

高压涌水及高含硫化氢页岩气井绳索取心钻进技术

何勇¹, 苏时才¹, 陈杨¹, 冯心涛², 张秀军¹, 杨发胜¹, 冯国文¹

(1. 四川省煤田地质工程勘察设计院, 四川成都 610072; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081)

摘要:页岩气调查井荣地1井设计井深1600 m, 钻探施工过程中发现多个高应力涌水破碎带, 最大涌水量达135 m³/h, 井口压力达2.5 MPa; 并且地层水中溶解有硫化氢, 从涌水中挥发出来的硫化氢气体最大含量达100 ppm; 水温较高, 在1300 m处涌水温度达到50℃; 这些问题给施工带来了极大的困难, 并增加了安全风险。针对以上问题, 介绍了钻井过程中所采取的注水泥浆堵水技术、高密度钻井液平衡钻进技术、多级套管固井技术, 并总结了每种技术的特点, 为川西南地区以后的页岩气调查井钻探工作提供参考。

关键词:高压涌水层; 高含硫化氢; 水泥浆堵水; 高密度钻井液; 多级套管固井

中图分类号: P634; TE242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)08-0023-06

Wire-line Core Drilling Technology in Shale Gas Wells with High Pressure Gushing Water and High H₂S Content/
HE Yong¹, SU Shi-cai¹, CHEN Yang¹, FENG Xin-tao², ZHANG Xiu-jun¹, YANG Fa-sheng¹, FENG Guo-wen¹ (1. Sichuan Institute of Coalfield Geological Engineering Exploration and Designing, Chengdu Sichuan 610072, China; 2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu Sichuan 610081, China)

Abstract: The designed depth is 1600 meters for the shale gas survey well Yingdi-1. During the construction process, several high stress water gushing fractured zones were encountered, the largest watering quantity was 135 m³/h and wellhead pressure was up to 2.5 MPa; there was hydrogen sulfide dissolved in formation water, the highest content of hydrogen sulfide gas escaped from the gushing water was up to 100 ppm; the water temperature is high up to 50℃ in gushing spot at 1300 meters depth, these difficulties brought safety risk to the construction. In view of the above, this paper introduces water plugging technology by cement slurry grouting, balanced drilling technology with high density drilling fluids and multistage casing technology for well cementing used in drilling process and summarizes the characteristics of each technology, which can be reference for the shale gas investigation well drilling construction in Southwestern Sichuan.

Key words: high pressure water gushing layer; high H₂S content; water shutoff technology by cement slurry; high density drilling fluid; multistage casing technology for well cementing

1 钻井工程概述

1.1 工程简介

荣地1井是由中国地质调查局成都地质调查中心承担的“四川盆地西南地区1:5万页岩气基础地质调查”子项目中设计的一口页岩气地质调查井, 四川省煤田地质工程勘察设计院负责钻井施工; 该井位于四川盆地西南地区页岩气空白区块——四川省雅安市荣经县境内, 设计井深1600 m, 设计目的层位为志留系龙马溪组; 此项目对推动空白区页岩气资源调查评价, 加快四川省页岩气资源勘探开发步伐意义重大。

1.2 地层概况

荣地1井位于川西低隆构造带南缘之荣经天凤背斜核部, 加里东期处于乐山-龙女寺隆起抬升的部位, 奥陶系、志留系地层残存较少, 受海西早期扬子地台持续隆升的影响, 石炭系地层全部缺失, 泥盆系地层残存较少。该井钻遇地层主要为二叠系、泥盆系、志留系以及奥陶系部分地层, 主要为一套岩浆岩、沉积岩地层, 岩性主要为玄武岩、灰岩、砂岩、泥岩、白云岩及页岩等, 各类岩石交替出现。岩石可钻性在4~9级(见表1)。

1.3 地质技术要求

根据页岩气调查井相关规范并结合本井的钻探目的, 在施工过程中遵循以下地质要求:

收稿日期: 2016-10-14; 修回日期: 2017-05-31

基金项目: 四川盆地页岩气基础地质调查项目“四川西南地区1:5万页岩气基础地质调查”(编号: 12120115100201-04)

作者简介: 何勇, 男, 汉族, 1986年生, 矿产普查与勘探专业, 硕士, 从事非常规资源调查及勘探技术工作, 四川省成都市青羊区青华路39号, 594903100@qq.com。

