

水锤效应影响洗井效果的原理

吕健, 刘盈君, 杨甘生

(中国地质大学(北京)科学钻探国家专业实验室, 北京 100083)

摘要: 洗井工艺在水文勘探孔成井工艺中占有重要的地位。以封闭反压洗井为例, 详细阐述了水锤效应的洗井原理, 并通过相应的模型简化推算, 得出了水锤效应所造成的水头差可达 136 m, 在理论上证明了水锤效应具有良好的洗井效果。最后, 通过对水锤压强公式中变量的分析, 提出了将泵的入水口置于封隔段最底端、提高泵量、减小封隔段长度等 3 种方法来优化水锤效应的洗井效果。

关键词: 封闭反压洗井; 水锤效应; 水锤波

中图分类号: P634.6; TU991.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2015)07-0014-05

Theory of Influences of Water Hammer Effect on Well Cleanout/LÜ Jian, LIU Ying-jun, YANG Gan-sheng (State Professional Lab of Scientific Drilling, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Cleanout service plays an important role in hydrological well completion. With an example of packed backpressure cleanout, well cleanout by water hammer effect is elaborated in this paper. It is showed that by the model simplification, the water head difference caused by water hammer effect can reach 136m; the good effect of well washing is proved in theory. Based on the analysis on variance in the water hammer pressure formula, 3 methods for well cleanout optimization by water hammer effect are put forward: put suction nozzle of pump at the bottom end of packed interval, increase the pump volume or shorten the length of packed interval.

Key words: packed backpressure cleanout; water hammer effect; water hammer wave

0 引言

在水文勘探孔和供水井的钻进过程中, 从钻头破碎井底岩石的瞬间开始, 泥浆中的自由水和固相颗粒以及高聚物就不断向地层孔隙中渗透形成泥皮。随着渗透的不断进行, 泥皮的厚度也不断增加。泥皮的存在虽然会平衡地层压力, 减缓泥浆的漏失, 但也会影响水文勘探孔的钻孔涌水量和单位涌水量, 以及通过抽水试验数据计算而得到的相关水文地质参数。所以, 洗井效果的好坏是水文勘探孔和供水井能否顺利成井的关键。据不完全统计, 现有的洗井方法有上百种, 但常用的主要是活塞洗井法、抽水洗井法、空压机洗井法、震荡洗井法、二氧化碳洗井法、喷嘴反冲洗井法、抽筒洗井法等。

洗井的主要目的是破坏钻进过程中在孔壁上形成的泥皮, 消除渗入含水层中的岩粉与泥浆, 同时要使滤料和靠近滤料的含水层中的颗粒按其大小重新排列组合, 以形成良好的人工过滤层^[1]。泥浆中的细颗粒在钻进过程中仅瞬时滤失过程就可以渗入地层 25 ~ 30 mm, 如果洗井工艺在水井下管和填砾后不

能及时进行, 停放时间过久, 泥皮会发生硬化, 给利用物理方法的洗井工艺如抽水洗井法带来极大的困难。本文将针对洗井过程中水锤效应对泥皮的破坏原理进行简单的讨论, 希望能起到抛砖引玉的作用。

1 洗井中的水锤效应

封闭洗井、振荡洗井、活塞洗井以及其他各种洗井方法中都广泛存在着水锤效应。水锤是管道瞬变流动中的一种压强波, 它是由于管道中某一截面的流速发生了改变, 从而使该处压强产生一个突然的跃升或下降^[2]。水锤效应引起的压强升高, 有时是非常大的, 可能引起管路爆裂; 水锤引起的压强降低, 管内形成真空, 有可能使管路扁缩而损坏。一般钢管的水锤波传播速度大约在 1000 m/s, 若管内液体流速为 3 ~ 4 m/s, 则突然关阀引起的水锤压强约为 3 ~ 4 MPa^[2]。因此, 在洗井过程中我们可以充分利用水锤效应造成的强大压强破坏泥皮, 以达到良好的洗井效果。

