

高温取样控制器的研制与应用

王亮, 李大亮

中法渤海地质服务有限公司 天津 300457

通讯作者: Email: lidl@cfbge.com

引用: 王亮, 李大亮. 高温取样控制器的研制与应用[J]. 油气井测试, 2023, 32(2): 41-48.

Cite: WANG Liang, LI Daliang. Development and application of high temperature sampling controller[J]. Well Testing, 2023, 32(2): 41-48.

摘要 为满足 180 ℃ 以上井下高压物性取样控制需要, 提高井下高压物性取样的时效性和成功率, 研制了一种新型的高压物性取样控制器。该控制器可以通过测井电缆送入实现实时控制取样; 也可以通过连续油管、钢丝等送入, 通过运动状态编码主动控制取样。通过多套工具串联, 一次入井能够完成不同深度、不同时间的取样任务。经某井的实验性应用, 验证了取样控制器电缆送入实时控制取样功能和钢丝送入运动状态编码控制取样功能, 取得良好效果。该取样控制器满足 200 ℃、103 MPa, 以及 H₂S 环境的取样控制需要, 能够控制多种类型的取样器, 提高了取样技术的可控性和适用性, 为降低海上高温井下取样成本、满足海上高温井下取样作业需求提供了技术保证。

关键词 取样控制器; 破裂盘; 机械时钟; 高温高压; 运动状态; 泡点

中图分类号: TE353 **文献标识码:** B **DOI:** 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.02.008

Development and application of high temperature sampling controller

WANG Liang, LI Daliang

China-France Bohai Geoservice Co., Ltd., Tianjin 300457, China

Abstract: In order to meet the need of downhole high-pressure physical property sampling control above 180 ℃ and improve the timeliness and success rate of downhole high-pressure physical property sampling, a new type of high-pressure physical property sampling controller is developed. The controller meets the sampling control requirements of 200 ℃, 103 MPa and H₂S environment, and can control various types of samplers. The controller can realize real-time control sampling through logging cable; It can also be fed in hole by coiled tubing, steel wire, etc., and the sampling can be actively controlled through motion state coding. Through multiple sets of tools in series, sampling tasks of different depths and different times can be completed at one time. Through the experimental application in a certain well, the sampling controller's real-time control sampling function with cable and the motion coding control sampling function with slickline are verified, and good results are achieved. The sampling controller improves the high-temperature sampling technology, improves the controllability and applicability of the sampling technology, and provides technical guarantee for reducing the cost of offshore high-temperature downhole sampling and filling the operation gap of offshore high-temperature downhole sampling.

Keywords: sampling controller; rupture disk; mechanical clock; high temperature and high pressure; motion state; bubble point

油气高压物性参数是确定油藏类型、制定开发方案和进行油藏工程计算不可缺少的重要参数, 是研究油气藏驱动类型、确定油气田开采方式、计算油气田储量、选择油气井工作制度的基础。油气高压物性参数的准确性对试井解释、排烃模拟有着重要意义。井下高压物性样品, 能够最直接准确地反应地层流体的高压物性, 有效的避免其它方式获得样品可能带来的分析误差, 具有难以替代的作用。

目前国内外取样器种类很多, 但取样控制方式

主要包括: 机械时钟控制取样、电缆实时控制取样、数字钢丝实时控制取样和击穿破裂盘控制取样等。机械时钟控制, 是预先设定时间倒计时, 倒计时结束触发取样。邓大军等^[1]、张伟^[2]介绍了时钟控制取样技术原理、作业流程, 通过分析现场应用中遇到的实际问题, 总结了时钟控制取样技术的适用条件和改进方法。电缆实时控制, 取样时携带直读压力计实时监测井下压力温度, 并根据监测数据实时控制取样。李志文等^[3]、任大明等^[4]介绍了电缆实

时控制取样技术的组成、控制原理及应用情况,通过优化作业流程,提高了作业效率和取样成功率。数字钢丝实时控制,具有与电缆实时控制方式相同的实时井下数据监测和实时控制能力。时振东等^[5]介绍了数字钢丝实时控制取样技术组成及控制原理,通过对比机械时钟控制取样技术和电缆实时控制取样技术,总结了数字钢丝实时控制取样技术的优势和特点,并对应用前景做出展望。击穿破裂盘控制,作业时取样器安装在取样器托筒内随 DST 管柱入井,通过井筒加压击穿取样器托筒上的破裂盘控制取样。李茂华等^[6]、林炳南等^[7]介绍了利用钻杆输送,击穿破裂盘控制取样技术的系统组成、基本原理,通过分析现场应用情况,总结了击穿破裂盘控制取样技术的适用条件和注意事项。戴卢军等^[8]对现有井下高压物性取样技术的特点进行了总结,通过取样技术特点的研究分析,优化了探井测试井下取样方案,提高了稠油井取样成功率。许峰等^[9]针对高温含硫凝析气藏取样问题,通过现有取样技术特点的研究分析结合现场应用情况,提出高温含硫凝析气藏取样技术的选择方法。

