

地层承压能力固井前动态测试方法

王 涛^{1,2}, 贾博超³

(1.陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院 陕西 西安 710075; 2.陕西省陆相页岩气成藏与开发重点实验室(筹), 陕西 西安 710075; 3.天津中油渤星工程科技有限公司, 天津 300451)

摘要:固井前获得地层的实际承压能力,对固井设计和安全都有着重要的意义。在一些上层套管下深较浅的井中,受上层套管鞋处地层破裂压力或上层套管抗内压强度限制,常规的地层承压能力测试无法满足固井要求,针对该问题,文中提出一种地层承压能力动态测试方法,同时进行了现场应用。该方法是在下套管循环后分挡逐渐增加排量,并同时记录与之对应的泵压、钻井液性能及漏失情况,然后利用流变学的原理计算出关键地层深度的承压能力。研究认为这种动态承压测试方法对于低压易漏井行之有效,实用性强,能够满足固井现场对承压能力测试的要求,获得的地层承压能力值为固井设计和安全提供了基础和保障。

关键词:固井;动态测试;地层承压能力;流变学

中图分类号:TE256 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)02-0040-04

Dynamic testing of formation pressure bearing capacity before cementation

WANG Tao^{1,2}, JIA Bochao³

(1.Research Institute of Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710075, China; 2.Shaanxi Key Laboratory of Lacustrine Shale Gas Accumulation and Exploitation (under planning), Xi'an Shaanxi 710075, China; 3.Tianjin Bo-Xing Engineering Science & Technology Limited Company, CNPC, Tianjin 300451, China)

Abstract: It is very important to the cementation design and safety to obtain the actual pressure bearing capacity of formation before cementing. The conventional formation integrity test(FIT) can not meet the cementing requirements due to limits of the formation fracture pressure at the upper casing shoe or the upper casing resistance to internal pressure. An innovative dynamic testing method was proposed in this paper to eliminate this issue and used in the field. This method operates as: increase flowrates at different levels after casing RIH and circulation, record the corresponding pump pressures, drilling fluid properties and amounts of leakage; then use rheology to calculate the formation bearing capacity at critical depths. Study indicates that the dynamic pressure testing method is effective for low pressure leaking wells, and very practical, meeting the FIT requirements for well cementation. The formation pressure testing results provide the basis and guarantee for the cementing design and safety.

Key words: cementing; dynamic test; pressure bearing capacity of strata; rheology

地层的实际承压能力对固井方案设计、水泥浆设计和固井施工排量设计等均有重要的影响^[1-3]。对于低压易漏井固井,为了降低风险,保障固井安全,做到固井的可控,在固井前必须对井眼做承压试验^[4-6]。目前常用的承压试验采取的是“逐渐加压,平缓泄压”的方式^[7-8],即用井筒内钻井液对套管进行试压,逐渐加压,直至地层不能“稳压”,以此得出

地层的承压能力,这种方法称之为静态的测试方法。但是,对于低压易漏失地层,受井身结构和上层套管鞋处破裂压力等条件的限制,无法在固井前对其承压能力做常规的静态测试。本文提出一种下套管后动态测试地层承压能力的方法,为该类型地层承压能力的测试提供了一套科学、可行的办法。

收稿日期:2018-05-29 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.02.007

基金项目:“十三五”国家科技重大专项课题“陆相页岩气水平高效低成本钻井技术”(编号:2017ZX05039003)

作者简介:王涛,男,汉族,1986年生,工程师,硕士,主要从事固井工艺方面的研究工作,陕西省西安市科技二路75号,wt861104@126.com。

引用格式:王涛,贾博超.地层承压能力固井前动态测试方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(2):40-43.

WANG Tao, JIA Bochao. Dynamic testing of formation pressure bearing capacity before cementation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(2):40-43.

1 地层承压能力动态测试方法的提出

对于低压易漏井固井,在下述情况下,目前的地层承压能力静态测试方法不能满足要求:

(1)上层套管下入较浅,受上层套管套管鞋处的地层破裂压力限制,地面井口压力不能施加过高;

(2)受上层套管抗内压强度值的限制,地面井口压力不能施加过高。

为解决上述难题,本文根据流变学原理,提出了一种地层承压能力动态测试方法,并在延长石油延208、延437两口试验井中进行了应用;测试出了该区域油层套管封固裸眼井段内地层的最大承压能力值,为该区低压易漏长封固段条件下的油层套管的安全、一次性固井全封固提供了强有力的技术保证。

2 地层承压能力动态测试方法的原理

地层承压能力动态测试方法即在下套管循环后逐渐分挡增加排量,并同时记录与之对应的泵压和钻井液性能,然后利用流变学的原理计算出关键地层深度的承压能力。由于不同于常规静态的地层承压试验,是动态的,所以称之为动态测试方法。