在一般的抽水洗井过程中, 由于开泵瞬间井管

收稿日期: 2015-03-03

作者简介: 吕健, 男, 汉族, 1989 年生, 硕士研究生在读, 钻井工程专业, 主要研究方向为特种钻进设计与施工和钻井机械, 北京市海淀区学院路 29 号, 393770676@qq.com。

中的水被突然抽出,造成井内水位突然下降,使得含水层与井管内出现较大的水头差,水头差的存在为冲刷和破坏井壁上的泥皮提供了原动力。随着抽水过程的不断进行,含水层中的水位也逐渐减低形成下降漏斗^[1],如图 1 所示。实际上,冲刷破坏泥皮的原动力主要由 2 部分组成:一是宏观上由于抽水造成井内水位下降,形成的水头差;二是开泵停泵的瞬间由于流速突然改变造成的水锤压强。振荡洗井就是利用开泵停泵瞬间在井内产生巨大的水锤压强,反复冲击破坏泥皮,以沟通含水层和井壁的连通性,达到良好的洗井效果的。而封闭分段洗井则是在振荡洗井的基础上,利用 PACKER 将水泵或空压机混合器的两端封隔,通过减小洗井段的长度来增强破坏泥皮的效果。其中,封闭反压洗井通过空压机反压给予地下水更大的流速变化值,更加充分的利用了水锤效应。活塞洗井也是依靠上下拉压活塞,造成压力的跃升和下降,从而改变水流速度,产生水锤压强。整个活塞洗井过程亦可以看作是个封闭段较长的封闭反压洗井。

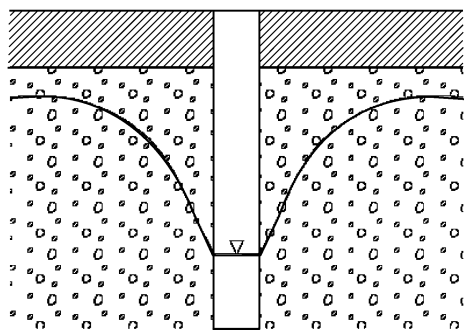


图 1 水泵洗井抽水漏斗示意图

2 水锤效应洗井原理

水锤效应是流体在管路中非定常流动的一个特例。在洗井的过程中,水锤效应主要出现在开机和停机的瞬间。为了更好的介绍洗井过程中的水锤效应,现以封闭反压洗井法为例进行原理分析。

2.1 水锤效应的形成过程

封闭反压洗井法曾于 1979 年在陕南江汉北岸二级阶地后缘某厂供水井中被使用。该井活塞洗井后先用空压机洗井 10 个台班,后改用封闭反压洗井法重新洗井 5 个台班,使该井单位涌水量增大 5.7 倍^[1]。其工作原理示意如图 2 所示,在泵(或空压机混合器)的两端添加两个封隔器(或海带止水)形成一个封隔段,空压机通过风管向封隔段加压时,井筒

中的水被迫向含水层中流去;空压机突然泄压后,它们又在压力的作用下重新返回到井筒中甚至是喷出地表。空压机加压泄压的过程中,地下水的流速随之不断改变,因而产生水锤压强破坏泥皮。若在该封隔段内反复振荡洗井,就可达到良好的洗井效果。

假设风管无限靠近上封隔器,且看作是个可以开闭的阀门,则空压机泄压表示阀门开启,地下水通过井管喷出地表;加压表示阀门关闭,地下水停止流动或被迫向含水层中流动。将井管封隔段平均分为无数个厚度为 Δh 的液层。取无限靠近上封隔器的 $m-n$ 段为研究对象,如图 3 所示。当阀门突然关闭时,在无限小的时间 Δt 内,紧靠上封隔器下端的 $m-n$ 段首先停止运动,此时紧挨 $m-n$ 段底部的水由于惯性作用仍以速度 v_0 向上运动,因此对 $m-n$ 段产生挤压作用,致使其发生弹性形变^[3]。由弹性模量的计算式可知,应变与应力成正比。则 $m-n$ 段受到压缩后其应力会相应增大,这个增大的应力称为水锤压强。

