

注水泥堵漏过程中水泥塞形成高度及质量控制技术研究*

杨振杰^{1,2} 岳砚华³ 张建卿³ 吴付频³ 左伟国³ 王伟良³

(1.长庆石油勘探局博士后工作站 2.西安石油大学石油工程学院 3.长庆石油勘探局钻井总公司)

杨振杰等.注水泥堵漏过程中水泥塞形成高度及质量控制技术研究.天然气工业,2005;25(6):49~51

摘要 注水泥堵漏是裂缝性和溶洞型漏层地层堵漏施工的主要工艺技术,水泥塞的有效形成和形成的质量是保证注水泥堵漏施工成功率的关键,而水泥塞不能有效形成或形成质量差的主要问题是注水泥施工全过程中出现的混浆问题。文章在现有研究的基础上,通过对注水泥施工过程中水泥混浆问题的详细分析,归纳出影响出现水泥混浆的4个压力平衡点、对应于每一个压力平衡点的混浆机理及影响因素。在此基础上提出了具体的保证注水泥堵漏施工过程中水泥塞有效形成的控制技术和计算方法,即:设计合理的水泥塞高度和钻具下入深度;确定合理的注水泥量;解决注水泥过程中假封门现象对水泥塞形成高度的失控问题;大裂缝和孔洞型漏失层的水泥塞液面的控制技术。

关键词 钻井工程 井漏 堵漏 注水泥堵漏 水泥塞

一、注水泥过程中的水泥混浆现象及影响因素分析

所谓水泥混浆是指在注水泥作业时水泥浆稠化前水泥浆与井内钻井液或其它介质产生混合所形成的混合体^[1~3]。从注水泥施工开始到水泥浆初凝,水泥浆大致会经历下列4个混浆过程,每个混浆过程的混浆机理有所不同,但都会对水泥塞的形成高度和强度造成危害。

(1)注水泥施工过程中的水泥混浆过程

从注水泥开始到水泥浆出钻杆前,环空液面不发生变化,环空的动态液柱压力即为漏失层的动态孔隙压力:

$$p = 0.01\rho_m(H-b) + p_{耗} \quad (1)$$

式中: p 为在施工排量下漏失层的动态孔隙压力(承压能力),MPa; ρ_m 为钻井液密度, g/cm^3 ; H 为漏层深度,m; b 为水泥浆还未出钻杆时,在施工排量下环空液面深度,m; $p_{耗}$ 为给定排量下环空压耗,MPa。

如果忽略注水泥过程中的环空压耗值,式(1)变为:

$$p = 0.01\rho_m(H-b) \quad (2)$$

当水泥浆被推出钻具进入井筒后,环空液柱压力随水泥浆的进入而逐渐增加,环空动态液柱压力与漏失层的孔隙压力(承压能力)之间的力学平衡被打破,环空泥浆液面开始下降,由此造成环空的泥浆被推入水泥浆中,水泥混浆过程开始。当水泥浆被推出钻具并达到漏层时,水泥混浆量达到最大。如果此时由于设计的水泥浆量较少,停止施工时,形成的水泥塞质量就很难保证,会出现水泥塞时硬时软,时有时无的怪现象。如果注水泥量充足,钻具内还有水泥浆,并继续施工时,混浆会被推进漏失层,环空液柱压力会达到动态平衡(即第一压力平衡点),混浆过程暂时停止,此时:

$$p_1 = 0.01(H-b_1-h)\rho_m + 0.01h\rho \quad (3)$$

式中: p_1 为注水泥施工时环空液柱压力达到第一次平衡时的动态液柱压力,MPa; ρ 为水泥浆密度, g/cm^3 ; b_1 为在施工排量下水泥浆到达漏失层,并继续施工将混浆全部推进漏失层后环空液面井深下降高度,m; h 为钻具离漏失层的高度,即水泥浆出钻杆后在井筒形成的高度,m。

根据压力平衡原理:

