

汶川地震断裂带科学钻探项目 WFSD - 4 孔套管护壁技术

赵远刚¹, 樊腊生¹, 李前贵¹, 张炳春²

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 2. 沧州市方圆管业有限公司, 河北 沧州 061000)

摘要:护壁技术是解决复杂地层钻探难题的关键技术之一。介绍了一些特殊的套管护壁技术在 WFSD - 4 号孔钻探中的应用情况, 包括在小间隙条件下大直径套管技术、复杂钻孔活动套管护壁取心技术和用于强缩径地层的两阶段下套管固井技术等。

关键词:科学钻探; 汶川地震断裂带; 套管; 护壁技术

中图分类号: P634.7 文献标识码: A 文章编号: 1672 - 7428(2014)09 - 0109 - 05

Wall Casing Protection Technology In WFSD - 4 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project/ ZHAO Yuan-gang¹, FAN La-sheng¹, LI Qian-gui¹, ZHANG Bing-chun² (1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2. Cangzhou Fangyuan Tubular Industrial Co., Ltd., Cangzhou Hebei 061000, China)

Abstract: Borehole wall protection is one of the key technologies for resolving drilling problems in Complex Strata. This paper introduces some special casing adopted in the drilling operation of the borehole WFSD - 4, including large diameter casing technology in small clearance condition, retrievable casing technology for small diameter core drilling in existing large borehole and two phase casing and cementing technology used in strong borehole shrinkage section.

Key words: Scientific drilling; Wenchuan earthquake fault; casing; borehole

0 前言

孔壁稳定与否问题一直以来都是制约钻探技术发展的“瓶颈”之一, 是决定孔内事故率和生产效率的关键。在汶川科钻四号孔(WFSD - 4)主要遇到地质构造复杂, 地应力集中、地层产状高陡突变、裂隙极其发育以及科学钻探连续取心钻进工期长、孔壁裸露时间久和起下钻频繁扰动孔壁等一系列钻探难题。为解决这些技术问题, 保证钻探施工正常进行, 现场钻探技术人员开发和应用了一系列特殊的套管护壁技术。

1 地层概况

WFSD - 4 号钻孔主要钻遇具有强烈走滑作用的映秀—北川断裂带北段, 具有代表性的岩心情况如图 1 所示。

根据 2008 年 5 月 12 日以来在北川—平武—青川一带发生的 6.0 级以上余震的震源分布特征和震源机制研究以及出露地表的地震破裂面分析, WFSD - 4 号孔附近的地层倾角在 $70^{\circ} \sim 75^{\circ}$, 而根据



图 1 WFSD - 4 号孔取出的代表性岩心情况

a—1449.33 ~ 1454.88 m, 变粉砂岩; b—2081.66 ~ 2087.66 m, 深灰色板岩; c—2164.99 ~ 2166.98 m, 灰色板岩; d—2312.30 ~ 2315.03 m, 断层角砾岩、碳质泥岩

实际取出的岩心测得地层倾角 $> 65^{\circ}$, 最大倾角已经

收稿日期: 2014 - 06 - 30

基金项目:科技部科技支撑计划专项“汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)”项目之“科学钻探与科学测井”课题; 中国地质调查局地调项目“定向钻进技术在西部地区大直径深孔钻探中的应用”(12120113097600)、“地震断裂带复杂地层钻探施工技术应用示范”(12120114075701)

作者简介:赵远刚(1983 -), 男(汉族), 辽宁大连人, 中国地质科学院探矿工艺研究所, 勘查技术与工程专业, 从事科学钻探技术研究工作, 四川省成都市郫县成都现代工业港(北区)港华路 139 号, 171613061@qq.com。

接近90°。受地质构造运动和沉积条件的影响,其主要取心段地层为复杂小褶皱、高陡突变构造,岩性变化大、自然造斜能力强,因此该地区钻探施工的防斜、坍塌掉块等问题十分突出。

