

# 测斜仪监测技术在共和盆地干热岩井压裂中的应用研究

徐胜强, 张旭东, 张保平, 周 健

(中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院, 北京 100029)

**摘要:** 地热是典型的非常规能源,我国具有丰富的地热资源,开发地热对缓解我国能源对外依存度不断增长的被动局面很有必要,开发利用前景广阔。测斜仪压裂监测技术可以监测裂缝发育形态,尤其在监测裂缝延伸方向,对指导井网布置、压裂工艺及施工规模方面具有重要的指导意义,目前在油气开发中获得了广泛的应用。青海共和盆地的X1井是国内干热岩首次压裂井,需要克服岩性致密坚硬、施工不确定因素多、施工排量小等监测难点问题,利用测斜仪压裂监测技术成功地监测地热井压裂改造过程,探索和丰富了地热井压裂监测方法,拓宽了测斜仪监测的应用范围,获取了X1井压裂裂缝的重要参数,为该区井网布置提供了基础数据,为测斜仪监测施工提供了重要的借鉴。

**关键词:** 地热;干热岩;水力压裂;测斜仪;裂缝监测;共和盆地

**中图分类号:** P634;TE357.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)02-0042-07

## Application of inclinometer monitoring technology in Gonghe hot dry rock well fracturing

XU Shengqiang, ZHANG Xudong, ZHANG Baoping, ZHOU Jian

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100029, China)

**Abstract:** China is rich in geothermal energy, so it is necessary to develop geothermal energy to alleviate China's increasing dependence on foreign energy; in addition, the prospect of geothermal energy development and utilization is broad. The fracturing monitoring technology with the inclinometer can monitor the development of fracture morphology, particularly the fracture extension direction, and has been widely used in oil and gas development. It plays an important role in guiding the well pattern layout, fracturing process and construction scale. The X1 well in Qinghai Gonghe Basin is difficult to monitor because of its tight and hard lithology, many construction uncertainties and small flow rate; meanwhile, X1 is the first one of geothermal wells to be fractured in China. It is the first time worldwide that inclinometer fracturing monitoring technology is used to monitor the process of HDR geothermal well fracturing treatment. The successful implementation of X1 well fracturing monitoring has explored and enriched the geothermal well fracturing monitoring methods, broadened the application scope of inclinometer monitoring. The important fracture parameters of X1 were obtained by monitoring, which provides basic data for well pattern layout in this area and an important reference example for monitoring and operation with the inclinometer.

**Key words:** geothermal; HDR; hydrofracture; tiltmeter; fracture monitoring; Gonghe Basin

收稿日期:2020-07-23; 修回日期:2020-12-04 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.02.006

基金项目:国家重点研发计划课题“压裂监测与人工裂缝网络评价”(编号:2018YFB1501803)

作者简介:徐胜强,男,汉族,1974年生,主任师,高级工程师,石油工程专业,硕士,长期从事油气田勘探开发、新能源开发利用技术研究和现场管理工作,北京市朝阳区北辰东路8号北辰时代大厦610.xsqqsx\_94@163.com。

引用格式:徐胜强,张旭东,张保平,等.测斜仪监测技术在共和盆地干热岩井压裂中的应用研究[J].钻探工程,2021,48(2):42-48.

XU Shengqiang, ZHANG Xudong, ZHANG Baoping, et al. Application of inclinometer monitoring technology in Gonghe hot dry rock well fracturing[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2): 42-48.

