

致密砂岩气田小直径地层压力测试器测试评价技术

刘绪钢¹, 陆健¹, 刘晓东², 李华³, 张飞龙⁴

- 1. 中国石化华北油气分公司采气二厂 河南郑州 450000
- 2. 中国石化华北油气分公司油气开发管理部 河南郑州 450000
- 3. 中国石化华北油气分公司采气一厂 河南郑州 450000
- 4. 中国石化中原石油工程公司地球物理测井公司 河南濮阳 450701

通讯作者: Email: 15482929@ qq. com

引用: 刘绪钢, 陆健, 刘晓东, 等. 致密砂岩气田小直径地层压力测试器测试评价技术[J]. 油气井测试, 2020, 29(6): 38-44.

Cite: LIU Xugang, LU Jian, LIU Xiaodong, et al. Test and evaluation technology of small diameter formation pressure tester in tight sandstone gas field [J]. Well Testing, 2020, 29(6): 38-44.

摘要 鄂尔多斯盆地 DN 气田为典型的低孔低渗致密砂岩储层, 采用常规地层压力测试, 干点过多, 测试成功率仅为 33.03%。小直径地层压力测试器测试时, 定点深度以自然伽玛为基准, 仪器下放和数据传输均由电缆完成, 一次下井能进行多点测量, 预测室大小可根据储层特征在 0~20 ml 之间调节。在 DN 气田致密砂岩储层应用, 测试总成功率达 59.0%。依据小直径地层压力测试器测试数据, 结合地层测试、试气情况, 区域特征, 以及 4 口典型井资料进行分析, 其结果为区块储层动用情况、纵横向连通性判断, 以及新井投产方案选择等提供了可靠依据。小直径地层压力测试器的成功应用, 为致密砂岩油气田快速、高效获得地层压力提供了新的测试评价方法。

关键词 致密砂岩储层; 小直径测试器; 地层压力测试; 预测室容积; 储层动用程度; 储层连通性; 评价方法

中图分类号: TE353 **文献标识码:** B **DOI:** 10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.06.007

Test and evaluation technology of small diameter formation pressure tester in tight sandstone gas field

LIU Xugang¹, LU Jian¹, LIU Xiaodong², LI Hua³, ZHANG Feilong⁴

- 1. No. 2 Gas Production Plant of SINOPEC North China Oil & Gas Company, Zhengzhou, Henan 450000, China
- 2. Oil and Gas Development Management Department of SINOPEC Huabei Oil and Gas Company, Zhengzhou, Henan 450000, China
- 3. No. 1 Gas Production Plant of SINOPEC Huabei Oil and Gas Company, Zhengzhou, Henan 450000, China
- 4. Geophysical Logging Company of SINOPEC Zhongyuan Petroleum Engineering Company, Puyang, Henan 450701, China

Abstract: DN gas field in Ordos basin is a typical tight sandstone reservoir with low porosity and low permeability. When conventional formation pressure test is used, there are too many dry points, and the success rate of test is only 33.03%. When the small diameter formation pressure tester is used for testing, the fixed point depth is based on the natural gamma ray, the running of instrument and data transmission are completed by the cable, the multi-point measurement can be carried out by one trip test operation, and the size of the prediction chamber can be adjusted between 0~20 ml according to the reservoir characteristics. This method has been applied in tight sandstone reservoir of DN gas field, and the total success rate of test is 59.0%. According to the test data of small diameter formation pressure tester, combined with formation test, gas test situation, regional characteristics, and data of four typical wells, the results provide reliable basis for the block reservoir production situation, judgment of vertical and horizontal connectivity, and selection of new well production scheme. The successful application of small-diameter formation pressure tester provides a new test and evaluation method for fast and efficient formation pressure acquisition in tight sandstone oil and gas fields.

Keywords: tight sandstone reservoir; small diameter tester; formation pressure test; prediction chamber volume; reservoir producing degree; reservoir connectivity; evaluation method