2 小间隙下大直径薄壁 $\varnothing 273.0$ mm 套管技术

2.1 问题和解决思路

WFSD-4号孔一开采用 $\varnothing 316.5$ mm三牙轮钻头钻进至502.00 m,换 $\varnothing 250.8$ mm三牙轮钻头钻进口袋至513.02 m。设计采用攀钢集团成都钢钒有限公司生产的 $\varnothing 273.0$ mm套管,钢级J55,壁厚8.89 mm,扣型BTC,接箍直径298.5 mm,最小环空间隙9.0 mm。由于套管外环空间隙小(内环空是外环空体积的2.5倍),套管刚度大,所以没有安放套管扶正器。2012年9月1日完成测井后下套管作业,下至孔深93.23 m处遇阻,处理无效被迫起拔套管。分析下套管遇阻的原因得出结论:所钻进的地层岩性为碳质板岩,造斜性很强,导致钻孔“狗腿度”较大。在套管与孔壁间隙小、套管刚度大和钻孔“狗腿度”大三方面条件的综合作用下,套管柱在下放过程中遇到较强的阻力。这种阻力不仅仅是套管与地层间正常的摩擦阻力,更重要的是由于套管在孔内变形后使套管柱对地层的正压力显著加大,从而使摩擦力也显著加大的结果。减轻套管柱下入时的摩擦阻力的基本思路是:采用修孔措施,增大套管与孔壁的间隙(尤其在“狗腿度”较大部位),降低“狗腿度”使钻孔轨迹趋于平滑,并因此降低套管变形时对孔壁的正压力以及与地层的摩擦阻力。

2.2 技术措施

为保证套管顺利下入,设计了与套管刚度匹配的四翼硬质合金刮刀筒修孔器(图2)。该修孔器采用 $\varnothing 273.0$ mm套管作为本体,修孔切削具是大八角硬质合金刮刀片。修孔器套管的长度 < 10 m,其两端各镶焊一组修孔刮刀片,以构成一个较长的大刚度修孔工具,以便获得较好的修孔效果。

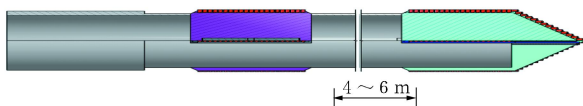


图2 四翼硬质合金刮刀筒修孔器

修孔钻具组合: $\varnothing 316.5$ mm四翼硬质合金刮刀筒(在 $\varnothing 273.0$ mm套管上镶焊硬质合金) $\times 10.18$ m + $\varnothing 273.0$ mm套管循环接头 $\times 0.39$ m + $\varnothing 177.8$ mm钻铤 $\times 54.77$ m + $\varnothing 127$ mm钻杆。

采用该钻具组合总计进行了5次修孔作业后环空通畅、孔壁平滑,起下钻过程中无明显阻卡。下套管过程中开泵循环无憋泵现象,泵压仅为1.0~2.8 MPa,仅在117.27、175.98、196.19、302.22、380.33 m五处遇阻,阻力最大增幅45.51 kN,稍加活动即可解除阻卡。

3 $\varnothing 219.1$ mm 活动套管护壁技术

二开施工裸眼段最长、施工时间最久,不仅有全面钻进、定向钻进和扩孔钻进,还有小口径取心钻进,对于长裸眼钻进的孔壁保护技术措施尤为重要。

$\varnothing 250.8$ mm口径钻进至1435.00 m后,根据地质学研究要求,需要取心钻进100 m。取心钻进的第一个回次,采用 $\varnothing 150.0$ mm取心钻具下钻不到底,循环泵压达到25 MPa,起钻后发现岩心管内充满岩粉。经对这种异常情况产生的原因进行分析得出结论:在 $\varnothing 250.8$ mm口径钻进阶段,由于钻孔直径大和斜孔的原因,孔内的岩粉在钻孔形成岩屑床。下钻时取心钻具破坏岩屑床,进入岩心管内。无论怎样修孔和循环,都很难排除已沉积的岩粉。为解决这个问题,计划下一层内径与取心钻头直径接近的套管,以保证岩屑的正常上返和排除。而为满足取心钻进完成后的 $\varnothing 250.8$ mm全面钻进设计要求,这一层套管不能用水泥固结。下入活动套管的另一个好处是,使钻杆柱运转更加平稳,可获得改善岩心的原状性和采取率并延长钻具寿命的良好效果。经研究,决定下入 $\varnothing 219.1$ mm活动套管,然后进行 $\varnothing 150.0$ mm口径取心钻进。

但是,要在深度1350 m、直径250.8 mm和顶角约30°的斜孔中下入该活动套管,并且保证套管能被全部拔出,该方案具有较大的难度和风险性。为此,现场的钻探管理人员采取了一系列技术措施。

