

东海凝析气层一体化测试管柱井下 PVT 取样技术

赵幸滨¹, 周志祥², 鲁法伟¹, 冯大龙³

1. 中海石油(中国)有限公司上海分公司勘探部 上海 200335

2. 中海油能源发展股份有限公司上海工程技术分公司 上海 200335

3. 中海石油(中国)有限公司上海分公司工程技术中心 上海 200335

通讯作者: Email: zhaoxb2@ cnooc. com. cn

项目支持: 中国海洋石油有限公司“十四五”重大科技项目海上深层/超深层储层经济产能获取技术研究(KJGG2022-0406)

引用: 赵幸滨, 周志祥, 鲁法伟, 等. 东海凝析气层一体化测试管柱井下 PVT 取样技术[J]. 油气井测试, 2023, 32(5): 14-18.

Cite: ZHAO Xingbin, ZHOU Zhixiang, LU Fawei, et al. Downhole PVT sampling technology with integrated testing string in condensate gas layer in East China Sea[J]. Well Testing, 2023, 32(5): 14-18.

摘要 钢丝作业取井下 PVT 样品方式在海上凝析气层测试中存在用时长、圈闭易失效、安全风险高等问题。根据 TCP+APR 一体化管柱特点, 将 SPS 保压单相取样枪及其托筒连接在测试管串上一并入井, 通过控制环空压力激发取样枪并圈闭井下流体样品。该技术性能稳定, 取样成功率高, 样品质量可以满足油气藏评价要求, 测试作业效率及安全性明显提升。以东海某勘探区为例, 5 年内共进行了 13 井次应用, 取样成功率 100%, 累计节约作业时间超 200 h。海上勘探油气藏类型越来越复杂, 成本控制 and 高质量勘探要求下, 一体化测试管柱井下 PVT 取样技术具有重要的现实推广意义。

关键词 东海; 凝析气层; 测试; 一体化管柱; SPS 单相取样器; PVT 取样; 应用效果

中图分类号: TE353 **文献标识码**: B **DOI**: 10. 19680/j. cnki. 1004-4388. 2023. 05. 003

Downhole PVT sampling technology with integrated testing string in condensate gas layer in East China Sea

ZHAO Xingbin¹, ZHOU Zhixiang², LU Fawei¹, FENG Dalong³

1. Department of Exploration of Shanghai Company, CNOOC Limited, Shanghai 200335, China

2. CNOOC Energy Development Co., Ltd., Shanghai Engineering Technology Branch, Shanghai 200335, China

3. Engineering Technology Center of Shanghai Company, CNOOC Limited, Shanghai 200335, China

Abstract: The method of wireline operation for downhole PVT sampling in offshore condensate gas layer testing is plagued by issues such as time-consuming operations, easy trap failure, and high safety risks. According to the characteristics of the TCP+APR integrated pipe string, the SPS pressure-maintaining single-phase sampling gun and its holder were connected to the testing pipe string and run into the well together. Fluid samples were collected by controlling annular pressure to activate the sampling gun and trap downhole fluid samples. This technology offers a stable performance and a high success rate for sampling, and the sample quality can meet the requirements for reservoir evaluation. It significantly improves testing efficiency and safety. Taking some exploration area in the East China Sea as an example, this technology was applied 13 times over five years, with a 100% success rate in sampling and a cumulative time savings of over 200 hours. As exploration in offshore oil and gas reservoirs becomes more complex, cost control and high-quality exploration are essential, making the downhole PVT sampling technology with integrated testing string of significant practical importance.

Keywords: east China sea; condensate; test; integrated pipe string; SPS single-phase sampler; PVT sampling; apply effects

东海海域油气藏类型复杂, 主要勘探区西湖凹陷西部斜坡带平湖组、中央反转构造带花港组等储层流体类型以凝析气^[1]为主。凝析气是介于油和纯气之间的特殊油气类型, 具有相态多样、流动特征复杂等特征^[2]。井下 PVT 样品可以获取储层原

始地层压力条件下的流体组成、物理化学性质等参数, 对油气藏储量估计、采收率估算、最佳开发方案和生产方案的编制等具有重要意义, 是评价该类气藏的 necessary 资料, 井下 PVT 取样也成为了探井测试的重要任务之一^[3]。

