

基于地应力的套管强度优化设计方法

王建龙¹, 张卫东², 刘学松¹, 刘新华³, 张艳增³

(1. 中石油渤海钻探工程研究院, 天津 300450; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266655; 3. 中石化胜利油田地质研究所, 山东 东营 257000)

摘要:针对东辛复杂断块油藏泥岩夹层和断层附近套管损坏严重的问题,研究了套管在泥岩夹层和断层附近套损机理。研究表明,造成泥岩夹层和断层处套管损坏的主要原因是该层段的异常地应力。因此,在这 2 个层段,考虑异常地应力作用和承受非均匀地应力作用对套管强度的影响,提出了基于地应力的套管强度优化设计方法。

关键词:地应力;套管强度;优化设计;泥岩;断层

中图分类号:TE256 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2018)01-0031-03

Design Method of Casing Strength Optimization Based on In-situ Stress/WANG Jian-long¹, ZHANG Wei-dong², LIU Xue-song¹, LIU Xin-Hua³, ZHANG Yan-zeng³ (1. Bohai Drilling Engineering Technology Research Institute, CNPC, Tian-Jin 300450, China; 2. China University of Petroleum, Qingdao Shandong 266655, China; 3. Shengli Oilfield Geological Research Institute, SINOPEC, Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: In view of the serious casing damage in the mudstone interlayer and near the fault of complex Dongxin fault block reservoir, the casing damage mechanism is studied. The studies demonstrate that the main causes of the casing damage in the mudstone interlayer and near the fault are the abnormal in-situ stress there. Therefore, considering casing damage caused by the abnormal stress and non-uniform stress in these 2 stratigraphic sections, the optimization design method of casing strength is put forward based on the in-situ stress.

Key words: in-situ stress; casing strength; optimization design; mudstone; fault

东辛油田属于典型的复杂断块油藏,断层多,断裂系统复杂,进入特高含水期开发阶段,油水井套管损坏严重。套损统计数据表明,断层附近和油层附近的泥岩夹层处套管损坏比例高达 65%。除复杂的地质因素之外,也体现出了传统套管强度设计方法(未考虑地应力的作用)在泥岩夹层和断层附近的不适应性。因此,本文以东辛复杂断块油藏套损井资料和地质条件为基础,研究了断层附近、油层附近的泥岩夹层处套管损坏机理。在此基础上,建立了一套适合断层和泥岩夹层的基于地应力的套管强度优化设计方法,为减缓泥岩夹层和断层附近套管损坏现象提供理论指导。

1 泥岩夹层和断层附近套管损坏机理分析

1.1 泥岩夹层处套损机理

东辛油田油层附近泥岩夹层套管损坏严重,以营 8 断块为例,在统计的 86 个套损点中,油层附近泥岩夹层套损点为 48 个,占比 55.8%。

断块油气田注水初期,注入水在砂岩储层的孔隙中是流动的,岩石的强度没有发生变化,并且在水泥的作用下,套管与地层成为一个整体,此时基本不会产生异常地应力;但是,随着注水时间的延长,注入水窜到泥岩夹层中时,泥岩会吸水软化膨胀,随着时间的推移,胶结力消失,形成的软化区域相当于用钻头扩大成一个“新井眼”^[1-4](图 1),此时套管与地层的整体性分离,随着泥岩的吸水蠕变膨胀,套管将承受非均匀地应力的挤压作用。当“等效破坏载荷”值大于套管屈服强度时,套管发生椭圆变形或错段。

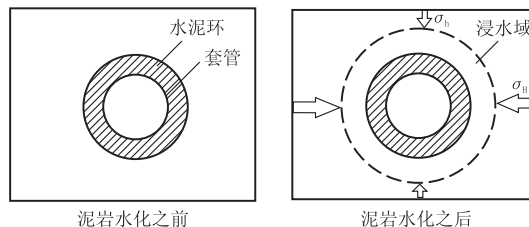


图 1 泥岩水化前后套管受力图

如东辛油田 DXX11-67 井,如图 2 所示,1730

收稿日期:2017-03-30; 修回日期:2017-11-02

基金项目:中石油渤海钻探工程有限公司科技项目“钻井提速工具优化升级与现场试验”(编号:2016ZD17Y-1)