在油田开发过程中, 油气藏的动态变化规律与地层压力有着密切的关系, 及时准确的了解和掌握有关地层压力情况具有十分重要的意义。目前, 在

套管井和裸眼井中, 均能获得地层压力。其中在套管井采用试井和 DST 等方法, 该方法测试时间长, 花费成本高, 很难进行大规模的测试^[1-3]; 而在裸眼

井中,采用的是电缆地层测试方法,该方法测试时间短,成本低,且一次下井可获得多个层组的压力,进行大规模的测试后,可以弄清楚区域现今地层压力情况^[4-5]。1975年,斯伦贝谢生产了RFT重复式地层测试器,同一时期阿特拉斯也生产出了FMT地层测试器,两种测试器均具有地层压力测试功能和取样功能^[6-7]。但取样基本上是地层流体和泥浆滤液的混和液。1990年,斯伦贝谢在RFT基础上生产了MDT地层测试器,在探测器、井下马达、各模块间的组合技术,以及解释方法等方面都做了改进,且完全可以取出地层真实流体^[8-10]。1995年,斯伦贝谢发明了SRFT小井眼地层测试器,没有实现预测试室可调、泵抽速率可调等功能,测试结果都是干点过多^[11]。2000年,斯伦贝谢的CHDT地层测试器问世,主要针对套管井进行地层压力测试^[12]。2005年,斯伦贝谢生产XPT地层测试器,其主要功能实现了小预测试室容积功能,但该技术目前没在国内应用。而上述部分地层压力测试器被引进国内后,相继在中原、青海、冀东、辽河、胜利、南阳、大庆等油气田进行了投产使用,在油气田的勘探开发中发挥着重要的作用^[13-16]。但是,随着石油开发技术的进步,在低孔低渗的致密砂岩油气层或小井眼等环境中应用存在以下问题:(1)由于预测室容积都在20 ml以上,一方面地层压力恢复时间太长,造成电缆粘卡事故,另一方面对于低孔低渗油气层容易被判断为干点;(2)仪器泵抽力量较小,且仪器推靠井壁时泥饼容易进入探头,导致测试干点过多或探头容易堵塞而导致测试失败;(3)由于仪器直径较大,在侧钻井、小井眼等井眼尺寸较小的井中无法测试。针对存在的问题,研究开发了小直径地层压力测试器^①(以下简称SFT)。SFT具有预测室在0~20 ml之间可调,泵的抽力较大,探针可以控制收缩,能在井眼尺寸小的环境中测试等特点。DN气田引进后,在其致密砂岩中取得了很好的应用效果。

1 SFT 测试技术

SFT小直径地层压力测试器是一种在裸眼井获取地层压力的电缆测井仪器,一次下井可以获得多个点的地层压力,具有仪器尺寸小、压力精度高、预测室容积可调等特点,仪器指标如下:

电源:220 V AC 50 Hz;最大直径:80 mm;

耐温:175 ℃,耐压:140 MPa;

预测室容积:0~20 ml;重复率:±1 psi;

压力精度:±0.02%;分辨率:±0.01 psi;

泵抽速度:0.5~3.0 ml/s。

测试时,由自然伽玛确定深度,通过仪器液压封隔系统进行封隔,利用泵抽系统抽取地层液体,测取地层恢复压力,同时可以计算地层渗透率。

1.1 关键技术创新

(1)在小直径仪器菱形推靠技术的基础上,研发了卧式推靠臂,设计了小直径电机,泵,电磁阀,安全阀,推靠缸,蓄能器等液压原件;优化了内部液压系统结构及电子节电路结构;设计了小直径仪器壳体、油路块、接头等机械加工作件。实现仪器缩径,由常规仪器的127 mm以上缩小到80 mm。

(2)研发了小直径直流电机,采用直流电机,螺杆拉动预测试室活塞运动的原理,实现预测试室容积可调功能。通过调整地面仪器电流大小来实现泵抽速率的可调功能,可以使活塞泵抽力量达到10 000 psi以上。

(3)实现封隔器吸口处伸缩探针自动控制功能,打开地层与仪器探管的通道,防止封隔器吸口堵塞。

1.2 测试环境适用性及成功率分析

通过一系列的技术改进,SFT小直径地层压力测试器可以在小井眼、低孔低渗的致密砂岩油气层等多种非常规环境下测试。

1.2.1 井眼尺寸适用性

SFT仪器最大外径为80 mm,可以在110~440 mm的井眼中均可施工。它不仅适用于小井眼、超深井、侧钻井,以及定向井压力测试,同时还适用于常规大井眼和扩径井段的地层压力测试,能准确获取地层压力。小直径仪器以及卧式推靠臂的特点使得SFT测试技术有更广的使用范围。

1.2.2 储层孔渗适用性

SFT的预测室容积在测试时可在0~20 ml之间变动。这种测试室可调的特点使得SFT在高、中、低孔,高、中、低渗,甚至特低渗地层中均有好的应用,且获得的地层压力准确。在施工时,高渗地层一般选用10~20 ml预测试室;中渗地层选用5~10 ml预测试室;低渗地层选用3~5 ml预测试室。如D5井2 746.00 m点岩性为细砂岩,常规测井计算的孔隙度为10.8%,渗透率为0.98 mD,可定性为低孔、低渗储层。在测试该点时,分别选择10 ml和