以往,凝析气层测试时井下 PVT 取样主要通过钢丝作业牵引装置,预设取样时间后下放至设计深度自主激发完成^[4]。但是,传统方式存在作业流程复杂,下入深度受限,对时钟预测精确性要求高,防喷管井控风险等诸多问题。例如,钢丝作业取井下 PVT 样品需要在开井期间连接井口钢丝防喷系统,高产、井口高压时存在井控风险^[5];钢丝仪器串组合需要考虑测试管柱内径及变径等问题,取样点深度受到限制,进而对取样成功率及样品合格率存在很大影响^[6]。

海上探井测试主要采用 TCP+APR 一体化管柱^[7],通过压力控制完成射孔、开关井等各项操作。根据这一特点,东海海域通过多年探索和实践,利用随一体化测试管柱下入 SPS 保压式单向取样枪,通过环空压力操作激发并圈闭样品的井下 PVT 取样技术逐渐成熟^[8]。该项技术不但作业程序简单、易操作、成功率高,而且单层测试平均节省 10~15 h 钢丝作业占用井口时间,同时规避了气层高产、井口高压条件下的井控及安全作业风险,对海上凝析气井测试工作具有重要的现实意义^[9]。

1 关键技术

将 SPS 单相取样枪装进专用托筒,连接在一体化测试管柱上一同入井,通过控制环空压力激发取样枪并圈闭井下流体样品。取样枪起至地面后,利用转样装置及时将圈闭的样品转入保压钢瓶,实现井下 PVT 样品的保存。

1.1 结构原理

随管柱下入的 PVT 取样装置主要由 SPS 单相取样枪、托筒、变扣短节等构成^[10],其中,取样枪是核心装置,可分为取样腔、氮气腔、空气腔、激发机构等四部分。

取样腔^[11]是作为所取样品承装体(见图 1);氮气腔是作为补充氮气的承装体;空气腔是作为由取样腔内置换液回收承装体,顶端连接激发撞针和激发器,行成闭路,接到取样指令后形成通路,完成取样;激发机构是传递取样作业指令的关键性部件,是激发部位的集成,主要由破裂盘短节、压力传输杆、撞针及撞针固定器、激发器组成。

工作原理^[12]:当激发器激发后,泄油阀打开,在井底压力作用下,驱使浮动活塞沿活塞轨道杆向上运动,当浮动活塞移动到它的上行程终点,活塞轨道杆底端端的关闭锁死机构被打开,针阀本体关闭

取样孔,与浮动活塞之间圈闭了井底流体,弹簧锁销弹起,取样完成。

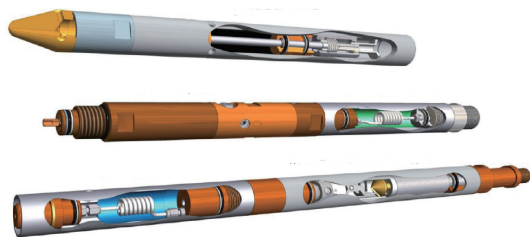


图1 SPS 保压单相取样枪构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SPS pressure holding single-phase sampling gun

SPS 单相取样器会在取样结束的瞬间,将预充的高压氮气通过浮动活塞作用于圈闭的样品上,使得圈闭的地层流体始终高于原始地层压力,并在样品从井底起至地面的过程中始终保持相态不发生改变。

1.2 管柱设计

SPS 取样枪连接完成后整体拖入至托筒内,托筒技术参数为:外径 140 mm;内径 57 mm;中心偏移 23 mm;通径 53 mm;本体长度 7 660 mm;短节长度:5 224 mm;重量 385 kg;工作温度等级 -18 ℃ ~ 204 ℃;抗内/外压 103.4 MPa, 204.4 ℃;抗拉强度 136 t, 204.4 ℃。托筒是 SPS 的载体,随测试工具管串一同下入井内,并作为测试管柱的一部分。每个托筒可携带两支容积为 600 ml 的 SPS 单相取样枪,并安装有一个破裂盘,能同时控制两支取样枪。凝析气层测试一般下入两个托筒四支 SPS 取样枪,为获取更多的地层流体样品,可根据需要组下多支托筒,但托筒之间不能直接连接,中间需连接同心工具或短节。