作者简介:王建龙,男,汉族,1984 年生,硕士,油气井工程专业,从事钻井提速工具研发与应用工作,天津市滨海新区大港油田渤海钻探工程研究院,383462010@qq.com。

~1760 m 段地层岩性为泥岩,由于吸水蠕变造成 1758 m 套管损坏。据测定该井在泥岩夹层处的最大、最小水平应力为 42 和 31 MPa。计算得承受这种非均匀地应力作用的套管抗均匀外挤强度为 119.8 MPa,而实际下入的 N80 套管抗外挤强度为 76 MPa,远不能满足强度要求。

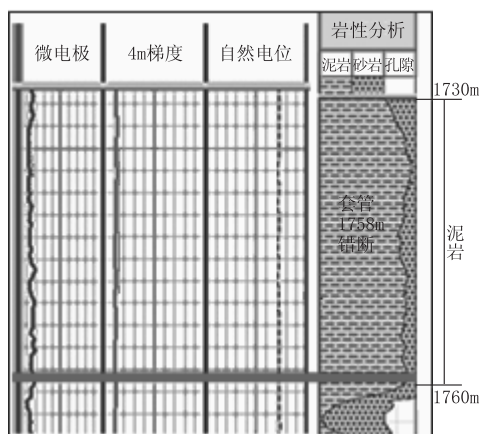


图2 DXX11-67井微电极测井示意图

1.2 断层附近套损机理

东辛油田断层处套损现象更为严重,以营8断块为例,统计的68口套损井中,断层附近套损42口,浅部、中部断层附近套损主要以变形为主,深部断层附近套损主要以错段为主。通过现场资料和理论分析认为断层附近套损原因主要是断层形成产生的异常应力,挤压套管造成套损。

正断层发生时三向主应力的大小应该满足库仑-摩尔准则,即:

$$\sigma_h = \sigma_v \left(\frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \right) - \frac{2C \cos\varphi}{1 + \sin\varphi} \quad (1)$$

$$\sigma_H = \sigma_v \left(\frac{2v}{1 + \sin\varphi} \right) - \frac{vUCS}{K_p} \quad (2)$$

式中: σ_v ——垂向地应力,MPa; σ_h ——最小水平地应力,MPa; σ_H ——最大水平地应力,MPa; φ ——断层面岩石内摩擦角,°; C ——断层面岩石内聚力,MPa; v ——泊松比,无量纲; UCS ——岩石单轴抗压强度,MPa; K_p ——摩尔-库仑活度系数, $K_p = (1 + \sin\varphi)/(1 - \sin\varphi)$ 。

逆断层发生时三向主应力的大小应该满足库仑-摩尔准则,即:

$$\sigma_h = v(K_p + 1)\sigma_v + vUCS \quad (3)$$

$$\sigma_H = K_p\sigma_v + K_pUCS/(K_p + 1) \quad (4)$$

当断层活动停止时,假设上覆岩层压力不变,且

断层面上的岩石内聚力 $C = 0$,则正断层、逆断层三向主应力应分别满足下列方程。

正断层活动停止时三向主应力的大小应该满足:

$$\sigma_h = \sigma_v(1 - \sin\varphi)/(1 + \sin\varphi) \quad (5)$$

$$\sigma_H = 2\sigma_v v/(1 + \sin\varphi) - vUCS/K_p \quad (6)$$

逆断层活动停止时三向主应力的大小应该满足:

$$\sigma_h = v(K_p + 1)\sigma_v + vUCS \quad (7)$$

$$\sigma_H = K_p\sigma_v + K_pUCS/(K_p + 1) \quad (8)$$

东辛油田井B在1539 m处钻遇2级断层,受断层形成的影响,断层附近应力异常。利用测井资料和室内实验数据计算得,钻遇断点处 $\sigma_v = 33.5$ MPa, $UCS = 18$ MPa, $\varphi = 26^\circ$, $v = 0.24$ 。求得 $\sigma_H = 72.8$ MPa, $\sigma_h = 24.5$ MPa, $\sigma_H/\sigma_h = 2.97$ 。承受这种非均匀地应力作用的套管抗均匀外载强度 $P_c' = 148.7$ MPa,而实际下入 N80 套管抗外挤强度为 76 MPa,远不能满足强度要求。