表1 区域地层及岩石可钻性分级情况

系	统	组	厚度/m	岩性	可钻性分级
二叠系	上统	峨眉山玄武岩组	0~400	玄武岩	9
		茅口组	33~305	灰岩夹燧石灰岩	4
	下统	栖霞组	21~204	致密灰岩夹砂质页岩	5
		梁山组	2~17	炭质页岩	4
泥盆系	中统	甘溪组	63~381	钙质页岩夹灰岩	5
	下统	平驿铺组	218~323	石英砂岩夹页岩	6
志留系	中统	罗惹坪组	63~625	泥灰岩夹砂质白云岩	5
	下统	龙马溪组	45~148	笔石页岩	4
奥陶系	上统	五峰组	1.5~73	黑色页岩	4
		临湘组	6~8	榴状灰岩	7
	中统	宝塔组	2~70	龟裂纹灰岩	7

- (1)除第四系表土覆盖层,要求全井取心率 $\leq 90\%$;
- (2)平均井径扩大率 $\geq 15\%$;
- (3)终孔直径 $\leq 95\text{ mm}$;
- (4)直井完井井斜 $\geq 5^\circ$;
- (5)目的层钻进取样,完成取样时间 $\geq 30\text{ min/次}$;
- (6)自钻穿第四系土层至完井随钻气测录井;
- (7)目的层含气性现场解析,并对气样进行室内化验;
- (8)完井后及时进行地球物理测井。

2 钻井难点分析

2.1 岩石可钻性差

根据区域岩石可钻性资料分析,本井钻遇的峨眉山玄武岩、平驿铺组石英砂岩、临湘组榴状灰岩及宝塔组龟裂纹灰岩莫氏硬度较大,可钻性差,可钻性分级最大的峨眉山玄武岩达到9级,并且多套地层岩石物理机械性能不一,均质性差,对钻头磨损严重。在钻进过程中,憋跳严重,钻头工作不平稳,易造成钻头先期损坏,影响钻头机械钻速和钻头的使用时间。

2.2 井涌及井漏风险大

菜地1井钻遇地层中灰岩、白云岩等碳酸盐岩地层厚度大,这些地层裂隙和溶洞较发育,极易发生井涌和井漏。

2.3 地层压力大

成都中心实施的穿过菜地1井的MT资料显示,该井地层中存在高阻带,分析井下可能由于目的层龙马溪组含气导致异常高压存在,加之龙马溪组

富有机质页岩本身具有水敏性,遇水和异常高压极易垮塌导致埋钻、卡钻事故。

2.4 有毒气体溢出

龙马溪组主要为黑色富有机质页岩段,为含气层段,可能有可燃气体及有毒有害气体溢出。此外,川西南地区茅口组及栖霞组地层中普遍存在硫化氢气体,钻井中容易发生井涌、井喷,并有可能因为硫化氢气体溢出危及人生安全。

2.5 钻井遇到的关键难题

(1)钻遇地层涌水点多,涌水量大,最大涌水量达到 $135\text{ m}^3/\text{h}$,松软破碎的地层在大量的涌水条件下局部形成垮塌;地层压力大,经过测量井口水压最大达到 2.5 MPa (见表2),导致起钻时井口形成高压水柱,操作风险大,并且取心工具难以投入井内;水温高,经测量井口水温最大超过 $45\text{ }^\circ\text{C}$,高水温会加速水中有毒有害气体挥发,造成人身伤害。

表2 菜地1井地层高压涌水点及硫化氢情况统计

地层	深度/m	涌水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	水温/ $^\circ\text{C}$	井口压力/MPa	硫化氢含量/ 10^{-6}
$P_3\beta$	388.04	<0.5		0~0.2	
	403.03	1.5			冲孔时15,钻进无
	436.10	2.0		0.8~	
	475.35	4.0		1.5	冲孔时50,钻进中5~8
	487.05	4.6	未测		
	498.03	6.2			
P_2m	504.54	9.0		1.5~	冲孔时100,钻进中5~10
	576.46	9.7		2.0	冲孔时100,钻进中35
	651.12	60		2.5	冲孔时100,钻进中50
	690.80	13.4			
	710.05	17.8	34~		
	722.90	8.5	35		冲孔时50~100,钻进中20~50,前后厂房15~20
P_2q	731.20	5.2			
	767.09	14.6	36		
	837.05	26.5	38		
	878.16	59.4	39	2.2~	
	927.91	7.3	40~	2.5	冲孔时50,钻进中20~35
	998.75	19.2	41		
D_1g	1023.14	135.0	42~		
	1047.57	24.1	43		
D_1p	1086.35	10.5	44		冲孔时30,钻进中5~10
	1115.48	7.6	45		
S_2l					