海洋石油勘探开发高温区块逐渐增多,部分区块测试温度超过 180 ℃。高温取样技术资源的紧缺及取样技术的不足与切实的高温井下取样需求形成现实冲突。首先,海上一些高温区块储量丰厚产量可观,有着迫切的井下取样需求,但作业时间窗

口窄,成本压力高;其次,180 ℃ 以上的取样器资源紧缺,调配周期长、作业成本高;再次,取样控制技术的不足使得问题更为突出。电缆实时控制和数字钢丝实时控制仅满足 150 ℃ 的取样需求。击穿破裂盘方式仅适用于 DST 测试井作业不能用于生产井作业,而且需要测试管柱取出后才能判断是否取样成功。高温机械时钟入井前需要高温预处理,出井后需要重新检修和标定无法重复入井,控制方式被动取样效率低。

为完善高温取样技术,提高取样技术的可控性和适用性,降低海上高温取样成本,填补海上高温井下取样的作业空白,研制了一种满足多次入井需要可以主动控制的高温取样控制器。

1 高温取样控制器设计方案

高温取样控制器具备电缆实时控制取样和运动状态编码控制取样的功能,能够控制斯伦贝谢的 SRS 型、Proserv 公司的 PDS 型和 SPS 型等多个品牌多种型号的取样器。该设计的关键技术是运动状态编码设计和高温电磁铁设计^[10-11]。

1.1 结构与原理

高温取样控制器结构主要包括:上部接头、仪器筒体、数据交互模块、加速度计、高温电磁铁、触发联动装置。运动状态识别高温取样控制器的结构如图 1 所示。

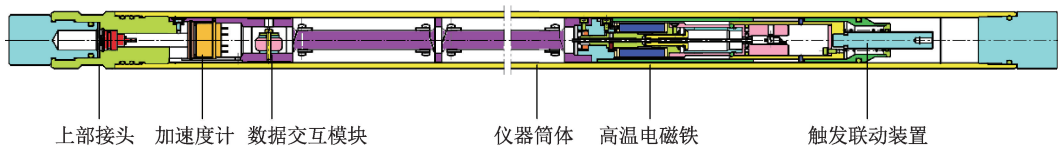


图 1 运动状态识别高温取样控制器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of motion state identification high temperature sampling controller

其中上部接头上端用于连接电缆绳帽、直读取样托筒或供电电池筒,下端连接数据交互模块、加速度计、电磁铁、触发联动装置,并装入仪器筒体内。仪器筒体用于承装保护数据交互模块、加速度计、电磁铁、触发联动装置。数据交互模块用于数据交互和指令的传达,控制电磁铁动作。加速度计用于识别运动状态,通过预定操作形成运动状态编码向数据交互模块发出取样请求。电磁铁用于控制取样联动装置,当数据交互模块发出取样指令时,电磁铁执行指令动作解除触发联动装置的限制。触发联动装置实现联动并完成取样动作。

1.2 取样控制模式

不同载体送入时,高温取样控制器可以选择不同的取样控制模式。电缆送入时,既可以通过地面发送取样指令给取样控制器进行实时取样控制,又可以通过运动状态编码进行主动取样控制;钢丝、钢丝绳、连续油管等送入时,需采取运动状态编码控制取样(见图 2)。

运动状态编码控制时,通过绞车的上提下放完成预定操作即可形成运动状态编码,发出取样指令控制取样器取样。通过多支取样控制器,设置不同的运动状态编码能够一次入井完成不同深度、不同时间的取样任务。