凝析气层测试一体化管柱^[13]设计时,单相取样装置的连接需遵循三个原则:取样装置的下深应尽量靠近测试层,并在 LPR-N 阀之下,避免地层流体流动距离长而导致分相;应置于封隔器安全接头之上,确保卡管柱等极端情况下依旧能起出样品;其上部或下部应与存储式压力计托筒连接,便于监测的取样深度点温度、压力数据的精确性(见图 2)。

取样装置在地面进行保养试压后需要进行激发试验,主要通过手压泵对激发机构的破裂盘短节进行打压 4.83~6.89 MPa 来完成激发装置的激发动作。

为保证管柱在下入过程、开关井作业期间的完整性及取样时操作压力的准确性,会根据井身结构、管柱下入深度、测试液比重等计算出取样点深

度的液柱压力,并选择相应的破裂盘压力值,从而折算出取样时地面环空操作压力值。入井前需进行托筒保养、破裂盘试压等,以确保破裂盘^[14]的密封性。

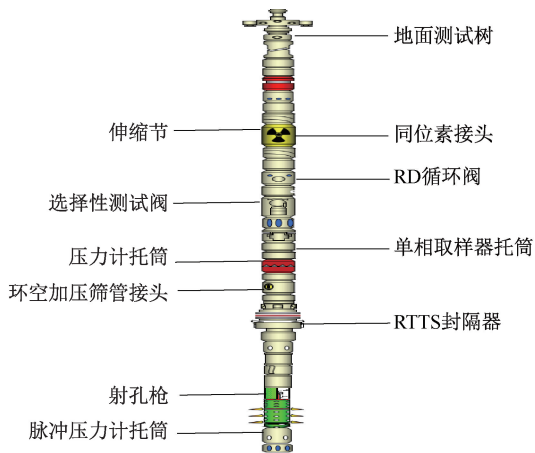


图2 TCP+APR一体化测试管柱示意图
Fig. 2 Schematic diagram of TCP+APR integrated test column

根据实际管柱组合通常设置单相取样器破裂盘值需要考虑取井下 PVT 样品期间需要保证井下选择性测试阀保持开启状态,所以单相取样器的操作压力需比选择性测试阀操作压力高 3.45 MPa(根据现场经验计算)。

选择性测试阀操作压力公式为

$$p_1 = ((p_2 - p_3) \times (p_{\text{静液柱压力}} - p_0) / 1000 + p_3) \quad (1)$$

式中: p_1 为选择性测试阀地面操作压力,MPa; p_2 为不考虑液柱压力时操作时压力高值,MPa; p_3 为不考虑液柱压力时操作时压力低高值,MPa; $p_{\text{静液柱压力}}$ 为选择性测试下入深度对应的液柱压力,MPa; p_0 为根据温度参数和静液柱压力查表所得低压力值,MPa。

单相取样器破裂盘值计算公式为

$$p_p = p_{ph} + p_1 + 3.45 \quad (2)$$

式中: p_p 为单相取样器破裂盘压力值,MPa; p_{ph} 为单相取样器下入深度对应的静液柱压力,MPa。

单相取样器操作压力计算公式为

$$p_2 = p_p - p_{ph} \quad (3)$$

式中: p_2 为单相取样器操作压力值,MPa; p_p 为单相取样器破裂盘压力值,MPa。

1.3 操作过程

对于凝析气层测试,为取到纯净且单相态地层流体样品,单独设置一次开井选择小油嘴流动稳定后操作取样,也可在求产末期直接切换小油嘴流动稳定后取样^[15]。流动油嘴建议选择 3.18 mm 固定油嘴,流动时间一般为 4~6 h。

现场操作时,环空逐步加压至取样器托筒破裂盘操作压力,宜在 2 min 内完成;环空稳压 30 min,以确保取样枪能够完全圈闭。环空压力击穿破裂盘后,环空液柱压力跟环空地面操作压力共同作用于取样装置的激发机构,泄油阀打开,在井底压力的作用下,驱使浮动活塞沿轨道杆向上运动至上行程终点并打开锁死机构,针阀本体关闭取样孔,与浮动活塞之间圈闭井底流体,弹簧锁销弹起,取样完成^[16]。