* 本文系长庆石油勘探局重大科技攻关项目“陇东地区防漏堵漏技术研究”成果。

作者简介:杨振杰,教授级高级工程师,博士,1958年生;1982年毕业于西南石油学院钻井工程专业,现在长庆石油勘探局博士后工作站和西安石油大学石油工程学院从事科研教学工作。地址:(710065)陕西省西安市电子二路18号。电话:(029)88383013。E-mail:dryzj200@zicn-net

$$0.01\rho_m(b_1 - b) = 0.01h(\rho - \rho_m) \quad (4)$$

整理式(4)得:

$$(b_1 - b) = h(\rho/\rho_m - 1) \quad (5)$$

在达到第一压力平衡点前的最大水泥混浆量为:

$$\Delta V_1 = V_a(b_1 - b) \quad (6)$$

$$\text{即 } \Delta V_1 = V_a h(\rho/\rho_m - 1) \quad (7)$$

式中: ΔV_1 为注水泥后环空钻井液下降的体积, m^3 ; V_a 为环空单位长度的容积, m^3/m 。

由式(6)可以看出,当水泥浆进入漏失层后,继续注入井筒的水泥浆量达到或大于 ΔV_1 时,井筒内将充满基本上为未混浆的水泥浆,水泥塞质量和注水泥堵漏的成功率将大大提高。

通过上述分析可以看出,注水泥施工过程中的水泥混浆过程产生的机理是:由于水泥浆与泥浆的密度差引起的混浆。在这一过程中,产生水泥浆与钻井液混浆的主要影响因素如下。

1)水泥浆与泥浆的密度差。差值越大,混浆越严重。

2)堵漏钻具的下入深度。钻具下入深度离漏层越近,水泥浆在钻具以下井筒所形成的高度(h)越小,混浆量也越少,但这仅是对第一压力平衡点而言,混浆过程并没有结束,而且为了保证一定的水泥塞高度钻具的下入深度是一个需要综合考虑的问题。

3)注水泥量的大小。注水泥量如果小于最大混浆量,混浆就会很严重。显而易见,由密度差机理造成的水泥浆混浆的解决办法是:①加大水泥浆的用量,确保这一过程产生的混浆被全部替进漏失层内,井筒中完全充满未发生混浆的水泥浆。这一过程产生的混浆问题仅仅通过调整水泥塞高度和钻具下入深度不可能得到有效解决;②使用低密高强度的水泥浆体系;③改进注水泥工艺。值得注意的是,这一过程产生的混浆问题仅仅通过调整水泥塞高度和钻具下入深度不可能得到有效解决。

(2)注水泥施工结束后停泵时的混浆过程

当施工结束停泵时,动液面会恢复为静液面(形成第二压力平衡点),环空液面下落,环空泥浆进入井筒而造成混浆。因此还必须考虑施工结束后动静液面差 Δb 对混浆的影响,达到第二压力平衡点时井筒的液柱压力为 p_2 :

$$p_2 = 0.01(H - b_1 - \Delta b - h)\rho_m + 0.01h\rho \quad (8)$$

达到第二压力平衡点时的水泥混浆量 ΔV_2 为:

$$\Delta V_2 = V_a \Delta b \quad (9)$$

这一过程的特点是,施工已完成,环空泥浆液面由动液面转化为静液面,井内压力由动态转变为静态。产生混浆的机理是:环空泥浆动液面转化为静液面过程中,由于动静液面差造成的混浆。这一过程产生的混浆对水泥塞的影响,不能通过增大水泥浆的用量来克服,而只能通过设计合理的水泥塞高度和合理的钻具下入深度来解决。

(3)注水泥施工结束后上提钻具时的水泥混浆过程

注水泥作业结束后起钻作业时,如果不灌泥浆,液面又会因起钻而下降,再次打破液柱压力与漏失层孔隙压力的平衡,如起出的钻具较多,漏失层的流体又会在水泥浆凝固前窜回井内,形成第二种混浆机理,即欠压混浆。要防止欠压混浆的发生,保证水泥塞的质量和基本的水泥塞高度,基本原则是,按取出钻具的体积准确及时地灌入泥浆,以平衡漏失层压力,不能因为见不到液面就不灌泥浆;但盲目灌入泥浆,又会引起水泥塞面下移,也是不可取的。