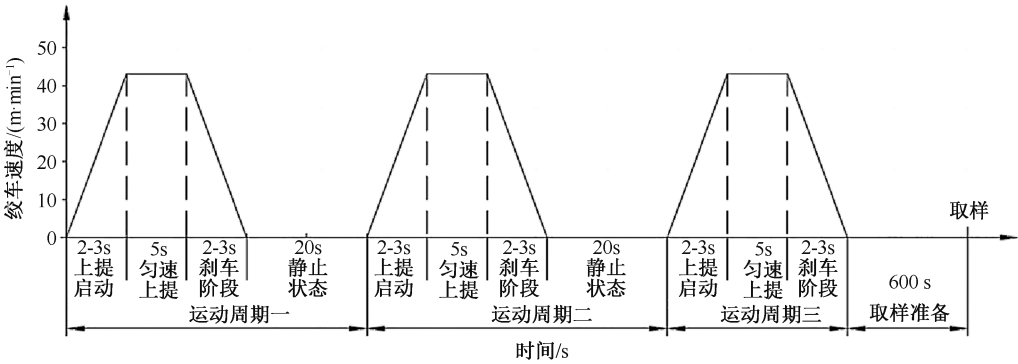


图 2 运动状态编码操作示意图

Fig. 2 Schematic diagram of motion state coding operation

1.3 取样控制器主要参数

- (1)工作温度:200 ℃;
- (2)工作压力:103 MPa;
- (3)设计标准:API 6A;
- (4)适用环境:适用酸性环境。

1.4 主要取样器类型

(1)SRS 取样器是斯伦贝谢公司的一款具有压力补偿功能的高温取样器。其主要由触发机构、空气室、取样室和氮气室四大部分组成(见图 3)。

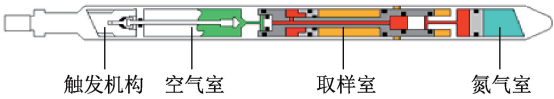


图 3 SRS 取样器结构示意图

Fig. 3 Structural Diagram of SRS Sampler

其中触发机构控制取样器开启;空气室用于存储从取样室驱替进来的置换液;取样室用于存储预制的置换液并在取样结束后存储井下高压物性样品;氮气室内预冲入氮气,取样结束后对取样室施加额外压力用于压力补偿。SRS 取样器适用酸性环境,能够满足压力 103 MPa、温度 200 ℃ 的环境要求,最大外径 44 mm,单支取样容积 600 ml。

(2)SPS 取样器是 PROSERV 公司的一种具有压力补偿功能的取样器。其组成及工作原理与 SRS 取样器相似,只是各个舱室的位置不同。SPS 取样器适用酸性环境,能够满足压力 103 MPa、温度 180 ℃ 的环境要求,最大外径 43 mm,单支取样容积 600 ml。

(3)PDS 取样器是 PROSERV 公司的一种常规取样器,不具备压力补偿功能。主要包括触发控制器、空气室、取样室三部分。PDS 取样器适用酸性环境,能够满足压力 103 MPa、温度 180 ℃ 的环境要求,最大外径 43 mm,单支取样容积 600 ml。

2 关键技术的设计与实验

为了能够实现高温电磁铁控制取样和运动状态编码指令指挥取样控制器的功能,需要进行高温电磁铁和运动状态编码的设计和实验,确保高温取样控制器功能完整且稳定可靠^[12-14]。

2.1 高温电磁铁的设计与实验

(1)高温电磁铁的设计

根据取样控制要求,在常温到 200 ℃ 高温的工作环境中提供不低于 27 N 的吸力。电磁吸力与工作温度和工作电压有着密切联系。电磁铁设计,一方面考虑高温环境以及温度变化对电磁铁的影响;另一方面考虑仪器供电影响。

螺管式电磁阀的经典电磁力计算公式为

$$F = \frac{\mu_0 S d^4 U}{8 \rho^2 (D_1 + D_2)^2 \delta^2} \times 10^6 N \tag{1}$$

式中: F 为电磁力,N; μ_0 为磁导率,H/m; S 为气隙面积, mm^2 ; d 为漆包线直径,mm; D_1 为绕线外径,mm; D_2 为绕线轴直径,mm; δ 为气隙长度,mm, U 为电压,V; ρ 为绕线电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; N 为线圈匝数。

电磁铁吸力 F 大小与线圈电阻有关,线圈电阻随温度变化而变化。

线圈电阻随温度变化规律为

$$R = \frac{T + t}{T + t_0} \times R_0 \tag{2}$$

式中: R 为换算电阻, Ω ; t 为换算温度,℃; T 为电阻温度常数; R_0 为绕线电阻, Ω ; t_0 为绕线温度,℃。

$$R = \rho L / S \tag{3}$$

式中: R 为电阻, Ω ; ρ 为电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; L 为长度,m; S 为横截面积, mm^2 。

由式(1)、式(2)、式(3)可知,随着温度的升高线圈电阻增大,维持 27 N 电磁吸力则需要提高电磁

铁工作电压。电磁铁可以通过电缆直接供电或井下电池组供电,电缆供电时可以方便的提供不同的供电电压,但井下电池组供电时供电电压偏低。电磁铁供电设计中采用了升压电路设计保证电磁铁在不同的温度环境中得到稳定的电压供应。升压电路最高能提供 100 V 的直流电压,有效解决了电池供电电压不足的问题。

