

# 井喷关井水击分析及水击波速计算

史富全

(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300452)

**摘要:** 油气井发生溢流或井喷后,立即关闭防喷器,关井期间防喷器需经受关井产生的水击压力作用。本文在对井喷关井水击的传播物理特征分析的基础上,推导直接关井水击压力计算公式,综合考虑井筒流体含气率、气液两相流型、固相类型等对水击波速的影响,推导水击波在气、液、固三相混合流体中传播速度计算公式,并通过算例对水击波速影响因素进行分析。计算表明水击波速对含气率变化非常敏感,钻井液含气率在 0~0.001 的时候,水击波速几乎是发生了突变,水击波速在含气率为 0.001 时仅为 385 m/s,相比纯钻井液情况下降了 67%,而钻井液固相含量、套管的内径和壁厚对水击波传播速度影响较小。

**关键词:** 井喷;关井;水击压力;水击波速;多相流;油气井

**中图分类号:** TE28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2020)11-0037-07

## Analysis of blowout shut-in caused water hammer and calculation of water hammer wave velocity

SHI Fuquan

(CNOOC Ltd., Tianjin, Tianjin 300452, China)

**Abstract:** The blowout preventer is closed immediately once the oil or gas well overflows or blows out. During the well shut-in period, the blowout preventer will withstand the water hammer pressure generated by shut-in. Based on the analysis of the physical characteristics of water hammer propagation in shut-in wells, this paper derives the formula for calculating the direct shut-in pressure from water hammer. With comprehensive consideration of the factors affecting the water hammer velocity such as gas content in the wellbore fluid, gas-liquid two-phase flow pattern, solid phase type, the calculation formula of the propagation velocity of the water hammer wave in the three-phase mixed fluid of gas, liquid and solid is deduced with the influencing factors of the water hammer wave velocity analyzed through an example. Calculations show that the water hammer wave velocity is very sensitive to changes in the gas content: when the gas content in the drilling fluid is 0~0.001, the water hammer wave velocity changes abruptly. The water hammer wave velocity is only 385m/s when the gas content is 0.001, indicating a decrease by 67% compared with that in the pure drilling fluid; while the solid phase content in the drilling fluid, the inner diameter and the wall thickness of the casing have less influence on the propagation velocity of the water hammer wave.

**Key words:** blowout; shut-in; water hammer pressure; water hammer propagation velocity; multiphase flow; oil or gas well

常规钻井过程中是依靠井筒液柱压力来平衡地层压力的,但由于某种原因,该平衡被打破,就可能造成溢流。溢流得不到有效控制时,易发展成为井喷、井喷失控。油气井溢流井喷涉及到复杂的流动现象,为控制溢流或井喷的发展,应当关闭防喷器,

这期间防喷器需经受关井产生的水击压力作用<sup>[1-3]</sup>。关于关井水击问题的研究始于对关井方式的研究,S.I.Jardine 等<sup>[4]</sup>对关井水击进行了实验和理论研究,指出“硬关井”虽然会引起一定的水击压力,但关井程序简单,可以避免更多的地层流体侵入

**收稿日期:** 2020-02-29; **修回日期:** 2020-10-05 **DOI:** 10.12143/j.tkgc.2020.11.007

**作者简介:** 史富全,男,汉族,1984 年生,工程师,硕士,主要从事海洋石油钻井监督技术及管理工作,天津市滨海新区海川路 2121 号渤海石油管理局大厦 C 座,shifq2@cnooc.com.cn。

**引用格式:** 史富全.井喷关井水击分析及水击波速计算[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(11):37-43.

SHI Fuquan. Analysis of blowout shut-in caused water hammer and calculation of water hammer wave velocity[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(11):37-43.

井筒。国内一些专家较早将气液两相流作为关井水击波的传播介质,对“硬关井”时,根据不同气侵程度和不同流型进行水击压力理论分析和实例计算<sup>[5-10]</sup>,但未考虑固相、套管的内径和壁厚对水击波传播的影响。笔者在对井喷关井水击的传播物理特征分析的基础上,推导直接关井水击压力计算公式,综合考虑井筒流体含气率、气液两相流型、固相类型等对水击波速的影响,推导水击波在气、液、固三相混合流体中传播速度计算公式,并通过算例对水击波速影响因素进行分析。