## 0 引言

我国2019年原油进口量超过 $5 \times 10^8$  t,为世界第一大原油消费国,在原油消耗量72%需要进口的情况下,拓宽资源种类和获取途径非常必要<sup>[1]</sup>。目前我国地热资源利用量仅占能源消耗总量的0.6%,但世界范围内地热能的年利用增长率达7%。我国地热资源丰富,每年可采量相当于2015年煤炭消耗量的70%,地热能利用增长空间巨大<sup>[1-2]</sup>。目前我国地热资源利用主要是地热发电、供暖、温泉、洗浴、医疗等领域,地热能开发目前处于探索阶段,干热岩压裂裂缝发育特征、改造工艺与造缝关系尚不明确,压裂监测工艺技术尚未配套成熟,进行压裂监测改造裂缝,对压裂监测技术发展和促进地热合理开发运用都十分有益。

我国首次在青海共和盆地发现大规模可利用干热岩资源,X1井是部署的第一口干热岩勘探开发

探索井。国内首次进行了水力压裂热储改造施工。通过室内实验与现场实践相结合的方法,形成了高原干旱地区测斜仪监测现场实施和复杂裂缝解释技术,并成功应用于国内首口地热井压裂施工。该井的成功监测为其它区块的裂缝监测提供了有利的借鉴。

## 1 测斜仪监测原理

测斜仪压裂裂缝监测原理(参见图1)是利用油气井施工时产生的地层形变分析监测裂缝形态,是一种高精尖电子仪器,可检测地层纳弧度级形变。储层改造过程流体高压注入地层,打破了原始平衡状态,会引起地层缝隙压力变化,地层的压力变化或岩石破裂改变了地层受力平衡,破坏了稳定状态,由此产生的弹性形变信息会向各个方向辐射并传导到地面,静置在地面监测孔中的测斜仪可以接收记录这些形变信息。

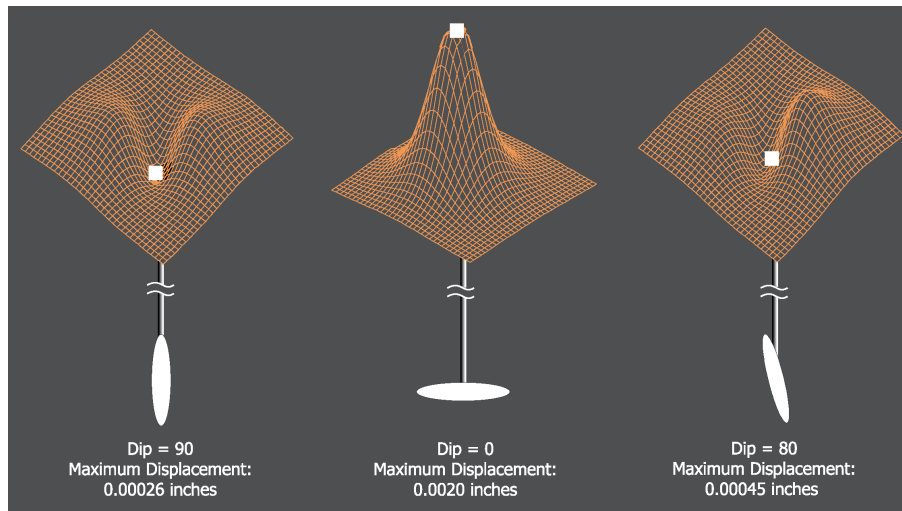


图1 测斜仪监测原理

Fig.1 Monitoring schematic diagram of the surface inclinometer

测斜仪测量的是相对于垂直方向倾斜的角度变化,压裂引起隆起及倾斜信息被测斜仪采集并保存,非规律地均匀布设测斜仪测得多点的形变数据,集中描绘即可得出随时间变化的地面形变场,该地面形变场可以反映地下裂缝动态发育及流体运移方向,由此获得压裂改造裂缝信息。

该技术产生以来,已经在全球各地得到应用,无论是山地、平原、丛林、沙漠和黄土沟壑地区,都有成功应用的实例,具有广谱的适用性,已成为一

种成熟的压裂监测技术<sup>[3-7]</sup>。

## 2 X1井基本情况及施工参数

### 2.1 监测井基本情况

X1井位于青海省共和县,地形以高原山地为主,海拔2910.08 m,完钻层位为印支期花岗岩,完钻深度3705 m,完井套管深度3361.12 m,裸眼段长度343.88 m。该井自1341.00~3705.42 m钻遇花岗岩地层,岩性以灰白色花岗岩为主,中粗粒花岗结