采油过程中该井在1524.8和1561.3 m两处套变。该区块浅部地层断层倾角较小,且基本不受注水的影响,所以断层滑移的可能性很小。统计套损层与断面之间的关系证实,浅部断层附近套损与断层滑移无关。因此,断层形成产生的异常应力是该井断层附近套损的主要原因。

2 基于地应力的套管强度优化设计方法

以上分析表明,异常地应力作用是导致泥岩夹层、断层附近套管损坏的主要因素。大量的套管损坏事实证明,套管与水泥环体系的强度远远小于断层滑移的剪切应力^[5-9]。因此,断层附近基于地应力的套管强度优化设计的条件是:断层附近套管只受断层形成产生的异常地应力作用。

2.1 等效破坏载荷

一般情况下,套管在泥岩夹层段、断层处承受的外挤应力是非均匀的。然而,在非均匀外挤应力作用下,套管的抗外挤强度大打折扣。因此,为了定量分析套管在承受非均匀外挤应力的作用下,抗外挤强度的变化,提出“等效破坏载荷”^[3,10]的概念,即认为套管抵抗各种外压能力是正比于径向分布外压图形所包含的面积。

$$P_c = \sqrt{ab} \quad (9)$$

式中: P_c ——等效破坏载荷,MPa; a ——椭圆形载荷的最大值,MPa; b ——椭圆形载荷的最小值,MPa。

通过实验发现,套管强度降低的程度取决于椭圆

形载荷的比值 $K(K=a/b)^{[4,12]}$ 。 K 值越小,强度降低的越多。

2.2 优化方法与步骤

(1) 根据目标井的地质资料确定油层附近的泥岩夹层和钻遇断点垂深 H 。

(2) 利用公式(9)计算出泥岩夹层和断层处的 P_c 和系数 K 。

(3) 根据目标井的井深结构设计,初选套管尺寸、钢级、壁厚,进而确定套管力学参数。

(4) 利用等效破坏载荷与套管屈服强度、径厚比、椭圆载荷轴比的关系^[13-15],计算所需套管壁厚 t 。

$$\frac{P_c}{Y_p} = 1.296e^{1.969K} \left[\frac{D}{t} \right]^{(-2.015 + 0.358K)} \quad (10)$$

式中: Y_p ——套管屈服强度,MPa; K ——短轴与长轴的比值; D ——套管外径,mm; t ——套管壁厚,mm。

(5) 如果所选钢级中有壁厚规格满足等于或大于壁厚 t 的条件,则选用。

(6) 如果所选钢级中壁厚规格不满足等于或大于 t 的条件,则利用 API 套管抗外挤强度公式,计算这种壁厚套管在均布载荷下的套管抗外挤强度 P_c' 。

$$P_c' = 2Y_p \frac{(D/t) - 1}{(D/t)^2} \quad (11)$$

(7) 根据计算结果,最终确定套管类型。

2.3 参数确定

2.3.1 泥岩夹层参数确定

东辛复杂断块油田大量的套管损坏井数据表明,油层段的套损大部分集中泥岩夹层胶结面附近,距离油层 50 m 左右。因此,本论文提出以泥岩夹层底界为计算深度值 H 。然后上下各延伸 50 m,作为下入设计套管深度的顶界和底界。

