

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2020139

引用格式: 周健, 曾义金, 陈作, 等. 青海共和盆地干热岩压裂裂缝测斜仪监测研究 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(1): 88-92.

ZHOU Jian, ZENG Yijin, CHEN Zuo, et al. Research on fracture mapping with surface tiltmeters for “hot dry rock” stimulation in Gonghe Basin, Qinghai [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(1): 88-92.

## 青海共和盆地干热岩压裂裂缝测斜仪监测研究

周 健, 曾义金, 陈 作, 张保平, 徐胜强

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 102206)

**摘 要:** 为了更好地认识青海共和盆地增强型地热系统 (EGS) 压裂裂缝的方位和长度, 指导该盆地换热井井位部署, 优化压裂设计, 采用地面测斜仪监测了 X1 井 3 个压裂阶段的裂缝, 获得了该井 3 个压裂阶段形成垂直裂缝的长度和方位, 并将监测结果与目的层地质特征结合, 分析了共和盆地目标层天然裂隙对裂缝复杂性的影响。研究表明, X1 井目的层的天然裂隙在压裂过程中被部分激活, 造成压裂裂缝的水平分量接近 50%, 在一定程度上提高了压裂裂缝的复杂性, 从而提高了热储裂缝的换热体积。这为今后青海共和盆地干热岩井压裂优化设计和换热井井位部署提供了科学依据。

**关键词:** 地面测斜仪; 干热岩; 地应力; 裂缝方位; 裂缝监测; 复杂裂缝

中图分类号: TE357.1<sup>+</sup>4 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2021)01-0088-05

### Research on Fracture Mapping with Surface Tiltmeters for “Hot Dry Rock” Stimulation in Gonghe Basin, Qinghai

ZHOU Jian, ZENG Yijin, CHEN Zuo, ZHANG Baoping, XU Shengqiang

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 102206, China)

**Abstract:** The three stages of hydraulic fracturing treatment in Well X1 were monitored from surface tilt mapping to better understand the fracture azimuth and length in the Gonghe Basin with enhanced geothermal systems (EGS), which would provide reference data in later deployment of adjacent wells and fracturing design. The fracture length and azimuth of Well X1 in the three stages of fracturing were obtained, and the mapping results were combined with geological features to analyze the impact of natural fractures on hydraulic fractures complexity in the target layers. The results demonstrated that some natural fractures are activated in the treatment and horizontal components of fractures are approximate to 50%, which will largely increase the complexity and heat transfer area of the fracture system. This research can provide a reference for fracturing optimization and the deployment of adjacent wells for geothermal development in Gonghe Basin of Qinghai Province.

**Key words:** surface tiltmeter; hot dry rock; in-situ stress; fracture azimuth; fracture mapping; complex fracture

干热岩 (hot dry rock, HDR) 是指埋藏于地下 3~10 km、温度 150~650 °C、不含或微含不流动流体的高温岩体<sup>[1]</sup>。保守估计, 地壳 3~10 km 深处干热岩所蕴含的能量相当于全球所有石油、天然气和煤炭所蕴藏能量的 30 倍<sup>[2]</sup>。在干热岩概念基础上发展而来的增强型地热系统 (enhanced geothermal systems, EGS), 是指通过水力压裂等工程手段, 在

地下深部低渗透性干热岩体中形成人工热储, 进而长期、经济地采出相当数量地热能的人造水热系统<sup>[3]</sup>。

共和盆地目前是我国干热岩勘查与开发的试验田, 位于昆仑—秦岭纬向构造带与河西系构造复合部位, 是在新近纪初形成的断陷盆地, 其北侧是青海南山断褶隆起带, 南侧是河卡山—贵南南山断褶

收稿日期: 2020-08-26; 改回日期: 2020-12-29。

作者简介: 周健 (1979—), 男, 江苏镇江人, 2003 年毕业于江苏工业学院过程装备与控制工程专业, 2008 年获中国石油大学 (北京) 油气井工程专业博士学位, 高级工程师, 主要从事水力压裂、岩石力学和裂缝监测等方面的研究工作。E-mail: zhouj.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家重点研发计划课题“压裂监测与人工裂隙网络评价 (编号: 2018YFB1501803)”部分研究内容。

