

深井超深井安全钻井液密度窗口研究进展^{*}

陈森¹ 梁大川¹ 李磊²

(1.西南石油大学 2.中国石油塔里木油田公司)

陈森等.深井超深井安全钻井液密度窗口研究进展.天然气工业,2008,28(1):85-87.

摘要 随着深部油气藏的勘探和开发,深井及超深井的数量大幅度增加,而深井超深井在高温高压条件下,窄安全密度窗口内的安全钻井是当前国内外都未能很好地解决的重大技术难题。确定安全钻井液密度窗口是钻井设计的重要组成部分,对于深井超深井更是具有重大意义。研究表明:温变应力、水化作用及渗流产生的附加应力场对深井超深井安全钻井液密度窗口的确定有很大影响。为此,综合考虑各种影响因素可为准确确定深井超深井的安全钻井液密度窗口提供重要依据。

关键词 深井 超深井 高温高压 钻井液 安全密度 井眼稳定

随着深部油气藏的勘探和开发,深井及超深井的数量大幅度地增加,而深井超深井高温高压条件下,窄安全密度窗口内的安全钻井是当前国内外未能很好解决的重大技术难题。一般来讲,井越深,井下压力和温度也越高,井下地质环境也越复杂。从我国深井超深井的钻井历史可以看出,钻井过程中所遇到的漏、喷、卡、塌等井下复杂事故占相当大的比例。这些复杂事故在很大程度上都与安全密度窗口太窄和钻井过程中对钻井液密度的控制不当有密切的关系。如果能在钻前确定出深部安全钻井液密度窗口,就可以指导深井超深井的安全钻井,并有助于提高各油气田的勘探开发速度,降低钻井成本,减小钻井风险。

一、安全钻井液密度窗口确定技术

钻井过程中钻井液密度大小的设计,不仅要求能维持井壁稳定,防止井壁的张性破裂(井漏)和剪切垮塌(井塌)还要能够维持井内压力平衡,避免地层流体大量流入井内,造成地层流体对钻井液的污染以及井漏、井喷、压差卡钻等工程事故。井眼的3个压力剖面,即地层孔隙压力、地层破裂压力、地层坍塌压力。所谓安全钻井液密度窗口(Δp)^[1-4]是指钻井过程中不造成漏、喷、卡、塌等钻井事故,能维持井壁稳定的钻井液密度范围。根据3个压力剖面的关系可得到 Δp 。

$$\text{当 } p_{\text{破}} > p_{\text{泥}} > p_{\text{地}}, (p_{\text{地}} > p_{\text{塌}}) \text{ 时} \\ \Delta p = p_{\text{破}} - p_{\text{地}} \quad (1)$$

$$\text{当 } p_{\text{破}} > p_{\text{泥}} > p_{\text{塌}}, (p_{\text{塌}} > p_{\text{地}}) \text{ 时} \\ \Delta p = p_{\text{破}} - p_{\text{塌}} \quad (2)$$

Δp 愈大,则钻井愈易; Δp 愈小,则钻井愈难。若 $\Delta p < p$ 循环压耗,则无法正常钻井。

地层孔隙压力是指:岩石孔隙流体(油气水)所形成的液柱压力,可表达为:

$$p_d = 9.81 \rho H \quad (3)$$

根据岩石力学理论可知,地层破裂压力是由井壁上的应力状态决定的,它是由于井壁上的有效切向应力达到或超过岩石的拉伸强度,表达式为:

$$p^t = \left(\frac{2u}{1-u} - A + 3B \right) (p_o - 2p_p) + S_t + 2p_p \quad (4)$$

钻井液取代了原井眼处的岩石,井壁坍塌的主要原因是由于井内液柱压力太低,使得井壁周围岩石所受压力超过了岩石本身强度而产生剪切破坏,此时,对于脆性地层会产生坍塌掉块,井径扩大,对于塑性地层,则向井眼内产生塑性变形,造成缩径。在石油工程岩石力学中,一般采用 Mohr-Coulomb 准则描述井壁发生剪切变形。表达式为^[5-15]:

$$p_p = \frac{\eta(3\sigma_1 - \sigma_3) - 2CK + 2p_p(K^2 - 1)}{0.0098(K^2 + \eta)H} \quad (5)$$

在得知井壁不发生剪切变形的钻井液液柱压力极限和保证井壁不发生张性破裂的钻井液液柱压力

^{*} 本文为中国石油天然气集团公司深井优快钻井技术的研究成果。

作者简介: 陈森,1979年生,硕士研究生;从事油气井工程研究工作。地址:(610500)四川省成都市新都区。电话:13880413900。E-mail:chenswpu@163.com

