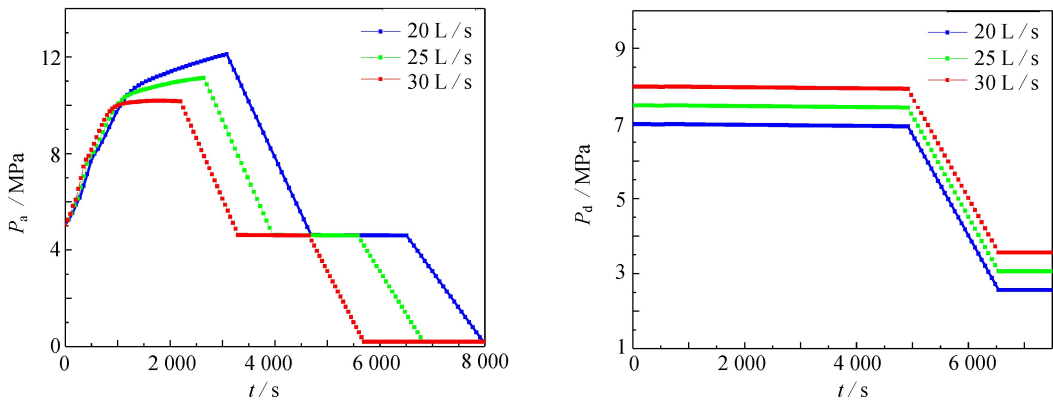
注 为了解释图中的颜色,读者可以参考本文的电子网页版本,后同。



(a) 套管压力 (a) Casing pressures (b) 立管压力 (b) Riser pressures

图 10 不同压井排量下工程师法压井过程中的套管压力和立管压力

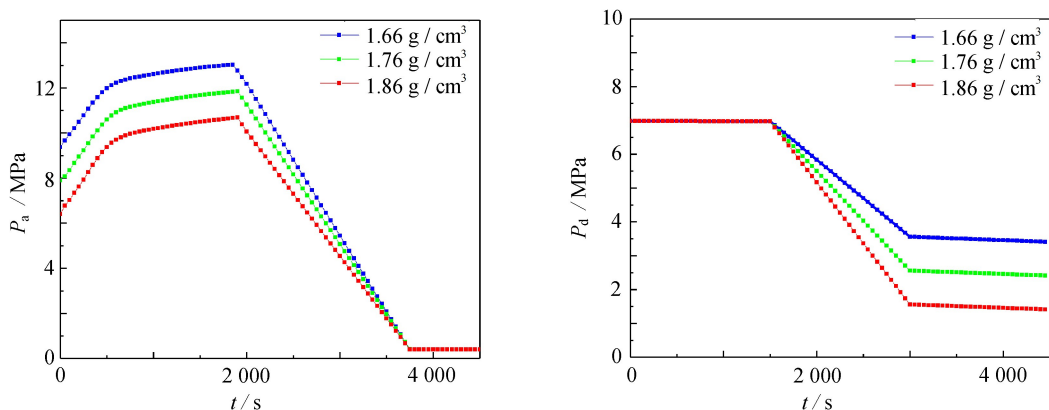
Fig. 10 Casing pressures and riser pressures in the process of killing well with the engineer method at different kill rates



(a) 套管压力 (a) Casing pressures (b) 立管压力 (b) Riser pressures

图 11 不同压井排量下司钻法压井过程中的套管压力和立管压力

Fig. 11 Casing pressures and riser pressures in the process of killing well with driller's method at different kill rates



(a) 套管压力 (a) Casing pressures (b) 立管压力 (b) Riser pressures

图 12 不同压井液密度下工程师法压井过程中的套管压力和立管压力

Fig. 12 Casing pressures and riser pressures in the process of killing with the engineer method at different kill fluid densities