构,块状构造,岩石主要成分为斜长石、钾长石、石英等。X1井岩心孔隙度和渗透率都很低,孔隙度<4%,渗透率<0.4 mD,地层渗透率低,岩石致密坚硬,杨氏模量及泊松比见表1,储层上覆岩石力学参

数对地下形变的传输具有重要影响,是进行监测解释的关键基础参数。经分析测试,X1井的岩石力学性质能较好满足监测要求。

表1 岩心力学性质测试

Table 1 Test parameters for the mechanical properties of cores

样品编号	检测条件		检测结果		
	围压/MPa	孔隙压力/MPa	抗压强度/MPa	杨氏模量/MPa	泊松比
X1-1-cz1	0	0	82.09	32838	0.206
X1-1-sp0	0	0	85.64	33007	0.203
X1-2-cz1	0	0	103.71	33638	0.225
X1-2-sp0	0	0	90.23	31423	0.216
X2-1-cz1	0	0	46.88	28227	0.189
X2-1-sp0	0	0	35.86	26452	0.190
X2-2-sp0	0	0	52.84	27544	0.215
X1-1-sp45	20	0	178.56	36933	0.250
X2-1-sp45	20	0	287.88	42134	0.245
X1-2-sp45	20	0	358.66	47290	0.319
X2-2-sp45	20	0	295.91	42686	0.311
X2-1-sp90	30	0	355.50	48620	0.339
X2-2-sp90	40	0	382.95	49452	0.344
X1-2-sp90	40	0	430.38	54142	0.343
X1-1-sp90	40	0	354.07	44910	0.338

## 2.2 X1井施工参数

通过水力压裂将干热岩压裂形成相互连通裂缝网络,地面注入液体至相互连通的裂隙系统中经高温岩体加热后采出的热能以高温蒸汽的方式通过地上发电装置转变为电能,实现干热岩热能利用,是目前地热经济开发的主要方式。美国、英国、法国、德国、瑞士、日本、澳大利亚等国已经开展了多年的研究和试验,但终因技术问题或经济效益不佳而终止,未实现大规模商业开发利用<sup>[8-12]</sup>。

通过压裂技术实现地下裂缝网络贯通是干热岩有效开发技术的关键途径,在室内试验和研究分析的基础上,结合X1井地质特征,压裂过程分为3个阶段:(1)地层吸水能力、热破裂及可压性试验阶段;(2)缝网主控因素试验阶段;(3)压后效果评价试验阶段。

采用4½ in(1 in=25.4 mm,下同)光套管注入压裂施工,于2019年8月27-29日,完成了地层吸水试验、热破裂试验、可压性试验、恒定排量试验

(一)、恒定排量试验(二)等压裂施工阶段。2019年9月5日进行压后地层吸水试验注入施工,各阶段主要施工参数如表2所示。

## 2.3 地面测斜仪裂缝监测施工准备及现场实施

测斜仪对方位角和倾斜角敏感,裂缝方位和形态对后期井位调整和施工方案确定指导意义重大<sup>[13-16]</sup>。X1井是我国花岗岩地热井进行压裂的首次施工,施工难度大,风险高,施工不确定性多。作为首口井压裂施工试验,用测斜仪进行地热井监测也是全球第一次,无经验可以借鉴,而监测施工要求务必成功。

## 2.4 测斜仪信号强度测算

监测施工前应对信号强度进行测算以评估施工可行性,测斜仪地面信号强度与施工时注入液体的量和目的层深度相关。调研目标区内的施工规模及地层条件,依据测斜仪形变计算公式:

$$n = \frac{V}{6(H/1000)^3}$$

表2 各阶段施工参数

Table 2 Operation parameters for each stage

阶段	排量/(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	阶段液量/m <sup>3</sup>	累计注入液量/m <sup>3</sup>	液性	压力/MPa	施工日期
地层吸水	0.3~1.0	20.0	20.0	清水	50.5~57.5	8月27日
热破裂	0.5~1.0	337.5	357.5	清水	40.5~65.5	8月27日
可压性	0.5~3.5	69.3	426.8	清水	20.0~75.3	8月28日
恒定排量试验	1.5	306.6	733.4	清水	59.5~70.1	8月28日
	1.5~2.0	100.0	833.4	胶液	55.9~72.9	8月29日
	2.0	500.4	1333.8	清水	72.9~77.9	8月29日
吸水测试	0.5~3.0	132.6	1466.4	清水	10.0~77.7	9月5日