隆起带,西为鄂拉山断褶隆起带,东为瓦里贡山断褶隆起带。根据区域地质构造分析、地热地质调查和地球物理(航磁、地震)解译等的结果,在共和盆地恰卜恰岩体内钻了 5 口井深为 2 927.00~4 200.00 m 的干热岩勘查井。GR1 井位于青海省共和县恰卜恰镇恰卜恰河谷内,是目前国内完钻温度最高的一口干热岩井,井底温度 236 °C<sup>[4-8]</sup>。

为了构建青海共和盆地干热岩井的流动和传热通道,掌握该地区干热岩井水力压裂后的裂缝走向和裂缝参数,利用地面测斜仪监测了 X1 井 3 个压裂阶段的裂缝,采集了倾斜角度的变化信号,并利用数据解释软件反演求取了裂缝参数,获得了每一压裂阶段的裂缝方位、裂缝长度与裂缝复杂性,可以为优化压裂设计、评价压裂效果以及干热岩注入-采出井的井位部署提供依据。

## 1 地面测斜仪测试原理

通过水力压裂将地层压开,使之形成 1 条一定宽度的裂缝。压裂裂缝引起的岩石变形场向各个方向辐射,引起地面及地下地层变形。地面变形为微米级,几乎不可测量,但变形场的变形梯度(倾斜场)是比较容易测量的。因此,可以在井下或压裂井井口周围布设一组测斜仪来测量由于压裂引起岩石变形而导致的倾斜角度,再用地球物理反演<sup>[9]</sup>方法反演出压裂裂缝参数。图 1 所示为测斜仪监测垂直裂缝的原理,显示了从地面测斜仪和邻井井下测斜仪观察到的水力裂缝造成的地层变形。

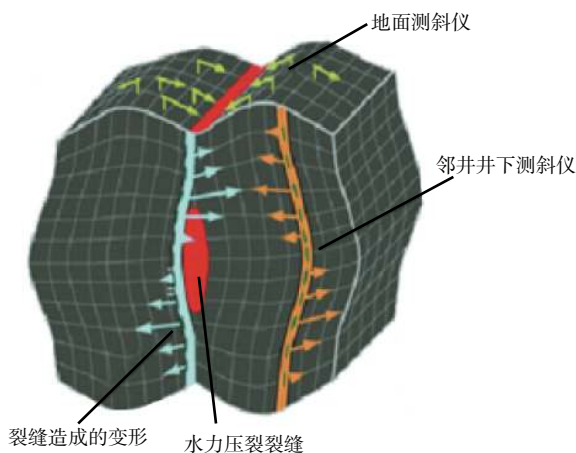


图 1 测斜仪监测垂直裂缝的原理示意

Fig.1 Tilt mapping principle of vertical fractures

在监测压裂裂缝之前,基于相关的施工参数,可以提前计算出压裂裂缝产生过程中所造成的地面最

大倾斜角,计算公式为:

$$T_{\max} = \frac{V}{6\left(\frac{D}{1000}\right)^3} \quad (1)$$

式中:  $T_{\max}$  为最大倾斜角,  $\mu\text{rad}$ ;  $V$  为裂缝内流体的体积,  $\text{m}^3$ ;  $D$  为射孔垂直深度,  $\text{m}$ 。

X1 井目的层埋深约 3 650.00 m, 利用式(1)计算其每个压裂阶段(300  $\text{m}^3$  液体)形成垂直裂缝能够造成的地面最大倾斜角约为 1 000  $\text{nrad}$ , 而测斜仪传感器的测量精度为 1  $\text{nrad}$ , 完全满足监测的需求。

利用地面测斜仪监测压裂裂缝的方法在国内外得到了广泛应用<sup>[10-14]</sup>, 但都是用于监测含油气资源沉积岩储层的压裂裂缝, 笔者首次将其应用于监测干热岩压裂裂缝。

## 2 X1 井目的层花岗岩储层特征

X1 井压裂层段对应井深 3 493.60~3 705.00 m, 岩性主要为黑云母二长花岗岩, 岩层致密且天然裂隙较发育。为进一步了解储层特性, 分别进行了岩石力学和地应力试验, 获取了岩石力学和地应力参数。