## 1 关井水击波传播特征分析及分类

### 1.1 关井水击波传播特征

井喷关井产生水击波与声波等其他弹性波一样,具有传播、反射和叠加等现象<sup>[11-13]</sup>,如图1所示。为分析关井水击波,假设发生井喷后,井口防喷器是骤然关闭的,并假设井喷关井前井口流速为 $v_0$ ,压力为 $p_0$ 。关井产生的水击压力波波速为 $a$ ,其传播可分为以下4个阶段来研究。

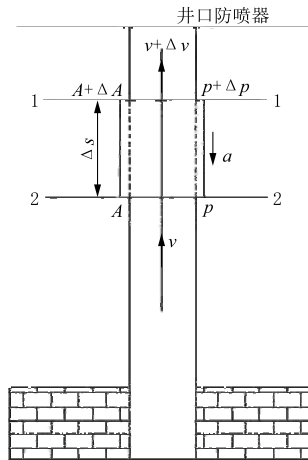


图1 井喷关井水击压力波传播示意

Fig.1 Schematic diagram of shut-in water hammer pressure wave propagation

(1)第一阶段。防喷器关闭后,靠近防喷器的一层厚度为 $\Delta s$ 的井筒流体在 $\Delta t$ 时间内首先停止流动,这段流体被压缩,压力增高了 $\Delta p$ ,即为水击压力。与此同时,井筒也发生了膨胀。当第一层的流体在 $\Delta t$ 时间内停止流动后,紧挨着的第二层流体也停了下来,并受到了压缩,压力增加 $\Delta p$ ,相应井筒同样发生膨胀。这就形成了高低压分界面,即增压面,并以速度 $a$ 向井底传播。假设套管鞋处井深为 $L$ ,那么当水击波经过 $t_1=L/a$ 后,套管内流体全部处于静止状态,压力增加 $\Delta p$ ,整个套管处于膨胀状态。

(2)第二阶段。在 $t_1=L/a$ 时刻时,套管内的压力高于套管鞋外的压力。由于压力的不平衡,套管内靠近套管鞋的一层液体又以速度 $v_0$ 冲向井底方向,产生的水击减压波以速度 $a$ 向防喷器传播,使得水击压力消失,井筒压力恢复正常,套管也恢复正常状态。

(3)第三阶段。在 $t_2=2L/a$ 时刻时,井筒内的压力都已恢复到了关井前的压力,但靠近防喷器的一层流体因为惯性作用,仍企图以速度 $v_0$ 向井底方向流动,但这个时候不再有流体补充,此时流体发生了双倍膨胀,压力双倍降低,即产生了负的水击压力 $\Delta p$ ,该水击减压波以速度 $a$ 向井底传播,套管壁收缩,压力降低 $\Delta p$ 。

(4)第四阶段。在 $t_3=3L/a$ 时刻时,水击减压波传到了套管鞋处,导致该处压力低于套管鞋外井筒压力。由于压力差,流体又以速度 $v_0$ 冲向防喷器方向,使得靠近套管鞋内的一层流体恢复到正常压力。这个水击增压波又以速度 $a$ 向防喷器传播,直到 $t_4=4L/a$ 时刻又传到了防喷器处。这个时候,整个井筒又恢复到了防喷器关闭前的流动状态。接着,又开始了下一个压力传递的循环。

关井水击传播的4个阶段,其物理特性见表1。

表1 关井水击传播过程物理特性

Table 1 Physical characteristics of shut-in water hammer pressure wave propagation

阶段	时段	流速	流速方向	压力	传播方向	井筒流体状态
1	$0 < t < L/a$	$v_0 \rightarrow 0$	井底 → 防喷器	增加 $\Delta p$	防喷器 → 井底	被压缩
2	$L/a < t < 2L/a$	$0 \rightarrow v_0$	防喷器 → 井底	恢复为原压力	井底 → 防喷器	恢复为原状
3	$2L/a < t < 3L/a$	$-v_0 \rightarrow 0$	防喷器 → 井底	降低 $\Delta p$	防喷器 → 井底	膨胀
4	$3L/a < t < 4L/a$	$0 \rightarrow v_0$	井底 → 防喷器	恢复为原压力	井底 → 防喷器	恢复为原状