极限后,便可得出保持井壁稳定的安全钻井液密度窗口。这是从井壁静力学稳定的角度考虑的安全钻井液密度窗口。在实际钻井中还必须考虑由于起下钻,钻井液的循环和设计安全系数等因素的影响。因而必须在前面的安全钻井液密度窗口的基础上再加上这些因素引起的附加密度值。

二、温变应力

对安全钻井液密度窗口的影响

深井超深井钻井过程中,下部地层温度较高,上部地层温度较低,由于钻井液的循环,使井壁围岩温度降低,上部井壁围岩温度升高。井壁及其周围地层受到温度扰动的结果将在井壁及其周围地层中产生温变应力,附加温变应力改变了井壁周围应力分布。因此,用以前的计算模型计算地层的3个压力体系是不合理的,需要进行改进后才能用以计算深井超深井高温高压条件下的安全钻井液密度窗口。国外有些公司还在实际钻井设计中考虑了温度变化对井壁稳定性的影响,并以此来调整钻井液密度。还有的公司在实际钻井中采用钻井液冷却系统来控制钻井液温度变化,尽量减小井壁温度变化造成的井壁失稳。在国内,总的来看,温度效应对井壁稳定性的影响和对安全钻井液密度窗口的影响研究还非常少,而且只是停留在理论研究上,有待于将理论与实际的钻井工程联系起来,根据热传导理论和热弹性力学基本原理可以得到柱坐标系下由于温度变化而产生的井周热应力表达式^[4-13]:

$$\sigma_r = \frac{\alpha_r E}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \int_{r_w}^r T(r) r dr \quad (6)$$

$$\omega_r = -\frac{\alpha_r E}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \int_{r_w}^r T(r) r dr + \frac{\alpha_r E \Delta T}{1-\nu} \quad (7)$$

$$\alpha_r = \frac{\alpha_r E \Delta T}{1-\nu} \quad (8)$$

式中: σ_r 为径向应力; ω_r 为周应力; α_r 为轴向应力; α_r 为岩石线热胀系数, $1/^\circ\text{C}$; E 为岩石的杨氏模量; ν 为岩石的泊松比; $T(r)$ 为井壁周围地层温度分布函数; ΔT 为地层温度变化量,在井壁指钻井液温度与地层温度之差, $^\circ\text{C}$; r 为以井眼为轴线的径向距离; r_w 为井眼半径。

由以上分析可见,温变应力的大小不仅与岩石温度变化直接有关,而且还与岩石的弹性模量、岩石的泊松比以及热传导系数密切相关。总结国内外最新研究成果分析可知。

(1)当地层温度低于井筒内流体温度,地层受井

筒内流体加热作用时,随着温差的增大,井壁所受周向应力和轴向应力也随之增大,从而意味着井壁发生剪切破坏的可能性逐渐增大。

(2)当地层温度高于井筒内流体温度,地层受井筒内流体冷却作用时,随着温差的增大,井壁所受井筒内周向应力和轴向应力也随之减小,周向应力和轴向应力逐渐由压应力变为张应力,井壁张性破坏的可能性增大。

(3)温变应力对井壁稳定性的影响取决于原地应力状态及井眼状态,同样大小的温变应力,在不同的井壁应力状态下,对井壁稳定性的影响不同,应视具体情况具体分析。在掌握温变应力对井壁应力分布规律的基础上,重新确立深井超深井条件下的破裂压力、坍塌压力的计算模型,从而确定安全钻井液密度窗口,为深井超深井的安全钻井提供保障。

三、水化作用

对安全钻井液密度窗口的影响

我国的钻井最普遍采用的是水基钻井液体系,在深井超深井的钻井过程中经常钻遇泥页岩层段,水化作用对岩石强度的影响相当大^[14],因而该因素对安全钻井液密度窗口的影响也不可忽视。由某井现场资料可知,当泥页岩发生水化后,井壁坍塌密度增大了 0.21 g/cm^3 ,而破裂密度减小了 0.13 g/cm^3 。为了能够在泥页岩层段安全钻井,国内外分别有学者研究了水化作用对安全密度窗口的影响,目的是为了准确确定泥页岩发生水化后安全钻井液密度窗口。研究表明:由于泥页岩水化后抗压强度减弱,粘聚力降低,即坍塌压力对应的钻井液密度值有所提高,破裂压力对应的钻井液密度值有所降低。因此,会导致钻井液安全密度窗口变小。为了定量得到水化后的安全密度窗口,有的学者从力学和化学的角度耦合出井壁稳定模型,通过耦合模型可以计算出维持稳定井壁的安全钻井液密度窗口。