(2)水中含有较高浓度的硫化氢,涌水到达地表后硫化氢迅速挥发,井口浓度超过 100 ppm (见表2)。硫化氢不仅会腐蚀钻杆导致断钻具的事故,更会对现场人员的身体健康产生危害,严重时危及生命安全。

(3)岩心钻机标准钻具级配中各级井径间环状

间隙小,通过使用配置高密度固相泥浆以平衡井内地层压力的方法钻进时会导致泥浆循环压力过大从而超过泥浆泵的负荷,并且由于固相泥浆中的重晶石会不同程度的沉淀,沉淀颗粒堵塞取心内管从而导致岩心管无法打捞。

3 钻井设备

根据本井设计井深及钻探目的选用XY-6B型立轴式液压钻机、WB-18型钻塔、BW-320型泥浆泵;并针对本井可能出现井喷及硫化氢气体溢出的风险专门配备了井口防喷器,现场还配备了便携式H₂S报警仪、风向标、泥浆测试仪、测斜仪等专用检测仪器(见表3)。

表3 主要施工设备和仪器统计

序号	名称	型号	单位	数量	备注
1	钻机	XY-6B	台	1	
2	钻塔	WB-18 四角铁塔	付	1	
3	泥浆泵	BW-320	台	1	
4	移动电站	150 kW	台	1	
5	泥浆搅拌机	1 m ³	台	2	
6	配电柜	KT-210T	台	1	
7	液压钻杆钳	SQ114/8	台	1	
8	旋流除砂器	自制	台	1	
9	测斜仪	XJL-42	台	1	无线陀螺式
10	泥浆测试仪		套	1	
11	井口防喷器		台	1	
12	风向标		台	1	
13	便携式硫化氢报警仪		台	4	

4 钻井工艺

根据本井地质要求、钻遇的地层、岩石可钻性及涌水情况,综合分析采用如下钻井工艺。

4.1 井身结构

为应对钻井可能遇到的各种风险,该井设计多开井身结构,实钻井身结构为四开(见图1)。

一开(开钻口径):用 $\phi 150$ mm普通工法(采用硬质合金钻头)钻进至20.65 m,下入 $\phi 146$ mm表层套管并固井,一开固井对于后续开次的固井及堵涌、堵漏施工是十分必要的。

二开(过渡口径):用 $\phi 130$ mm普通工法(采用硬质合金钻头)钻进,根据设计二开只需要钻进至井深400 m,由于井内出现多层涌水,因此加深至576.24 m,并下入 $\phi 127$ mm套管固井。

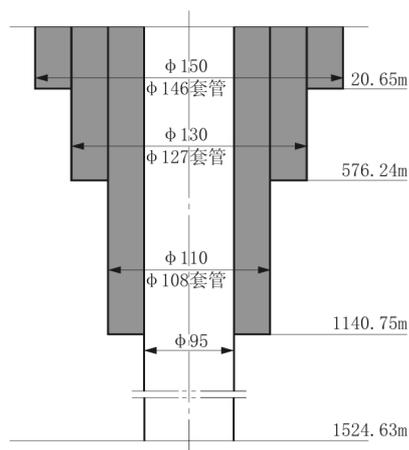


图1 荣地1井实钻井身结构

三开(备用口径):本开次主要用于井内出现复杂情况备用,根据该井涌水情况,用S110金刚石绳索取心工艺钻穿涌水层后下入 $\phi 108$ mm套管并固井,本开次井深1140.75 m。

四开(完钻井深):用S95金刚石绳索取心钻至终孔。

4.2 钻进参数

XY-6B型钻机主要靠钻头机械研磨进行钻进,在较软地层(本井中页岩、泥岩地层)钻进,采用低转速、小泵量和适当的压力;在坚硬的研磨性强的岩层(本井中玄武岩、石英砂岩地层)钻进,则采用大钻压、较高的转速和泵量;在裂隙发育的破碎岩层(本井中灰岩及砂岩破碎带)钻进,应适当加大钻压,降低转速,尽量减少钻具震动;在回次钻进过程中,当钻压变化不大,发现钻进速度明显加快要及时调整,减小钻压,控制钻进速度,防止软硬岩石互层时压力过大造成钻头顺层跑偏,导致井斜偏大;在低固相泥浆钻进条件下,为避免钻杆内结泥垢,应限制钻具转速和回次时间;另外在孔深较大时,为保证孔内安全,则要限制转速和钻压。