①实用新型专利,专利号:ZL200 520 873 114.8

3 ml 预测室进行测试。结果显示,选择 10 ml 预测室测试 960 s 后压力仍然没有得到恢复,不能计算地层压力;而选择 3 ml 预测室测试时仅用了 460 s 压力就恢复到地层平衡压力,可以计算地层压力

(图 1)。测试结果进一步说明,SFT 预测室容积可调的功能,在低渗油气田和高渗油气田的差油气层等致密地层中测试地层压力时,比预测室容积不可调的常规仪器具有独特的技术优势。

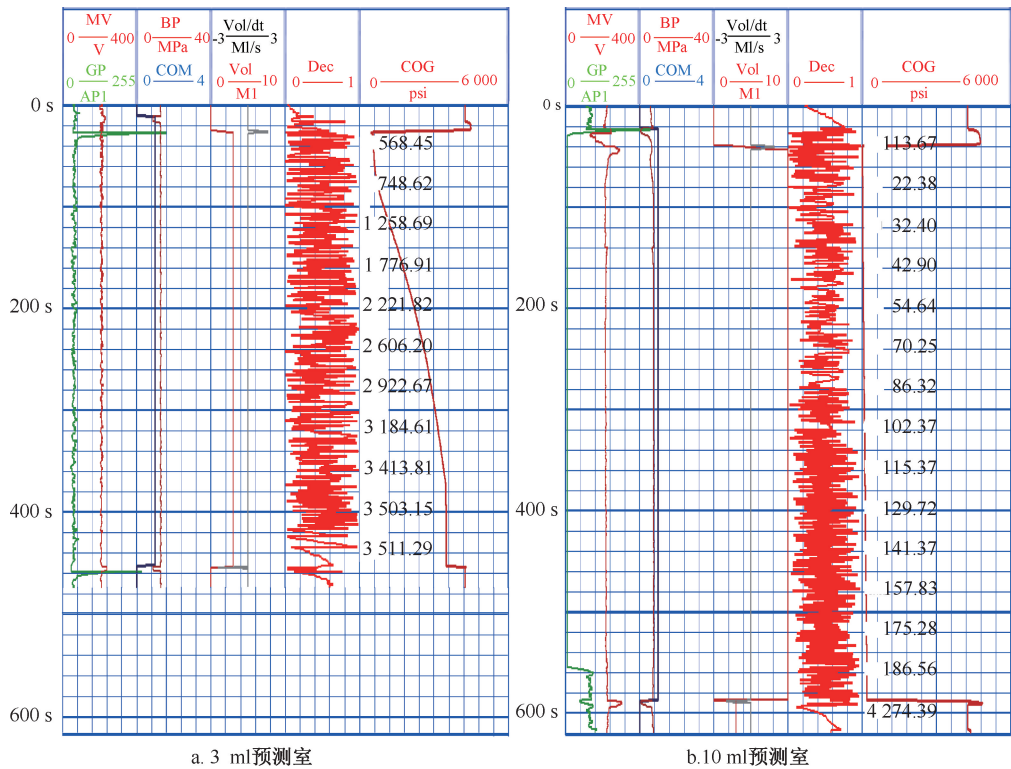


图 1 D5 井 2 746.00 m 处不同预测室测试图
Fig. 1 Test chart of different prediction rooms at 2 746.00 m of Well D5

根据地层渗透性特性选择合适的泵抽速率,可以消除测试过程的“续流现象”(指泵抽活塞停止抽汲后流体继续流入预测室的现象)和“平头现象”(指特高渗储层测试时泵抽过程出现的没有压降的现象),以便准确确定泵抽流量,实现准确计算储层渗透率的目的。一般低渗地层选择 0.1~0.5 ml/s;中渗地层选择 0.5~1.0 ml/s;高渗地层选择 1.0~3.0 ml/s 的泵抽速率。

1.2.3 测试成功率分析

由于 SFT 测试结果为渗点或低渗点时才能计算地层压力,因此文中把测试为渗点和低渗点定性为测试成功。对工区中 SFT 测试资料的成功率(层组成功率是指每个层组测试为渗点和低渗点的个数和与该层组总测试点的比值;总成功率是指参与统计的渗点和低渗点的个数总和与总测试点的比值)进行了统计分析。结果显示,测试总成功率为 59.0%,层组成功率最低为 47.4%,最高达到 74.1%(表 1)。测试成功率明显高于工区其它测试技术,说明 SFT 技术更适合致密砂岩获取地层压力。

