

非常规龙马溪组和牛蹄塘组页岩取心技术

曹华庆,高长斌

(中国石化华东石油工程公司六普钻井公司,江苏 镇江 212003)

摘要:页岩气井钻探过程中获取高质量的岩心样本是进行储层评价的重要前提。针对我国南方页岩气井目的层取心进尺长、收获率低和常规取心工艺效率差等难题,在分析取心层位地质特点的基础上,开展了取心工具、取心钻头、取心参数及取心工艺等方面的优化和改进。通过多口页岩气井牛蹄塘和龙马溪组的取心实践,平均取心收获率大于98%,最高机械钻速达到9 m/h。现场应用表明,该技术能有效提高取心收获率和机械钻速,成功解决了页岩气井中取心施工存在的各种问题,同时也为页岩气井的后期开发提供了重要支持。

关键词:非常规;页岩气;取心;机械钻速;龙马溪组;牛蹄塘组

中图分类号:TE92 **文献标识码:**A

Shale coring technology in Longmaxi formation and Niutitang formation of unconventional shale gas field

Cao Huaqing and Gao Changbin

(Liupu Drilling Company of East China Petroleum Engineering Company, SINOPEC, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China)

Abstract: During the drilling process of the shale gas wells, obtaining the high quality core samples is an important prerequisite for the reservoir evaluation. Aiming at the problems such as the long coring footage, the low core recovery and the poor efficiency of the conventional coring technology, and based on the analysis of the geological characteristics of the coring layer, we optimized and improved the tools, the bit, the parameters and the technology. In the field application of the multiple shale gas wells, the average core recovery was more than 98 % and the penetration rate was up to 9 m/h. The results showed that this technology had wonderful performance in improving the core recovery and the penetration rate, and successfully resolved the various problems in the process of the coring in the shale gas wells. In the meantime it provided important support for the later development of the shale gas wells.

Key words: unconventional, shale gas, coring, penetration rate, Longmaxi formation, Niutitang formation

1 页岩层位地质特点和页岩取心的难点

1.1 页岩层位地质特点

川东南、渝东南、湘保靖区块非常规页岩气井目的层的取心层位一般为下古生界地层,主要为志留系下统的龙马溪组、奥陶系上统五峰组的页岩和寒武系下统牛蹄塘组的页岩。川东南、渝东南、湘保靖

区块页岩的成分不尽相同。龙马溪组以渝东南地区彭页1井为例,根据岩心X—射线衍射测试结果,龙马溪的黏土矿物的混合类型为伊利石、有序的伊/蒙混层和绿泥石,其中伊利石含量相对较多,平均含量为54%左右,伊/蒙混层次之,平均含量36%。且随着埋深的增加,伊/蒙混层不断向伊利石进行成岩转化,绿泥石的含量逐渐降低^[1]。牛蹄塘组以渝东南地区西页1井为例,牛蹄塘组页岩中硅质含量高,占47%~64%,碳酸盐岩含量略高,占10%~25%,泥质含量较低,占10%~30%,孔隙度在0.6%~

收稿日期:2017-04-06。

第一作者简介:曹华庆(1972—),男,高级工程师,从事油田钻井管理及技术指导。

3.1%,含气量较低在0.2~0.9 m³/t,裂缝不发育^[2-4]。

1.2 目的层井段页岩取心的难点

从多口井取心的实践总结和分析,页岩气井地层取心主要存在以下难点:

- 1) 探井取心层位不准,取心钻头与非页岩地层不配伍,导致机械钻速慢、取心率低。
- 2) 取心过程中岩心破碎、进筒困难、高角缝破裂、导致斜楔断裂,形成楔心现象;页岩水化膨胀,形成堵心。
- 3) 取心层位含石英砂岩、硅质岩,地层可钻性差,机械钻速低,取心钻头在同一位置反复研磨岩心,导致岩心直径变细,拔心时,取心筒内缩径套无法抓牢岩心,导致丢心,影响取心收获率。
- 4) 取心层位岩性不均质,取心钻头齿崩损严重,寿命低,影响回次进尺。
- 5) 连续取心期间井底易留有余心,导致下回次取心时引心困难。