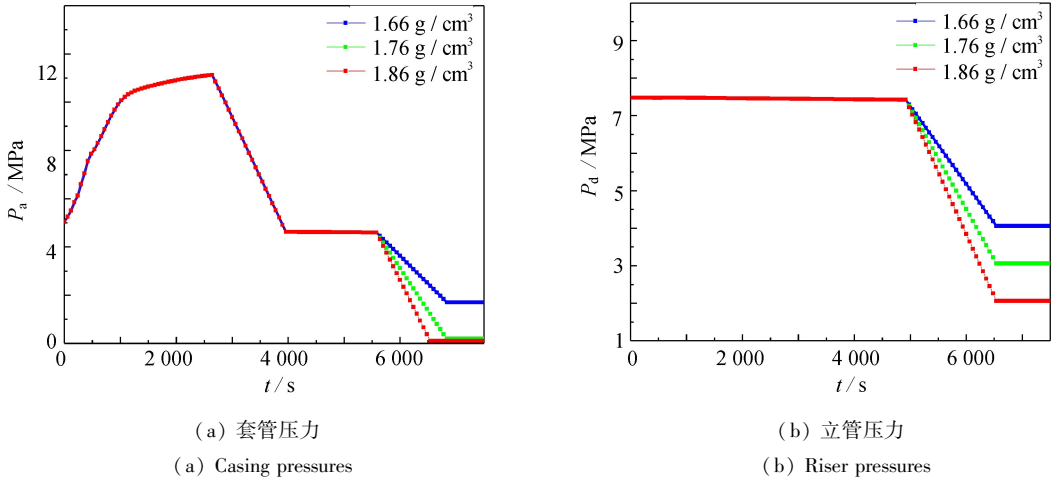


图 13 不同压井液密度下司钻法压井过程中的套管压力和立管压力

Fig. 13 Casing pressures and riser pressures in the process of killing with driller's method at different kill fluid densities

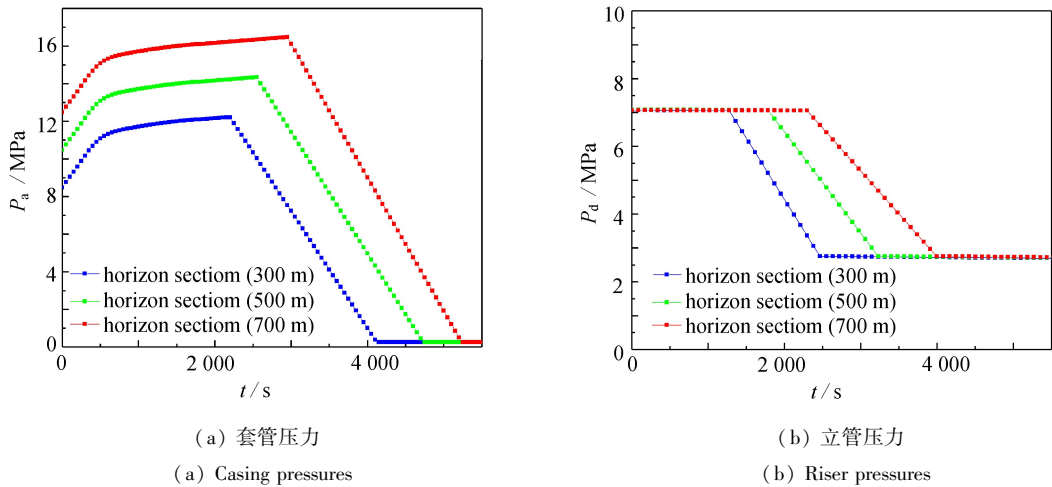


图 14 不同水平段长度下工程师法压井过程中的套管压力和立管压力

Fig. 14 Casing pressures and riser pressures in the process of killing well with the engineer method at different horizontal section lengths