表 1 SFT 测试成功率统计表

Table 1 Statistics of SFT test success rate

层组	测试点数			层组成功率/ %
	渗点	干点 ^①	漏点 ^②	
盒 3	24	16	1	58.5
盒 2	20	7	0	74.1
盒 1	56	26	4	65.1
山 2	18	20	0	47.4
山 1	21	18	0	53.8
太原	18	17	0	51.4

①由于地层偏干,测试的地层压力为零的点;②测试时,由于井壁原因,封隔器未封闭好,地层和仪器未建立连通性的点。

2 与常规测试技术对比分析

目前,国内裸眼井地层压力测试主要采用 RFT 技术,但 RFT 技术存在诸如在致密砂岩油气层中测试成功率低;在小井眼中施工存在风险大等问题。SFT 小直径地层压力测试器的成功研发较好的解决了上述 RFT 等地层测试器存在的问题,较大提升了致密砂岩油气层中地层压力的测试成功率,满足了

小井眼电缆地层测试的要求。SFT 与 RFT 在仪器结构、工作原理及应用分析等方面存在异同:①测量方式,基本一致。②预测室及容积,前者一个预测室,容积 1~20 ml 可调;后者两个预测室,容积 20 ml 和 30 ml,不可调。③泵抽速率,前者 0.1~3.0 ml/s 可调;后者不可调。④SFT 测试适用 118.0~410.0 mm 井眼;RFT 测试适用 152.4~374.7 mm 井眼。⑤致密砂岩储层测压成功率,SFT 高,RFT 低。⑥地层渗透率计算,前者特高、高、中、低渗储层均可计算;后者高中渗储层可计算,低渗储层和特高渗储层无法计算。⑦非致密砂岩储层测试成功率,差别不是太大,SFT 相对成功率更高。⑧测试结果应用分析,差别不是太大,SFT 相对成功率更高。对工区 RFT 和 SFT 的总测试点、渗点和低渗点的总数,以及成功率进行了统计,截至 2020 年 9 月 1 日,RFT 总共测试 436 个点,其中渗点和低渗点共 144 个,计算的测试成功率为 33.03%;SFT 总共测试 266 个点,其中渗点 157 个,计算的测试成功率为 59.0%。

对比分析认为,不管是仪器结构、原理、适用性方面还是测试成功率方面,SFT 均有较大的有优势,从根本上解决了 RFT 等测试器上文所述问题。

3 SFT 测试资料应用分析

DN 气田位于鄂尔多斯盆地,为低孔低渗的致

密气田,分为一区和二区两个区。其中一区的构造位置在鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部,面积 2 000 km²,区域内构造单一,总体为北东高、西南低的平缓单斜,构造相对简单,纵横向地层较为稳定,砂体连续性相对较好,主要勘探目的层系为太原组、山西组、下石盒子组,对应一套三角洲-辫状河沉积体系,2005 年开始大规模开发,目前部分层组地层压力下降比较明显^[17]。二区的构造位置在鄂尔多斯盆地伊盟北部隆起,面积 9 825 km²,整体上呈现出北高南低、东高西低的特征,内部为向西倾斜的大单斜构造,区内发育三条大断裂,小断裂带较发育,横向连续性较差,主力勘探层系为下石盒子组,对应一套冲积平原、冲积扇-辫状河-三角洲平原冲积体积,目前处于开发的初级阶段,地层压力下降程度较低,但存在多个不同的压力系统^[18]。依据 SFT 数据、结合 DST、试气、区域特征、4 口典型井等资料,对区块储层的动用情况,纵横向的连通性以及新井投产方案的选择等方面做了分析。

3.1 判断储层动用情况

根据 SFT 测试的地层压力可以判断区域储层油气动用情况,也可以用单井的压力剖面来直观的评价单个砂体的油气动用情况。分区块、分层组对 SFT 测试的压力进行了统计,并与 DST 测试数据做了比较(表 2)。

表 2 SFT 测试地层压力与 DST 数据对比*
Table 2 Comparison of formation pressure measured by SFT and DST data

区号	层位	平均压力/MPa		压力系数范围		平均压力系数	
		SFT	DST	SFT	DST	SFT	DST
一	盒 3	20.90	26.20	0.22~1.01	0.98~1.02	0.81	0.99
	盒 2	24.11	23.87	0.84~0.95	0.95	0.91	0.95
	盒 1	23.23	22.98	0.75~0.95	0.83~0.99	0.88	0.87
	山 2	23.36	24.63	0.83~1.02	0.86~0.97	0.94	0.89
	山 1	25.42	24.98	0.78~1.03	0.93~0.97	0.91	0.91
	太 2	23.67	25.08	0.60~0.97	0.83~0.96	0.84	0.92
	太 1	25.07	25.72	0.84~0.99	0.93	0.90	0.93
	盒 3	26.19	26.90	0.81~0.95	0.85~1.00	0.91	0.92
二	盒 2	30.16	27.00	0.94~0.99	0.86	0.97	0.86
	盒 1	29.22	27.20	0.88~1.08	0.82~0.92	0.93	0.89
	山 2	30.92	27.60	0.89~1.00	0.89~1.00	0.94	0.86
	山 1	29.89	27.60	0.90~0.96	0.85~0.94	0.92	0.91
	太原	30.38	28.90	0.93~1.03	/	0.97	0.93