式中: $n$ ——形变弧度, $\mu R$ ;  $V$ ——液体总量, m<sup>3</sup>;  $H$ ——目的层垂深, m。

参照设计施工规模和X1井施工目的层位,计算地热井压裂信号强度为 $(6\sim7)\times 10^3$  nR,测斜仪监测精度为1 nR,信号强度足够满足监测要求。

## 2.5 仪器准备

测斜仪地面监测系统有检波仪60支,每支仪器独立进行数据采集,检波仪有专用接口进行数据读取和仪器运行状态检查,现场施工过程中对检波仪及配套附件进行联机检查和维护(参见图2)。

## 2.6 监测孔设计及要求

依据施工目的层位深度、施工规模和测斜仪检波仪探测能力可确定需要监测孔数,信号越强,需要的监测孔个数越少,反之则越多。

地面布孔需在井眼四周垂深25%~75%形变最佳范围内尽可能地均匀布设,并且避免钻孔多点连成直线;考虑地面噪声对监测质量的影响和增加数据处理工作量,在兼顾钻孔施工条件的同时还要远离交通干道、人口密集区以减少干扰;每个监测孔深度要达到12 m,井眼需进行防水处理并与地层胶结良好。

## 2.7 现场查勘

监测施工必须提前进行现场查勘,了解施工区域的交通条件、自然环境、社会依托、土地关系、民风民俗等基本情况。X1井场地处牧民的公共草场,但是井场东部及南部1 km外就是砾石沟壑地区,高度落差大,交通困难。实地查勘发现沟壑底部干涸河床能够行进工程车辆,查当地为非汛期,为监测孔布设提供了有利条件。沟壑底部有淤积平原、有农田和村庄,需要调整和规避的井位比较多。大部分区域地表土层下有1~3 m的砾石层,钻孔过程中

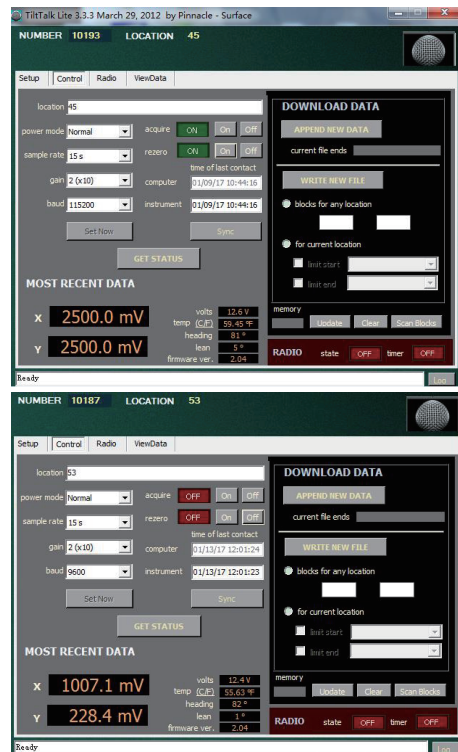


图2 测斜仪数据传输界面

Fig.2 Data transmission interface of the surface inclinometer

容易垮塌,高原干旱地带施工及生活用水比较困难。施工现场地形见图3。

## 2.8 监测孔布孔

根据现场查勘的初步情况,室内进行理论布孔,理论布孔只能确定监测的大概位置,考虑实施条件和钻孔要求,现场查勘时几乎全部的理论监测点位置需要微调或者大幅度调整。室内设计与现场查勘两者相结合并不断调整和反复优化,最终提供首次钻孔位置选点。在实际钻孔过程中遇到异常也会导致个别井位调整,从而引起其它井位关联