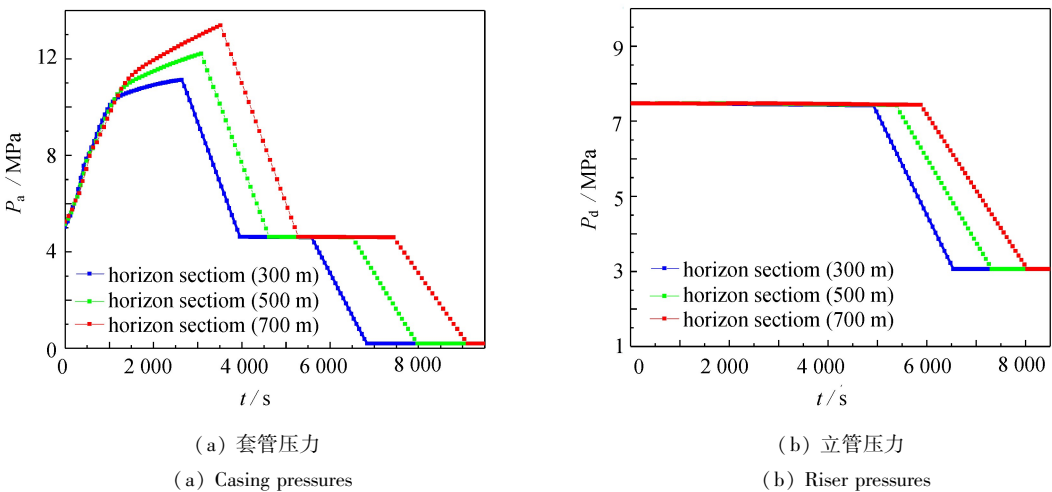


图 15 不同水平段长度下司钻法压井过程中的套管压力和立管压力

Fig. 15 Casing pressures and riser pressures in the process of killing well with driller's method at different horizontal section lengths

### 3.2.4 水平井段长度对井筒压力的影响

图 14 和图 15 为不同水平井段下工程师法和司钻法压井过程中套管压力和立管压力曲线。由图 14 和图 15 可知,水平段长度越长,套管压力越大,压井时间越长。这是因为:水平段长度越长,井筒中聚集的气体越多,当地面关井后,大量的气体在井筒中向井口聚集,套管压力开始不断上升;压井开始后,套管压力继续上升,且水平段长度越长,套管压力越大,套管承受高压的时间也越长,这将大大增加地面井控风险。因此,在对水平井或大斜度井进行压井作业时,现场人员需加强井口压力监测,以预防过高的井筒压力压破地层导致井漏。

## 4 现场应用

我们根据本文建立的动态压井模型,对柴达木盆地英雄岭某溢流井进行压井模拟。该井 13:53 时停泵观察,井口外溢量  $0.5 \text{ m}^3$ ,溢速  $30.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,13:55 关井完毕,起始立压为  $6.5 \text{ MPa}$ ,套压为  $4 \text{ MPa}$ 。关井后校核泥浆池,井筒返出泥浆共  $5 \text{ m}^3$ ,减除停泵回流量  $4 \text{ m}^3$ ,溢流量  $1 \text{ m}^3$ 。次日 10:28 时进行工程师法压井,其基础信息如表 2 所示,初始含气率分布如图 16 所示,图 17 为模拟结果对比图,从图中可以看出,模拟结果与现场实际数据相比,吻合度高,应用效果良好,可为现场的压井作业提供一定的理论指导。

表 2 柴达木盆地某溢流井基础信息表

Table 2 Basic information of an overflow well in Qaidam Basin

parameter	value	unit
the straight well depth	4 933	m
gas velocity kick	0.008 3	$\text{m}^3/\text{s}$
drilling fluid density	2.39	$\text{g}/\text{cm}^3$
drilling fluid displacement	27	L/s
well killing fluid density	2.42	$\text{g}/\text{cm}^3$
kill fluid displacement	30	L/s
geothermal gradient	0.026	$^{\circ}\text{C}/\text{m}$