* 一区和二区的 DST 数据为早期数据,基本能反应原始地层压力。

对比结果显示,一区 SFT 测试的压力较 DST 值整体偏低,且部分层组压力降低幅度大,说明一区的储层都有不同程度的动用,且部分层组动用程度高;而二区 SFT 测试的压力与 DST 值基本一致,说明二区的储层动用程度低。

D2 井是一区的一口开发定向井,井眼直径 165.1 mm,周围邻井已开发多年,2019 年 10 月 16 日完钻后进行了 SFT 测试。从压力剖面图上可以看出(图 2),该井已动用的储层为 A、C 两小层,其中 A 小层地层压力衰减较大,能量下降明显,地层

压力亏空尤为严重,说明本井周围该套储层动用程度高。因此,在新井投产时应考虑采取有效的措施,避免低压层出现压力倒灌等现象。

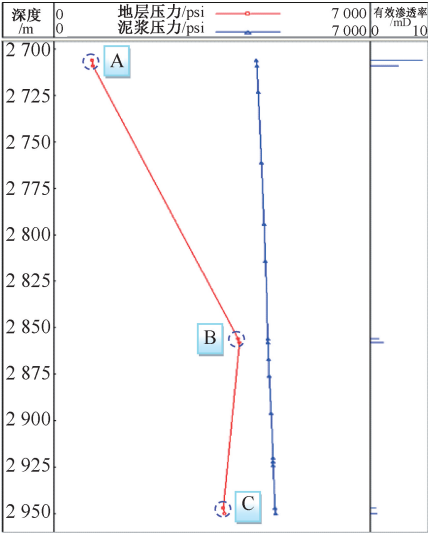


图 2 D2 井 SFT 测试压力剖面图

Fig. 2 SFT test pressure profile of Well D2

3.2 判断连通性

在油气田的开发过程中,储层中流体大量的产出,导致地下能量亏空,纵向上和横向上的压力分布在原始压力分布的基础上发生了很大变化,造成层间矛盾突出,这就对井位的部署、新井投产方案的确定,以及产量的提升等有较大影响。因此,弄清楚储层在纵向上和横向上是否连通就显的尤为

重要。而 SFT 测试可以获得地层能量的变化信息,进而判断储层的连通性。

图 2 中,A、C 两小层的压力有不同程度的衰减,但中部 B 小层基本保持为原始地层压力,A、B、C 三小层间压力的不同说明该井在纵向上储集层连通性较差,具有不同的压力体系。

图 3 中 D1、D2 和 D3 三口井相邻,且都位于 DN 气田一区,其中 D1 井、D2 井相距 427.5 m,D2 井、D3 井相距 689.4 m,D1、D3 两井均为 2005 年完钻的开发井,完钻后分别对 D1 井盒 3 段 2 687.0 ~ 2 693.0 m、2 695.0 ~ 2 697.0 m、2 704.0 ~ 2 711.0 m 和 D3 井盒 3 段 2 648.0 ~ 2 657.0 m、2 669.0 ~ 2 672.0 m、2 683.0 ~ 2 686.0 m 进行射孔压裂投产,试气均获得工业气流,目前已连续开采多年,无阻流量分别为 $18.929\ 4\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 和 $26.245\ 5\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 。而 D2 井 2019 年完钻后进行 SFT 测试,结果显示盒 3 段 2 656.0 m 和 2 659.0 m 处压力系数分别为 0.22 和 0.23,远低于原始地层压力 (0.98 ~ 1.02),说明该井盒 3 段地层压力下降较大。综合地质、测井、测试等资料分析认为,三口井盒 3 段砂体在构造特征,埋藏深度,电性特征等方面基本相似,且横向上砂体有较好的连续性。D2 井盒 3 段地层压力的降低与 D1、D3 等邻井的长期开采而能量未得到补充有关,同时进一步说明三口井的盒 3 段砂体在横向有好的连通性。