(2) 高温电磁铁实验

在常温至 205 ℃ 温度环境下对高温电磁铁进行了实验验证(见图 4)。

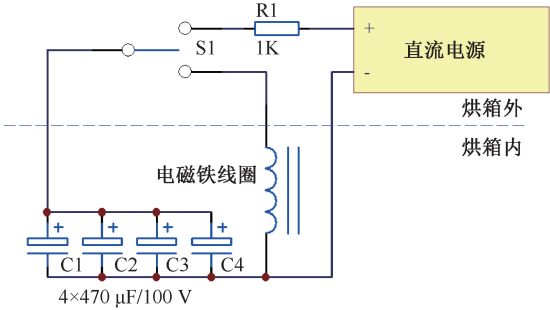


图 4 高温电磁铁实验示意图

Fig. 4 Schematic diagram of high temperature electromagnet experiment

实验采用 21 V 直流电源模拟供电电池,通过烘箱升温模拟高温环境,S1 开关控制升压电路充电和放电。实验时首先通过直流电源向升压电路充电,当充电完成后切换 S1 向电磁铁放电触发电磁铁动作。实验数据见表 1。实验验证了电磁铁的工作性能并测得不同温度下线圈内阻、启动电压数据。

表 1 高温实验数据

Table 1 High temperature experimental data

序号	温度/℃	恒温时间/h	线圈阻值/Ω	启动电压/V
1	20	/	9.2	24
2	60	7	9.5	25
3	120	7	12.4	26
4	180	7	13.6	28
5	200	7	16.8	35
6	205	7	18.6	40

从表 1 可以看出,实验中随着测试温度的升高,线圈内阻增大,升压电路提供的启动电压升高。实验测试最高温度 205 ℃,线圈内阻 18.6 Ω,升压电路提供的启动电压为 40 V,满足电磁铁工作需要。

2.2 运动状态编码设计与实验

(1) 运动状态数据采集实验

采用加速度计识别运动状态,通过绞车的特殊

操作形成运动状态编码并控制取样。运动状态编码实验流程如图 5 所示,电缆携带运动状态识别测试工装入井,地面便携采集系统实时记录采集数据。运动状态编码的设计需要考虑编码的可操作性,即绞车操作人员能够顺利的完成操作形成运动状态编码指令。

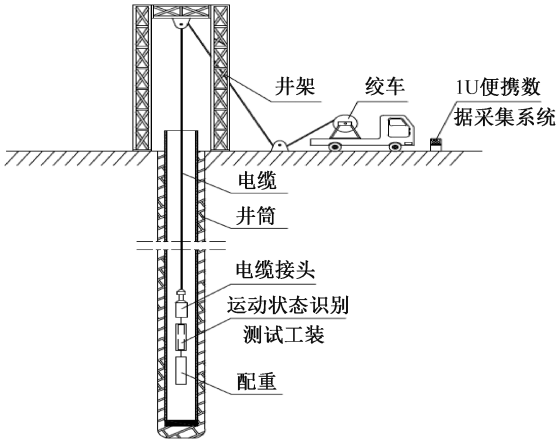


图 5 实验验证示意图

Fig. 5 Schematic Diagram of Test Verification

实验时,操作人员需在规定时间内完成绞车由静止到恒定速度的过程(即启动过程),且恒定速度误差小于 1 m/min;停止时操作人员需在规定时间内将绞车停止(即停止过程)。

实验中发现,启动过程或停止过程完成过快(小于 1 s),加速度计难以捕捉到运动状态的变化,无法形成运动状态编码。

通过反复尝试,启动过程或停止过程在 2~3 s,恒定速度大于 10 m/min 时,开始采集到明显的运动状态变化数据(见图 6)。

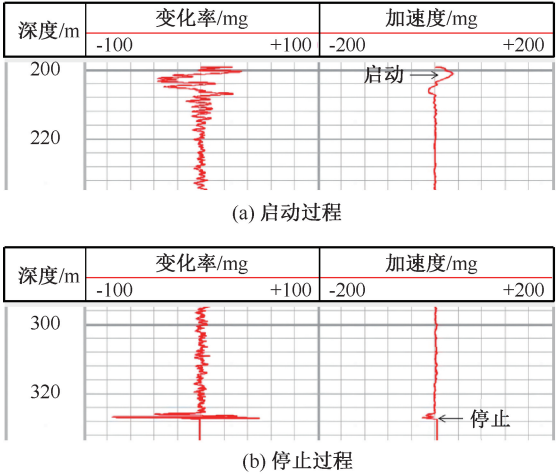


图 6 启动或停止过程在 2~3 s 时的运动状态曲线
Fig. 6 Motion state curve of starting or stopping process in 2~3 s