1.4 转样

工作原理:转样时,利用转样泵打压将压力从高压软管管线传导至取样枪,推动取样枪活塞挤压地层样进入样瓶,进入样瓶的地层流体同样推动样瓶活塞挤压、排空预置液完成转样(见图 3)。

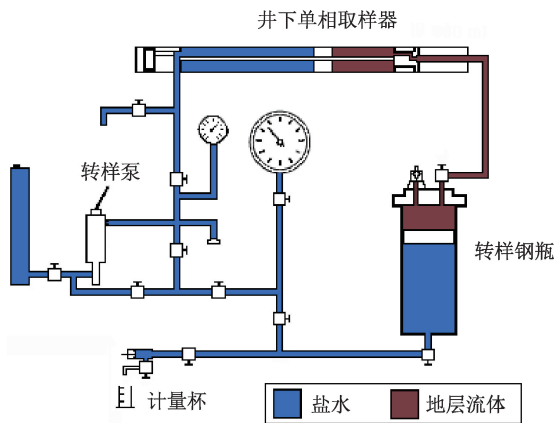


图3 单相转样器现场地面转样流程图
Fig. 3 Flow chart of single-phase sample converter field ground sample transfer

取样装置自井下起出后,为保证单相态样品质量,应在 2 h 内完成转样。先观察取样枪的圈闭状态,初步判断是否成功取样;然后连接转样器与取样装置,检查并记录单相取样器打开压力。

转样过程中,应控制转样泵泵注速度,观察转样钢瓶的出液体积及速度以判断转样是否平稳,单支取样枪的转样时间一般不低于 0.5 h。转样完成后,为确保样品存储、运输时的相态不发生改变,需在单相样品钢瓶上附加备压 6.89~13.79 MPa。

2 设备改进

SPS 单相取样器在早期使用过程中,曾出现过个别取样枪未圈闭的现象。经检查分析发现,因为激发机构中伸缩杆伸出距离不够,导致无法触碰至激发器触动点。对单相取样器激发机构进行改进,

通过在释放杆顶端加装 1 mm 厚度的铜质垫片以补偿顶杆与释放杆顶端的距离,进一步提升了设备的稳定性(见图 4)。为确保取样成功率,铜质垫片在每次入井激发后必须换新。

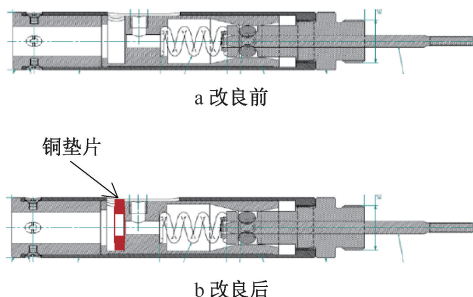


图 4 SPS 单相取样器激发装置改良前后结构对比示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the structure comparison before and after the improvement of the excitation device of SPS single-phase sampler

激发装置组装后释放杆顶端距总成端面长度为 73 mm 左右为正常。若激发装置组装后释放杆顶端距总成端面长度达 80 mm 或以上,则释放杆凹面未卡入钢珠内,必须重新组装,并测量确认,直至释放杆端与总成端面距离约 73 mm 左右为合格。

3 应用效果

SPS 单相取样装置在东海海域累计进行了 15 井次应用,取样成功率 100%,平均单层测试节省时间 13 h 左右,降成本效果明显。尤其在深层、高温、高压、高产及定向井测试作业中,简化作业流程的同时,更是规避了钢丝作业带来的安全和井控风险。

X 井是东海海域 2021 年一口凝析气藏勘探发现井,测试层埋深 4 104~4 126 m,管串长,预测产量高且井口压力大。测试采用 TCP+APR 一体化管柱,在选择性测试阀与存储式压力计托筒之间(4 065 m)下入 2 个取样托筒和 4 支容积 600 ml 的 SPS 单相取样枪。求产时选用“二开一关”工作制度,一开井分别求取了 4.76 mm、7.94 mm、11.11 mm、14.29 mm 四个固定油嘴的稳定流动产能,二开井 3.18 mm 固定油嘴流动 4 h 后,环空加压至 25 MPa 并稳压 0.5 h,完成井下 PVT 取样。起出取样装置检查,4 支取样枪全部成功圈闭。