分析关井水击传播的4个阶段,对比防喷器处、井筒中某截面、套管鞋处的水击压强随时间的变化

(如图2所示),可以知道防喷器处总是在相末发生变化,水击作用持续时间最长,变化的幅度也是最

大。

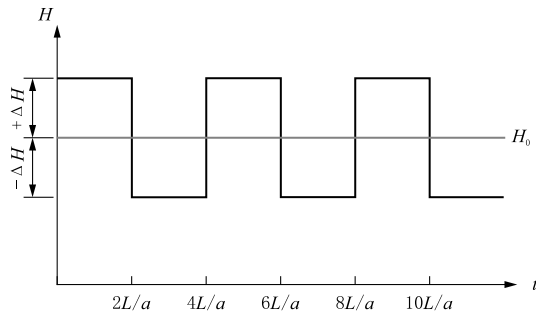


图 2 防喷器处直接水击压力变化示意

Fig.2 Diagram of direct water hammer pressure variation at BOP

如上所述,井筒流体的流速、压强随着水击波的传播随时变化。为了分析井喷关井的可靠性,既要了解关井后防喷器处压力的变化,也要了解井筒上任一点,尤其是套管鞋处薄弱地层的压力变化。

### 1.2 关井水击波的分类

前面讨论的是防喷器在瞬间关闭产生的水击压力传播特征,但实际上,防喷器是不可能在瞬间关闭的,对于每一个微小的关闭过程都会产生一个相应的水击波,并按照上述传播规律传播。因此,整个井筒的水击压力都是由一系列的不同发展阶段水击压力波复杂叠加的结果。

当第二个水击波产生以后,第一个水击波已经传播一定距离,同样,当第三个水击波产生以后,第二个水击波也传播了一定距离。经过时间  $L/a$  后,第一个水击波到达套管鞋处,随即向防喷器反射减压波。如果防喷器的关闭时间小于一个相长  $2L/a$ ,第一个减压波就还没到达防喷器处,这时防喷器已经完全关闭,此时防喷器处的水击压力达到最大值,这种情况水击现象即为直接水击。如果防喷器关闭时间大于一个相长  $2L/a$ ,那么在第一个减压波到达防喷器时,防喷器还没完全关闭,这样一来,减压波就会抵消掉一部分关闭防喷器产生的增压波,使得水击压力不会达到直接水击压力值,这种情况水击现象即为间接水击。

由于受到水击反射波(减压波)的影响,距离地层越近,得到减压波的机会就会越多,压强增量就越小,所以井筒其他截面的最大水击压强要比防喷器处要小。直接水击总是比间接水击要大,工程上一般应选择合理的阀门关闭方式,避免产生直接水击压力。由上述分析可知,间接水击与直接水击在本质上没有差别,都是由流体的惯性力、弹性力和管壁

的弹性力起主要作用,但间接水击压力传播涉及水击的干涉、反射和复杂的边界条件,其计算要比直接水击压力的计算要复杂得多。

## 2 直接水击压力计算

发生井喷后,突然关闭防喷器,在无限小的  $\Delta t$  时间内,靠近防喷器厚度为  $\Delta s$  的一层钻井液首先停止了流动,对于该层钻井液,用动量定理分析如下<sup>[14]</sup>。

如图 1 所示,选取一长为  $\Delta s$  的控制体 1-2,水击波从 1-1 流入,从 2-2 流出,水击波速为  $a$ 。取断面 2-2 处的面积为  $A$ ,压力为  $p$ ,流速为  $v$ ,流体的密度为  $\rho$ 。断面 1-1,上述各项分别变为  $A + \Delta A$ 、 $p + \Delta p$ 、 $v + \Delta v$ 、 $\rho + \Delta \rho$ 。

在  $\Delta t$  时段内, $\Delta s$  段流体的动量增量为:

$$(\rho + \Delta \rho)(A + \Delta A)(v + \Delta v)\Delta s - \rho A v \Delta s \approx \Delta(\rho A v)\Delta s$$

$\Delta s$  段流体所受外力为:

$$pA - (p + \Delta p)(A + \Delta A) - \rho g A \Delta s \cos \theta - \tau_0 X_0 \Delta s \approx -\Delta(pA) - \rho g A \Delta s \cos \theta - \tau_0 X_0 \Delta s$$

根据动量定理得:

$$\begin{cases} -[\Delta(pA) + \rho g A \Delta s \cos \theta + \tau_0 X_0 \Delta s] \Delta t \\ = \Delta(\rho A v)\Delta s \\ -[(p + \Delta p)(A + \Delta A) + \rho g A \Delta s \cos \theta + \tau_0 X_0 \Delta s] \\ = a(\rho A \Delta v + \rho v \Delta A + A v \Delta \rho) \end{cases} \quad (1)$$

