

# 页岩气地质调查井小口径绳索取心钻探技术分析

张强, 战启帅, 张文良, 赵东生, 李森

(山东省鲁南地质工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局第二地质大队), 山东 济宁 272100)

**摘要:**小口径绳索取心钻探技术在页岩气地质调查井中具有不可替代的优势,同时也存在较大的局限性。结合小口径绳索取心工艺在10余口页岩气调查井的应用情况,从地质条件、技术要求、设备及配套机具等方面归纳总结了施工中的难点,从井身结构、设备配置、取心工艺、泥浆体系、复杂情况预防等方面提出了优化方案。依据优化后的施工技术措施,在后续施工的页岩气调查井中取得了良好的效果,岩心采取率保持在97%以上,台月进尺超过了400 m,复杂发生频次控制在2次以下。对下一步小口径页岩气调查井施工具有一定的借鉴意义。

**关键词:**页岩气地质调查;页岩气井;小口径钻探;绳索取心钻探;井身结构

**中图分类号:**P634; TE24 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2022)05-0072-08

## Application of small diameter wire-line core drilling in shale gas geological wells

ZHANG Qiang, ZHAN Qishuai, ZHANG Wenliang, ZHAO Dongsheng, LI Sen

(Shandong Lunan Geological Engineering Survey Institute (The Second Geological Brigade of Shandong Geological Survey Bureau), Jining Shandong 272100, China)

**Abstract:** Small diameter wire-line coring has irreplaceable advantages in shale gas geological survey wells, but also has major limitations. In regard to the application of small diameter wire-line coring technology in more than 10 shale gas investigation wells, this paper sums up the difficulties from geological condition, technical requirements, equipment, and supporting equipment, and put forward the optimization scheme from the aspects of wellbore structures, equipment configuration, coring technology, mud system and incident prevention. With the optimized drilling measures, good results have been achieved in the following shale gas investigation wells with the core recovery rate above 97%, the rig-month footage exceeding 400m, and the incident frequency below 2 times. It can be used as reference for drilling of future small-diameter shale gas investigation wells.

**Key words:** shale gas geological survey; shale gas wells; small diameter drilling; wire-line coring; wellbore structure

## 0 引言

页岩气是指赋存于以富有机质页岩为主的储集岩系中的非常规天然气,是连续生成的生物化学成因气、热成因气或二者的混合<sup>[1]</sup>。我国页岩气储量丰富,页岩气地质资源量为 $(80.45\sim 144.5)\times 10^{12}$  m<sup>3</sup>,技术可采资源量为 $(11.5\sim 36.1)\times 10^{12}$  m<sup>3</sup>,具有巨大的开发潜力<sup>[2]</sup>。

我国页岩气勘探开发起步较晚,但是经过十多

年的研究与发展已经初具规模<sup>[3-4]</sup>。在页岩气有利目标区的优选和资源量评价上,需要通过实施大量的调查井获取岩心实物资料来实现。目前,小口径绳索取心钻探技术以其较低的施工成本、较短的施工周期、较小的环境影响以及高效的取心技术,成为页岩气地质调查井的首选。小口径绳索取心工艺主要应用于地质找矿,直接应用于页岩气等能源勘探存在诸多不足和需要改进之处,经过科研工作

收稿日期:2022-06-08; 修回日期:2022-07-29 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.05.010

第一作者:张强,男,汉族,1991年生,工程师,勘查技术与工程专业,主要从事钻探生产技术与管理工作,山东省济宁市兖州区九州中路107号,1327107863@qq.com。

引用格式:张强,战启帅,张文良,等.页岩气地质调查井小口径绳索取心钻探技术分析[J].钻探工程,2022,49(5):72-79.

ZHANG Qiang, ZHAN Qishuai, ZHANG Wenliang, et al. Application of small diameter wire-line core drilling in shale gas geological wells[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 72-79.

者和生产一线人员共同努力,在短短几年的时间里,已形成了一套完整的页岩气地质调查井施工工艺体系。

## 1 页岩气地质调查井施工难点

### 1.1 地质条件复杂

根据沉积环境的不同,我国富有机质页岩划分为海相页岩、海陆交互相煤系炭质页岩、陆相页岩3种基本类型。页岩储层的矿物组成主要为脆性矿物、粘土矿物和碳酸盐矿物。脆性矿物常见石英、长石、云母、黄铁矿等,其中石英含量一般高于30%;粘性矿物常见伊利石、蒙皂石、高岭石等;碳酸盐矿物常见方解石、白云石等<sup>[5-8]</sup>。