实验分别在 88.9 mm 油管内(井深 200~300 m)和 73.0 mm 油管内(井深 400~500 m)进行单次启动、停止的上提和下放实验。单次启动和停止的运动状态变化数据如表 2 和表 3 所示。

表 2 运动状态数据(88.9mm 油管段)
Table 2 Motion state data(88.9mm tubing section)

恒定速度/ (m·min ⁻¹)	状态	第一次/mg		第二次/mg		第三次/mg	
		下放	上提	下放	上提	下放	上提
20	启动	24	-11	45	-26	22	-38
	停止	-21	13	-41	21	-30	45
30	启动	70	-69	40	-47	29	-43
	停止	-21	45	-28	23	-35	24
40	启动	/	-45	53	-53	44	-48
	停止	/	51	-36	78	-59	32
50	启动	97	-63	80	-55	62	-59
	停止	-32	55	-21	46	-54	84

表 3 运动状态数据(73.0 mm 油管段)
Table 3 Motion state data(73.0 mm tubing section)

恒定速度/ (m·min ⁻¹)	状态	第一次/mg		第二次/mg		第三次/mg	
		下放	上提	下放	上提	下放	上提
20	启动	56	-20	54	-21	45	-33
	停止	-22	29	-14	20	-15	33
30	启动	47	-50	38	-40	42	-53
	停止	-45	38	-46	27	-50	38
40	启动	50	-60	74	-46	59	-58
	停止	-65	37	-55	29	-53	37
50	启动	110	/	85	-63	54	-34
	停止	-46	39	-75	71	-73	59

单次启动和停止实验按照 20 m/min、30 m/min、40 m/min、50 m/min 的恒定速度,每个速度分别记录三次上提和三次下放的启动过程和停止过程的运动状态变化数据。

(2)运动状态编码实验

考虑作业中的实际井况和操作人员的不同,运动状态编码实验过程中不要求严格控制恒定

时的速度,启动过程结束速度在规定范围保持恒定即可。运动状态编码实验测试曲线如图 7 所示。

实验分别按照恒速范围 20~30 m/min 和 40~50 m/min,不限定井段深度进行连续启动、停止的上提和下放实验,获得运动状态变化数据(见表 4)。

表 4 连续运动状态数据
Table 4 Continuous motion state data

恒速范围	状态	第一次/mg		第二次/mg		第三次/mg	
		下放	上提	下放	上提	下放	上提
20~30 m/min	启动	84	-34	64	-23	33	-28
	停止	-100	82	-116	99	-90	37
	启动	32	-48	37	-28	42	-22
	停止	-68	82	-102	122	-114	27
	启动	48	-32	44	-29	35	-34
	停止	-80	102	-112	82	-114	47
40~50 m/min	启动	84	-52	63	-38	50	-70
	停止	-118	148	-104	152	-108	125
	启动	70	-58	79	-53	97	-78
	停止	-125	136	-170	145	-135	142
	启动	70	-49	71	-52	92	-67
	停止	110	114	-148	133	-180	144