因为  $\Delta \rho$ 、 $\Delta A$  相对于  $\Delta p$  比较小,故可以忽略不计,得到:

$$\begin{aligned} -[A \Delta p + \rho g A \Delta s \cos \theta + \tau_0 X_0 \Delta s] &= a \rho A \Delta v \\ \Delta p &= -\frac{a \rho A \Delta v + \rho g A \Delta s \cos \theta + \tau_0 X_0 \Delta s}{A} \\ &= -a \rho \Delta v - \rho g \Delta s \cos \theta - \frac{\tau_0 X_0 \Delta s}{A} \\ &= a \rho (v - v') - \rho g \Delta s \cos \theta - \frac{\tau_0 X_0 \Delta s}{A} \end{aligned} \quad (2)$$

上式为动量定理中考虑重力项和摩擦项推导出的水击压力表达式,其中, $v$  为断面 2-2 处流体速度, $v'$  为断面 1-1 处流体速度。由此可见,水击压力  $\Delta p$  主要与水击波速  $a$ 、流体密度  $\rho$ 、流体速度差  $(v - v')$  有关,受重力项和摩擦项影响很小。

当发生直接水击压力时,即闸门(防喷器)在瞬间关闭时,断面 1-1 处流体速度  $v'$  为 0,此时得到直接水击压力计算公式如下: $\Delta p = a \rho v$ 。由此可见,

水击压力主要与水击波速、流体密度和流体流速有关。

### 3 关井水击波速计算

#### 3.1 水击波在纯液中传播

以下对图1选取的微元段进行水击波速计算公式推导。由质量守恒原理知,流入、流出微元段的流体质量差等于微元段的流体质量增量。

在 $\Delta t$ 时间内,流入微元段的流体质量为 $\rho A v \Delta t$ ,流出微元段的流体质量为:

$$(\rho + \Delta\rho)(A + \Delta A)(v + \Delta v)\Delta t$$

流入、流出微元段的流体质量差为:

$$\rho A v \Delta t - (\rho + \Delta\rho)(A + \Delta A)(v + \Delta v)\Delta t \approx -\Delta(\rho A v)\Delta t$$

微元段的流体质量增量为:

$$(\rho + \Delta\rho)(A + \Delta A)\Delta s - \rho A \Delta s \approx \Delta(\rho A)\Delta s$$

根据质量守恒原理知:

$$-\Delta(\rho A v)\Delta t = \Delta(\rho A)\Delta s$$

$$-\Delta(\rho A v) = \Delta(\rho A)a$$

$$a = \frac{-\Delta(\rho A v)}{\Delta(\rho A)} = \frac{-\rho A \Delta v + v \Delta(\rho A)}{\Delta(\rho A)}$$

即得:

$$a + v = -\frac{\rho A \Delta v}{\Delta(\rho A)}$$

因 $a \gg v$ ,上式可简化成:

$$a = -\frac{\rho A \Delta v}{\Delta(\rho A)}$$

因 $\Delta v = -\Delta p / (\rho a)$ ,代入上式得:

$$a = \frac{\rho A \Delta p}{\rho a \Delta(\rho A)}$$

$$a^2 = \frac{1}{\frac{\Delta(\rho A)}{A \Delta p}} = \frac{1}{\frac{A \Delta \rho + \rho \Delta A}{A \Delta p}}$$

上式取极限即得水击波速计算公式:

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho \left( \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dp} \right)}} \quad (3)$$

液体的弹性系数为 $E_1$ ,根据弹性系数定义可得:

$$E_1 = \rho \frac{dp}{d\rho}$$

管子弹性系数为 $E_p$ ,厚度为 $e$ ,直径为 $D$ ,应变为 $\sigma$ 时,根据薄壁圆管拉力公式可得:

$$e = \frac{pD}{2\sigma}$$

根据管材弹性系数定义可得:

$$E_p = \frac{d\sigma}{dD} D$$

管子截面:

$$A = \frac{1}{4} \pi D^2$$

则有:

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dp} = 2 \frac{dD}{D} \frac{1}{dp} = 2 \frac{d\sigma}{E_p} \frac{1}{dp} = \frac{D}{e E_p}$$

$$a_m = \sqrt{\frac{E_1 / \rho_m}{1 + \frac{E_1 D}{E_p e}}} \quad (4)$$

经过计算,常温常压状态下,水击波在钻井液中传播速度为1200 m/s左右。

#### 3.2 水击波在纯气中传播

温度 $T_g$ 条件下,水击波在空气中的传播速度 $C_g$ 可通过以下公式计算:

$$C_g = C_0 (T_g / T_0)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: $C_0$ ——温度为 $T_0$ 时,水击波在理想气体中的传播速度,m/s; $T_0$ ——温度,K。