石英、长石等脆性矿物硬度较高,可钻性差,对钻头、钻具、钻杆等研磨性较强,易造成器具磨损。伊利石、蒙皂石等粘性矿物含量较高的地层水敏性不稳定,根据粘性矿物成分、含量的不同,在施工中常见吸水膨胀、吸水分散和吸水剥落,造成孔壁失稳。碳酸盐岩地层易发生溶蚀性孔洞,是井漏的主要外因。

另外有软硬互层频繁、地层倾角较大、节理裂隙发育等不良因素,均对页岩气地质调查井施工技术选择及井身质量控制造成极大的困难。

#### 1.1.1 泥浆选型难

基于页岩气地质调查井钻遇地层复杂多变的特性,泥浆在满足携带岩粉、冷却钻头等要求的同时,既要有较强的抑制性,又要达到封堵微裂隙的要求;既要考虑漏失,又要考虑涌水、逸气。上述情况对泥浆体系的选择和性能参数的维护带来巨大的挑战。尤其是在漏失层段,泥浆发挥不出携带岩粉的作用,极易发生埋钻、烧钻事故,有些井段甚至出现失返性漏失,导致无法通过泥浆获取井下钻进信息,加大了复杂发生的概率。

同时绳索取心钻探口径小、环状间隙小、泥浆压力激动大,对泥浆质量性能要求更高。

#### 1.1.2 破碎地层取心困难

受构造运动的影响,泥页岩节理、裂隙比较发育,相对较破碎不完整。取心过程中破碎的岩心容易卡堵脱落,造成岩心采取率低下,影响钻进效率。

#### 1.1.3 井漏造成气测录井困难

在失返性漏失井段,由于没有泥浆返出地面,无法进行气测录井,使得地质录井资料不完整,不能及

时对目的层含气量情况作出准确的判断,无法满足地质综合录井的要求。

#### 1.1.4 钻孔弯曲度控制困难

地层软硬互层频繁,需要经常更换钻头、取心内管、取心卡簧,甚至是钻具和钻杆接箍。岩层的软硬不均,钻探设备和钻进参数的不统一性,导致进尺忽快忽慢,孔斜难以控制,极易造成钻杆折断等井下事故。

#### 1.1.5 井下复杂发生多,钻进效率低

复杂的地质条件极易发生钻孔坍塌、掉块、缩径、漏失等现象,从而造成卡钻、埋钻、烧钻等井内事故,工程风险较大。

就我单位近年来承担施工的10余口页岩气地质调查井发生的井下复杂进行统计分析,具体统计数据见表1。从表1可以看出,页岩气地质调查井施工过程中极易发生井下复杂,其中以钻杆折断、井漏、埋钻、掉块最为常见,频率最高(见图1)。同时,复杂叠加也比较常见,单一复杂原因分析不正确、处理方法不当、处理不迅速等,都极有可能造成次生复杂。因此,在地质调查井施工中,往往井漏伴随着烧钻,井塌伴随着埋钻,掉块伴随着卡钻与钻杆折断,钻杆刺漏伴随着埋钻与钻杆折断,等等。以巴页1井为例,在处理井漏过程中,就多次发生烧钻、钻杆折断等次生复杂;辽凌地3井在处理井漏过程中,由于泥浆泵故障发生埋钻等。

## 1.2 质量要求高,测试项目多

页岩气调查井在下套管及终孔前均需进行测井工作,测井项目有电阻率测井、自然电位、阵列声波、井径、井斜、伽马能谱、密度、中子、井温、无轴伽马等<sup>[9]</sup>。为满足测井仪器通过的需要,要求终孔直径 $<95$  mm,限制了95 mm以下井身结构的设计。同时多项测井项目使得测井时间较长,裸眼段长时间停待加大了孔壁坍塌等井下复杂情况发生的概率。

## 1.3 设备、器具等配套不完善

小口径绳索取心钻探在页岩气地质调查井领域通过近10年的实践应用,展示了其巨大的适应性与优越性,但是在设备及配套器具方面也存在诸多不足和需要改进之处<sup>[10]</sup>,主要体现在以下几个方面。

### 1.3.1 钻机卷扬提升能力小,井内复杂处理能力不足

页岩气地质调查井钻井深度一般在1500~2000 m,少数钻井深度 $>2000$  m。目前在页岩气地

表1 近年施工的页岩气地质调查井复杂情况统计

Table 1 Summary of downhole incidents in recent shale gas geological survey wells