(4)施工结束后水泥浆候凝过程中的水泥混浆过程

施工结束后在水泥浆候凝过程中,由于第二压力平衡点产生的水泥混浆与水泥浆之间的离子浓度差,会进一步对水泥浆产生渗透作用,水泥混浆与水泥浆的交界面会有不同程度的下移;另外,水泥浆自身的析水效应也会增加混浆量,降低水泥塞的有效高度,因此考虑这两个因素产生的混浆高度 $h_{析}$,这一过程的混浆量为:

$$\Delta V_3 = V_h h_{析} \quad (10)$$

式中: V_h 为井筒单位长度的容积, m^3/m 。

这一过程的水泥混浆量与井筒的压力变化无关,其影响因素主要是水泥浆和泥浆自身的性能,解决办法主要是改进注入的水泥浆质量,减少析水;采用低密高强、抗渗析的堵漏水泥浆体系;提高顶替泥浆的粘度等。

二、注水泥过程施工过程中水泥塞形成高度及强度的控制技术

(1)设计合理的水泥塞高度和钻具下入深度

在现场堵漏根据经验能保证 30~50 m 的水泥塞,堵漏成功率就会得到保证。这时应该考虑第二平衡点由 Δb 引起的水泥混浆 ΔV_2 和泥浆渗透及水泥浆析水形成的水泥混浆 ΔV_3 对水泥塞上部质量的破坏作用和对水泥塞有效高度的减少。即水泥塞设计高度 L 应该大于这两部分的高度:

$$L = \Delta b V_a / V_h + h_{\text{断}} + (30 - 50) \quad (11)$$

根据现场经验, $h_{\text{断}}$ 一般可考虑为 15~20 m。动静液面差 Δb 可以通过实测得到, 如陇东地区一般为 30~50 m。因此, 对于长庆油田陇东地区的漏失井, 注水泥施工合理的水泥塞高度通过运用式(11)计算设计为 60~100 m。钻具的下入深度 L_p 为:

$$L_p = H - L \quad (12)$$

由上式可以看出, 水泥塞设计高度 L 与式(3)中的 h 一致。

(2) 确定合理的注水泥量

通过保证必要的注水泥量, 可将第一阶段产生的混浆全部推入漏失层, 作为封堵的前置液。根据现场经验, 为了保证水泥塞的形成和对漏失层的封堵强度与厚度, 第一平衡点的水泥混浆量 ΔV_1 只能小于总的注水泥量的 20%, 保证注入漏失层的水泥浆占注水泥量的 50% 以上, 而水泥塞只能占注水泥量的 25%。因此对于陇东地区注水泥量的设计为:

1) 水泥塞体积 V_s :

假定水泥塞高度设计为 90 m, 对于 215.9 mm 钻头的井眼, 水泥塞体积 V_s 为: $V_s = L V_h = 90 \text{ m} \times 0.0366 \text{ m}^3/\text{m} = 3.3 \text{ m}^3$

2) 水泥浆总体积 V_c 和顶替泥浆量 V_m :

$$V_c = V_s / 0.25 = 3.3 / 0.25 = 13.2 \text{ m}^3$$

$$V_m = V_p (H - L)$$

式中: V_p 为钻杆的内容积, m^3/m 。对于 215.9 mm 的钻杆为 $0.0093 \text{ m}^3/\text{m}$ 。

3) 根据公式(3), 第一平衡点的水泥混浆量 ΔV_1 (以长庆油田陇东地区为例, 设水泥浆密度为 $1.8 \text{ g}/\text{cm}^3$, 钻杆为 127 mm, $V_a = 0.024 \text{ m}^3/\text{m}$):

$$\Delta V_1 = V_a h (\rho / \rho_m - 1) = 90 \text{ m} \times 0.024 \text{ m}^3/\text{m} \times 0.8 = 1.73 \text{ m}^3$$