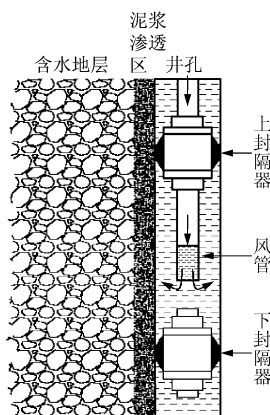


图 2 封闭反压洗井示意图

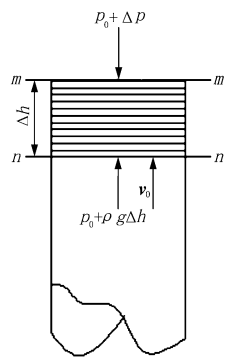


图 3 水锤压力导出示意图

$m-n$ 段停止运动以后,接着下部各层地下水也相继停止下来,这样一层复一层被停止的结果是每一层水都受到下一层水的挤压作用,最终动能全都转变为弹性势能,各层水依次产生水锤压强。因而在地层中形成了靠近上封隔器的高压高能区和靠近下封隔器的低压低能区。当高压高能区弹性势能积蓄到最高值后,能量开始向低压低能区释放,地下水又从上至下依次开始向下运动。下部低压区的地下水逐渐受到压缩,继而动能转变成弹性势能成为高压高能区,上部的高压高能区段则由于地下水的流出逐渐解压成为低压低能区。下部高压高能区弹性势能积蓄到最高值后,地下水又开始向上压缩。至

此,水锤的传播完成一个周期,若不考虑能量损失,水锤将无限循环传播下去。理想情况下 $m-n$ 截面上水锤压强随时间变化如图4所示。可以看出,水锤效应所产生的水锤压强,正像弹簧伸缩一样可看作是个以阀门为振源,将机械能和弹性势能相互转化的纵波,称为水锤波。在沿水锤波传播方向上有疏部和密部之分。

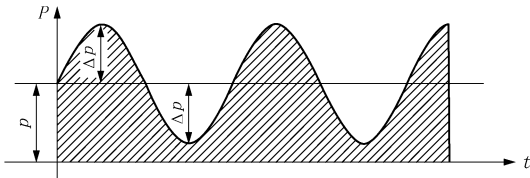


图4 理想水锤压强时间变化图

2.2 水锤压力值的推算

为了更好的计算在加压和泄压瞬间水锤压强的大小,现做以下简化与假设:

- (1) 假设井孔一径到底,无超径、缩径现象;
- (2) 假设地下水在含水层和井管中运动时无不计摩擦阻力和粘性阻力做功;
- (3) 假设空压机的加压、泄压过程为一维不定常流动,且在极短时间内完成;
- (4) 假设空压机风管为可开闭的阀门,且无限靠近上封隔器。

参照《工程流体力学》中对水平管道中水锤压强的推算,可对竖直井管中的水锤压强进行推算^[3]。以 p_0 表示阀门尚未关闭时截面 $m-m$ 的压强,则截面 $m-m$ 关闭阀门后的压强为 $p_0 + \Delta p$,截面 $n-n$ 阀门关闭瞬间的压强为 $p_0 - \rho g \Delta h$ 。由此可知, $m-n$ 段在压缩过程中所受外力为:

$$F = -(\Delta p + \frac{1}{2} \rho g \Delta h) A \quad (1)$$

式中: Δp ——压强的改变值; ρ ——地下水的密度; g ——重力加速度; Δh ——位置水头改变值; A —— $m-n$ 段的横截面积。

$m-n$ 段在时间 Δt 内的动量改变了 $-\rho A \Delta h v_0$, 由动量定理可知:

$$F \Delta t = -\rho A \Delta h v_0 \quad (2)$$

即:

$$-(\Delta p + \frac{1}{2} \rho g \Delta h) A \Delta t = -\rho A \Delta h v_0 \quad (3)$$