2 取心工具的选型和改进

2.1 取心筒的选择

现场一般使用常规川8-3型和川7-5型两种取心筒。川8-3型为常规油气投球式的取心筒;川7-5型为四川钻采工艺研究院取心中心为满足中国石油、中国石化、中海油在重庆“12·23事故”后,要求取心时满足井控安全,防止钻杆内井喷的需要研制的新型取心筒。

川7-5型取心工具在取心作业时不需要投球,可以在钻具组合的下部安装止回阀,满足“取心作业时防止钻杆内井喷”的井控要求^[5]。川7-5型取心筒,使用 $\phi 215.9$ mm取心钻头、岩心直径 $\phi 101$ mm,双筒最大取心长度18.50 m,可以组合使用为单筒、双筒、三筒取心。

2.2 取心钻头的选择和改进

根据取心和测井资料显示,龙马溪和牛蹄塘组储层硅质含量高(表1)、泥质含量较低,孔隙度较低,泥页岩较为致密,取心过程中极易发生磨心,因此,选择合适的钻头是保证取心机械钻速和取心率的关键^[6]。湘保靖区块的保页2井先期尝试使用GC315取心钻头(图1),钻头进尺少,机械钻速低,切削齿崩损、磨损严重。主要是由于地层坚硬、致密,对切削齿冲击载荷很大,常规GC315采用单排齿设计稳定性稍差,在硅质含量高的页岩层取心,切削齿承受的冲击载荷大,容易造成切削齿先期崩损。

经现场实钻后取心钻头磨损分析,进一步改进取心钻头,并在渝东南区块的西页1井进行试验,取得成功,西页1井全井取心率为100%,改进后定型为GC315M型。



图1 GC315取心钻头
Fig. 1 Core bit: type GC315

表1 西页1井牛蹄塘组测井解释
Table 1 Well log interpretation of well Youye-1 in Niutitang formation

层号	顶深/ m	底深/ m	厚度/ m	常规测井			ECS测井					ELAN成果						总气含量/(m ³ ·t ⁻¹) (地层压力系数=1.1)		
				自然伽马/ API	深电阻率/ ($\Omega \cdot m$)	密度/ (g·cm ⁻³)	中子, %	硅质含量, %	黏土含量, %	碳酸盐含量, %	黄铁矿含量, %	有效孔隙度,%			TOC,%					
												最大	最小	均值	最大	最小	均值	最大	最小	均值
1	3 798.0	3 805.4	7.4	177.0	0.4	2.7	11.8	47.3	25.9	22.6	3.3	3.0	0.5	1.7	6.8	2.3	5.6	0.59	0.20	0.49
2	3 805.4	3 813.2	7.8	269	0.5	2.7	13.1	57.8	25.1	10.3	5.4	2.8	0.6	1.3	5.0	2.7	4.1	0.44	0.23	0.36
3	3 813.2	3 839.8	26.6	550.0	0.2	2.6	13.1	64.6	19.3	10.3	5.2	3.1	0.6	2.0	10.5	4.8	7.9	0.91	0.42	0.69
4	3 839.8	3 845.0	5.2	484.0	0.8	2.7	9.9	49.4	23.8	20.6	3.1	2.6	0.2	1.4	7.5	2.3	4.7	0.65	0.20	0.41
5	3 871.0	3 880.7	9.7	187.0	3.8	2.7	8.6	57.5	12.3	24.6	4.8	2.2	0.4	1.0	5.1	1.0	2.7	0.44	0.10	0.24

改进后的GC315M钻头(图2)具有以下个性化的特征:

1) 在原有8刀翼PDC取心钻头的基础上进行改进,适当增大切削齿后倾角,增强钻头的抗崩能力;冠部改进成抛物线;中等密度布齿,确保钻头能在中至硬地层,及中等抗压强度和研磨性夹层中获得更好的机械钻速。

2) “G”系列专利切削齿,巧妙地有害应力从齿的边缘移到易于吸收高载荷的区域,减少切削齿边缘破裂的机率,使切削齿维持长时间自锐和钻进速度。

3) GC315M钻头采用PDC齿和巴拉斯齿混合布置结构(图2),在PDC切削齿后面脊镶式布置巴拉斯,采用脊镶式高密度布齿,适应硬地层。减小了PDC切削齿的比钻压,起到辅助破岩,延长钻头使用寿命的作用。