本井使用的钻进参数如表4所示。

表4 荣地1井钻进规程参数

井段/m	井径/mm	钻进参数		
		钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	泵量/(L·min ⁻¹)
0~20.65	150	3~4	80~150	66~146
20.65~576.46	130	10~15	700~900	146~320
576.46~1140.47	110	8~12	600~800	146~320
1140.47~1524.63	95	8~12	400~900	66~320

注:具体施工时,需根据孔内情况和钻机的额定转速选用,页岩钻进时选用低钻进参数。

5 关键钻井技术

根据钻井遇到的问题,分别采用了有针对性的技术措施,并将石油钻井中常用的技术方法加以改进运用到钻探施工中,主要技术包括:水泥浆堵水技术、多级套管固井技术、高密度钻井液平衡钻进技术等。

5.1 水泥浆堵水技术

水泥浆堵涌技术属于化学堵水技术的一种,是用水泥浆封堵出水层的方法,将预先配制好的水泥浆泵送到涌水层,再施加一定压力将水泥浆挤入地层,经过一定的时间水泥浆候凝在破漏或者地层裂隙处形成密封带,有效地将涌水层封堵固化从而达到堵水的目的。

针对本井涌水点较多的实际情况,共进行了8次水泥浆堵水施工,以井深651.12 m处堵水施工为例进行介绍。

5.1.1 水泥浆配制

根据井筒内容积,结合涌水情况,配制 14 m^3 水泥浆。材料为水泥、水及硅酸钠速凝剂(俗称水玻璃),按水灰比1:2,硅酸钠占15%配比配置密度为 1.90 g/cm^3 的水泥浆。同时准备清水以备注完水泥浆后替浆用。

5.1.2 施工步骤

(1)进行注水泥浆,将配置好的水泥浆液通过泥浆泵从井口泵入井内。

(2)当水泥浆全部注完后立即用清水进行替浆,并观察泥浆泵压力变化,在泥浆泵承压范围内尽可能多的将水泥浆注入地层裂隙中(本次施工中泵压达到10 MPa时停止泵入,通过流量计算出水泥浆进入裂隙 7.16 m^3 ,残留在井筒内 6.84 m^3)。

(3)替浆完成后给井口进行补压,带压候凝24 h。

(4)候凝结束后打开井口,下入钻具钻除水泥塞。

5.1.3 堵水效果分析

本次施工揭穿水泥塞后,涌水量明显降低,由原来的 60 m^3 降至 2.5 m^3 ,效果显著。根据8次堵水施工情况总结,并非每次水泥浆堵水都能取得显著效果,成功与否取决于涌水点地层压力、上下地层裂隙相互连通情况、水泥浆配比及注浆操作技巧等多种因素的共同影响,并且由于堵水过程中水泥浆候凝时间难以掌握,往往在井内形成大量水泥塞,候凝

后钻开水泥塞需要耗费较多的时间。

5.1.4 注意事项

(1)在注浆施工前首先要确保井口密封,并且密封组件要能够承受超过泥浆泵负荷的压力,否则注浆时会导致浆液从井口返出,注浆失败。

(2)由于水泥浆中加入了速凝剂,要确保操作过程中泵入排量较大,流速较快,否则水泥浆可能提前凝固,导致泵入裂隙中浆液较少,堵水效果差。

(3)带压候凝十分必要。水泥浆在稠化过程中稠度会增加,水泥浆随着稠度升高并且由于处于失重状态,难以传递到封堵层位。在水泥浆失重期间,地层裂隙中水流体将通过高低压层流体之间的压差从水泥浆还没有凝固的部分,从高压层窜流到低压层,进而形成水泥窜槽。由于井口加压给井筒内的水泥浆一个覆盖力,控制高压裂隙水流体不在井筒内流动,从而确保井筒内流体趋于稳定,这样能保证水泥封堵的成功率。

5.2 高密度钻井液平衡钻进技术

由于本井涌水点众多,并且水泥浆堵水方法并非每次都能奏效,为保证正常钻进并且裂隙水在钻进和循环过程中不再涌出,通过加大钻井液密度平衡地层压力以达到控制井涌的理论,结合岩心钻机的实际情况,尝试了配制固相和无固相2种重浆平衡钻进的技术。