整理可得:

$$\Delta p = (\frac{v_0}{\Delta t} - \frac{1}{2} g) \rho \Delta h \quad (4)$$

式中: v_0 ——水的流动速度。

由于阀门的关闭是在极短时间内完成的,即 Δt 的值无限小, $v_0/(\Delta t)$ 的值无限大且 $v_0/(\Delta t) \ll (1/2)g$, 即可以不考虑重力竖直方向的作用,则式(3)可进一步简化为:

$$\Delta p = \rho \frac{\Delta h}{\Delta t} v_0 \quad (5)$$

令 $C = \Delta h/\Delta t$ 表示水锤压强波的传播速度,水锤压力可表示为:

$$\Delta p = \rho C v_0 \quad (6)$$

水锤压强波传播速度公式是由俄国人儒可夫斯基推出的:

$$C = \frac{\sqrt{\frac{E_0}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{DE_0}{eE}}} \quad (7)$$

因此,封闭反压洗井中水锤压力的大小公式为:

$$\Delta p = \rho C v_0 = \frac{v_0 \sqrt{\rho E_0}}{\sqrt{1 + \frac{DE_0}{eE}}} \quad (8)$$

式中: ρ ——水的密度,取 $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; v_0 ——地下水在井管中的流速, m/s ; E_0 ——地下水的弹性模量,取 $E_0 = 2.058 \text{ GPa}$; D ——井管直径, mm ; e ——井管的厚度, mm ; E ——井管弹性模量, GPa 。

一般情况下,水文地质勘探孔的井径在 $130 \sim 250 \text{ mm}$,水井的井径在 $300 \sim 500 \text{ mm}$ 。现假设井管直径 $D = 225 \text{ mm}$,壁厚 $e = 25 \text{ mm}$,地下水流速 $v_0 = 1 \text{ m/s}$,井管材料为铸铁,由表1可知 $E = 196 \text{ GPa}$ 。

表1 各种管壁材料的弹性模量^[3]

管壁材料	E/GPa	E_0/E
钢和铁	196.0	0.01
生铁	98.0	0.02
混凝土	19.6	0.11
木材	9.8	0.21

将以上数值代入式(8)中,可得到水锤效应在井管中产生的压力的粗略值:

$$\begin{aligned} \Delta p &= \rho C v_0 = \frac{v_0 \sqrt{\rho E_0}}{\sqrt{1 + \frac{DE_0}{eE}}} \\ &= \frac{1 \times \sqrt{1.00 \times 10^3 \times 2.058 \times 10^9}}{\sqrt{1 + \frac{0.225}{0.025} \times 0.01}} \end{aligned}$$

$$=1.36 \text{ MPa}$$

即在以上假设条件下,阀门突然关闭时水锤效应在井管管壁上所产生的压强可达到 1.36 MPa,相当于 136 m 的水头差,远远大于一般抽水时的降深。故水锤压强在洗井中起到了重要的作用。

3 水锤效应洗井方法的优化

研究水锤效应影响洗井效果目的之一是更加充分的利用水锤压强,更加合理的设计洗井方案。通过对水锤效应在井管中传播过程的分析以及水锤压强的推算,可以从以下 2 个方面对洗井方案进行优化。

3.1 提高流速 v_0

在确定的井孔中,井管直径 D 、井管壁厚 e 和井管材料(即井管弹性模量 E)为不能改变的确定值。分析水锤压强的公式可以发现,通过提高地下水在井管内的流速 v_0 来增大水锤压强。

(1)封隔段长度 L 和泵的流量 Q 都不变时,可以通过将泵口放置在封隔段的一端来增大流速。当泵口放置在封隔段一端时,泵的流量可以用下式表示:

$$Q = v_0 \frac{\pi D^2}{4} \quad (9)$$

当泵口位于封隔段中间其它位置时,流入泵管的水以泵口位置为分界线分为上下两部分。泵口以上的流速为 $v_{\text{上}}$,泵口以下的流速为 $v_{\text{下}}$ 此时泵的流量可表示为:

$$Q = (|v_{\text{上}}| + |v_{\text{下}}|) \frac{\pi D^2}{4} \quad (10)$$

故:

$$v_0 = |v_{\text{上}}| + |v_{\text{下}}|, v_0 > |v_{\text{上}}|, v_0 > |v_{\text{下}}| \quad (11)$$