4) 设计加强型外保径,提高了保径的耐磨性,使之与钻头的高寿命相匹配;内天然金刚石规径,水道设置在内规径处,使规径齿得到充分冷却和清洗。

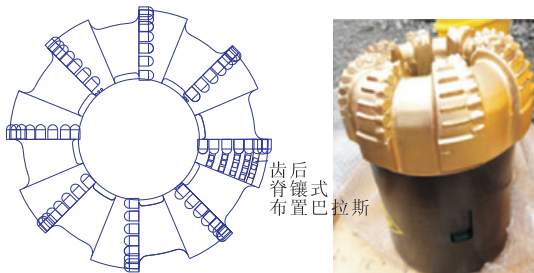


图2 改进后的GC315M

Fig. 2 Improved core bit: type GC315M

3 取心工具组合和取心参数的配备

BHA: $\phi 215.9\text{mm}$ (GC315M)取心钻头+川7-5型取心筒(单筒、双筒)+ $\phi 165\text{mm}$ 钻铤 $\times 12$ +浮阀+配合接头+ $\phi 127\text{mm}$ 加重钻杆。

视井下情况,在两节取心筒之间加入 $\phi 212\text{mm}$ 左右的稳定器,以增加取心筒的稳定性,防止取心外筒在钻压作用下发生弯曲失稳^[6-8]。一方面避免钻头偏磨导致单筒进尺降低,另一方面防止内外筒发生摩擦,导致已经进入内筒的岩心破碎受损以及钻具事故。理论计算取心外筒增加稳定器后,扶正器安

装位置详见表2,能够显著提高外筒临界钻压,正常钻压范围内可以避免外筒弯曲,保证取心筒稳定。

表2 稳定器对取心筒稳定性的影响

Table 2 Impacts of stabilizer on stability of core barrel

稳定器情况	临界钻压/kN
取心筒两端加稳定器	384.4
取心筒上端加稳定器	182.9
取心筒下端加稳定器	110.3
不加稳定器	49.0

临界钻压与取心外筒长度回归公式: $W_c=1\ 463 L^{-1.97}$,回归的曲线关系(图3)近似幂函数关系。取心筒越长,其一次弯曲临界钻压越低,取心筒越容易发生弯曲,稳定性越差。例如单筒取心时,其一次弯曲临界钻压为190 kN,如果换成双筒取心临界钻压就下降到50 kN左右。因此,在使用双筒或三筒取心筒取心作业时,必须在适当的位置加入稳定器,否则取心筒会发生失稳。

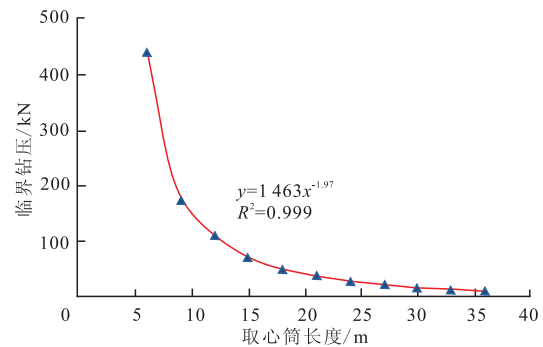


图3 取心筒长度对取心筒稳定性的影响

Fig. 3 Impacts of core barrel length on stability of core barrel

临界钻压与取心转速关系(图4)回归公式: $W_c=-0.02 n^2-0.001 n+15.56$ (n 为转速, r/min),为近二次函数关系,转速越高,取心筒稳定性越差。由于双