该方法的原理如下所述:下套管循环钻井液两个循环周期后以一定的排量 Q 进行循环并记录与之对应的泵压 P_p ,同时测试计算钻井液性能,包括密度 ρ 、流性指数 n 、稠度系数 K 。其他的已知条件有套管的外径 D_e 、内径 D_i ,井眼直径 D_w 。

2.1 计算井底的承压能力

由于循环时管内和环空全部都是钻井液,没有液柱压力差,所以此时记录的泵压为循环压耗。则此时井底的当量密度 $\rho_{\text{井底}}$ 可由式(1)计算得出。对于井底是薄弱地层的井,不断变换测试排量直至设计值,由此可计算出井底的最大承压能力和当量密度。

$$\rho_{\text{井底}} = \rho + P_p / (gH) \quad (1)$$

式中: $\rho_{\text{井底}}$ ——井底当量密度, g/cm^3 ; H ——井底深度, m ; P_p ——泵压, MPa ; g —— 0.00981 N/kg ; ρ ——钻井液密度, g/cm^3 。

2.2 计算任意井深的承压能力

计算以当前排量 Q 循环时的整个管内循环摩阻和整个环空循环摩阻压降^[9],对于宾汉流体,有:

$$P_{\text{fp}} = 250\lambda\rho LQ^2 / (\pi^2 r^5) \quad (2)$$

$$\lambda = 0.228 / [6.4Q\rho / (\pi\mu)]^{0.2} \quad (3)$$

式中: P_{fp} ——循环摩阻, MPa ; ρ ——钻井液密度, g/cm^3 ; L ——套管长度, m ; r ——套管半径, m ; λ ——摩阻系数, 无因次; Q ——排量, m^3/min ; μ ——塑性粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

对于环空摩阻 P_{fa} ,也可采用(2)式计算,半径采用当量半径法计算:

$$r_2 = \sqrt{1/6} (D-d) \quad (4)$$

式中: r_2 ——环空当量半径, m ; D ——井眼直径, m ; d ——套管直径, m 。

由于井下条件的复杂性,计算的循环摩阻值与实际的循环摩阻(即此时泵压 P_p)必定会有误差,计算出此时的环空修正压耗系数 T ,即 $T = (P_p - P_{\text{fp}}) / P_{\text{fa}}$,任意井深 H' 处的最大承压能力和当量密度 ρ' 可通过公式(5)计算得出。

$$\rho' = \rho + TP_{\text{fa}} / (gH') \quad (5)$$

式中: P_{fa} ——井深 H' 处的计算循环压降, MPa ; ρ' ——任意井深处的当量密度, g/cm^3 。

3 动态测试方法的实施步骤

(1)下套管后循环钻井液1个循环周期以上,如井下条件允许,2个循环周期效果更好。

(2)根据事先计算的排量计划,采用最低排量循环钻井液30~60 min,记录循环刚结束时的排量与泵压(可以采用录井仪的记录数据)、并测试钻井液的密度与流变性能。

(3)根据排量计划,提高一个排量挡位,循环钻井液30~60 min,循环刚结束时记录排量与泵压(可以采用录井仪的记录数据)、并测试钻井液的密度与流变性能,同时记录钻井液的漏失量。

(4)重复步骤(3),直至事先计算的排量计划中的最高值。

(5)根据上述测试中所记录的排量、泵压、钻井液的密度与流变性能,并根据注水泥流变学计算的相关理论,计算不同排量下实际的井内关键地层深度处所承受的压力及当量密度。

下套管后动态承压测试需要注意的事项有:一是在上述动态测试中,必须仔细观察地面返出情况、泵压情况及泥浆池液面情况,严防出现恶性井漏的事故;二是司钻房的专职操作人员必须坐岗、随时观察,防溢管出口处必须有专人坐岗、随时观察,录井房必须有专人坐岗、随时观察。

4 现场应用

依据上述下套管后动态测试方法对延长石油延408、延437两口井进行地层承压能力测试,均取得了预期的效果。根据钻井和前期的调研情况,该区域内钻井及固井过程中井漏时有发生,前期主要采用分级固井的方式进行固井,但随着开发的深入,区域内井拟采用缝网压裂的方式进行增产试验,而分级箍较弱密封能力使其成为整个井筒的致命薄弱点,因此,急需论证一次性固井的可行性。但由于该区域井表层套管下深较浅,限制了通过承压试验的方式来获取地层承压能力来设计一次上返固井水泥浆柱结构。因此,采用动态承压测试的方式对区域内井的地层承压能力进行测试,对该区域的高效开发极为重要。