3.1 活动套管的选择

采用现场已有 $\varnothing 219.1$ mm套管,具体参数见表1。屈服强度 > 552 MPa,抗拉强度 > 655 MPa,能够满足活动套管的技术要求。

表1 $\varnothing 219.1$ mm 活动套管技术参数

产品名称	外径/mm	钢级 API	接箍外径/mm	壁厚/mm	通径/mm
套管	219.1	J55	232	7.72	202

注:该套管在沧州市方圆管业有限公司定制加工。

3.2 套管螺纹脂选择

套管螺纹全部涂抹钻具螺纹脂,以保证重复拆卸套管不会造成套管螺纹损坏。该螺纹脂具有良好

的密封性能,能够提供 $\varnothing 219$ mm 套管适当的紧扣和松扣的扭矩,具体性能参数见表 2。

表 2 $\varnothing 219.0$ mm 套管使用的螺纹脂性能

项 目	分析结果	备 注
工作锥入度	340	GB/T269;25 °C,150 g,0.1 mm
滴点	>200 °C	GB/T4929
腐蚀度	无腐蚀痕迹	SH/T0331
钢网分油	1.3%	SH/T0324;65 °C,24 h
水沥滤	1.5%	SY/T5198;65 °C,2 h

注:以上数据由成都工投专用器材开发有限责任公司油脂分公司提供。

3.3 通孔修整孔壁和清理钻孔

为使 $\varnothing 219.1$ mm 套管下入和拔出过程顺利,在下套管前首先进行通孔,以使孔壁较光滑,并且通过大排量循环尽量将孔内的岩屑排除干净。

通孔钻具组合: $\varnothing 250.8$ mm 三牙轮钻头 $\times 0.27$ m + 转换接头 $\times 0.61$ m + $\varnothing 250.8$ mm 修孔器 $\times 1.06$ m + $\varnothing 177.8$ mm 钻铤 $\times 9.12$ m + $\varnothing 245$ mm 扶正器 $\times 1.06$ m + $\varnothing 177.8$ mm 钻铤 $\times 18.26$ m + $\varnothing 245$ mm 扶正器 $\times 1.10$ m + $\varnothing 177.8$ mm 钻铤 $\times 63.89$ m + $\varnothing 127$

mm 钻杆。

钻进工艺:轻压(钻压 < 20 kN)、慢转(转速为 10 r/min)、大排量(25.5 L/s)通孔修整孔壁 2 个回次。

3.4 优化泥浆性能

为了活动套管能顺利拔出,在套管下入前和下入后对泥浆采取了以下措施:

(1)在修孔和下套管前,分多次加入 FKRH 处理剂,降低摩阻,增强润滑性(泥饼粘滞系数控制在 0.09 以下)。

(2)套管下入后,配制防卡润滑浆 30 m³,泵入环空 24 m³,将环空全部封闭。防卡润滑浆配方:孔内泥浆 30 m³(内含 FKRH3%) + 0.6% 废机油 + 0.17% SP-80(乳化剂) + 1.67% FKRH(防卡润滑剂)。

下入活动套管前和起出套管后的泥浆性能见表 3。可见,优化后泥浆体系性能稳定,具有较强的防塌抑制性和润滑性能。

3.5 取得的效果

表 3 下入活动套管前和起出套管后的泥浆性能参数

泥浆性能	密度 /(g·cm ⁻³)	漏斗粘度 /s	失水量/[mL· (30 min) ⁻¹]	泥饼厚度 /mm	pH 值	初切 /Pa	终切 /Pa	动切力 /Pa	塑性粘度 /(mPa·s)	含砂量 /%
下入套管前	1.17	45	6.9	0.5	9.5	5.0	16.0	16.0	17.0	0.3
拔出套管后	1.20	48	6.0	0.5	9.5	4.0	14.6	12.5	24.0	0.3

采用以上措施主要起到了以下作用:

(1)封隔了上部断层附近不稳定地层,降低了钻柱转动对孔壁的扰动破坏;

(2)缩小环空间隙,满足了 $\varnothing 150.0$ mm 口径取心工艺要求;