在常温常压条件下,水击波在空气中传播速度约为340 m/s。

#### 3.3 水击波在多相流中传播

在气、液、固多相流中,由于气体具有很大的压缩性,造成水击波速传播速度对含气率变化非常敏感,少量的含气率就会使其传播速度远小于在纯液或纯气中的传播速度。当水击波从气相往液相传播时,因为液相的惯性降低了传播速度;当水击波从液相往气相传播时,又因为气相的压缩性降低了传播速度<sup>[15]</sup>。

水击波在多相流中的传播已经有不少学者进行了实验和理论研究,并建立了相关模型。

##### 3.3.1 气液两相压力波传播速度实验研究

西安交通大学多相流国家重点实验室对压力波在含气率为0~0.7范围内的气液两相泡状流和弹状流传播进行了室内实验,试验结果如图3、图4所示<sup>[16-18]</sup>。

实验结果表明:对于泡状流,在含气率接近0的时候,波速几乎是发生了突变;在含气率 $<0.05$ 时,随着含气率变大,压力波的波速陡然下降;当含气率 $>0.05$ 以后,压力波波速变化变得缓慢。对于弹状流,当含气率在0.25~0.5时,压力波波速基本上变

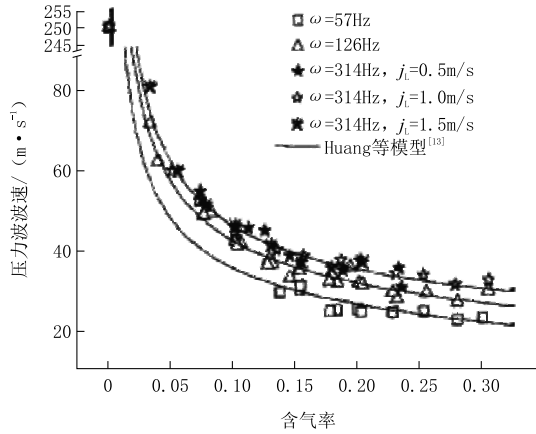


图 3 泡状流下压力波波速随含气率的变化

Fig.3 Pressure wave propagation velocity vs gas contents for the bubbly flow

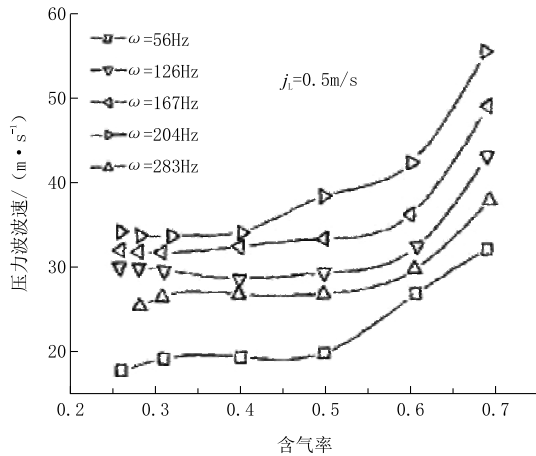


图 4 弹状流下压力波波速随含气率的变化

Fig.4 Pressure wave propagation velocity vs gas contents for the slug flow

化不大;当含气率>0.5以后,压力波波速随着含气率的增大而逐渐缓慢增大。

### 3.3.2 水击波速计算公式推导

井喷期间,井筒内的流动为气、液、固三相流动,气体对水击波速影响很大,常规的水击波速计算公式已不再适用,以下根据质量守恒方程和动量守恒方程,推导井筒环空为多相流情况下的水击波速。

防喷器突然关闭,井口混合流体的流速可以统一考虑,这与单向流相似。不同的是流体的压缩性,因为气、液、固的弹性模量均不相同,井口混合流体的压缩体积是由固相压缩量、液相体积压缩量和气体的压缩量三者共同组成。

如图 1 所示,假设井口初始流速为  $v_{m0}$  (m/s),防喷器关闭后终了流速为  $v_{m1}$  (m/s),压力增加量为  $\Delta P$  (MPa),环空横截面积为  $A$  (m<sup>2</sup>),环空横截面积