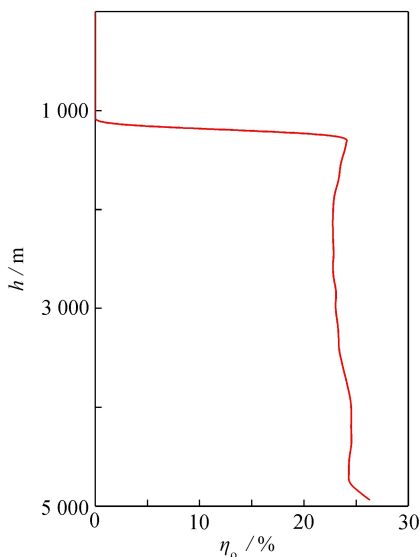


图 16 初始含气率分布图

Fig. 16 The initial gas content distribution

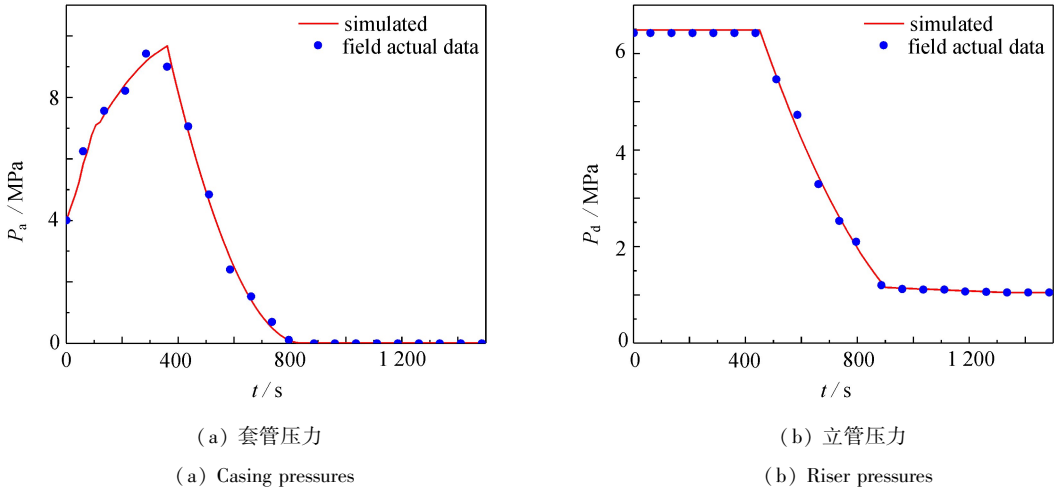


图 17 模拟结果对比图

Fig. 17 Comparison of simulation results

## 5 结 论

1) 本文建立了复杂结构井动态压井模型,模拟了复杂结构井溢流后两种不同的压井过程,通过对压井过程影响因素进行分析,提出了施工参数优化措施。

2) 溢流发生后,井底压力逐渐降低,而压井过程中又重新建立起了井底平衡,保证井底压力的稳定。相对于直井,在大斜度井和水平井压井过程中,井筒中存在更多的气体,随着气体不断上升,套管承受的压力将会变得更大;开始压井后,套管压力上升的幅度将会增加,套管承受高压的时间也会明显增长,这给地面压井增加了更多的风险。

3) 初始气侵量越大,为平衡井筒压力,压井过程中套管压力越大,环空压力越高,压井液密度越大,套管压力越小,压井过程中环空压力越低;压井排量越大,套管压力越小,环空压力越小;水平段长度越长,套管压力越大,压井时间越长。

4) 在大斜度井和水平井压井过程中,套管承受的压力将会变得更大,且承受高压的时间也会明显增长。因此,在实际压井作业过程中,在满足压井工艺设计和要求的前提下,适当地增加钻井液的密度和排量,以提高大斜度井和水平井压井的压井效率。