该区域内漏失最薄弱地层在接近井底处^[10-12],因此以下主要对井底处的承压能力进行计算。表1和表2分别是延408、延437井的井身结构,表套套管鞋处破裂压力当量密度为 1.68 g/cm^3 ,固井前承压试验井口承压值为 3.61 MPa ,无法满足固井要求,所以进行动态承压试验。动态承压试验是在下完套管循环2个循环周期后进行的。根据前文所述的方法,动态承压测试和计算结果如表3、表4所示。

表1 延408井井身结构

Table 1 Casing programme of Yan-408 well

序号	钻头		套管		
	直径/mm	钻深/m	直径×壁厚/mm	下深/m	封固井段/m
1	311.1	200	244.5×8.94	200	0~200
2	215.9	3920	177.8×9.17	3915	0~3915

表2 延437井井身结构

Table 2 Casing programme of Yan-437 well

序号	钻头		套管		
	直径/mm	钻深/m	直径×壁厚/mm	下深/m	封固井段/m
1	311.1	200	244.5×8.94	200	0~200
2	215.9	3915	177.8×9.17	3910	0~3910

表3 延408井动态承压试验结果

Table 3 Results of dynamic pressure test in Yan-408 well

排量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	泵 压/ MPa	环空流 动阻力/ MPa	实测钻井 液密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	井底动压 当量密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	钻井液累 计漏失量/ m^3
0.78	4.9	4.75	1.25	1.348	0.5
1.00	5.9	5.65	1.26	1.377	1.6
1.11	7.3	7.00	1.25	1.395	3.4
1.20	9.1	8.75	1.26	1.442	5.2

表4 延437井动态承压试验结果

Table 4 Results of dynamic pressure test in Yan-437 well

排量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	泵 压/ MPa	环空流 动阻力/ MPa	实测钻井 液密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	井底动压 当量密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	钻井液累 计漏失量/ m^3
1.08	9.7	9.36	1.25	1.444	1.2
1.30	12.9	12.46	1.26	1.509	2.4
1.51	14.8	14.21	1.25	1.545	4.6
1.60	16.8	16.16	1.26	1.585	6.1

由表3中数据可知,延408井井底的可控承压能力为 1.442 g/cm^3 (当量密度)。以此为依据,设计该井施工采用常规密度+低密度的双密度水泥浆固井,低密度水泥浆密度为 1.35 g/cm^3 ,最终该井施工顺利,固井水泥浆返出井口。

由表4中数据可知,延437井的可控井底承压能力为 1.585 g/cm^3 (当量密度)。以此为依据,设计该井同样采用双密度水泥浆固井,低密度水泥浆密度为 1.40 g/cm^3 ,最终该井同样施工顺利,固井水泥浆返出井口。

以上现场应用可知,该方法成功解决了该区块由于表层套管下深较浅无法在油层套管固井前进行静态承压试验的难题,获得了实际的地层承压能力,为该区实现固井全封固和固井施工的安全和成功奠定了基础。同时上述测试结果也为合理的低密度水泥浆密度设计提供了依据,最大限度地节省了低密度减轻材料,降低了固井成本。

5 结论

针对固井前无法进行常规的静态承压试验或者常规静态承压试验无法满足固井要求的特殊情况,本文提出了一种动态测试方法,根据研究及现场应用得出以下结论:

(1)这种动态测试方法能够解决受上层套管下深浅或者抗内压强度不够等限制而无法进行静态承压试验的难题,在下套管后对地层的实际承压能力进行测试,非常有效。

(2)从现场应用的情况来看,该方法实用性强,能够满足现场固井对地层承压能力测试的要求,获得的地层承压能力值为固井设计和固井安全提供了基础和保障。

参考文献(References):