膨胀量为  $\Delta A$  (m<sup>2</sup>),那么在防喷器关闭  $\Delta t$  时间后,进入  $\Delta s$  段的流体体积为:

$$\Delta V_m = (v_{m0} - v_{m1}) A \Delta t = \Delta v_m A \Delta t \quad (6)$$

假设  $\Delta L$  段含气率为  $\alpha$ ,气泡体积模量为  $E_g$ ,则气相体积压缩变形量  $\Delta V_g$ :

$$\Delta V_g = \frac{\Delta P}{E_g} \alpha A \Delta s \quad (7)$$

假设  $\Delta L$  段固相含量为  $\beta$ ,固相颗粒体积模量为  $E_s$ ,则固相体积压缩变形量  $\Delta V_s$ :

$$\Delta V_s = \frac{\Delta P}{E_s} \beta A \Delta s \quad (8)$$

假设钻井液体积模量为  $E_1$ ,则  $\Delta L$  段钻井液体积压缩变形量  $\Delta V_1$ :

$$\Delta V_1 = \frac{\Delta P}{E_1} (1 - \alpha - \beta) A \Delta s \quad (9)$$

假设套管厚度为  $e$ ,直径为  $D$ ,套管体积模量为  $E_p$ ,则套管膨胀变形量  $\Delta V_p$ :

$$\Delta V_p = \frac{\Delta P D}{E_p e} A \Delta s \quad (10)$$

由连续性原理知流入  $\Delta s$  段的流体量等于气、液、固三相体积压缩量和管道膨胀的体积:

$$\Delta V_m = \Delta V_g + \Delta V_s + \Delta V_1 + \Delta V_p \quad (11)$$

由式(6)~(11)可得:

$$\Delta v_m A \Delta t = \frac{\Delta P}{E_g} \alpha A \Delta s + \frac{\Delta P}{E_s} \beta A \Delta s + \frac{\Delta P}{E_1} (1 - \alpha - \beta) A \Delta s + \frac{\Delta P D}{E_p e} A \Delta s \quad (12)$$

由动量定理知:

$$\Delta P = \rho_m a_m \Delta v_m \quad (13)$$

式中: $\rho_m$ ——流体混合密度,kg/m<sup>3</sup>;  $a_m$ ——井喷关井水击波速,m/s。

根据一般水击波速定义知:

$$a_m = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (14)$$

由(12)、(13)、(14)三式可得:

$$a_m = \sqrt{\frac{E_1 / \rho_m}{1 - \alpha - \beta + \alpha \frac{E_1}{E_g} + \beta \frac{E_1}{E_s} + \frac{E_1 D}{E_p e}}} \quad (15)$$

其中, $\rho_m$ 为流体混合密度:

$$\rho_m = \alpha \rho_g + \beta \rho_s + (1 - \alpha - \beta) \rho_1 \quad (16)$$

式中: $\rho_g$ 、 $\rho_s$ 、 $\rho_1$ ——分别表示井筒中气泡、固相颗粒、钻井液的密度,g/cm<sup>3</sup>。

当钻井液中不含气相和固相时,即得水击波在

纯液中的传播速度计算公式:

$$a_m = \sqrt{\frac{E_l/\rho_m}{1 + \frac{E_l D}{E_p e}}} \quad (17)$$

为分析含气率和固相含量对水击波速的影响,应用公式(15),选取如下实例,进行实例分析:

某井套管内径  $D=215.9$  mm,套管体积模量  $E_p=2.1 \times 10^{11}$  Pa,气相体积模量  $E_g=2.0 \times 10^5$  Pa,钻井液体积模量  $E_l=2.04 \times 10^9$  Pa,固相体积模量  $E_s=1.62 \times 10^{10}$  Pa,气相密度  $\rho_g=0.9$  kg/m<sup>3</sup>(标况),钻井液密度  $\rho_l=1200$  kg/m<sup>3</sup>,固相密度  $\rho_s=2660$  kg/m<sup>3</sup>,套管壁厚  $e=0.008$  m。通过计算得到水击波速随含气量和固相含量变化的曲线如图5~8所示。

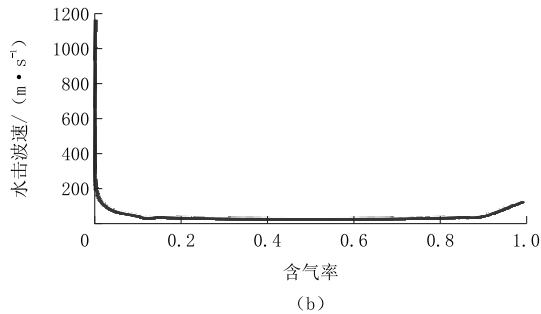
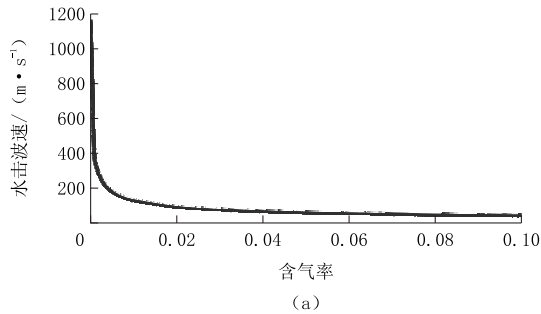