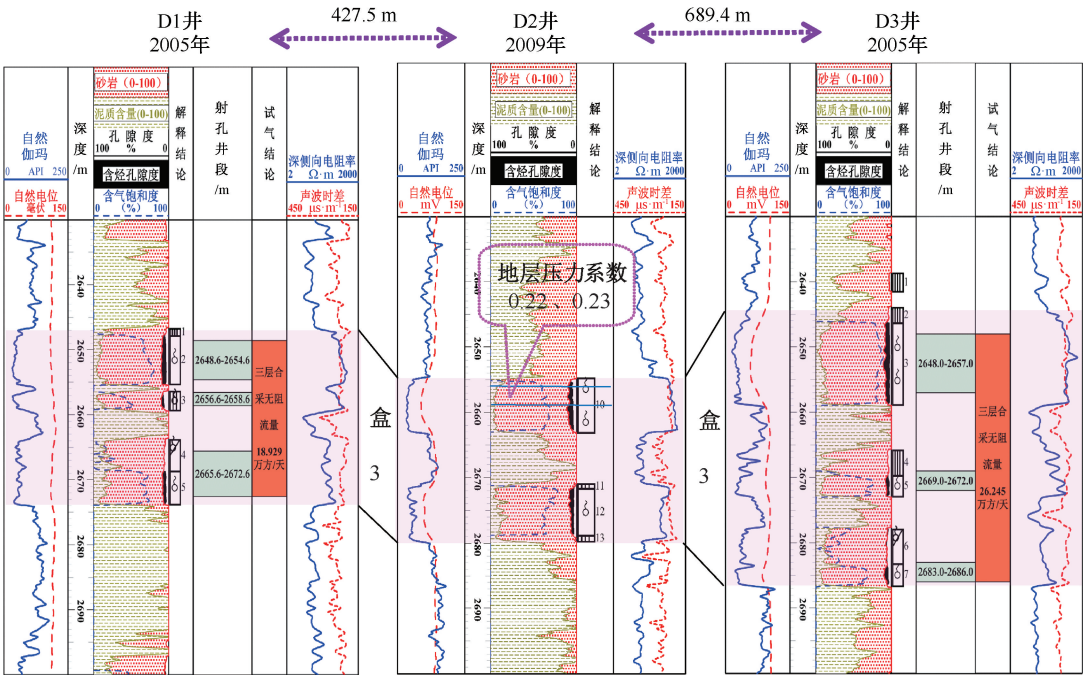


图 3 D1 井、D2 井和 D3 井盒 3 段连井剖面对比图

Fig. 3 Cross section comparison of He3 layer of Well D1, D2 and D3

3.3 辅助调整投产方案

随着气田的长期开发,地层能量都有不同程度的下降。如果不能清楚地了解地层压力的变化情况,可能会对新井的投产层位选择带来难度,直接影响新井投产效果。而 SFT 就能直观的显示现今地层压力,从而为投产方案的确定提供技术支持。

图 4 为 D4 井的 SFT 测试压力剖面图和测井解释成果图,D4 井是部署在一区的一口定向开发井,主要以盒 3、太 2 段为目的层新建产能,井眼直径 215.9 mm,2019 年完钻后进行了 SFT 测试。测试结果显示,太 2 段 2 797.6 m 处地层压力系数为 0.6,明显低于原始地层压力。D4 井原投产方案计划对

太 2 段 2 784.8~2 787.8 m 井段进行试气投产,但参考太 2 段 SFT 测试数据考虑到如果对压力低的储层进行射孔压裂投产,则会造成两方面的后果,一是本井的产能可能较差,二是可能会影响井周正在产气井的产量。经过充分论证后,最终决定放弃对太 2 段进行投产,转而对盒 3 段进行试气投产,盒 3 段 SFT 测试的地层压力系数在 0.92~0.95 之间,为明显的常压地层,投产后地层压力不会影响产能情况。本井太 2 段 2 796.8~2 798.8 m 井段下套管后进行了 DST 测试,测试结果地层压力系数为 0.66,与 SFT 结果基本一致,进一步验证了 SFT 测试结果的准确性,说明 SFT 技术在新井投产方面有较好的指导作用。