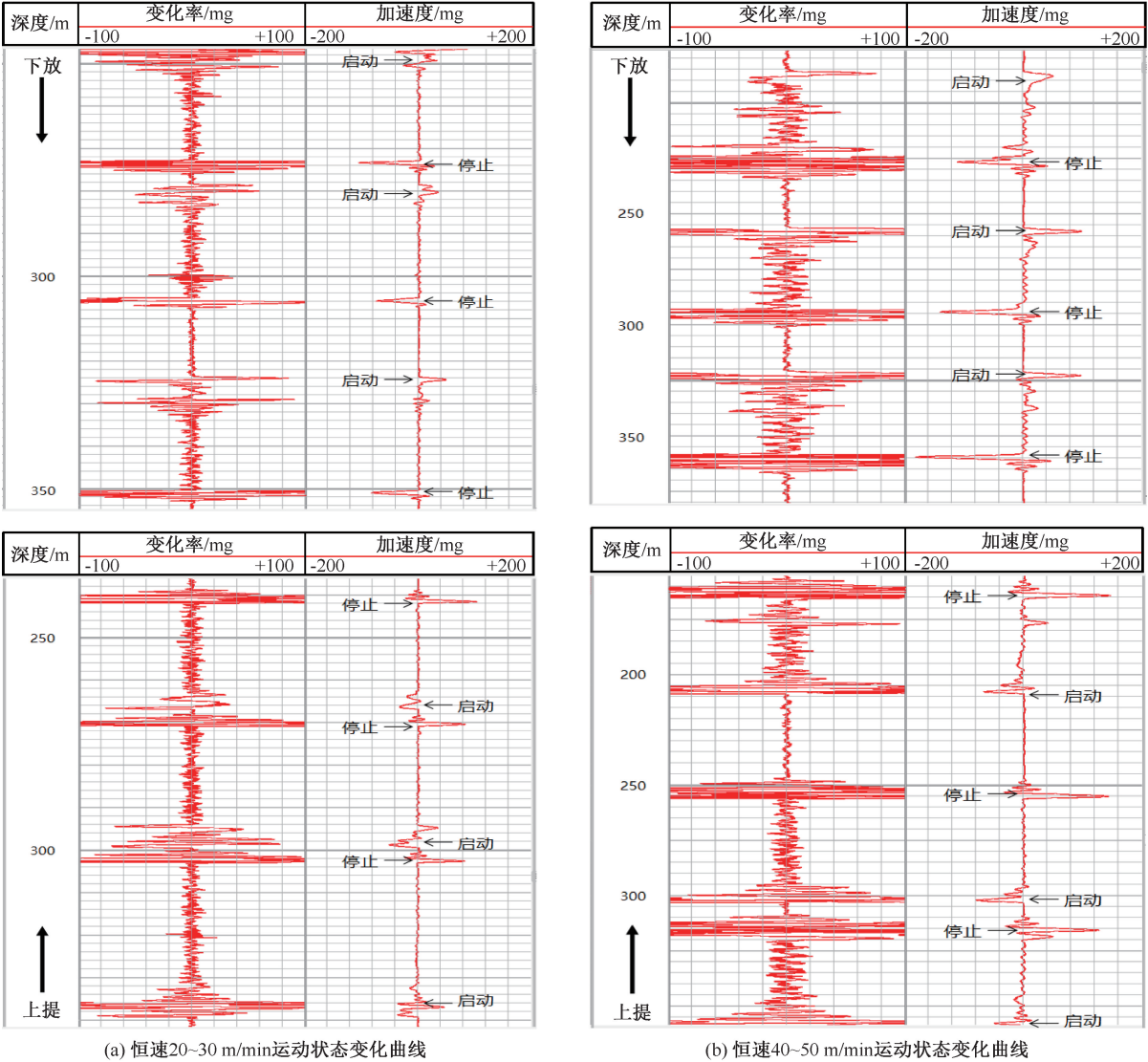


图 7 连续运动状态变化曲线
Fig. 7 Continuous motion state change curve

实验显示,恒定速度 20 ~ 30 m/min 和 40 ~ 50 m/min 所获得的连续多次的运动状态数据,均能满足运动状态编码要求。可以确定实际操作过程中,启动或停止过程持续 2 ~ 3 s,恒定速度 20 ~ 50 m/min,可以形成有效的运动状态编码数据。降低恒定速度要求,极大的降低了操作人员的操控难度,同时也更能够适应不同的井况。

3 现场应用

2022 年 8 月 24~25 日,高温取样控制器在某井进行了实验性应用。该井采用 Y 型合采管柱,自喷生产,井口油压 2.5 MPa,油产量 74.65 m³/d,气产量 0.506 4×10⁴ m³/d,水产量 0.32 m³/d。实验主要分为四步:通井、流压梯度测试、电缆送入取样实验和钢丝送入取样实验。通井时采用 58 mm 通井规,

通井至 2 272 m。然后采用实时监测方式获得 2022 年 8 月 24 日井下压力温度数据(见图 8)。图中红色为压力曲线,蓝色为温度曲线,测试中最高压力 19.374 MPa,最高温度 99.04 ℃。

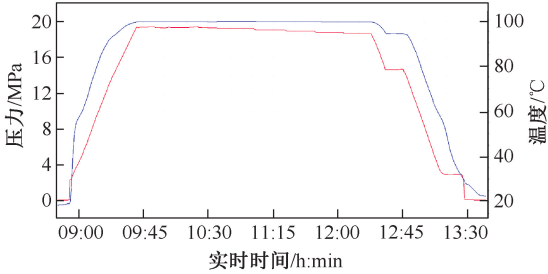


图 8 压力温度曲线
Fig. 8 Pressure and temperature curve

测试过程中在油层段选取 5 个不同深度进行停点监测,具体压力梯度数据如表 5 所示。

表 5 压力梯度测试数据
Table 5 Pressure gradient test data

斜深/m	垂深/m	压力/MPa	压力梯度/ (MPa/100 m)
2 266. 01	2 219. 49	19. 224	0. 971
2 246. 01	2 199. 89	19. 034	0. 847
2 226. 01	2 180. 29	18. 868	0. 846
2 209. 01	2 163. 63	18. 727	0. 684
2 196. 01	2 150. 69	18. 639	