(3)降低了活动套管起拔时的摩擦阻力。

最终, $\varnothing 219.0$ mm 活动套管安全下至孔深 1435.00 m 处,停留在 $\varnothing 250.8$ mm 裸眼中 21 天后一次性全部起拔成功,完成了活动套管作业。在长裸眼(922.00 m)、定向斜孔条件下(最大孔斜 32.9°)成功拔出活动套管,这在地质和石油钻井行业是较罕见的,该方案的成功实施与孔壁的稳定和决策者的胆大心细及对孔内情况分析判断准确是分不开的。活动套管顺利拔出其意义重大,为下部的施工创造了极为有利的条件,对钻孔结构可调整性,安全施工打下了基础。

4 两阶段下套管固井工艺

4.1 思路和设计

WFSD-4-S4 钻进至 2260.55 m 后,计划下入

$\varnothing 168.3$ mm 套管至 2260 m。该孔 2200 m 以深的孔段属于强缩径带,在钻进施工中曾屡屡发生缩径卡钻事故。由于下入 2260 m 套管时间较长,因地层缩径遇阻甚至被卡死的风险性极大。为此,现场的钻探技术人员创造性地采取了一种特殊的下套管固井工艺,即两阶段下套管固井工艺,其基本思路是: $\varnothing 168.3$ mm 套管分两阶段下入。第一阶段用钻杆下放一小段套管柱,使其以最短的时间通过强缩径带并封隔住缩径带;第二阶段在安全位置使钻杆与套管分离并完成套管回接。具体做法如下:第一阶段采用 $\varnothing 89$ mm 钻杆将 310 m $\varnothing 168.3$ mm 套管下放至孔深 2260 m,并进行固井,控制水泥返高 2050 m。第二阶段从 1950 m 处倒扣,起钻后下入剩余的 1950 m 套管,使上下两段套管在孔深 1950 m 处连接。

该方案可在最短的时间内使套管穿过强缩径带并下到预定井深,是复杂地质条件下大斜度钻孔固井施工中降低孔内事故的最为有效的技术。

4.2 套管柱的选择

(1) $\varnothing 168.3$ mm 套管技术参数:壁厚 7.72 mm,钢级 P110,扣型 BTC,接箍外径 177.8 mm。

(2)尾管套管柱组合:浮鞋×0.29 m+Ø168.3 mm套管1根×9.48 m+浮箍×0.30 m+Ø168.3 mm套管尾管串×310.25 m+尾管头+反扣接头+Ø89 mm钻杆(见图3)。浮箍、浮鞋与套管连接丝扣处和下数第2根与第3根套管连接处采用多点点焊加强连接强度,防止倒扣。

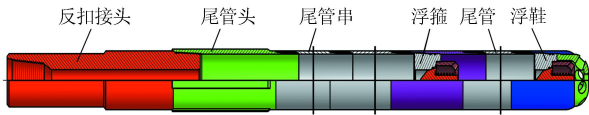


图3 尾管套管柱组合

4.3 注水泥浆工艺

为降低固井成本和保证底部固井质量,采用了普通高强水泥和三峡牌G级油井水泥分别固井,配比情况见表4。首先注入1号罐普通高强水泥,后续注入2号罐G级油井水泥,确保了套管柱底部固井水泥的强度。

表4 Ø168.3 mm 套管尾管固井水泥配比

序号	清水 /m ³	水泥 /t	水泥牌号	缓凝剂 /kg	减阻剂 /kg
1号配浆罐	1.2	2.5	42.5R	5	15
2号配浆罐	1.0	2.0	G级油井水泥	4	12

4.4 分级下套管倒扣和回接

(1)套管倒扣和回接装置。由于在非常规级配Ø219.1 mm套管中下Ø168.3 mm固井后回接,国内目前并没有此类成熟的器具,为此研制了新型的可回接装置,原理见图4。