即当泵口位于封隔段的一端时,封隔段内任意一点的平均流速要大于泵口在其它位置时该点的平均流速。实际抽水洗井中为防止掉泵,泵口位置一般选择放在封隔段最底端。

(2)封隔段 L 长度不变的情况下,可以通过提高水泵的流量来增大流速 v_0 。以 Q 表示泵的流量,因为 $Q = v_0 \frac{\pi D^2}{4}$,即 v_0 与 Q 成正比, Q 的增大会引起 v_0 的增大。

3.2 利用波的性质

前文已经讲到,水锤波是个以阀门为振源,将机械能和弹性势能相互转化的做简谐运动的纵波。仍以 $m-n$ 段为研究对象,当 $m-n$ 段停止运动后,下层

水由于惯性仍以速度 v_0 向上流动,使 $m-n$ 段受到挤压发生弹性变形,弹性变形包括轴向的压缩和径向的扩张。由于水是各项均匀的介质,故在水锤波既在井管轴向上传播也在径向上传播,且径向扩张与轴向压缩具有一样的周期性,即水锤波的周期 T 。

为了得到水锤波的周期,我们暂且将水锤波在轴向上的振动简化成如图 5 所示的弹簧振子的振动,封隔段内水的质简化成其质心位置($L/2$ 处)处的小球,由弹簧振子串联性质可得到劲度系数^[4]:

$$k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \quad (12)$$

式中, k_1 、 k_2 ——分别为弹簧振子的劲度系数。

此处 $k_1 = k_2 = E_0$,整理得 $k = E_0/2$ 。

因此可得到周期为:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{E_0}} = \pi \sqrt{\frac{2\rho D^2 L}{E_0}} \quad (13)$$

式中: m ——封隔段水的质量,kg; D ——井管直径,m; L ——封隔段长度,m; E_0 ——水的弹性模量,GPa。

由此可以得到水锤波的波长为:

$$\lambda = TC = \pi \sqrt{\frac{2D^2 L}{1 + \frac{DE_0}{eE}}} \quad (14)$$

若取封隔段长度 $L = 20 \text{ m}$, $D = 0.225 \text{ m}$, $e = 0.025 \text{ m}$, $E = 196 \text{ GPa}$,则代入式(14)可算得波长 $\lambda \approx 5.83 \text{ m}$ 。

洗井过程中,封隔段的位置均是选在滤水管的位置。滤水管上的过滤器一般为圆孔或直缝,其直径或宽度范围在几毫米或十几毫米内,远远小于水锤波的波长。因此,水锤在径向上的波动透过滤水管上成排的过滤器时会发生衍射和干涉现象,如图 6 所示。

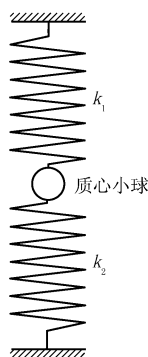


图 5 水锤波简化图

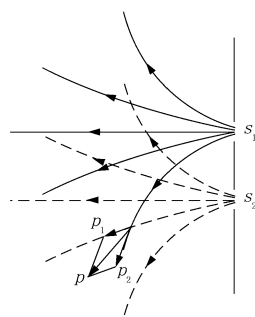


图 6 纵波干涉示意图

根据纵波干涉的规律可知两个相干波源干涉时,相交点的振幅是两相干波源的矢量相加,若以压强 P 表示振幅,则有:

$$P = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + 2P_1P_2\cos\theta} \quad (15)$$

由式(15)可以得知,干涉水锤压强的大小与相关振源的振幅 P_1 、 P_2 以及 $\cos\theta$ 的值有关。

一般来说,靠近振源的近场区的 $\cos\theta$ 为负值,远离振源的远场区的 $\cos\theta$ 为正值^[5]。若想泥皮位于远场区,则可适当调节填砾厚度。由于振源 S_1 、 S_2 间的距离远远小于水锤波的波长,故可认为相邻两个振源的振动方向永远相同,则此时位于远场区的水锤压强将达到最大值,即 $P = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + 2P_1P_2\cos\theta} \geq \sqrt{P_1^2 + P_2^2}$ 。因此填砾厚度适中的井中水锤效应更明显。但关于井孔中远场区与近场区的划分尚未有相关研究。此外,填砾厚度过大,能量损失也会增大,从而影响洗井效果。