井号	复杂状况频次	复杂状况类型	页岩沉积类型
HZK1井	6	钻杆折断、钻杆刺漏	海陆过渡相
贺地1井	6	掉块、井涌、钻杆折断	海陆过渡相
贺地2井	5	钻杆、套管折断,绞车钢丝绳断裂,掉块	海陆过渡相
巴页1井	6	井漏、钻杆折断、烧钻	海相
鄂姊地4井	12	岩心脱落、泥浆漏失、钻杆折断、绞车钢丝绳断裂	海相
泾页1井	2	钻杆折断、井塌	海相
辽凌地1井	5	塌孔、埋钻、缩径、钻杆折断	陆相
辽凌地3井	6	钻杆折断、井漏、烧钻、井涌、埋钻	陆相
蒙科地1井	1	钻杆折断	海陆过渡相
宁卫地1井	9	钻杆折断、绞车钢丝绳断裂、掉块卡钻、埋钻	海陆过渡相
蓝地1井	7	井漏、井涌、掉块卡钻、塌孔	海陆过渡相

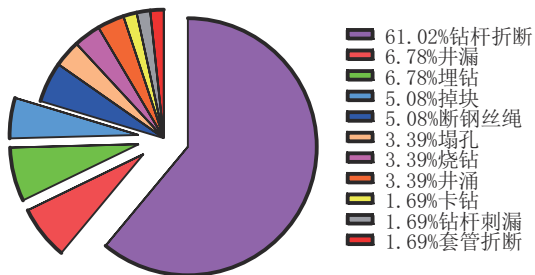


图1 近年施工的页岩气地质调查井复杂情况发生频次

Fig.1 Occurrence frequency of incidents in recent shale gas geological survey wells

质调查井中多采用XY系列立轴钻机(XY-6B、XY-8、XY-8DB),该系列钻机动力传递方式单一,顶升能力有限,处理事故能力不足(见表2)。

### 1.3.2 钻机与井控设备不匹配

考虑地层生烃生气条件,在个别圈闭内可能存在高压地层,为了保证在发生井喷、井涌时能够实施有效的井控作业,页岩气调查井施工必须安装井控设备。目前页岩气地质调查井采用立轴钻机施工安

表2 XY系列钻机主要性能参数

Table 2 Main specification of XY series drills

钻机类型	钻孔公称系列	最大钻进深度/m	油缸上顶力/kN	油缸给进力/kN	卷扬单绳最大提升力/kN
XY-6B		1500~1800	200	150	60
XY-8	H95	2000~2200	300	142	130
XY-8DB		2400	300	142	100

装井控装置时,一般是对钻机底座进行改装,形成二层台,以满足井控设备安装的需要。施工中使用的防喷器借鉴于石油钻井设备,将闸板防喷器通径缩小以实现与小口径钻机的配合,压力等级一般为21~35 MPa。由于是非标准设备,改装后的防喷器在管汇、旋塞阀、防喷单根等方面配套困难。同时受施工场地限制,井控设备的安装与摆放距离等均不能满足井控技术规范的相关要求<sup>[11-12]</sup>。

### 1.3.3 钻杆壁厚较薄,环状间隙小

小口径绳索取心钻进均采用薄壁钻杆,该类钻杆壁厚较薄(见表3),抗拉、抗扭性能受限。同时,绳索取心为“满眼”钻进,回转速度快,与孔壁岩石直接接触,孔内受力不匀,易发生偏磨,造成钻杆刺漏、折断等<sup>[13]</sup>。

表3 绳索取心钻杆尺寸参数

Table 3 Sizes of wire-line coring drill rods

规格型号	钻杆系列	钻杆材质	钻杆直径/mm	
			外径	内径
S75	普通钻杆	45MnMoB	71	61
S95	普通钻杆	45MnMoB	89	79
S75A	加厚钻杆	45MnMoB	(两端加厚)	61
S95A	加厚钻杆	45MnMoB	(两端加厚)	79
CNH	C系列钻杆	30CrMnSiA	(两端加厚)	61
CHH	C系列钻杆	30CrMnSiA	(两端加厚)	77
CPH	C系列钻杆	ZT600	114.3	101.6

绳索取心钻具与井壁、内管与外管之间环状间隙均较小(见表4),因此对泥浆的含砂量、泥饼厚度等性能参数有更高的要求。较小的环状间隙限制了大泵量的使用,使得携带岩粉困难,尤其是深孔,泥浆上返阻力大,流速慢,极易在钻杆内壁形成泥垢,不利于内管的投放与打捞<sup>[14-15]</sup>。

表4 常用钻孔系列环状间隙统计  
Table 4 Annular clearance of common size boreholes

钻孔系列	钻头尺寸/mm	扩孔器尺寸/mm	钻具尺寸/mm	钻杆尺寸/mm	环状间隙/mm	
					钻杆与孔壁	内管与外管
N(76)	76	76.5	73	71	2.75	3.5
H(95)	95	95.5	92	89	3.25	3.5
(114)	114	114.5	112	110	2.25	3.5
P(122)	122	122.5	118	114	4.25	3.5
(130)	133	133.5	114	110	11.75	3.5
S(150)	150	150.5	139.7	127	11.5	9.5