测试层原始地层压力 40.33 MPa,取样深度点流动压力 39.78 MPa,实验室分析显示凝析气露点压力为 39.2 MPa。井下流体样品为单相态,样品质量满足油气藏评价要求(见图 5)。

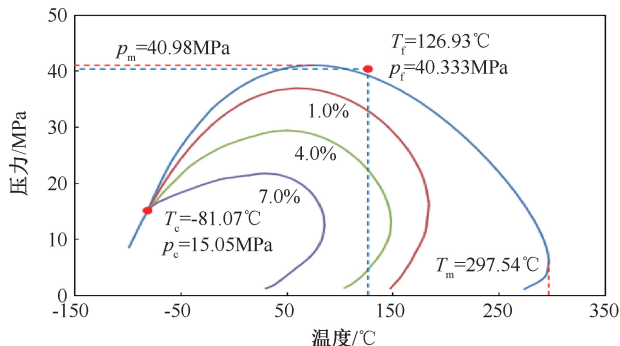


图 5 X 井井流物流体 p - T 相图

Fig. 5 p - T phase diagram of X well flow logistics body

本井测试的成功实施,进一步证实了一体化管柱井下 PVT 取样技术的可靠性和实用性。

4 结论

(1) SPS 保压单相取样装置作业流程简单,性能稳定,取样成功率高,可实现多支样品同时取样,现场可操作性更强。

(2) 较传统钢丝作业,SPS 取样装置下入深度更接近测试层,并能保证样品相态稳定,能够满足油气田评价的井下 PVT 样品要求。

(3) 一体化测试管柱井下 PVT 取样技术简化了作业程序,减少了占用井口时间,规避了井控风险,有效降低作业成本的同时,安全性得到提升,在海上油气田产能测试中具有现实推广意义。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司上海分公司提供资料及技术支持。

参考文献

- [1] 魏恒飞,陈践发,陈晓东,等. 东海盆地西湖凹陷凝析气藏成藏特征及分布控制因素[J]. 石油天然气工业, 2019, 49(6): 1507-1517.
WEI Hengfei, CHEN Jianfa, CHEN Xiaodong, et al. Characteristics and controlling factors of condensate reservoir accumulation in Xihu sag, East China sea basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(6): 1507-1517.
- [2] 许峰,赵洪涛. 高温含硫凝析气藏取样技术探讨[J]. 油气井测试, 2019, 28(4): 20-26.
XU Feng, ZHAO Hongtao. Discussion on sampling technology of high-temperature sulfur-containing condensate gas reservoir [J]. Well Testing, 2019, 28(4): 20-26.
- [3] 尚俊臣,刘晓娟,孙尧尧. 油气井钢丝作业技术[J]. 化学工程与装备, 2023, (4): 89-90.
SHANG Junchen, LIU Xiaoyu, SUN Yaoyao Oil and gas well wire operation technology [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2023, (4): 89-90.