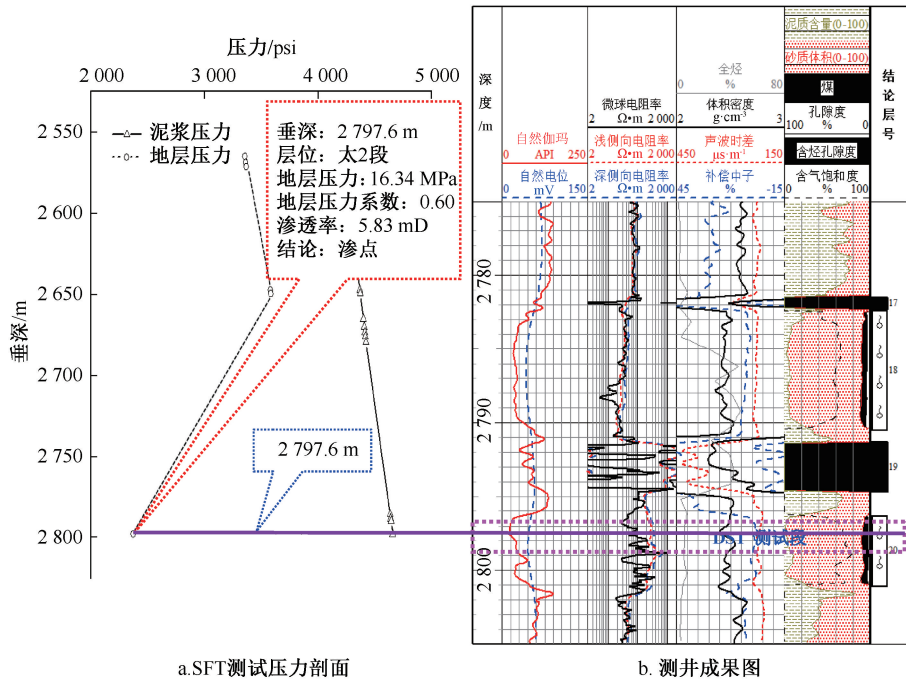


图 4 D4 井 SFT 测试压力剖面与测井成果图
Fig. 4 SFT test pressure profile and logging results of Well D4

4 结论

- (1) SFT 小直径地层压力测试器具有预测室可调、泵抽速率大、仪器直径小等特点,填补了定向井、侧钻井等小井眼中不能进行地层压力测试的空白,成倍提升了致密砂岩层中地层压力测试的成功率,为致密砂岩油气田获得地层压力提供了一种全新的方法。
- (2) SFT 技术既适用于中、高孔,中、高渗的砂岩地层,也适用于低孔低渗致密砂岩地层。同时,适用的井眼范围更广,在 118.0~410.0 mm 之间。
- (3) 针对应用中存在的问题,今后在继续完善

SFT 现有技术基础上,改进在水平井或大斜度井施工工艺,加强研发在碳酸盐岩地层、页岩气或页岩油等非常规地层中成功测试地层压力技术。
致谢:感谢中原石油工程有限公司地球物理公司和盘锦凯新能源科技有限公司对该论文的完成提供的技术支持。

参考文献

[1] 许江文,彭威,毕全福,等. DST 测试资料解释中的数值计算[J]. 油气井测试,2013,22(1):57~60.
XU Jiangwen, PENG Wei, BI Quanfu, et al. The numerical computation of DST transient pressure interpretation [J]. Well Testing, 2013,22(1):57~60.
[2] 任超群,李文红,杨柳,等. Mini-DST 测试及解释技术在