图3 现场查勘地形  
Fig.3 Site inspection

性调整,如此反复形成最终的井眼位置(参见图4)。

本次监测总共钻孔47个,因底部钻遇砾石流动层,无法下PVC管调整位置1口井,井眼透水重新钻井1口,井眼斜度过大重钻3口,最终实际交付合格监测孔眼42口,达到了预期的设计要求。

## 2.9 数据采集及监测结果

施工提前3天,测斜仪全部入井静置,进入数据

采集状态,记录监测区域背景数据。数据采集覆盖整个施工过程,施工监测期间需对仪器进行巡护和采集状态检查。

在施工全部结束后进行了全部下载,42个监测孔中的检波仪获取了整个施工过程地面形变数据,形成了地面形变场,利用蒙特卡罗统计分析方法,拟合形变场以达到最佳解释结果。

第一阶段为地层吸水能力、热破裂及可压性试验阶段,阶段注入清水压裂液 $357.5\text{ m}^3$ 。第二阶段为可压性实验和恒定排量压裂试验,主要是为了测试地层持续吸液能力和裂缝破裂延伸状况,阶段注入排量最大达到 $3.5\text{ m}^3/\text{min}$ ,累计注入压裂液 $976.3\text{ m}^3$ (含胶液压裂液 $100\text{ m}^3$ )。第三阶段为吸水试验阶段,施工排量 $0.5\sim 3.0\text{ m}^3/\text{min}$ ,累计注入 $132.6\text{ m}^3$ 。

每一泵注阶段都进行数据质量检查,去除干扰信号或异常数据。采用“三段分析法”进行数据处理,即压前和压后的背景数据与压裂时段的数据进行对比和数学反演,最后得出解释结果。地面测斜仪的解释结果包括每一段的裂缝方位、裂缝半长、裂缝倾角、复杂裂缝。

形变矢量图及裂缝模拟见图5,对数据进行分析解释后获得数据见表3。

从分析结果看,不同阶段裂缝的方位有所变化,随着液体注入地应力场的改变,裂缝发生偏转,注入胶液后,随着液体粘度的增加,缝高也有明显的增加。



图4 实际成孔GPS投影  
Fig.4 Borehole positions from GPS projection

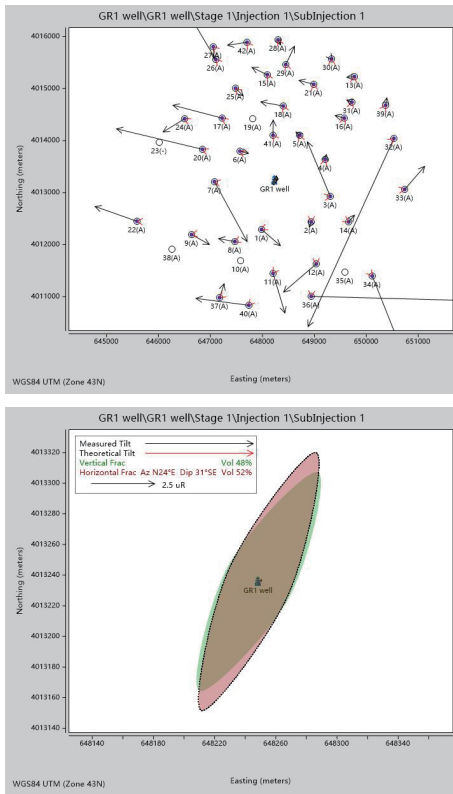


图 5 监测数据矢量及裂缝投影

Fig.5 Monitoring data vector and fracture projection

2.10 地震事件分析

测斜仪不但能够精确记录地层的形变,对于能够导致地面起伏波动的其它信号也能够准确记录。根据地震台网测定,2019年8月27日18时55分02秒监测到震级 2.7 级的地震事件,震源位于北纬 36.265°、东经 100.656°,深度 9000 m,测斜仪检波仪监测到典型信号如图 6 所示。测斜仪的监测数据捕捉到了异常信号,记录了地震发生的时间和强弱,具有对区域重大地质事件的记录及监测作用。