- [4] 姜玉峰,葛东升. 高温高压气井钢丝作业技术实践[J]. 石油地质与工程,2020,(6):89-92.
JIANG Yufeng, GE Dongsheng. Practice of steel wire operation technology in high temperature and high pressure gas well [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, (6): 89-92.
- [5] 王雯娟,李华,张辉,等. 影响南海西部油气藏 PVT 取样成败的两个关键问题[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014:196.
WANG Wenjuan, LI Hua, ZHANG Hui, et al. Two key issues affecting the success or failure of PVT sampling in oil and gas reservoirs in the western South China Sea [J]. China Petroleum and Chemical Industry Standards and Quality, 2014:196.
- [6] 骆劲羽,杨晓勇,张鹏,等. 射孔压裂封隔一体化压裂管柱的改进[J]. 石油天然气工业,2021,30(5):50-54.
LUO Jinyu, YANG Xiaoyong, ZHANG Peng, et al. Improvement of perforated fracturing sealing integrated fracturing string [J]. Oil & Gas Industry, 2021, 30 (5): 50-54.
- [7] 张兴华,杨子,冯卫华,等. 单相和置换式 PVT 取样技术在探井测试中的研究[J]. 石油工业技术监督,2014,2(1):27-29.
ZHANG Xinghua, YANG Zi, FENG Weihua, et al. Research on single-phase and displacement PVT sampling technology in exploratory well testing [J]. Technical Supervision of Petroleum Industry, 2014, 2 (1): 27-29.
- [8] 林炳南,梁昕,赵洪绪,等. 压控式井下单相高压物性取样技术及应用[J]. 油气井测试,2014,23(3):61-63.
LIN Bingnan, LIANG Xin, ZHAO Hongxu, et al. Technique of single-phase high-pressure down-hole sampling by pressure-controlled and its application [J]. Well Testing, 2014, 23 (3): 61-63.
- [9] 卢中原,杜连龙,陈光峰,等. 单相取样器在海上油田探井稠油测试作业中的应用[J]. 化工管理, 2017, (21):14.
LU Zhongyuan, DU Lianlong, CHEN Guangfeng, et al. Application of single-phase sampler in heavy oil testing operation in offshore oilfield [J]. Chemical Engineering Management, 2017, (21): 14.
- [10] 张兴华,杨子,冯卫华,等. 单相和置换式 PVT 取样技术在探井测试中的研究[J]. 石油工业技术监督,2014, 30(2):27-29.
ZHANG Xinghua, YANG Zi, FENG Weihua, et al. Research on single-phase and displacement PVT sampling technology in exploratory well testing [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2014, 30 (2): 27-29.
- [11] 张文昌,党军胜,杨明滔,等. 高抗硫保压井下取样器的研制及在 P202-1 井中的应用[J]. 石油钻采工艺, 2013,35(2):122-124.
ZHANG Wenchang, DANG Junsheng, YANG Mingtao, et al. Development and application of high sulfate resistant and pressure keeping samplers on Well P202-1 [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35 (2): 122 -124.
- [12] 杨二东. 高温高压井测试应用 DST 工具的可靠性与有效性[J]. 新技术应用与实践,2018,(8):171-172.
YANG Erdong. The reliability and effectiveness of using DST tools in the high temperature and high pressure well testing [J]. Management & Technology of SME, 2018, (8): 171-172.
- [13] 熊爱江,杨进,宋宇,等. 油气井用破裂盘测试与破裂压力模型研究[J]. 压力容器,2017,34(8):1-6.
XIONG Aijiang, YANG Jin, SONG Yu, et al. Research on model of fracture pressure on test of oiland gas burst disc [J]. Pressure Vessel Technology, 2017, 34 (8): 1-6.
- [14] 许峰,赵洪涛. 高温含硫凝析气藏取样技术探讨[J]. 油气井测试,2019,28(4):22.
XU Feng, ZHAO Hongtao. Discussion on sampling technology of high-temperature sulfur-bearing condensate gas reservoir [J]. Well Testing, 2019, 28 (4): 22-23.
- [15] 邱兆军,曾爱民,李国明,等. SPS 高压物性取样器地面转样方法[J]. 油气井测试,2010,19(4):54-56.
QIU Zhaojun, ZENG Aimin, LI Guoming, et al. Ground transferring method of SPS PVT sampler [J]. Well Testing, 2010, 19 (4): 54-56.
- [16] 戴卢军,杨子,高科超,等. 渤海油田探井测试井下 PVT 取样技术进展研究与改进[J]. 油气井测试,2017,26(5):62-65.
DAI Lujun, Yang Zi, GAO Kechao, et al. Research and improvement on down-hole pvt sampling technique progress in exploratory well testing in Bohai oilfield [J]. Well Testing, 2017, 26 (5): 62-65.

编辑 穆立婷

第一作者简介:赵幸滨,男,1986 年出生,工程师,2009 年毕业于中国石油大学(华东)资源勘察专业,主要从事海上探井录井、测试等技术与管理方面工作,电话:021-22830095, 13816477227;Email: zhaoxb2@ cnooc. com. cn. 通信地址: 上海市长宁区通斜路 388 号中国海油大厦,邮政编码:200335。