ΔV_1 小于 V_c 的 20%, 设计合理, 能够保证水泥塞高度和水泥塞的强度及进入漏失层的水泥浆量。通过钻具下入深度、水泥塞高度和水泥浆注入量的合理设计和现场实施, 假如水泥浆能够顺利进入漏失层, 可保证注水泥施工结束后水泥塞高度不低于 30 m, 50% 的水泥浆进入漏失层, 形成封堵层。

(3) 注水泥过程中假封门现象对水泥塞形成高度的失控问题及解决办法

根据过去的经验主要有下列方面: ①在水泥浆前面注入清水冲洗漏失层, 破坏滤饼和堵漏剂形成的假封门; ②对于闭合及假封门较严重的井, 可将钻具直接下到漏失层, 转动钻具将漏失层拨开, 引起漏失, 这时立即泵入水泥浆(最好是含水泥的堵漏浆),

待其到达漏失层并漏入 $5 \sim 6 \text{ m}^3$ 时, 立即起钻到安全井段候凝。起钻时灌泥浆量的确定方法是: 用取出钻具的体积减去 ΔV_1 作为灌入泥浆的量; ③注水泥施工过程中如发现有少量泥浆返出, 应立即改成关井憋挤的方法继续施工; ④施工结束, 起到安全井段后, 注意观察液面, 如发现液面明显上移, 应立即少量多次试灌泥浆; 如果能够灌满井眼, 应关井憋挤泥浆, 憋挤压力控制在 3 MPa 以内, 灌入量控制在 $3 \sim 6 \text{ m}^3$, 通过多次的憋挤密实封堵层, 保证堵漏成功。

(4) 大裂缝孔洞型漏失层的水泥塞液面的控制

对于由于裂缝过大, 漏失通道扩张, 引起堵漏困难的井, 如陇东洛河层区域垂直裂缝的特大型漏失井, 应该采用桥堵+触变性水泥复合堵漏工艺, 为水泥塞面的控制创造条件。采用复合堵漏技术的原理是先长纤维等堵漏材料的高粘度桥堵剂泵入漏层, 使其在漏失通道内堆积产生滞流体, 延缓漏失速度, 紧接着打触变性水泥, 使触变性水泥浆在进入漏层向四周漏失通道流动过程中, 流速降低, 切力升高, 逐渐失去流动性, 凝固并堵住漏层通道。

三、结 论

(1) 注水泥堵漏施工过程中存在 4 个混浆过程, 对水泥塞的形成和质量控制会产生不利影响。

(2) 影响注水泥堵漏施工过程中高质量水泥塞影响形成的因素主要有: ①水泥浆与钻井液的密度差; ②水泥塞设计高度和钻具下入深度; ③注入水泥浆的体积和水泥浆体系的性能。

(3) 注水泥堵漏施工过程中保证高质量水泥塞有效形成的控制技术是: ①按本文提供的计算公式, 设计合理的水泥塞高度、钻具下入深度和注入水泥浆的体积, 有效地消除上述各种有害因素对水泥塞形成及质量的不良影响; ②使用低密高强度的水泥浆或堵漏浆体系, 使水泥浆的密度与钻井液接近, 增强水泥浆对漏失层的界面胶结强度; ③对于具备条件的井, 使用井口平推法注入水泥浆或堵漏浆。

参 考 文 献

- 伍贤柱, 谭兵. 溶洞—裂缝性井漏情况下水泥堵漏形成混浆的原因分析及预防措施. 天然气工业, 2003; 23(2)
- 陈博安, 郭中峰, 王学良, 曾洪图. 关井注水泥堵漏技术. 探矿工程, 2001; (5)
- 徐华义, 余志清. 井漏失返条件下水泥浆堵漏工艺参数计算. 钻井工艺, 1998; 21(5)

(收稿日期 2004-12-23 编辑 钟水清)