根据表 5 压力梯度数据,可以初步判断,斜深 2 196~2 209 m 可能存在脱气现象,不符合取样要求;斜深 2 209~2 246 m 主要为油相,无明显脱气现象,比较符合取样要求;斜深 2 246~2 266 m 可能为油水过渡带。

3.1 电缆送入取样实验

电缆送入实验由两支高温取样控制器分别控制两支取样器。上面一组携带 SPS 取样器采用实时取样控制在井下 2 215 m 处完成取样,下面一组携带 SRS 取样器采用两次连续下放和两次连续上提的运动状态编码控制,实时取样 1 h 后完成取样。由于现场条件受限,在恒温 60 ℃ 采用定容泄压方法做泡点回归(见图 9)。

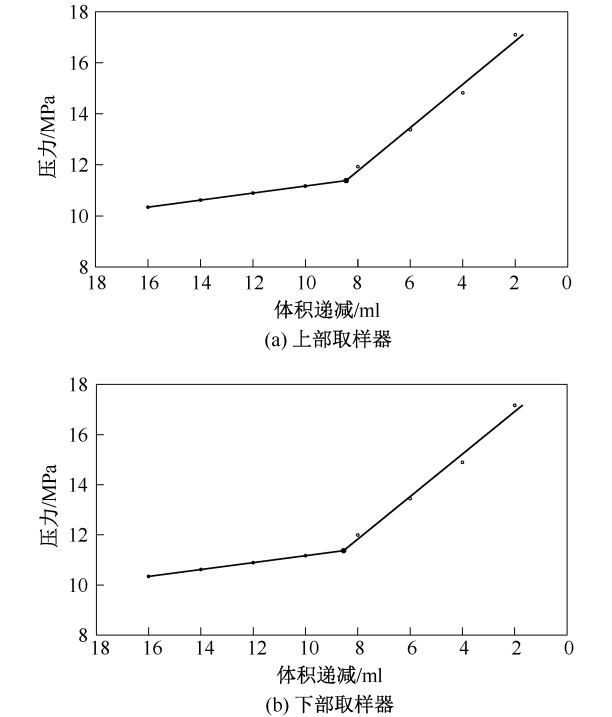


图 9 电缆送入泡点交会图
Fig. 9 Cross plot of bubble point with cable running in
根据上部样品回归原油泡点压力为 11. 384 MPa, 根据下部样品回归原油泡点压力为 11. 370 MPa。

3.2 钢丝送入取样实验

钢丝送入实验由两支高温取样控制器分别控

制两支取样器。上面一组携带 SPS 取样器,采用连续三次下放一次上提编码方式在 2 235 m 处完成取样。下面一组携带 SRS 取样器,采用两次连续下放和两次连续上提编码方式在 2 266 m 完成另一组取样。下面一组取样深度处于油水过渡带,取得的样品为油水混合液体,符合油水过渡带的特征(见图 10)。



图 10 油水混合样品
Fig. 10 Oil water mixture sample

由于现场条件受限,另外一支样品在恒温 60 ℃ 采用定容泄压方法进行了泡点回归(见图 11),回归原油泡点压力为 11. 357 MPa。

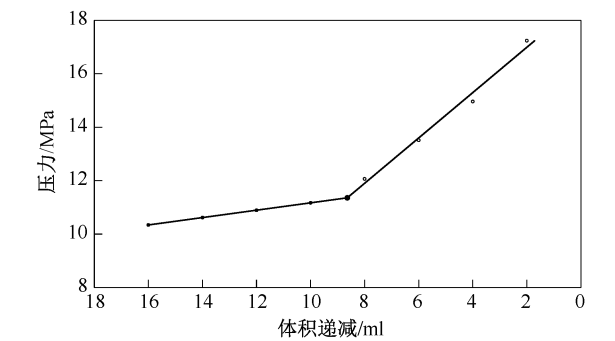


图 11 钢丝送入泡点图
Fig. 11 Cross plot of bubble point with slick line running in

三支样品回归获得的泡点压力误差小于 1%, 符合现场泡点回归要求,样品合格。

4 结论

(1) 高温取样控制器可以通过运动状态编码指令主动控制取样。多支控制器携带多组取样器采用不同的运动状态编码指令,能够一次入井完成不同深度、不同时间的取样任务。同时高温取样控制器还可通过电缆送入实时控制取样。

(2) 高温取样控制器采用 API 6A 标准设计,满

足温度 200 ℃、压力 103 MPa 以及高硫化氢等特殊环境取样要求,能够控制多种型号的取样器。

(3)高温取样控制器丰富并完善了高温取样技术,提高了井下取样的可控性和适用性,为降低海上高温取样成本,填补海上高温井下取样的作业空白,提供了技术保证,但其耐高温性能及复杂井况的应用效果尚需要更多的高温井例验证。