5.2.1 固相高密度钻井液

钻井液配方:4%膨润土+0.5% Na_2CO_3 +2% NaOH +0.5% HV-CMC +2.5% KHm +1% TX +重晶石粉。

钻井液性能:密度 $1.37\sim 1.40\text{ g/cm}^3$,粘度45~50 s,pH值8~9。

该钻井液密度容易调节,是石油钻井中最常用的重浆类型,但相比无固相钻井液循环阻力会更大,对钻具环空直径、泥浆泵泵压要求较高,应用到绳索取心钻具中应当随时关注泵压变化情况,使用不当容易产生因泥浆循环不畅导致的烧钻、卡钻事故。

5.2.2 无固相高密度钻井液

钻井液配方:4%膨润土+2% NaOH +0.5% HV-CMC +1% TX +氯化钙。

钻井液性能:密度 $1.35\sim 1.42\text{ g/cm}^3$,粘度34~42 s,pH值8~9。

考虑到氯化钙水溶液密度大,选用无水氯化钙为主要加重剂,配制高密度钻井液,既可满足高密度

压井,又因其为液态,流动性很好,确保了泥浆循环畅通。但由于该泥浆中润滑剂的溶解度较小,润滑性能受到影响,钻进过程中钻速较低,不适合在研磨性强的岩层(本井中玄武岩、石英砂岩地层)中使用。

5.3 多级套管固井技术

在绳索取心钻进工艺中,一般只对涌、漏、垮塌等复杂地层下入套管封隔,并且不进行套管固井。本井施工过程中,由于存在地层涌水点多、水压高、水中溶解有硫化氢等棘手问题,单纯下套管封隔不仅无法解决涌水问题(裂隙水会从套管环空以较大流速涌出井口),甚至套管会因为硫化氢腐蚀氢脆断裂而导致严重的井内事故(本井在施工过程中检查出钻具接手因硫化氢腐蚀而脆裂的现象),经过综合分析,为彻底封隔涌水层,杜绝硫化氢危害,荣地1井对一开、二开和三开均进行了固井,本文以三开固井为例进行介绍,如图2所示。

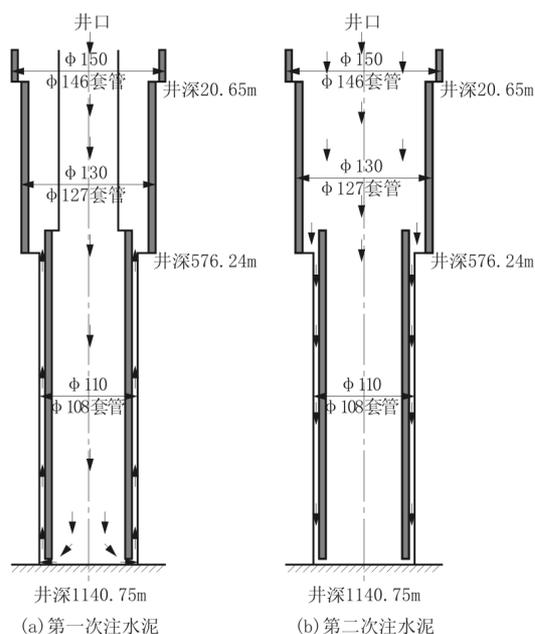


图2 荣地1井三开固井施工示意图

三开井深为576.24~1140.75 m,裸眼井径为110 mm,选用 $\text{Ø}108$ mm套管固井,若 $\text{Ø}108$ mm套管直接从井口固至1140.75 m,材料成本很高,造成了浪费,在二开已固井的情况下只需固三开井段即可达到封隔涌水层目的。