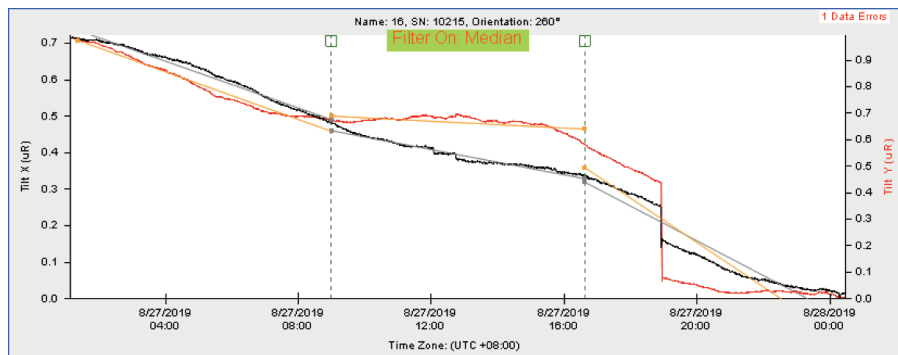


图 6 检波仪监测数据波形图

Fig.6 Waveform chart from the surface inclinometer

表 3 阶段裂缝结果解释汇总

Table 3 Summary of interpretation of stage fracture results

阶段	参数	垂直缝	水平缝
第一阶段	裂缝方位 NE/(°)	28.73	24.10
	裂缝倾角 SE/(°)	29.38	30.89
	半缝长/m	81.00	92.00
	缝高(宽)/m	51.00	49.00
	液体体积/m <sup>3</sup>	163.50	174.66
	液体比例/%	48	52
第二阶段	裂缝方位 NE/(°)	43.50	53.16
	裂缝倾角 SE/(°)	60.00	30.00
	半缝长/m	76.20	88.00
	缝高/m	51.00	44.00
	液体体积/m <sup>3</sup>	190.61	169.31
	液体比例/%	53	47
第三阶段	裂缝方位 NE/(°)	22.32	32.90
	裂缝倾角 SE/(°)	60.00	30.00
	半缝长/m	76.20	73.00
	缝高/m	64.00	55.00
	液体体积/m <sup>3</sup>	330.10	239.16
	液体比例/%	58	42

3 结论及认识

通过 X1 井压裂施工测斜仪地面监测,探索和验证了该技术在干热岩压裂监测方面的可行性,获得了裂缝的发育方位等重要参数。该井同时进行的微地震、广域电磁法等监测结论也得到了相互印证。