5) 通过现场数据验证,本文建立的复杂结构井动态压井模型的预测数据误差小,吻合度高,可为现场的压井作业提供一定的理论指导。

**致谢** 本文作者衷心感谢中国石油-西南石油大学创新联合体科技合作项目(2020CX040204)对本文的资助。

### 参考文献(References):

- [1] 李琪, 何华灿, 张绍槐. 复杂地质条件下复杂结构井的钻井优化方案研究[J]. 石油学报, 2004, **25**(4): 80-83. (LI Qi, HE Huacan, ZHANG Shaohuai. Optimum drilling program for complex well under complex geological condition[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, **25**(4): 80-83. (in Chinese))
- [2] 周英杰. 胜利油田特殊结构井开发技术新进展[J]. 石油勘探与开发, 2008, **35**(3): 318-329. (ZHOU Yingjie. Advances on special structure drilling development techniques in Shengli Oilfield[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, **35**(3): 318-329. (in Chinese))
- [3] 任文希, 李皋, 孟英峰, 等. 特殊结构井井眼净化工具研究新进展[J]. 石油矿场机械, 2015, **44**(4): 1-5. (REN Wenxi, LI Gao, MENG Yingfeng, et al. Current development of hole cleaning tool in special structure well

- [J]. *Oil Field Equipment*, 2015, **44**(4): 1-5. (in Chinese))
- [4] 伍贤柱, 胡旭光, 韩烈祥, 等. 井控技术研究进展与展望[J]. 天然气工业, 2022, **42**(2): 133-142. (WU Xianzhu, HU Xuguang, HAN Liexiang, et al. Research progress and prospect of well control technology[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, **42**(2): 133-142. (in Chinese))
- [5] 赵德林, 赵勇华, 滑辉, 等. 特殊结构井防砂技术研究与应用[J]. 内蒙古石油化工, 2012, **38**(1): 109-111. (ZHAO Delin, ZHAO Yonghua, HUA Hui, et al. Research and application of sand control technology for wells with special structure[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2012, **38**(1): 109-111. (in Chinese))
- [6] 高德利, 黄文君, 刁斌斌, 等. 复杂结构井定向钻井技术现状及展望[J]. 前瞻科技, 2023, **2**(2): 11-21. (GAO Deli, HUANG Wenjun, DIAO Binbin, et al. Current status and prospect of directional drilling technologies for complex wells[J]. *Science and Technology Foresight*, 2023, **2**(2): 11-21. (in Chinese))
- [7] 刘文升. 复杂结构井关键技术发展[J]. 中国科技信息, 2022(24): 66-67. (LIU Wensheng. Development of key technologies for wells with complex structures[J]. *China Science and Technology Information*, 2022(24): 66-67. (in Chinese))
- [8] BLOUNT E M, SOEINAH E. Dynamic kill: controlling wild wells a new way[J]. *World Oil*, 1981, **193**: 5.
- [9] WATSON W D, MOORE P. Momentum kill procedure can quickly control blowouts[J/OL]. *Oil and Gas Journal*, 1993[2024-07-15]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:107291828>.
- [10] 刘凯. 气井超重泥浆司钻法压井[J]. 天然气工业, 1988(2): 59-68. (LIU Kai. Gas well drilling with heavy mud driller method[J]. *Natural Gas Industry*, 1988(2): 59-68. (in Chinese))
- [11] 刘凯. 压井计算方法的改进[J]. 西南石油学院学报, 1989, **11**(1): 58-66. (LIU Kai. Improvement on killing well calculation[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1989, **11**(1): 58-66. (in Chinese))
- [12] 范军, 施太和. 气井动态井控模型及计算机仿真[J]. 天然气工业, 1998, **18**(4): 58-61. (FAN Jun, SHI Taihe. Dynamic well control model and computer simulation of gas well[J]. *Natural Gas Industry*, 1998, **18**(4): 58-61. (in Chinese))
- [13] 庞华. 深水钻井气侵井控风险分析[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2015. (PANG Hua. Risk analysis of gas invasion well control in deepwater drilling[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2015. (in Chinese))
- [14] 付建红, 冯剑, 陈平, 等. 深水动态压井钻井井筒压力模拟[J]. 石油学报, 2015, **36**(2): 232-237. (FU Jianhong, FENG Jian, CHEN Ping, et al. Simulation on wellbore pressure during dynamic kill drilling in deep water[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, **36**(2): 232-237. (in Chinese))
- [15] 付建红. 深水钻井溢流监测与井控技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016. (FU Jianhong. Study on overflow monitoring and well control technology of deepwater drilling[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016. (in Chinese))
- [16] 李治, 魏攀峰, 吕建, 等. 天然气井绒囊流体活塞技术不降压压井工艺[J]. 天然气工业, 2018, **38**(2): 90-96. (LI Zhi, WEI Panfeng, LÜ Jian, et al. A gas well killing process without pressure release based on the fuzzy-ball fluid piston technology[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, **38**(2): 90-96. (in Chinese))
- [17] 孙宝江, 孙小辉, 娄文强. 深水油气钻采井筒多相流理论前沿问题研究进展[C]//第三十一届全国水动力学研讨会. 厦门, 2020: 7. (SUN Baojiang, SUN Xiaohui, LOU Wenqiang. Research progress on the theoretical frontiers of multiphase flow in deepwater oil and gas drilling and production wells[C]//*The 31st National Symposium on Hydrodynamic*. Xiamen, 2020: 7. (in Chinese))
- [18] 孙宝江, 王雪瑞, 孙小辉, 等. 井筒四相流理论在深水钻完井工程与测试领域的应用与展望[J]. 天然气工业, 2020, **40**(12): 95-105. (SUN Baojiang, WANG Xu Rui, SUN Xiaohui, et al. Application and prospect of the wellbore four-phase flow theory in the field of deepwater drilling and completion engineering and testing[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, **40**(12): 95-105. (in Chinese))
- [19] 王江帅, 李军, 何岩峰, 等. 变梯度控压钻井井控过程中井口回压变化规律[J]. 石油学报, 2021, **42**(11): 1499-1505. (WANG Jiangshuai, LI Jun, HE Yanfeng, et al. Variation law of wellhead back pressure under well con-