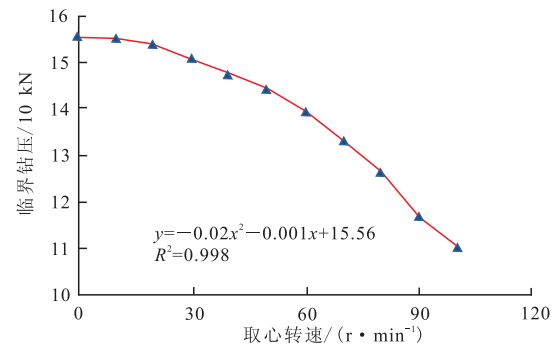


图4 取心转速对取心筒稳定性的影响

Fig. 4 Impacts of core rotation rate on stability of core barrel

长筒取心外筒较长,容易失去稳定,所以避免同时采取高钻压和高转速,根据钻压施加情况,转速采取40~70 r/min。

目前现场优化的取心参数:引心钻压10~20 kN;正常取心钻压50~60 kN/转盘转速60~65 r/min,排量18~20 L/s(例如,鄂阳页1井,井深3 000 m,直井,正常取心时顶驱扭矩值在2.5~10 kN·m波动。堵心时顶驱显示扭矩在 4.0 ± 0.2 kN·m)。

4 取心遇到的复杂情况及解决措施

4.1 探井取心层位不准,取心钻头与地层不配伍

一方面由于探井的地质资料相对较少,地层判断存在认知困难^[9-10];另一方面出于页岩气井探井对地质资料的要求,经常会出现非目的层取心,以确定地层的情况。现场要备用针对白云岩、高含硅泥岩的取心钻头。

4.2 井底不干净

井下有钻头掉齿;地层含有硅质、黄铁矿、燧石等(图5)。取心之前,要尽量保持井底干净,发现地层中有硅质、黄铁矿、燧石的成分,需要调整取心钻头的类型和取心参数。



图5 牙轮断齿和地层中含黄铁矿

Fig. 5 Broken teeth of cone bit and pyrite contained in formation

4.3 堵心

堵心易导致进尺不高,不盲目追求进尺,发现取心钻时突然变慢,需要对各种地面仪表数据参数及时分析,尤其是钻头扭矩的分析和对比。分析清楚情况,查明原因后及时起钻,防止破碎岩心或楔形岩心造成的堵心(图6),造成磨心,确保取心率。

工程上采取适当提高钻井液比重,提高钻井液的抑制性,优化钻井参数的作业措施。



图6 破碎和楔形岩心

Fig. 6 Broken core and wedge core

4.4 余心

井底余心分为:未割断的余心(图7)和断落的自由余心(图8)。由于页岩层取心一般为连续取心,井底可能存在余心。

取心操作上可以将上回次井底未割断的余心,完整地抓取,提高全井取心率。现场操作时要分析上回次取心率的情况,判断井底是否存在余心。如井下确实存在余心,取心前循环和引心的操作要制定详细的操作规程。保持清醒的判断,有耐心,逐步引心,确保取心率和进尺。井底留有余心较多时,引心一般比较困难,需要长时间有耐心地引心,并且引心钻压不能提高。



图7 井底未割断的岩心

Fig. 7 Intact core in bottom hole



图8 井底自由断心

Fig. 8 Free core in bottom hole

4.5 取心层位不特定

探井钻探过程中,为确定地层层位或地层岩性,经常需要机动取心,机动取心层位一般为非页岩或泥岩层。白云岩压实程度高且可钻性差,导致取心钻头切削齿崩损,且存在进心困难、岩心易碎等现象,加之钻头长时间承受复杂载荷,导致钻头流道出现从内向外的裂纹;普通GC315M型号取心钻头不适合白云岩地层取心。

以牛蹄塘组和陡山沱组为目的层的页岩气井的机动取心以白云岩为主,普通的GC315M型号的取心钻头由于其特殊的设计,抗冲击性稍弱,不适合白云岩地层取心。

通过对白云岩的岩性分析和对GC315M型取心钻头的改进,研制了GC315M-2型取心钻头(图9),经多口井试验,满足白云岩地层的取心要求,机械钻速达到1.5~2.5 m/h。