- 海上低渗探井中的应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(6): 29-31.
- REN Chaoqun, LI Wenhong, YANG Liu, et al. Application of mini-DST test and interpretation technology in low permeability exploration well in the sea [J]. Well Testing, 2017, 26(6): 29-31.
- [3] 张昌朝, 逯玉亮, 杨昆, 等. 孟加拉国 Titas 气田高产井测试技术[J]. 油气井测试, 2020, 29(1): 23-27.
- ZHANG Changchao, LU Yuliang, YANG Kun, et al. Testing technology of high production well in Bangladesh Titas gas field [J]. Well Testing, 2020, 29(1): 23-27.
- [4] 冯永仁, 左有祥, 王健, 等. 地层测试技术及其应用的进展与挑战[J]. 测井技术, 2019, 43(3): 217-227.
- FENG Yongren, ZUO Youxiang, WANG Jian, et al. Advances and challenges in formation test and practical application [J]. Well Logging Technology, 2019, 43(3): 217-227.
- [5] 马建国. 新型电缆测试器地层测试技术[J]. 油气井测试, 1998, 7(1): 32-35.
- MA Jianguo. The technology about the new type WFT implement [J]. Well Testing, 1998, 7(1): 32-35.
- [6] 包鸿海, 李宏, 牛润海. RFT-B 型地层压力测试器在 LEAP600B 测井系统上的应用[J]. 油气井测试, 2014, 23(2): 48-50.
- BAO Honghai, LI Hong, NIU Runhai. Applications of formation tester RFT-B in LEAP600B logging system [J]. Well Testing, 2014, 23(2): 48-50.
- [7] 张文昌, 朱新民, 王春祥. RFT 和 FMT 压力测试对比与分析[J]. 油气井测试, 2002, 11(5): 41-44.
- ZHANG Wenchang, ZHU Xinmin, WANG Chunxiang. Comparison and analysis of RFT and FMT pressure test [J]. Well Testing, 2002, 11(5): 41-44.
- [8] 徐文圣, 阳建平, 牛玉, 等. MDT 测试技术在凝析气藏循环注气开发中的应用[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(3): 342-346.
- XU Wensheng, YANG Jianping, NIU Yu, et al. Application of MDT testing technology in the process of cyclic gas injection development of gas condensate reservoir [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(3): 342-346.
- [9] 赵爱军, 方华, 杨宏飞. MDT 地层测试技术在大港油田滩海区的应用[J]. 油气井测试, 2012, 21(6): 42-45.
- ZHAO Aijun, FANG Hua, YANG Hongfei. Application of MDT test technology on offshore area of Dagang Oilfield [J]. Well Testing, 2012, 21(6): 42-45.
- [10] 赵立新, 廖新维. 电缆地层测试油气层产能预测技术研究及应用[J]. 测井技术, 2009, 33(3): 284-288.
- ZHAO Lixin, LIAO Xinwei. An approach for reservoir yield prediction using WFT and its applications [J]. Well Logging Technology, 2009, 33(3): 284-288.
- [11] 温杰文. 超深小井眼地层测试工艺技术研究及应用[J]. 钻采工艺, 2019, 42(6): 50-53.
- WEN Jiewen. Research and application of formation test technology in ultra-deep slimholes [J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(6): 50-53.
- [12] 肖承文, 柳先远, 周波, 等. CHDT 技术在超深复杂水淹油藏中的应用[J]. 测井技术, 2016, 40(2): 229-233.
- XIAO Chengwen, LIU Xianyuan, ZHOU Bo, et al. Application of CHDT in ultra-deep complex watered-out reservoir [J]. Well Logging Technology, 2016, 40(2): 229-233.
- [13] 张高玖, 白建平, 曲波, 等. RFT 测压资料在南阳油田开发井中的应用[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2008, 10(1): 12-14.
- ZHANG Gaojiu, BAI Jianping, QU Bo, et al. Application of formation pressure data of RFT to production wells in Nanyang Oilfield [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2008, 10(1): 12-14.
- [14] 张洪峰. 吉林探区压力监测资料解释技术[J]. 油气井测试, 2019, 28(6): 73-77.
- ZHANG Hongfeng. Pressure monitoring data interpretation technology in Jilin prospecting area [J]. Well Testing, 2019, 28(6): 73-77.
- [15] 孙达. 油气井压力恢复试井解释关键技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(6): 73-77.
- SUN Da. Key technologies for oil and gas well pressure buildup test interpretation [J]. Well Testing, 2018, 27(6): 73-77.
- [16] 邢晓光, 许泽君, 戴南燕, 等. 冀东油田地层测试工艺研究与优化[J]. 油气井测试, 2014, 23(6): 40-42.
- XING Xiaoguang, XU Zejun, DAI Nanyan, et al. Research and optimization to well test technology in Jidong Oilfield [J]. Well Testing, 2014, 23(6): 40-42.
- [17] 张广权, 郭书元, 张守成, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田下石盒子组一段沉积相分析[J]. 东北石油大学学报, 2017, 41(2): 54-61.
- ZHANG Guangquan, GUO Shuyuan, ZHANG Shoucheng, et al. Analysis of sedimentary facies the 1st member of lower-Shihezi formation in Daniudi gas field, Ordos basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2017, 41(2): 54-61.
- [18] 段治有, 李贤庆, 陈纯芳, 等. 杭锦旗地区 J58 井区下石盒子组气水分布及其控制因素[J]. 岩性油气藏, 2019, 31(3): 45-54.
- DUAN Zhiyou, LI Xianqing, CHEN Chunfang, et al. Gas and water distribution and its controlling factors of Xia-shihezi formation in J58 well area, Hangjinqi area [J]. Lithologic Reservoirs, 2019, 31(3): 45-54.

编辑 王 军

第一作者简介: 刘绪钢, 男, 1978 年出生, 高级工程师, 2004 年毕业于中国石油大学(华东)地球探测与信息技术专业, 主要从事石油天然气开发管理与研究工作。电话: 0477-3109888, 13838162824; Email: liuxugang, hbsj@sinopetec.com。通信地址: 河南省郑州市陇海西路 189 号, 邮政编码: 450006。