5.3.1 施工步骤

(1)准备 $\text{Ø}108$ mm套管600 m,用S95钻杆将套管送入孔底(中间用正反扣变径将S95钻杆与

$\text{Ø}108$ mm套管联接)。

(2)配制 2 m^3 水灰比为0.5的水泥浆,进行第一次注浆,用泥浆泵连接S95钻杆从钻杆中将水泥浆泵入井内。

(3)水泥浆泵入完成后立即进行第一次替浆,用 7 m^3 的清水把水泥浆压至孔底,并压入套管环状间隙(见图2a)。

(4)提起S95 mm钻具。

(5)配制 3 m^3 水灰比为0.6的水泥浆,进行第二次注浆。

(6)用泥浆泵从井口 $\text{Ø}130$ mm套管,将水泥浆压入孔内(见图2b)。

(7)替浆,用 6 m^3 清水压水泥浆,致泵压升高,不能压入为止,井口保压6 h。

整个固井完工,待水泥浆凝固后钻开水泥塞。

5.3.2 固井效果分析

通过三级套管固井方法,彻底封隔住涌水层段,并且解决了硫化氢危害。

5.3.3 注意事项

套管固井施工前应该准确测定地层压力、涌水量和井内容积,以便配置合适密度和体积的水泥浆,以防止水泥浆密度和体积不恰当导致被稀释或是将地层压漏。

5.4 几种钻井技术对比

以上技术在应对本井高应力涌水和含硫化氢地层的钻进过程中都起到了良好的效果,在应用过程中每种方法也有各自的优劣:水泥浆堵水技术成本低、操作方法容易掌握,但堵水成功率难以保证,并且耗时较长,会降低钻进效率;高密度钻井液平衡钻进技术由于不需要额外的钻井辅助时间,有利于提高钻效,但钻井液与地层压力之间的平衡难以掌握,增加了钻井的成本;多级套管固井技术能从根本上解决涌水和硫化氢问题,但固井后套管无法再次使用,因此成本也最高;一般而言,在固井前应该先尝试水泥浆堵水和高密度钻井液平衡钻进方法,在前两种方法不奏效时才考虑套管固井。

6 钻井技术成果

(1)通过荣地1井的施工,基本形成了一套切合实际的页岩气调查井钻井施工工艺,并且总结了一套较为完善的处理井内涌水、含有毒有害气体的方法,为川西南地区即将实施的页岩气调查井钻探

提供宝贵的经验。

(2)首次尝试在绳索取心钻探工艺中引入高密度钻井液,通过平衡井内压力的方法对高压涌水地层进行钻进,并且针对岩心钻机各级井径环空间隙小、泥浆泵泵压普遍较小的特点,自制了无固相高密度氯化钙型钻井液,克服了常规固相重晶石型钻井液会增加泥浆循环阻力的难题。

(3)应用水泥浆堵水技术,成功堵住超过岩心钻机常规处理能力的高应力涌水,为下一步钻井施工打下了基础。

(4)采用多级套管固井技术并在井口安装防喷器,成功应对了硫化氢气体可能对人身安全和钻具产生的危害,施工过程中未出现一起安全事故。

7 问题探讨

页岩气调查井与常规煤田钻井具有相似之处,但也具有特殊性,具体而言,由于目前国内页岩气调查井钻井经费投入有限,在设备选型上无法考虑抗风险能力更高的石油钻机,只能沿用钻井成本较低的岩心钻机;而页岩气调查井针对的目的层都含有甲烷气体,甚至含有硫化氢等有毒气体,并且地层往往具有超压的特点,无疑会增加井涌、井喷的风险,常规的岩心钻机在应对这些复杂情况是非常困难的。为此,提出如下建议。

(1)增加页岩气调查井工程的经费投入,保证钻探施工有充足的经费处理复杂情况。

(2)用岩心钻机施工时要提前做好相关应急预案、加装井口防喷设备、采用多级钻进工艺、重视钻井液使用、必要时采取套管固井方案。

参考文献:

- [1] DT/T 0227—2010,地质岩心钻探规程[S].
- [2] 页岩气地质调查井荣地1井地质设计书[Z].中国地质调查局成都地质调查中心,2015.
- [3] 页岩气地质调查井荣地1井工程设计书[Z].四川省煤田地质工程勘察设计院,2015.
- [4] 杨雄.吐哈油田油水井水泥封堵工艺的优化与应用[D].山东东营:中国石油大学,2014.
- [5] 黄土鹏,廖凤蓉,吴小奇,等.四川盆地含硫化氢气藏分布特征及硫化氢成因探讨[J].天然气地球科学,2010,(5):705-714.
- [6] 陈宁,彭步涛.贵州页岩气调查评价井钻探施工技术综述[J].探矿工程(岩土掘进工程),2013,40(S1):261-264.
- [7] 蒋国盛,王荣璟.页岩气勘探开发关键技术综述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(1):3-8.
- [8] 米合江,张飞.新疆页岩气调查井准页2井钻井施工技术及问题探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(11):25-30.
- [9] 徐永镭,汪晓东,冯本强.许昌武庄铁矿深孔绳索取心钻进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(7):33-35.
- [10] 洪卫东.甘陕工区钻井防漏堵漏技术分析和建议[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(3):42-45.

致谢:在钻井技术论证及论文编写过程中得到了中国地质调查局成都地调中心余谦、汪正江及四川省煤田地质工程勘察设计院李之利、黎冬林、冉茂云、严瑞刚、邱建、钱直明、陈锐等人的支持和帮助,在此一并表示感谢!