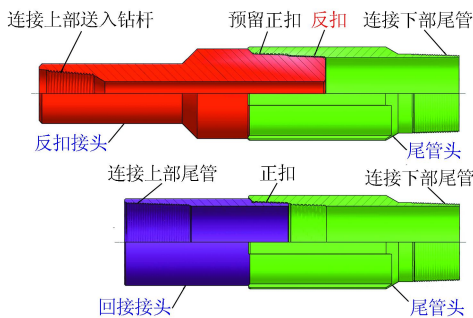


图4 Ø168.3 mm 套管倒扣与回接原理图

上提Ø89 mm钻杆柱使中和点在图4回接连接接头公螺纹处,正转进行倒扣。图5显示当扭矩达到最大值后突然降低时,倒扣成功。

(2)倒扣完成后,采用QZ3NB-350型泥浆泵以11 L/s的排量充分循环30 min,冲洗图4中尾管头母螺纹处残留岩粉,为回接做好准备工作。

(3)下入剩余的约1950 m Ø168.3 mm套管接近倒扣位置时,开启转盘,控制悬重,使图4中尾管

头母螺纹处均匀受力,缓慢下放套管正转对扣。图6显示,转盘转速突然降低且扭矩突然增加至最大值时,对扣成功。

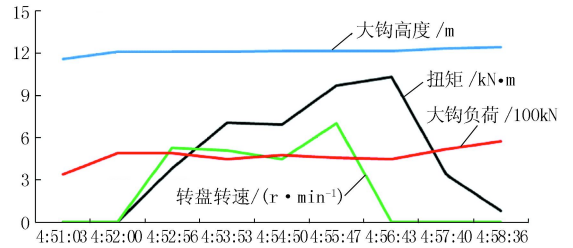


图5 Ø168.3 mm 套管倒扣各参数随时间变化曲线

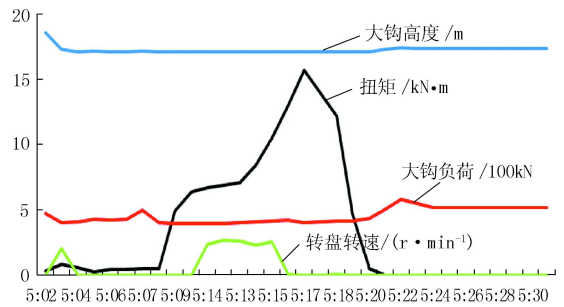


图6 Ø168.3 mm 套管回接各参数随时间变化曲线

5 Ø168.3 mm 套管切割锻铣

WFSD-4-S5孔段处理事故后的“鱼顶”位置在套管内,在裸眼中施工侧钻孔的计划无法得以实施,选择在Ø168.3 mm套管内通过侧钻开窗出新孔S6之后,钻进时很快就发生了断钻铤事故。分析事故原因如下:在套管内开窗侧钻时下发了斜角为3°的斜向器,致使钻孔在此处孔斜突变,产生较大的“狗腿度”。在这种“狗腿度”条件下,钻杆柱在回转过程中要受到强烈的交变弯曲应力作用,使此处的钻柱部件很快发生疲劳断裂。为改善钻孔轨迹质量,S7孔段施工方案采用切割Ø168.3 mm套管,起拔上部未固井套管,在套管割断部位与Ø219 mm套管鞋之间产生一个约38 m长的裸眼窗口(图7),使得S7孔段的侧钻施工在岩层中进行,并因此产生“狗腿度”小的平缓钻孔轨迹,以保障下部施工安全。

切割和锻铣套管施工采用胜利钻井工艺研究院研制的TDX-178型锻铣器(图8),在Ø168.3 mm套管未封固段底部孔深2010.82 m处进行切割,并锻铣至孔深2010.92 m。同时,回收了剩余的全部Ø168.3 mm套管。

切割锻铣施工完毕,在该段裸眼中进行了定向钻进施工,完成的钻孔轨迹的“狗腿度”变化如图9所示。

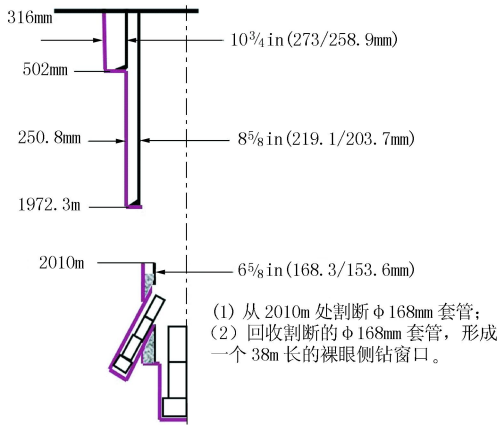


图 7 WFS-4 孔割套管侧钻施工原理



图 8 TDX-178 型锻铣器实物图

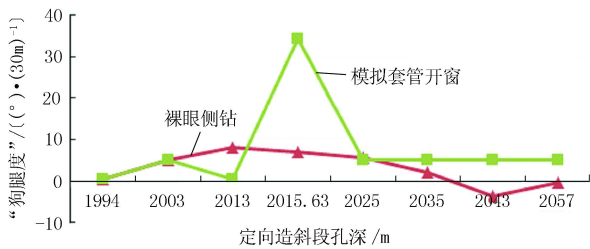


图 9 裸眼侧钻和模拟套管开窗的“狗腿度”变化情况

由图 9 可以看出,切割套管后在裸眼段侧钻,钻孔的“狗腿度”变化较为平滑,而模拟套管开窗的“狗腿度”突变较大。套管切割锻铣技术的采用改善了钻孔轨迹,为后续的安全施工打下了基础。