泥岩夹层套管的外载与地应力成正比,比值以 K_1 、 K_2 表示。

$$\begin{cases} K_1 = \sigma_0 / \sigma_H \approx 1.05 \sim 1.20 \\ K_2 = \sigma_{90} / \sigma_H \approx 0.80 \sim 1.00 \end{cases} \quad (12)$$

即:

$$a = K_1 \sigma_H; b = K_2 \sigma_H; K = b/a$$

式中: σ_0 、 σ_{90} ——与 σ_H 成 0° 和 90° 方向的套管外载的最终稳定值,MPa。

2.3.2 断层附近参数确定

在统计的大量因断层导致的套损井中,98% 套损位置集中在钻遇断点深度上下 30 m 之内。因此,提出以钻遇断点深度为计算深度值 H ,然后以断点

深度为基准上下延伸 30 m,作为下入设计套管的顶界与底界。

由式(5)、(6)得知,正断层稳定之后,原最小水平主应力增大成为新的最大水平主应力 $\sigma'_H = \sigma_h$,原最大水平主应力减小成为新的最小水平主应力 $\sigma'_h = \sigma_H$,因此正断层中 $a = \sigma'_H$, $b = \sigma'_h$ 。由式(7)、(8)知,逆断层形成之后,最大最小水平主应力大小关系未发生变化,因此逆断层中 $a = \sigma_H$, $b = \sigma_h$ 。

3 结论与建议

油田开发过程中,注水引发的地应力异常是导致泥岩夹层和断层处套管损坏的主要原因,传统的套管强度设计方法在这两个层段适应性较差。因此,基于异常地应力提出了一套适应泥岩夹层和断层处套管强度优化设计方法。但是,该设计方法还未进行现场试验,建议下一步在套管损坏严重的断块油田开展先导试验,并根据试验结果对设计方法进行优化改进,最终形成一套完整的适应泥岩夹层和断层的套管强度设计新方法。

参考文献:

- [1] 周延军,贾江鸿. 预测套管损坏的新方法研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(S1):230-234.
- [2] 卓景军,张秀红. 套管剪切破坏原因分析及防止技术[J]. 钻采工艺,2004,27(2):64-67.
- [3] 屈春艳. 高压注水井套管缩径变形机理及防治技术——以史深100断块为例[J]. 海洋石油,2007,(1):97-100.
- [4] 吴晓东,李远超,马焕英,等. 二连油田阿11断块油水井套损原因分析及治理对策研究[J]. 石油钻探技术,2005,33(1):9-11.
- [5] 刘绘新,严仁俊,王子平. 非均布载荷下套管强度问题研究[J]. 钻采工艺,2001,24(4):47-48,63.
- [6] 卢运虎,陈勉,唐继平,等. 山前浅部岩层断层附近套管损坏分析[J]. 石油钻采工艺,2011,33(3):109-112.
- [7] 王钟茂,卢万恒,胡江明. 油田油水井套管损坏的机理及防治[M]. 北京:石油工业出版社,1994:127-129.
- [8] 刘东升,赵国,等. 油气井套损防止新技术[M]. 北京:石油工业出版社,2008:154-159.
- [9] 牛艳花,李春福,关舒伟,等. 港西油田套管损坏的现状与建议[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(12):66-69.
- [10] 顾维森. 东辛复杂断块油藏套管柱强度优化设计研究[D]. 山东青岛:中国石油大学(华东),2012:53-71.
- [11] 席小宁. 高温高压井中套管的蠕变分析[D]. 天津:天津大学,2007:34-41.
- [12] 刘杰. 辽河油田油水井套管损坏机理及修复措施[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(2):50-52.
- [13] 张清柄,郝娟,任强燕,等. 油水井套管损坏的原因及预防措施[J]. 油气田地面工程,2011,30(2):91-92.
- [14] 刘新华,王建龙,张卫东,等. 营8断块油水井套损原因及预防措施[J]. 中外能源,2012,7(17):57-61.
- [15] 张春轶,邓洪军. 塔河油田油水井套损现状及主要影响因素[J]. 油气田地面工程,2011,30(7):68-69.