对共和盆地 X1 井所取储层岩心进行了岩石力学试验, 获得了不同围压下的杨氏模量和泊松比: 单轴下的杨氏模量为 31.00~33.00 GPa, 泊松比为 0.216~0.225; 围压下的杨氏模量为 47.29~54.14 GPa, 泊松比为 0.319~0.343。40 MPa 围压下的泊松比大于 0.300, 杨氏模量高于 40 GPa。

X1 井地层的各向异性较强, 统计各向异性方向平均为 53.5°, 可知地层的各向异性方向主要为北东东—南西西, 即最大主应力方向, 与地面考察结果基本一致。通过地应力测试, 获得 X1 井井深 3 226.00 m 处的最小水平主应力为 68.94 MPa, 最大水平主应力为 77.67 MPa, 折算到压裂段中部深度最小水平主应力为 77.0 MPa, 最大水平主应力为 86.7 MPa, 最大与最小水平主应力差为 9.7 MPa。

受构造变形影响, X1 井部分井段岩心裂隙发育, 出现了完整岩体与裂隙岩体互层现象。X1 井部分井段还有断层发育迹象, 如取自井深 2 250.00 m 处的岩心呈角砾状, 无充填物, 厚 34.10 m, 推测为一断层。X1 井井深 3 000.00 m 以深地应力较高, 部分岩心严重饼化(见图 2)。