较小的环状间隙和较大的泵压损失均不利于采用高效的钻进手段。

### 1.3.4 主要钻探设备自动化程度低

目前我国绳索取心钻探以立轴钻机为主,立轴钻机存在回次进尺短、倒杆频繁、送钻精度低、多工艺适用性弱、安全性差、效率低、劳动强度大等缺点。近年来,我国陆续研制出XY-8DB、XD-30DB和XD-40DB等一系列交流变频电驱动岩心钻机,自动化程度大大提高,但是跟国外相比仍存在较大的差距<sup>[16]</sup>。

## 2 页岩气地质调查井施工工艺

经过近10年的适应与发展,目前小口径绳索取心钻探已经在页岩气地质调查井施工领域形成一整套完整、成熟的施工工艺。

### 2.1 井身结构优化设计

井身结构是一口井的骨架、基础,关系整口井的成井质量和施工难易程度。合理设计井身结构,能够在满足设计要求的同时,减少或杜绝井下复杂的发生,提高钻进效率。

页岩气地质调查工作通常处于地质“盲区”,区域地质资料较为模糊,预测地层与实钻地层差异性较大。为保证施工的顺利,通常对井身结构进行保守设计。井身结构设计应预留一级口径,以较大口径开孔,小口径绳索取心加速钻进,钻遇复杂地层则扩孔下套管,最大限度地发挥绳索取心钻进的优势。

目前比较成熟的井身结构设计有2种,如图2所示。

图2(a)井身结构(I)开孔孔径大,二开以浅环状间隙较大,泵量和泥浆上返速度更有保证,有利于携带岩粉,稳定孔壁;二开及二开以深取心工艺较为

成熟,钻进速度快,岩心采取率高; $\Phi 114$  mm绳索取心钻杆可以兼做套管,能够确保准确封隔事故井段。缺点是容易出现钻孔偏斜、钻杆折断等,同时钻扩一体钻头切削面较大,钻进效率低。

图2(b)井身结构(II)钻进口径小,对地层的切削面小,钻进效率高;一开 $\Phi 130$  mm口径既可以采用单管提钻取心,也可以采用钻扩一体钻头绳索取心钻进,工艺方法灵活多变;二开可以作为预留口径,待钻遇难以处理的复杂地层用以下套管封隔复杂井段;该工艺可以尽早进入H95口径,最大限度地发挥小口径绳索取心钻进优势。缺点是口径较小,应对井下复杂情况的能力不足;套管与孔壁间隙较小,难以下入到预定位置。

### 2.2 合理配置钻探设备

钻探设备的性能直接影响钻孔的施工效率、质量、处理孔内事故的能力等,合理选择钻探设备及其配套设施,使其满足钻进深度、口径以及其他地质要求。页岩气地质调查井一般设计深度较大,孔内情况复杂多变,井身结构复杂,预测地层深度偏差较大,为达到施工目的常常需要增加孔深。因此,在设备选择上建议“大马拉小车”,即选用能力高一级别的相关设备,在输出参数上留有余地,以应对复杂的孔内情况和孔深加深的可能<sup>[17-18]</sup>。根据设计深度的不同,对页岩气调查井钻探设备优选建议如表5所示。

(1)在钻机的选择上,1000~1500 m一般选择XY-6B、HXY-6型钻机,1500 m以深选择XY-8、XY-8DB、HXY-8、HXY-9型钻机,优先选用自动化较高的钻机,如XY-8DB、XDL-3000型钻机。

(2)钻塔方面主要选择13、18、24 m三种类型,钻塔高度越大,移摆立根长度越长,提钻速度越快;