当 $\cos\theta$ 的值固定不变时, S_1 、 S_2 相位相同,则 P_1 、 P_2 在同一时刻达到最大值,则 P 也取得最大值。取 S_1 、 S_2 的间距为 md ,若相位相同则要求:

$$\varphi = 2\pi \frac{md}{\lambda} = 2\pi n, (m, n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (16)$$

整理可得:

$$n = \frac{md}{\lambda} \quad (17)$$

式中: φ ——相位差; λ ——水锤波波长; m ——滤缝个数; d ——滤缝间距。

在既定的滤水管中,任意两个滤缝间距为 md 。当两相关波源相位差 φ 恒定即 n 为固定的某个整数时, md 随着波长 λ 减小而减小。因此,在滤水管单位长度范围内, S_1 、 S_2 间距 md 减小,但数量增多。即相关波源的密度增大,干涉加强点的密度也随之增大。

由波长公式式(14)可知波长 λ 与封隔段长度 L 成正相关,减小封隔段长度即可达到减小波长,增大最大干涉压强密度的目的。与此同时,从式(13)可以发现,封隔段长度 L 与周期 T 亦成正相关, L 减小后 T 也会变小,最大干涉压强出现的频率也相应提高。

综上所述,要增大水锤压强,可将泵的入水口放在封隔段最底端、提高泵量和减小封隔段长度 3 种方法实现。同时,水锤效应在弹性模量较大的铸铁管、井管直径与壁厚比较小,以及填砾厚度适中的井

中洗井效果更佳。

4 结论

(1)水锤效应广泛存在于洗井方法中,尤其在封闭分段洗井和活塞洗井中效果良好。

(2)经过相应假设条件下的推算,水锤压强产生的水头差可高达 136 m,远远大于由于抽水形成的降深值,为水锤压强良好的洗井效果提供了理论依据。

(3)为了更加充分合理的利用水锤效应,可以通过提高泵量 Q 或将泵的入水口放在封隔段的最底端来实现。

(4)可以通过减小封隔段长度 L 缩短水锤波的周期 T ,提高最大水锤压强出现的频率,从而改善洗井效果。

(5)水锤波透过滤水管上的过滤器会发生衍射和干涉现象,减小封隔段长度 L 会提高最大干涉压强出现的密度和频率,从而改善洗井效果。

(6)在弹性模量较大的铸铁管、井管直径与壁厚比较小、填砾厚度适中的井中利用水锤效应洗井效果会更好。

(7)在水锤压强推算过程中没有考虑摩擦阻力做功。

(8)实际上,阀门突然关闭时,地下水从含水层透过井壁和管壁向井中流动时会受到阻碍,也会受到压缩产生水锤效应。

参考文献:

- [1] 刘建刚. 洗井工艺[M]. 湖北武汉:中国地质大学出版社, 1990:81-84.
- [2] 王学芳. 工业管道中的水锤[M]. 北京:科学出版社, 1995:1-2.
- [3] 周亨达. 工程流体力学[M]. 北京:冶金工业出版社, 1988:152-155.
- [4] 古丽娜. 弹簧振子势能的一种简便分析方法[J]. 长春师范学院学报, 2010, 29(4):57-61.
- [5] 刘义春. 纵波干涉的规律及其应用[J]. 物理通报, 2000, (9):11-13.
- [6] 杨宝奎, 等. 水锤计算中压力管道的分段问题研究[J]. 水利水电技术, 2007, (1):53-55.
- [7] 杨春敏, 张景松. 水锤及水锤压力波在水系中传播的分析与试验[J]. 流体机械, 2014, (9):10-13.
- [8] 梁其东, 韩淑婷, 张鑫, 等. 水锤理论模拟分析与防护技术研究[J]. 城镇供水, 2014, (5):89-92.