图5 钻井液含气率对水击波速的影响

Fig.5 Water hammer wave velocity vs gas content in the drilling fluid

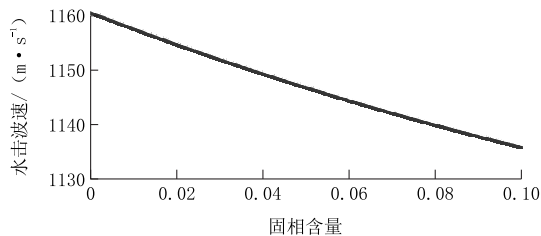


图6 钻井液固相含量对水击波速的影响

Fig.6 Water hammer wave velocity vs solid content in the drilling fluid

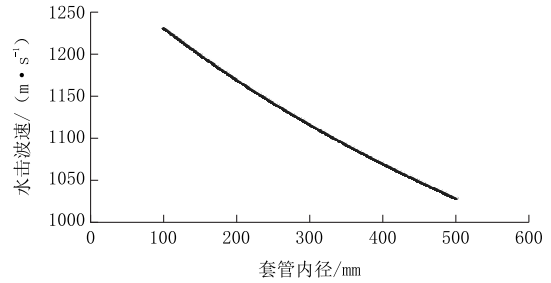


图7 套管内径对水击波速的影响

Fig.7 Water hammer wave velocity vs casing inner diameter

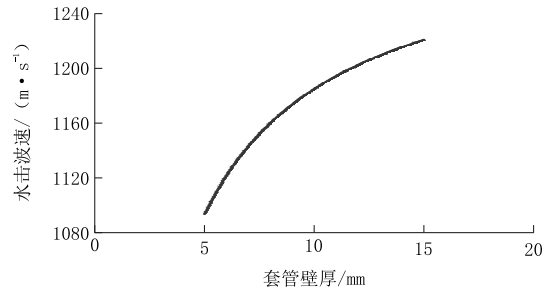


图8 套管壁厚对水击波速的影响

Fig.8 Water hammer wave velocity vs casing thickness

计算实例表明:

(1)应用公式(15)得到的水击波速曲线与室内实验结果吻合度较高,可以使用该公式估算气液两相流中的水击压力波速。

(2)钻井液含气率对混合流体的压缩性影响很大,随着含气量的增加,水击波速迅速下降。由图5可知,当钻井液不含气时,水击波速为1161 m/s;当含气率为0.001时,水击波速为385 m/s,下降了67%;当含气率为0.005时,水击波速为181 m/s,下降了84%。当含气率>0.005后,随着含气量的增加,水击波速下降速度变得缓慢。

(3)钻井液固相含量对混合流体的压缩性影响较小,随着固相含量的增加,水击波速逐渐下降,但降幅很小,可忽略固相含量对水击波速的影响。

(4)套管的内径和壁厚对水击压力传播速度影响较小。水击波速随着套管内径的增大而减小,随着套管壁厚的增大而增大。

#### 4 结论

(1)分析了井喷关井水击传播过程的物理特征,对直接水击压力计算公式进行了推导。关井过程中,整个井筒的水击压力都是由一系列的不同发展阶段水击压力波复杂叠加的结果,关井水击可分为直接水击和间接水击,直接水击压力大于间接水击

压力。

(2)对水击波在气、液、固多相流中的传播进行了分析,计算表明水击波速对含气率变化非常敏感,钻井液含气率在 0~0.001 的时候,水击波速几乎是发生了突变,水击波速在含气率为 0.001 时仅为 385 m/s,相比纯钻井液情况下下降了 67%,而钻井液固相含量、套管的内径和壁厚对水击波传播速度影响较小,水击波速随着固相含量的增加而下降,随着套管内径的增大而减小,随着套管壁厚的增大而增大。