(1)监测结果显示,在完成地层吸水试验、热破裂试验、可压性试验、恒定排量试验等压裂施工阶段,地层产生了压裂裂缝,裂缝以垂直缝为主,具有

一定的复杂性,裂缝方位在北偏东 $22.3^{\circ}\sim 43.5^{\circ}$ 之间,倾斜角 $60^{\circ}$ 。

(2)测斜仪压裂监测记录的地层形变资料与压裂液注入关联性强,对地震等引起地面波动的异常信号也能及时采集和记录。

(3)测斜仪监测可用于干热岩热储改造时的裂缝监测。

### 参考文献(References):

- [1] 舟丹. 新冠疫情对中国及全球石油消费的影响[J]. 中外能源, 2020, 25(3): 35.  
ZHOU Dan. Impact of COVID-19 on China and global oil consumption[J]. Sino-Global Energy, 2020, 25(3): 35.
- [2] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 1-9.  
WANG Guilin, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1-9.
- [3] 修乃岭, 严玉忠, 骆禹, 等. 地面测斜仪压裂裂缝监测技术及应用[J]. 钻采工艺, 2013, 36(1): 50-53.  
XIU Nailong, YAN Yuzhong, LUO Yu, et al. Induced fracture monitoring technology and its application of surface tiltmeter[J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(1): 50-53.
- [4] 修乃岭, 王欣, 梁天成. 地面测斜仪在煤层气井组压裂裂缝监测中的应用[J]. 特种油气藏, 2013, 20(4): 147-150.  
XIU Nailong, WANG Xin, LIANG Tiancheng. Application of surface tiltmeter in fracturing fractures surveillance for CBM well group[J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2013, 20(4): 147-150.
- [5] 唐梅荣, 张矿生, 樊凤玲. 地面测斜仪在长庆油田裂缝测试中的应用[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(3): 107-110.  
TANG Meirong, ZHANG Kuangsheng, FAN Fengling. Application of surface tiltmeter fracture mapping in Changqing Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(3): 107-110.
- [6] 周健, 张保平, 李克智, 等. 基于地面测斜仪的“井工厂”压裂裂缝监测技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(3): 71-75.  
ZHOU Jian, ZHANG Baoping, LI Kezhi, et al. Fracture monitoring technology based on surface tiltmeter in “Well Factory” fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(3): 71-75.
- [7] WRIGHT C A, DAVIS E J, MINNER W A, et al. Surface tiltmeter fracture mapping reaches new depths—10000 feet, and beyond[R]. SPE 39919.
- [8] 曾义金. 干热岩热能开发技术进展与思考[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(2): 1-7.  
ZENG Yijing. Technical progress and thinking for development of hot dry rock (HDR) geothermal resources [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(2): 1-7.
- [9] 王培义, 马鹏鹏, 张贤印, 等. 中低温地热井钻完井工艺技术研究与实践[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(4): 27-32.  
WANG Peiyi, MA Pengpeng, ZHANG Xianyin, et al. Drilling and completion technologies for of geothermal wells with medium and low temperatures [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(4): 27-32.
- [10] 谭现锋, 王浩, 康风新. 天津陈庄干热岩 GRY1 孔压裂试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(10): 230-233.  
TAN Xianfeng, WANG Hao, KANG Fengxin. Experimental study on fracturing of GRY1 hot dry rock hole in Chenzhuang town, Lijin county [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10): 230-233.
- [11] 周舟, 金衍, 卢运虎, 等. 干热岩地热储层钻井和水力压裂工程技术难题和攻关建议[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2018, 48(12): 93-98.  
ZHOU Zhou, JIN Yan, LU Yunhu, et al. Present challenge and prospects of drilling and hydraulic fracturing technology for hot dry rock geothermal reservoir [J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2018, 48(12): 93-98.
- [12] 陈作, 许国庆, 蒋漫旗. 国内外干热岩压裂技术现状及发展建议[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(6): 1-7.  
CHEN Zuo, XU Guoqing, JIANG Manqi. The current status and development recommendations for dry hot rock fracturing technologies at home and abroad [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(6): 1-7.
- [13] 张洪峰. 吉林探区压力监测资料解释技术[J]. 油气井测试, 2019, 28(6): 73-77.  
ZHANG Hongfeng. Pressure monitoring data interpretation technology in Jilin prospecting area [J]. Well Testing, 2019, 28(6): 73-77.
- [14] 陈辉. 插值法在测斜数据处理中的应用[J]. 福建建设科技, 2020(2): 19-23.  
CHEN Hui. Application of interpolation method in inclinometer data processing [J]. Fujian Construction Science & Technology, 2020(2): 19-23.
- [15] 曾义金, 郭印同, 杨春和. 压裂过程中地面和井下倾斜场的主控因素研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 79-87.  
ZENG Yijin, GUO Yintong, YANG Chunhe. Investigation on major factors controlling surface and subsurface inclined fields upon hydraulic fracturing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 79-87.
- [16] 闫鑫, 胡天跃, 何怡原. 地表测斜仪在监测复杂水力裂缝中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(3): 480-486.  
YAN Xin, HU Tianyue, HE Yiyuan. Application of surface tiltmeter in monitoring complicated hydraulic fracture [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(3): 480-486.

(编辑 荐华)