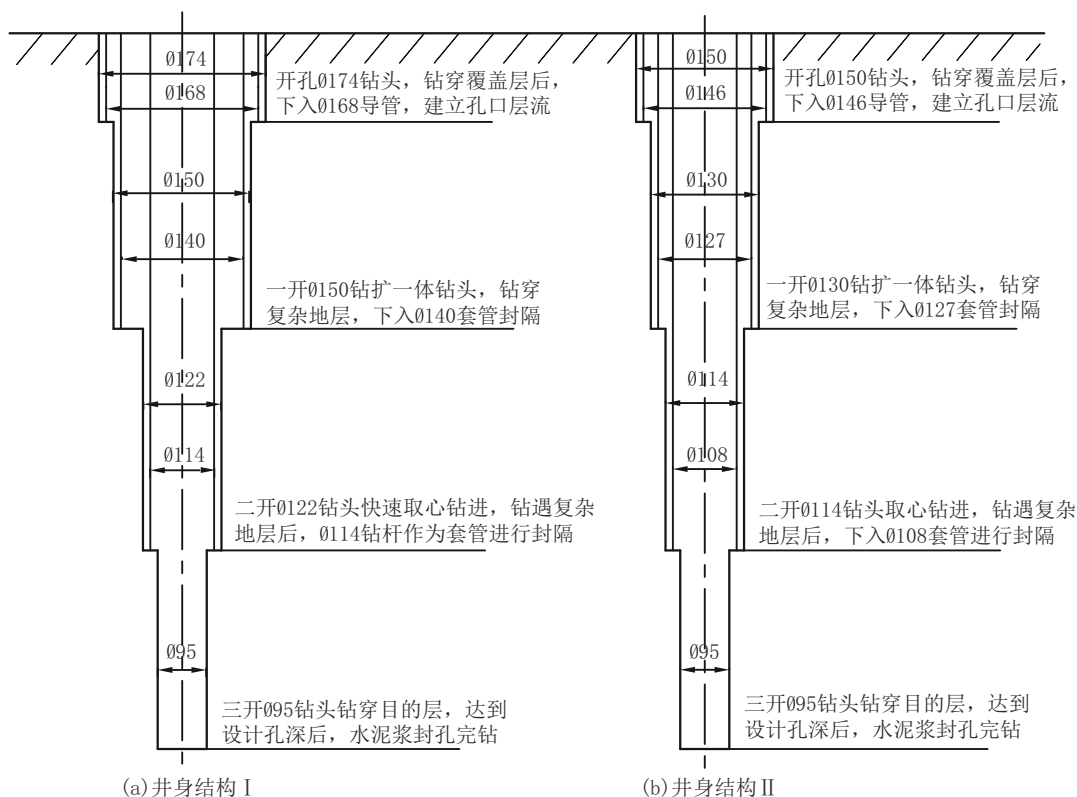


图2 常用井身结构

Fig.2 Common size borehole structure

表5 钻机及配套设施优化选择推荐

Table 5 Recommended selection of drills and supporting facilities

设计深度/m	钻机型号	钻塔高度/m	泥浆泵型号
1000~1500	XY-6B、HXY-6	13、18	BW-250、BW-300/16
1500~2000	XY-8、XY-8DB、HXY-8	18、24	BW-250、BW-300/16
>2000	HXY-9、XDL-3000	24	BW-300/16、BW-320

天车负荷越大,事故处理能力越强。因此,在条件允许的情况下,应当尽可能选取大高度钻塔。

(3)常用泥浆泵主要由BW-250、BW-300/16、BW-320型3种类型,实践表明,BW-300/16型泥浆泵性能较为优良,其变速箱单独设置,与泵体齿轮分开,维修保养方便,而且是多挡变速,泵速和泵量调节范围广,泵压比较稳定,适合复杂地层。

### 2.3 取心工艺优化

页岩气地质调查井取心宜采用以绳索取心钻进

工艺为主、提钻取心工艺为辅的施工技术。

(1)绳索取心钻进工艺在完整地层回次进尺长,取心速度快、岩心采取率高。在破碎地层,回次进尺短,岩心采取率低,需要频繁提下内管。因此在破碎层段采用提钻取心,在穿过复杂井段后更换绳索取心,最大限度地保证岩心采取率和取心速度。

(2)严格执行绳索取心钻进工艺流程,提高取心成功率。只有减少非必要提钻次数,才能将绳索取心钻进优势最大化。其一,要根据钻遇地层情况优选取心钻头,在保证钻进效率的前提下,提高单个钻头的有效工作时间;其二,内管入井前认真检查卡簧、单动装置、缓冲装置、打捞装置等,避免因内管问题提钻;其三,严禁用铁锤敲打岩心管,轻拿慢放,选用内壁镀铬处理的内管,提高取心成功率。

(3)加长取心钻具,减少辅助时间。打捞内管取心操作的时间占比随着井深的增加越来越大,1500 m以深单井取心操作时间占比在10%~20%。根据地层的完整情况,优化配备和选取不同规格长度的取心钻具,例如在地层完整井段,将取心钻具长度由3 m增加至4.5 m,甚至6 m,可以大大减少取心操作