1) 有针对性地对切削齿布置进行优化,适当增加内径处切削齿数量。

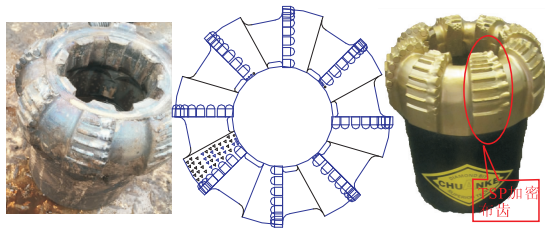


图9 GC315M-2型取心钻头
Fig. 9 Core bit: type GC315M-2

2) 增加鼻部布齿排数,在两排巴拉斯齿中间再增加一排巴拉斯齿,提高使用寿命。

3) 在不影响钻头排屑的情况下,增加刀翼宽度,进一步加大TSP布齿密度。增强钻头对碳质泥岩、页岩、白云岩等复杂地层的适应能力,牺牲部分机械钻速,延长了钻头使用寿命。可以解决白云岩地层的取心问题。

5 现场应用

近年来,在川东南、渝东南、湘保靖区块页岩气井的施工中使用改进型GC315M型取心钻头配合川7-5型取心筒双筒取心,平均机械钻速在3 m/h左右,最高机械钻速达到9.00 m/h,解决了非常规页岩气井目的层页岩取心遇到的困难,同时满足了地质方面对资料录取和工程方面对钻杆内防喷的井控要求。表3为近年来使用该钻头在牛蹄塘和龙马溪组地层取心取得的成果。

表3 页岩地层取心现场应用情况

Table 3 Field application of shale formation coring

井号	取心段/m	进尺/m	心长/m	收获率,%	机械钻速/(m·h ⁻¹)	备注/目的层
保页2井	2 845.76 ~ 3 177.66	321.90	316.85	98.43	2.70	连续取心/牛蹄塘
酉页1井	3 668.67 ~ 3 869.24	139.95	139.95	100	2.92	不连续取心/龙马溪
隆页1井	2 762.74 ~ 2 847.81	85.07	85.07	100	4.20	连续取心/龙马溪
鄂阳页1井	3 013.00 ~ 3 166.00	153.00	152.80	99.8	5.80	连续取心/牛蹄塘
焦页87-3HF	3 635.00 ~ 3 653.00	18.00	18.00	100	9.00	最高机械钻速/龙马溪

6 结论与建议

1) 改进型GC315M钻头配合川7-5型取心筒在页岩地层取心,双筒取心可以满足机械钻速、取心率的要求,同时还提高了综合时间利用率。

2) 页岩气井页岩层连续取心,要根据前一次取心的取心率、拔心情况,注意判断井下余心情况,对井下自由的余心和未拔断的余心采取不同的处理方法。

3) 对于采用三筒取心,要在取心外筒合适的位置连接相应尺寸的稳定器,以增加取心筒的稳定性。

4) 改进型GC315M-2取心钻头适合白云岩、高含硅页岩地层的取心。

参考文献

[1] 靳雅夕,蔡潇,袁艺,等.渝东南地区志留系龙马溪组页岩黏土矿物特征及其地质意义[J].中国煤炭地质,2015,27(2):21-24.

[2] 王兰生,廖仕孟,陈更生,等.中国页岩气勘探开发面临的问题与对策[J].天然气工业,2011,31(12):119-122.

[3] 李庆辉,陈勉,金衍,等.页岩气储层岩石力学特性及脆性评价[J].石油钻探技术,2012,40(4):17-22.

[4] 据宜文,卜红玲,王国昌.页岩气储层主要特征及其对储层改造的影响[J].地球科学进展,2014,29,(4):492-506.

[5] 雷云军,王朝普,黄名召,等.川7-5型取心工具在青海跃灰101井的应用[J].青海石油,2006,24(1):78-80.

[6] 梁海明,裴学文,赵波.页岩地层取心技术研究及现场应用[J].石油钻探技术,2016,44(1)39-43.

[7] 姜伟.水平井及大斜度井下部钻具组合的弹性稳定性[J].石油机械,1995,23(11):32-37.

[8] 李子丰,梁尔国.钻柱力学研究现状及进展[J].石油钻采工艺,2008,30(2):1-8.

[9] 孙少亮,尹家峰.JH-1井取心实践与认识[J].石油钻采工艺,2012,34(5):115-117.

[10] 孔志刚,于希.辽河油田古潜山储层钻井取心技术[J].石油钻探技术,2014,42(3):50-54.

(编辑 尹淑容)