致谢:本论文在撰写过程中得到中法渤海地质服务有限公司的支持,通过保密审查并同意本文公开发表,在此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] 邓大军,齐彦强,杜庆召,等. PDS 高压物性取样及转样应用分析[J]. 油气井测试,2008,17(4):43-44.
DENG Dajun, QI Yanqiang, DU Qingzhao, et al. Application and analysis of PVT sampling and transfer by positive displace sampler[J]. Well Testing, 2008, 17(4): 43-44.
- [2] 张伟. 高压物性取样技术在雅达油田的成功应用[J]. 油气井测试,2016,25(5):68-70.
ZHANG Wei. Successful application of pvt technology in Yada Oilfield[J]. Well Testing, 2016, 25(5): 68-70.
- [3] 李志文,李春生,周志江. PVT 电控式高压物性取样研究[J]. 油气井测试,2002,11(6):51-53.
LI Zhiwen, LI Chunsheng, ZHOU Zhijiang. A study on electric control PVT investing set[J]. Well Testing, 2002, 11(6): 51-53.
- [4] 任大明,许峰,李大亮. 电缆地面触发 P. D. S. 取样器技术的应用[J]. 石化技术,2017,24(3):81-83.
REN Daming, XU Feng, LI Daliang. Application of cable triggering P. D. S. technology[J]. Petrochemical Industry Technology, 2017, 24(3): 81-83.
- [5] 时振东,李大亮. 新实时取样技术的研究与前景展望[J]. 化工管理,2018,485(14):77-78.
SHI Zhendong, LI Daliang. Research and prospect of new real-time sampling technology[J]. Chemical Management, 2018, 485(14): 77-78.
- [6] 李茂华,罗承跃,吴军. RD 取样器及其应用[J]. 油气井测试,2003,12(4):67-68.
LI Maohua, LUO Chengyue, WU Jun. RD sampling apparatus and its application[J]. Well Testing, 2003, 12(4): 67-68.
- [7] 林炳南,梁昕,赵洪绪. 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. Technique of single-phase high-pressure down-hole sampling by pressure-controlled and its application[J]. Well Testing, 2014, 23(3): 61-63.
- [8] 戴卢军,杨子,高科超,等. 渤海油田探井测试井下 PVT 取样技术进展研究及改进[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.
- [9] 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):21-25.
XU Feng, ZHAO Hongtao. Discussion on sampling technology of high-temperature sulfur-bearing condensate gas reservoir[J]. Well Testing, 2019, 28(4): 21-25.
- [10] 朱黎,李民,张友义,等. 高温高压对机械仪器仪表精度及稳定性的影响[J]. 油气井测试,2008,17(3):72-74.
ZHU Li, LI Min, ZHANG Youyi, et al. Influence HT and HP on Precision and Stability of Mechanical Instrument[J]. Well Testing, 2008, 17(3): 72-74.
- [11] 陈雪勇,刘兴中,陈强. 一种高温高压燃气电磁阀的设计与研究[J]. 现代机械,2017,200(04):40-43.
CHEN Xueyong, LIU Xingzhong, CHEN Qiang. Design and research of a gas solenoid valve working in high temperature and high pressure[J]. Modern Machinery, 2017, 200(04): 40-43.
- [12] 陈雪勇,谭耳,陈强. 小型高温燃气电磁阀电磁推力的设计与仿真[J]. 现代机械,2016,196(06):55-58.
CHEN Xueyong, TAN Er, CHEN Qiang. Design and simulation of electromagnetic thrust of small high temperature gas solenoid valve[J]. Modern Machinery, 2016, 196(06): 55-58.
- [13] 王晶晶,朱晓萍. 某型电磁阀高温启动电压特性研究[J]. 现代机械,2021,223(03):21-24.
WANG Jingjing, ZHU Xiaoping. Characteristics of high-temperature starting voltage of a certain solenoid valve[J]. Modern Machinery, 2021, 223(03): 21-24.
- [14] 胡智敏,蔡志远,马少华. 高温阀用电磁机构温度场分析与结构参数优化[J]. 电机与控制应用,2021,48(2):57-63.
HU Zhimin, CAI Zhiyuan, MA Shaohua. Temperature field analysis and structural parameter optimization of electromagnetic mechanism for high temperature valve[J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(2): 57-63.

编辑 刘振庆

第一作者简介:王亮,男,1979 年出生,工程师,2014 年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业,现从事试井技术相关工作。Email:wangliang@cblgc.com。通信地址:天津经济技术开发区信环西路 19 号天河科技园 1 号楼 3 层中法渤海地质服务有限公司,邮政编码:300457。