- trol during variable gradient managed pressure drilling[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, **42**(11): 1499-1505. (in Chinese))
- [20] 郑如森, 高文祥, 王磊, 等. 塔里木油田高压气井压井技术[J]. 油气井测试, 2021, **30**(2): 30-33. (ZHENG Rusen, GAO Wenxiang, WANG Lei, et al. Well killing technology for high pressure gas wells in Tarim Oilfield[J]. *Well Testing*, 2021, **30**(2): 30-33. (in Chinese))
- [21] 袁征. 节流压井套压控制精确计算方法[D]. 成都: 西南石油大学, 2015. (YUAN Zheng. Accurate calculation method of casing pressure control for throttling and killing well[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015. (in Chinese))
- [22] 何玉发, 刘清友. 深井注入管柱力学行为研究[C]//中国力学学会学术大会'2009 论文摘要集. 郑州, 2009: 476-477. (HE Yufa, LIU Qingyou. Study on mechanical behavior of injection string in deep well[C]//*Proceedings of the 2009 Academic Conference of the Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics: Abstracts*. Zhenzhou, 2009: 476-477. (in Chinese))
- [23] 蒋希文. 钻井事故与复杂问题[M]. 2版. 北京: 石油工业出版社, 2002. (JIANG Xiwen. *Drilling Accidents and Complex Problems*[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002. (in Chinese))
- [24] 曾明昌, 高自力, 郑述全, 等. 气井最高允许关井压力确定及钻井现场几个井控问题研究[J]. 天然气工业, 2005, **25**(11): 45-47. (ZENG Mingchang, GAO Zili, ZHENG Shuquan, et al. Highest shut-in pressure allowed by gas well and some well-control problems in drilling site[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, **25**(11): 45-47. (in Chinese))
- [25] 毛良杰, 张孝诚, 薛继彪, 等. 隔水管注气双梯度钻井井筒参数计算研究[J]. 应用数学和力学, 2022, **43**(4): 401-415. (MAO Liangjie, ZHANG Xiaocheng, XUE Jibiao, et al. Research on calculation of riser gas injection dual-gradient drilling wellbore parameters[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(4): 401-415. (in Chinese))