### 参考文献 (References):

- [1] 郝俊芳.平衡钻井与井控[M].北京:石油工业出版社,1992.  
HAO Junfang. Balanced drilling and well control[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [2] Robert D.G. Blowout and well control handbook[M]. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2003.
- [3] Neal Adams. Well control problems and solutions[M]. Printed in the United States of America, 1980.
- [4] S.I.Jardine, Sedco Forex, A.B.Johnson. Hard or soft shut-in: Which is the best approach? [J]. SPE25712, 1993:359-370.
- [5] 韩文亮,王光谦,韩军.两相流水击模型对输送防护措施效果的计算分析[J].水利学报,2000,31(3):37-41.  
HAN Wenliang, WANG Guangqian, HAN Jun. Computational analysis of water hammer prevention devices for solid-liquid two-phase flow pipelines[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000,31(3):37-41.
- [6] 陈林,张雪,刘顺茂,等.井筒气液两相流水击波速计算图版的研制与应用[J].西安石油大学学报(自然科学版),2018,33(1):79-84.  
CHEN Lin, ZHANG Xue, LIU Shunmao, et al. Development and application of water hammer wave velocity calculation chart of wellbore gas-liquid two-phase flow[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2018,33(1):79-84.
- [7] 罗朝东.深井气侵关井引发的井筒多相水击压力特性研究[J].应用力学学报,2018,35(1):218-222.  
LUO Chaodong. Research on water hammer pressure in multi-phase flow along wellhole in shutting operation[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018,35(1):218-222.
- [8] 任美鹏,李相方,刘书杰,等.钻井井喷关井期间井筒压力变化特征[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(3):113-119.  
REN Meipeng, LI Xiangfang, LIU Shujie, et al. Characteristics of wellbore pressure change during shut-in after blowout [J]. Journal of China University of Petroleum, 2015,39(3):113-119.
- [9] 任美鹏,刘书杰,耿亚楠,等.置换法压井关井期间压井液下落速度计算方法[J].中国安全生产科学技术,2018,14(6):128-133.  
REN Meipeng, LIU Shujie, GENG Yanan, et al. Calculation method of falling velocity for killing fluid during shut-in process with displacement method for killing[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018,14(6):128-133.
- [10] 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(3):1-3.  
LI Xiangfang, ZHENG Quanfang. Calculation and application of sugar pressure for “Hard Closing”[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1995,23(3):1-3.
- [11] 张国忠.管道瞬变流动分析[M].东营:石油大学出版社,1994.  
ZHANG Guozhong. Pipeline transient flow analysis [M]. Dongying: University of Petroleum Press, 1994.
- [12] A. Bergant, A. R. Simpson, A. S. Tijsseling. Water hammer with column separation: A historical review[J]. Journal of Fluids and Structures, 2006(22):135-171.
- [13] Jaime Suárez Acuña. Generalized water hammer algorithm for piping systems with unsteady friction[M]. University of Puerto Ricomayaguez Campus, 2005.
- [14] 钱木金.直接水击的计算公式[J].水电能源科学,1996,14(2):140-144.  
QIAN Mujin. A novel formula of the direct waterhammer[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 1996,14(2):140-144.
- [15] 孙晓峰,李相方,齐明明.溢流期间气体沿井眼膨胀规律研究[J].工程热物理学报,2009,30(12):2039-2042.  
SUN Xiaofeng, LI Xiangfang, QI Mingming. Study on gas expansion characteristics along the borehole during kicking [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009,30(12):2039-2042.
- [16] 黄飞,张西民,郭烈锦.气液两相流中压力波传播的实验研究[J].自然科学进展,2005,15(4):459-446.  
HUANG Fei, ZHANG Ximin, GUO Liejin. Experimental study on pressure wave propagation in gas-liquid two-phase flow[J]. Progress in Natural Science, 2005,15(4):459-446.
- [17] 刘磊,王跃社,周芳德.气液两相流压力波传播速度研究[J].应用力学学报,1999,16(3):22-27.  
LIU Lei, WANG Yaoshe, ZHOU Fangde. Propagation speed of pressure wave in gas-liquid two-phase flow[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1999,16(3):22-27.
- [18] 陈二锋,厉彦忠,应媛媛.泵间管气液两相流压力波传播速度数值研究[J].航空动力学报,2010,25(4):754-760.  
CHEN Erfeng, LI Yanzhong, YING Yuanyuan. Numerical investigation on pressure wave propagation speed of gas-liquid two-phase flow in pump pipeline[J]. Journal of Aerospace Power, 2010,25(4):754-760.

(编辑 周红军)