[1] 王涛,王国峰,李伟,等.提高固井过程中环空摩阻计算精度的

- 方法[J].科学技术与工程,2015,15(11):49-52.
- WANG Tao, WANG Guofeng, LI Wei, et al. Method to increase the accuracy of annular friction calculation while cementing[J]. Science Technology and Engineering, 2015,15(11):49-52.
- [2] 刘云,王涛,于小龙,等.延长油田西部地区低压易漏地层固井技术[J].石油钻探技术,2017,45(4):53-58.
- LIU Yun, WANG Tao, YU Xiaolong, et al. Cementation technology for low-Pressure formations susceptible to lost circulation in western area of the Yanchang oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017,45(4):53-58.
- [3] 李晓春,李坤,刘锐,等.塔里木盆地超深天然气井全过程塞流防漏注水泥技术[J].天然气工业,2016,36(10):102-109.
- LI Xiaochun, LI Kun, LIU Rui, et al. Plug flow based full-process leakage-proof cementing technology for ultra-deep gas wells in the Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016,36(10):102-109.
- [4] 李伟,王涛,王秀玲,等.陆相页岩气水平井固井技术——以延长石油延安国家级陆相页岩气示范区为例[J].天然气工业,2014,34(12):106-112.
- LI Wei, WANG Tao, WANG Xiuling, et al. Cementing technology for horizontal wells of terrestrial shale gas: A case study of the Yan'an national terrestrial shale gas E & P pilot area[J]. Natural Gas Industry, 2014,34(12):106-112.
- [5] 丁开军,陈道元,余辉.OWS油水井堵漏水泥浆体系应用研究[J].钻井液与完井液,2005,22(6):45-48,88.
- DING Kaijun, CHEN Daoyuan, YU Hui. The application study of OWS cement slurry for sealing wells[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005,22(6):45-48,88.
- [6] 蔡利山,苏长明,刘金华.易漏失地层承压能力分析[J].石油学报,2010,31(2):311-317.
- CAI Lishan, SU Changming, LIU Jinhua. Analysis on pressure-bearing capacity of leakage formation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010,31(2):311-317.
- [7] 谭茂波,何世明,范兴亮,等.相国寺地下储气库低压裂缝性地层钻井防漏堵漏技术[J].天然气工业,2014,34(1):97-101.
- TAN Maobo, HE Shiming, FAN Xingliang, et al. Lost circulation prevention and plugging technology for test wells at low pressure fractured formations of the Xiangguosi underground gas storage[J]. Natural Gas Industry, 2014,34(1):97-101.
- [8] 邓明杰,川东北河坝构造低压力漏地层固井技术研究[J].天然气技术,2010,4(1):47-49.
- DENG Mingjie. Cementing technology for low-pressure and lost-circulation formation in Heba structure, northeastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Technology, 2010,4(1):47-49.
- [9] 谷穗,蔡记华,乌效鸣.窄密度窗口条件下降低循环压降的钻井液技术[J].石油钻探技术,2010,38(6):65-70.
- GU Sui, CAI Jihua, WU Xiaoming. Drilling fluid technologies to decrease circulating pressure loss under narrow mud density window[J]. Drilling Petroleum Techniques, 2010,38(6):65-70.
- [10] 王鄂川,樊洪海,党杨斌,等.环空附加当量循环密度的计算方法[J].断块油气田,2014,21(5):671-674.
- WANG Echuan, FAN Honghai, DANG Yangbin, et al. Calculation method of additional equivalent circulating density[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014,21(5):671-674.
- [11] 孙士慧,李改海,逯广东,等.考虑钻具接头影响的环空压耗计算[J].数学的实践与认识,2017,47(19):76-83.
- SUN Shihui, LI Gaihai, LU Guangdong, et al. Annular pressure loss calculation considering the effects of tool-joint[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2017,47(19):76-83.
- [12] 段鸿海,宋金亭,赵洪.小口径深孔钻探冲洗液循环阻力测算[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(5):4-7.
- DUAN Honghai, SONG Jinting, ZHAO Hong. Calculation of circulation resistance for drilling deep hole of slim diameter[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(5):4-7.
- [13] 姜民政,王丽丽,李庆彬,等.杆管环空摩擦阻力能耗研究[J].化工机械,2012,39(2):210-213,250.
- JIANG Minzheng, WANG Lili, LI Qingbin, et al. Study on annulus frictional resistance between pumping rod and tubing[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2012,39(2):210-213,250.
- [14] 张小霞,王子振,凡朝波.延长气田地层漏失区域地层特征研究[J].石化技术,2017,24(9):100.
- ZHANG Xiaoxia, WANG Zizhen, FAN Zhaobo. Stratigraphic characteristics of formation leakage in Yanchang gas field[J]. Petrochemical Industry Technology, 2017,24(9):100.
- [15] 贺健,蒋立宏,肖国平,等.延长气田西部地区中深井固井技术研究[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2015,17(6):54-57.
- HE Jian, JIANG Lihong, XIAO Guoping, et al. Research on the mid-deep well cementing technology in western region of Yanchang gas field[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2015,17(6):54-57.
- [16] 曾艳军,姚平均,陈道元,等.延长气田易漏失井不规则井眼固井技术[J].石油钻采工艺,2013,35(2):52-55.
- ZENG Yanjun, YAO Pingjun, CHEN Daoyuan, et al. Irregular borehole cementing technology in leakage wells of Yanchang gas field[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013,35(2):52-55.
- [17] 康雪林,王延东.延长气田易漏失井固井前井眼准备技术[J].钻采工艺,2009,32(5):119-120.
- KANG Xuelin, WANG Yandong. Borehole preparation technology before cementing in Yanchang oilfield absorption well[J]. Drilling & Production Technology, 2009,32(5):119-120.