的时间。

## 2.4 优选泥浆体系

绳索取心钻进工艺受限于小口径、小间隙的特点,泥浆体系的选用要满足携带岩粉、冷却钻头、润滑钻具、稳定孔壁的要求,具有低粘度、低密度、低固相的特点。施工过程中,泥浆的配比及性能参数要根据钻遇地层情况及时调整,使其更加适应钻探工作的需要,其中通过浸泡试验选择性能良好的泥浆配方是最直接有效的方法<sup>[19]</sup>。页岩气调查井除常规的泥浆处理剂和固控设备外,现场还要准备一定量的加重剂和加重设备、除气设备。

页岩气调查井施工中宜选择无固相或低固相泥浆体系,泥浆的基本要求如下:

(1)在相同钻井深度下,循环间隙越小、泥浆粘度越大,泵压越高。受限于环状间隙,页岩气地质调查井粘度一般控制在20~30 s,保证足够携带岩粉即可,防止高粘度引起高泵压。

(2)泥页岩中的粘土矿物水敏性较强,易水化膨胀,造成孔壁不稳定。提高泥浆的水化抑制能力,通常采用加入聚丙烯酸钾、聚丙烯腈铵盐等抑制剂,提高矿化度的方法。

(3)施工中严格控制泥浆滤失量 $\leq 5\text{mL}$ ,含砂量 $\leq 0.5\%$ ,相应的固控系统、泥浆循环系统(循环管线,沉淀池)等要规范化,保持泥浆性能稳定。

(4)施工中保证泥浆润滑性能良好,尤其是在恶性漏失井段顶漏钻进过程中,除了通过钻柱向井内泵入清水外,还应向钻杆与井壁的环状间隙中输送润滑剂,防止钻杆因过度磨损、扭矩过大等原因发生钻杆折断事故。

(5)目的层段严禁使用沥青类、磺化类、荧光类等泥浆材料,避免对测井、录井等工作造成影响,加强储层保护。

(6)表层的第四系松散覆盖地层,一般采用低固相化学泥浆,以膨润土加纯碱预水化24 h后作为基浆,辅以抑制剂、防塌剂等化学材料。针对水敏性的泥页岩、泥质含量较高的砂岩,改用防塌性好、排粉能力强、流变性好、抑制性强的低固相聚合物防塌泥浆,基本配方为:1 m<sup>3</sup>水+1.0~2.0 kg 纯碱+0~40 kg 膨润土+5~10 kg 降失水剂+5~10 kg 增粘剂+1~3 kg 包被剂+10~20 kg 随钻堵漏剂+5~20 kg 润滑剂<sup>[20-21]</sup>。

## 2.5 井下复杂情况的预防

页岩气地质调查井预测地层与实际地层偏差较大,地层结构比较复杂,再加上设备、人为等因素,极易发生井下事故。小口径绳索取心钻进工艺事故处理难度大、周期长,个别钻孔甚至报废,造成极大的工期损失和经济损失。因此,预防井下复杂情况的发生,是页岩气地质调查井施工中的重中之重。

(1)根据周边钻孔及区域地质资料,事先做好复杂井段事故的预测,提前做好应急预案。例如页岩气地质调查井最常遇见的井漏以及由于井漏造成的井塌、埋钻、烧钻、钻杆折断等次生事故。

(2)施工过程中加强对钻进参数、扭矩、泥浆性能参数、泥浆返出量等监测,对异常情况认真分析,及时作出响应,在复杂情况发生初期及时处理,避免由小情况演变成大事故。

(3)对钻机及配套设备、入井钻头和钻具等经常性检查,发现问题及时处理,严禁设备带故障或超负荷作业,严禁问题钻头、钻具等入井。

(4)复杂情况发生后,要冷静分析原因,选择正确合适的处理方法,果断迅速的做出反应,避免延时时造成处理难度的增加。

(5)应科学准确地确定“必封点”,保证套管的下入深度能够封隔复杂井段,尤其是钻遇井漏时,在堵漏无效后不能盲目下入套管,要顶漏钻进一段深度,在确定穿越漏失层段后再下套管封隔,避免出现堵不住漏的情况<sup>[22]</sup>。

## 3 现场应用效果

小口径绳索取心钻探进入页岩气勘探领域前期,由于技术不成熟、经验欠缺、设备能力受限等原因,钻孔施工周期长、事故频次多、录井解析等操作不规范。经过不断总结和探索,工艺技术逐渐成熟,在钻探深度、岩心采取率、钻进效率和钻孔质量等方面均取得较大的提升(见表6)。