四、渗流对安全钻井液密度窗口的影响

近年来井壁稳定性的定量分析中已逐渐认识到钻井液滤失对井壁稳定性的影响^[6],但过多地强调地层和流体之间的物理化学作用,而对流体流动造成的孔隙压力,进而导致流体流动和岩石变形之间的耦合却重视不足。现有确定安全钻井液密度窗口技术中,一般都假定地层孔隙压力为原始地层压力,这与深井超深井条件实际情况存在较大的偏差。正压差钻井过程中,当钻井液液柱压力大于地层压力

时,井筒内钻井液将产生失水,尤其是在渗透性好的疏松地层失水情况更为严重,钻井液失水后,在井壁周围形成新的附加应力场,必将改变原始地层的孔隙压力的大小。在欠平衡钻井过程中,钻井液液柱压力低于地层压力,其结果使地层中流体在压差下流入井筒,导致井壁周围地层孔隙压力改变。由于井壁稳定性取决于井壁岩石所受到的有效应力,因此,钻井液滤失的结果将使通过假设地层孔隙压力恒定而得到的井周应力分布和地层安全钻井液密度窗口与实际产生偏差。

五、认识和建议

深井超深井钻井过程中,要准确地确定安全钻井液密度窗口,需要在以下几个方面加深研究。

(1)在深井超深井这样特殊高温高压条件下,应用传统和经验的计算模型来计算3个压力剖面是不够合理的,需要综合考虑各种因素的影响,在此基础上修正以前的计算模式,为安全钻井液密度窗口的确定提供可靠依据。

(2)在深井超深井钻井过程中,难免会遇到安全密度窗口小于循环压耗的情况,这将导致钻井工作无法进行。针对这样的复杂情况必须从优选钻井液体系、合理控制钻井液性能、控制循环温度等角度出发,扩大钻井液安全密度窗口,从而使安全钻井成为可能。

(3)大量的钻井实例资料表明:很多时候实钻钻井液密度虽然处于安全密度窗口内,但是处于安全窗口的上下限的边缘,控制稍微偏差就会脱离安全窗口,这无疑存在安全隐患。因此,有必要将最优化理论方法应用到钻井液密度控制技术上,使循环钻井液密度调整到最优的安全密度窗口位置。

(4)由于深井超深井地质和工程的复杂性,要进行人工计算不仅精度不能满足工程需要,而且耗费大量人力和物力。因此,开发出相应的模拟计算程序具有重要的现实意义。

参 考 文 献

- [1] 蔚宝华,王炳印,曲从锋,等.高温高压储层安全钻井液密度窗口确定技术[J].石油钻采工艺,2005,27(3):31-37.
- [2] 汪海阁,刘岩生,杨立平.高温高压井中温度和压力对钻井液密度的影响[J].钻采工艺,2000,23(1):56-60.
- [3] 陈天成.坍塌压力与井身结构设计和井壁稳定技术关系初探[J].钻采工艺,2006,29(1):21-23.
- [4] 袁波,刘刚,戴爱国,等.高温高压天然气井常见问题及安全钻井工艺[J].国外油田工程,2006,22(8):40-42.
- [5] 张斌.计算高温高压条件下的钻井液当量循环密度[J].国外油田工程,2006,22(6):28-32.
- [6] 王炳印,蔚宝华,邓金根.温度及渗流对疏松砂岩储层钻井液密度窗口的影响规律研究[J].钻井液与完井液,2005,22(4):40-42.
- [7] 李嗣贵,邓金根,蔚宝华,等.高温井地层破裂压力计算技术[J].岩石力学与工程学报,2005,24(增刊2):5669-5673.
- [8] 蔚宝华,卢晓峰,王炳印,等.高温井地层温度变化对井壁稳定性影响规律研究[J].钻井液与完井液,2004,21(6):15-18.
- [9] 程远方,徐同台.安全泥浆密度窗口的确立及应用[J].石油钻探技术,1996,27(3):16-18.
- [10] 钟敬敏,齐从丽,杨志彬.定向井安全钻井液密度窗口测井计算方法[J].南方油气,2006,19(1):38-41.
- [11] 慈建发,何世明,李荣,等.钻前井壁力学稳定性研究[J].天然气工业,2006,26(6):68-71.
- [12] 马开华,刘修善.深井超深井钻井新技术研究与应用[M].北京:中国石化出版社,2005.
- [13] 刘向君,罗平亚.岩石力学与石油工程[M].北京:石油工业出版社,2004:118-129.
- [14] 刘平德,张梅,孙明鑫,等.泥页岩井眼稳定的力学及化学藕合方法研究[J].钻采工艺,2006,23(6):10-12.
- [15] 罗健生,鄢捷年.新疆呼图壁地区防塌钻井液优化设计[J].钻井液与完井液,1999,16(3):14-18.

(收稿日期 2007-09-17 编辑 钟水清)