(上接第 108 页)

辅助配套的设备少、使用操作方便等优点。在一趟钻中既可以滑动造斜钻进,又可以旋转复合钻进。

(2)通过无线随钻定向钻进的实时监控及提钻后的测斜,基本掌握了“单弯单稳”、“单弯双稳”钻具在本地区的造斜、稳斜、降斜的规律,为 1555.67~1970.30 m 孔段的轨迹控制提供了依据。

(3)随着顶角的增大,机械钻速降低,滑动造斜钻进的托压现象明显,加压困难,有待优化钻具组合(如采用加重钻杆、液力加压器等)。

(4)在石油钻井、定向井、水平井、大直径全面钻进中,无线随钻测斜仪配合弯外管螺杆马达进行定向钻进是主流方向,有线随钻逐步被淘汰。

(5)在地质勘探钻进中,造斜工作量大时建议采用有线随钻测斜仪配合单弯螺杆马达进行定向钻

6 总结

(1)采用修孔方法解决了 $\varnothing 273.0$ mm 套管下入受阻的技术难题,提高了施工效率。

(2) $\varnothing 219.1$ mm 活动套管护壁取心技术打破了常规的钻进施工思路,解决了施工的难题,取得了较好的效果,可为以后类似的工程提供借鉴。

(3)两阶段下套管固井工艺,可在最短的时间内使套管通过缩径带,实现了安全和快速穿越强缩径地层下套管固井。

(4)采用切割和锻铣套管技术,将套管内的开窗侧钻转移到地层中进行,大大降低了造斜强度,改善了钻孔轨迹,减轻了事故风险。

参考文献:

- [1] 邓金根,程远方,陈勉,等.井壁稳定预测技术[M].北京:石油工业出版社,2008.
- [2] 吕坚看,王晓山,苗春兰,等.汶川余震序列北川以北段的震源分布特性与破裂复杂性研究[J].大地测量与地球动力学,2012,35(5):17-21,26.
- [3] 张伟.特深岩心钻孔套管程序和钻具级配等问题的探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(11):1-5.
- [4] 于玲玲,孙连环,鲍洪志.川东北地区高陡构造井壁失稳原因及对策[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2010,32(1):281-283.
- [5] 卫尊义,杨力能,高蓉,等.API偏梯形螺纹套管三角形上螺纹标记疑点分析[J].石油矿场机械,2005,34(1):68-71.
- [6] 张克勤,译.井壁稳定技术译文集(上册)[M].北京:石油工业出版社,1991.
- [7] 樊腊生,张伟,赵远刚,等.一种坐孔底并可回接的尾管装置:中国,CN201320801252[P].2014-05-07.
- [8] 高德利,许树谦,罗平亚,等.复杂地质条件下深井超深井钻井技术[M].北京:石油工业出版社,2004.

进;在侧钻绕障等造斜工作量小时可采用机械式连续造斜器。

(6)在特殊情况下,自然偏斜、偏心楔(斜向器)仍可采用。

参考文献:

- [1] 江天寿,周铁芳,等.受控定向钻探技术[M].北京:地质出版社,1994.
- [2] 马元普,杨明合,陶谦.导向钻井有关力学特性的分析[J].青海大学学报(自然科学版),2007,25(5):14-17.
- [3] 赵金海,韩来聚,等.复合钻进中导向钻具稳斜能力的研究[J].矿山压力与顶板管理(采矿与安全工程学报),2002,19(3):96-97.
- [4] 尹虎,李黔,等.单弯螺杆控制井斜力学特性分析及应用[J].天然气工业,2004,24(6):80-82.
- [5] 游云武.“单弯双稳”钻具组合的受力分析与现场应用[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2010,32(6):498-501.