蓝地1井终孔孔深2300.30 m,是我单位施工的页岩气地质调查最深井。该井首次使用XY-8DB型交流变频电驱动钻机,采用 $\text{O}175-150-130-114-95\text{ mm}$ 等五级井身结构,克服了新设备掌握不熟练,砂泥岩井段坍塌掉块、缩径、卡钻以及极端恶劣天气的影响,顺利完成施工任务。蓝地1井全孔综合岩心采取率94.40%,最大弯曲度2.82°,井径扩大率最大值为15.45%,井底水平位移26.78 m,达到

表6 典型钻孔成果统计  
Table 6 Typical drilling results

井号	钻机型号	设计井深/m	完钻井深/m	岩心长度/m	岩心取心率/%	钻井周期/d	台月进尺/m	事故发生频次	施工周期	质量等级
蓝地1井	XY-8DB	2300	2300.30	2171.59	94.40	334	206.6	7	2016.1—2017.3	良好
辽凌地1井	XY-6B	1500	1722.78	1691.83	98.20	182	283.97	5	2016.12—2017.9	优秀
蒙科地1井	XY-6B	1800	1800.21	1754.98	97.49	133	406.06	1	2017.4—2017.7	良好

注:钻井周期不包含非施工原因(停电、停水、春节放假等)造成的停待时间

了设计要求。

辽凌地1井设计井深1500 m,为了揭示北票组暗色泥页岩和可能油气分布情况,深入评价北票组生烃潜力,加深钻进至1722.78 m终孔。该井采用 $\phi 150-130-114-95$  mm等四级井身结构,全孔综合岩心采取率98.20%,最大井斜 $4.81^\circ$ ,平均井径扩大率6.10%。辽凌地1井的成功实施,进一步完善了该口径系列施工工艺,台月进尺提高至283.97 m。

在积累了丰富经验的前提下施工的蒙科地1井,综合岩心采取率均保持在97%以上,台月进尺提高至400 m以上,井下事故发生频次更是控制在2次以下。

#### 4 结论与建议

(1)小口径绳索取心钻探在页岩气地质调查井施工中具有不可替代的优势,极大地推动了我国页岩气勘探开发进程。随着页岩气地质调查深度的不断加深、口径不断增大、取心速度不断加快等,对钻探工作提出了更高的要求。

(2)页岩气调查井采用小口径绳索取心钻进工艺时,应当结合页岩气地层的特点及以往施工经验,在井身结构设计、设备的配置、泥浆体系的优选、井控方案等方面综合分析考虑,以降低事故发生频次,确保调查井的成功实施和目的任务的圆满实现。

(3)小口径绳索取心钻进工艺以机械操作为主,尤其是设备安装、加单根、取心、提下钻等工序需要大量人工配合,自动化程度较低,劳动强度较大。同时,井控设备和综合录井设备与钻机、泥浆泵等匹配程度较低。应当借鉴国内外智能钻探装备的成熟经验,加快钻机操作控制系统、井架自动平衡升降系统、自动猫道、铁钻工、自动井架工、防喷器、综合录井设备等在页岩气调查井中的研究与推广应用。

(4)小口径绳索取心钻进在钻进参数、孔底参

数、泥浆性能参数等实时监测方面,数据参数的采集、传输、分析、预警等无法做到及时、准确。应当加快钻进参数采集、预警、预处理系统和孔底自动监测装置、泥浆性能参数一体化自动测量等智能化系统的研发与推广应用<sup>[23]</sup>。

#### 参考文献(References):

- [1] 赵亮,汪程林.页岩气地质调查皖含地1井施工工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(4):42-47.  
ZHAO Liang, WANG Chenglin. Drilling of Well Wanhandi1 for shale gas geological survey [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(4):42-47.
- [2] 董大忠,邹才能,戴金星,等.中国页岩气发展战略对策建议[J].天然气地球科学,2016,27(3):397-406.  
DONG Dazhong, ZOU Caineng, DAI Jinxing, et al. Suggestions on the development strategy of shale gas in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016,27(3):397-406.
- [3] 邹才能,董大忠,王玉满,等.中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J].石油勘探与开发,2015,42(6):689-701.  
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects ( I ) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015,42(6):689-701.
- [4] 邹才能,董大忠,王玉满,等.中国页岩气特征、挑战及前景(二)[J].石油勘探与开发,2016,43(2):166-178.  
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects ( II ) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016,43(2):166-178.
- [5] 邹才能,赵群,从连铸,等.中国页岩气开发进展、潜力及前景[J].天然气工业,2021,41(1):1-14.  
ZOU Caineng, ZHAO Qun, CONG Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China [J]. Natural Gas Industry, 2021,41(1):1-14.
- [6] 邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.  
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010,37(6):641-653.
- [7] 张金川,陶佳,李振,等.中国深层页岩气资源前景和勘探潜力[J].天然气工业,2021,41(1):15-28.  
ZHANG Jinchuan, TAO Jia, LI Zhen, et al. Prospect of deep

- shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1):15-28.
- [8] 蒋裕强,董大忠,漆麟,等.页岩气储层的基本特征及其评价[J].天然气工业,2010,30(10):7-12.  
JIANG Yuqiang, DONG Dazhong, QI Lin, et al. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10):7-12.
- [9] DB43/T 971—2014,页岩气钻井技术规程[S].  
DB43/T 971—2014, Technical specification for shale gas drilling[S].
- [10] 陈师逊,翟育峰,王鲁朝,等.西藏罗布莎科学钻探施工对深部钻探技术的启示[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(11):1-3,9.  
CHEN Shixun, ZHAI Yufeng, WANG Luzhao, et al. Enlightenment to deep drilling technology from scientific drilling in Luobusha of Tibet[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(11):1-3,9.
- [11] 刘治.小口径岩心钻探技术在页岩气地质调查井中的应用分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(9):32-37.  
LIU Zhi. Application analysis on small diameter core drilling technology in shale gas geological exploration well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(9):32-37.
- [12] 伍晓龙,朱芝同,董向宇,等.小口径油气地质调查井的问题与工程实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):27-32.  
WU Xiaolong, ZHU Zhitong, DONG Xiangyu, et al. Problems and field cases of small-diameter oil and gas geological survey wells[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(11):27-32.
- [13] 孙建华,陈师逊,刘秀美,等.小直径特深孔绳索取心口径系列及钻柱方案[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(8):1-5,17.  
SUN Jianhua, CHEN Shixun, LIU Xiumei, et al. Diameter series and drill pipe scheme for wire-line coring with small diameter in ultra-deep borehole[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(8):1-5,17.
- [14] 朱恒银,王强,张正,等.大直径加重管绳索取心技术在页岩气勘探中的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):160-164.  
ZHU Hengyin, WANG Qiang, ZHANG Zheng, et al. Application research on large diameter weighted combined wire-line coring technology for shale gas exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10):160-164.
- [15] GB/T 16950—2014,地质岩心钻探钻具[S].  
GB/T 16950—2014, Geological Core Drilling Tools[S].
- [16] 张金昌,刘凡柏,黄洪波,等.5000米智能地质钻探技术与装备研发[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):1-8.  
ZHANG Jinchang, LIU Fanbai, HUANG Hongbo, et al. Research and development of 5000m intelligent geological drilling technology and equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(4):1-8.
- [17] 张正,朱恒银.深部钻探关键设备选择原则及配置优化[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(9):17-20.  
ZHANG Zheng, ZHU Hengyin. Selection principles and configuration optimization of the key equipments in deep drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(9):17-20.
- [18] 朱恒银,朱永宜,张文生,等.汶川地震断裂带科学钻探项目WFSD-3孔施工技术与会体[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(9):12-17.  
ZHU Hengyin, ZHU Yongyi, ZHANG Wensheng, et al. Construction technology and experience of WFSD-3 Hole of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(9):12-17.
- [19] 王盛,潘振泉,秦正运.小口径绳索取心钻进在砾山地区深厚泥岩地层中的施工技术[J].钻探工程,2022,49(2):85-90.  
WANG Sheng, PAN Zhenquan, QIN Zhengyun. Small diameter wireline core drilling for deep mudstone formation in Dangshan area[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2):85-90.
- [20] 单文军,蒋睿,陶士先,等.页岩气钻探冲洗液体系的研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):176-181.  
SHAN Wenjun, JIANG Rui, TAO Shixian, et al. Research and application of the flushing fluid system for shale gas drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10):176-181.
- [21] 刘文武,赵志涛,翁炜,等.页岩气基础地质调查皖南地1井钻探施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):66-70.  
LIU Wenwu, ZHAO Zhitao, WENG Wei, et al. Drilling of Wannandi Well-1 for basic shale gas geological survey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(10):66-70.
- [22] 李岩,郭军,王文彬.滇东地区页岩气调查云宣地1井钻探施工难点及对策[J].钻探工程,2021,48(8):12-18.  
LI Yan, GUO Jun, WANG Wenbin. Drilling difficulties and solutions for Well Yunxuandi-1 for shale gas survey in eastern Yunnan[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(8):12-18.
- [23] 朱恒银,王强,刘兵,等.5000 m新型能源勘探智能钻探装备与技术研究[J].钻探工程,2022,49(1):110-119.  
ZHU Hengyin, WANG Qiang, LIU Bing, et al. Research on 5000m new energy exploration intelligent drilling equipment and technology [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1):110-119.

(编辑 李艺)