## 3 X1 井压裂裂缝监测方案设计

根据目的层深度和施工规模确定直井地面测斜

| 孔内深度区间/m    | 岩心实景 | 岩性描述  |
|-------------|------|---|
| 0~1 350     |      | 灰黑色、青灰色及灰青色中厚层泥岩夹褐红色薄层泥岩，夹灰黄色、青灰色及杂色中厚层粉砂岩  |
| 1 350~1 450 |      | 浅肉红色中粒二长花岗岩，岩石弱风化，花岗结构：灰色中粗粒斑状二长花岗岩，中粗粒花岗岩结构，似斑状结构，块状构造。斑晶为钾长石，粒径 8~15 mm，含量 10%~15%；基质成分主要为钾长石 30%~35%，斜长石 5%~40%，石英 25%~30%，黑云母 10%~15%，矿物颗粒径主要分布范围 4~7 mm。岩石整体较破碎      |
| 1 450~1 650 |      | 灰白色中粗粒黑云母花岗岩，具花岗结构，块状构造。其中，斜长石 45%~55%，石英 25%~30%，黑云母 10%~15%，矿物粒径 4~8 mm。岩心完整，未见蚀变   |
| 1 650~1 750 |      | 灰白色中粗粒花岗岩闪长岩，花岗结构，块状构造。主要矿物成分及含量：斜长石 40%~45%，钾长石 5%~10%，石英 20%~25%；其中，暗色矿物成份及含量：黑云母 8%~10%，角闪石 5%~8%  |
| 1 750~2 300 |      | 灰白色中粗粒黑云母花岗岩。岩石整体为花岗结构，块状构造。主要矿物成分及含量：斜长石 40%~50%，钾长石 5%~10%，石英 0~25%，黑云母 10%~15%。主要矿物粒径分布在 4~7 mm。可见较多闪长质包体；沿解理面充填 2~4 mm 厚度沸石，呈粉末状                                      |
| 2 300~2 600 |      | 灰白色中粗粒斑状二长花岗岩，花岗结构，块状构造。斑晶主要为斜长石，含量 10%~15%，粒径 15~20 mm。岩石主要矿物成分及含量：钾长石 10%~15%，斜长石 40%~50%，石英 5%~20%，黑云母 5%~10%。沿解理面可见 2~4 mm 厚的纤维状沸石。该段岩心较完整                            |
| 2 600~2 651 |      | 灰白色中粗粒黑云母花岗岩，花岗结构，块状构造。主要矿物成分及含量：斜长石 40%~45%，石英 20%~25%，黑云母 10%~15%。可见 30 cm 宽的细粒二长花岗岩脉   |
| 2 651~2 800 |      | 灰白色中粗粒斑状二长花岗岩，花岗结构，块状构造。斑晶为钾长石，含量 10%~15%，粒径 12~20 mm。基质主要成分为钾长石 25%~35%，斜长石 20%~35%，石英 20%~25%，黑云母 5%~10%  |
| 2 800~2 950 |      | 青灰色中粗粒蚀变花岗岩，中粗粒结构，块状构造。主要矿物成分及含量：斜长石 35%~45%，石英 25%~30%，黑云母 10%~15%，绿帘石 10%~15%。中部夹 340 cm 的细粒二长花岗岩脉。沿解理面见 3~5 mm 的沸石粉末   |
| 2 950~3 100 |      | 青灰色中粗粒蚀变黑云母花岗岩，花岗结构，块状构造。主要矿物成分及含量：斜长石 35%~40%，石英 25%~30%，黑云母 5%，绿帘石 10%~15%。沿解理面充 35 mm 宽的钾长石细脉  |
| 3 100~3 200 |      | 青灰色中粗粒蚀变二长花岗岩，中粗粒花岗岩结构，块状构造。主要矿物成分：斜长石 30%~35%，钾长石 25%~30%，石英 20%~25%，绿帘石 10%~15%（黑云母蚀变形成），粒径 3~8 mm，偶见钾长石碎块，沿裂隙面见 2~3 mm 宽的钙华、沸石薄膜                                       |
| 3 200~3 300 |      | 青灰色中粗粒蚀变黑云母花岗岩，中粗粒结构，块状构造。主要矿物成分：斜长石 30%~40%，石英 25%~30%，黑云母 10%~15%，钾长石 5%~10%。黑云母均已蚀变绿帘石化，长石蚀变成高岭土。沿节理面充填 2~3 mm 宽的钙华、沸石，可见钙华、沸石沿裂隙充填呈细脉状                                |
| 3 300~3 326 |      | 青灰色蚀变花岗岩，粒状花岗岩结构，块状构造。主要成分为斜长石、石英，偶见少量 8~10 mm 的钾长石斑晶。可见绿帘石化和绿帘石化蚀变   |
| 3 226~3 380 |      | 灰白色中粗粒斑状二长花岗岩，中粗粒花岗岩结构，块状构造，似斑状结构，斑晶为钾长石，含量 10%~15%，粒度 8~20 mm，基质为黑云母 5%~8%，钾长石 40%~50%，斜长石 10%~15%，石英 20%~25%，粒径 2~6 mm 为主，较 3 400 m 岩心斑晶粒度明显增加。岩饼状构造发育差，沿裂隙可见钾长石粉末      |
| 3 380~3 400 |      | 青灰色中粗粒斑状二长花岗岩，含灰色细粒花岗岩包体，岩性同 3 500 m，岩饼不如 3 500 m 发育，沿裂隙可见肉红色钾长石化及团块状黑色硬锰矿  |
| 3 400~3 500 |      | 浅肉红色中粗粒斑状黑云母二长花岗岩，含灰色细粒花岗岩包体，直径 5~20 cm，主要成分黑云母 15%，角闪石 5%，斜长石 40%~55%，钾长石 5%，石英 20%~25%，粒径 1~2 mm，发育岩饼状构造，岩饼局部厚 1~2 cm，裂隙中充填薄的高岭石粉末                                      |
| 3 500~3 600 |      | 浅肉红色中粗粒斑状黑云母二长花岗岩，似斑状构造，斑晶为钾长石，肉红色，含量 5%~10%，粒度 6~12 mm，基质以 2~6 mm 为主。主要成分：黑云母 5%~8%，钾长石 30%~45%，斜长石 10%~15%，石英 20%~25%。岩心直径 65 mm，较破碎，呈岩饼状，厚度 1~3 cm（少量 5 cm）。沿裂隙局部见钾化现象 |

图 2 X1 井岩心柱状图<sup>[4]</sup>

Fig.2 Core histogram of Well X1<sup>[4]</sup>

仪的分布位置和数量。根据 X1 井目的层的实际井深(3 493.60~3 705.00 m)和压裂施工参数，确定该井压裂需布置 42 支测斜仪。结合设计方案和现场地表实际条件，在 X1 井井口 3 km 范围内布置了 42 支测斜仪(见图 3)。图 3 中间是 X1 井的井口，黑旗代表分布在每一个测点的测斜仪，黑点是现场布置测斜仪实际走过的轨迹。每一个测点都是通过 GPS 定位确定的。

#### 4 X1 井裂缝监测结果及分析

在干热岩增强型地热(EGS)开发过程中，国际上一般采用对井进行取热和发电，换热井主要依据地热井热储裂缝的方位、缝长等部署。相比于微地震监测等其他监测方法，地面测斜仪能够明确给出

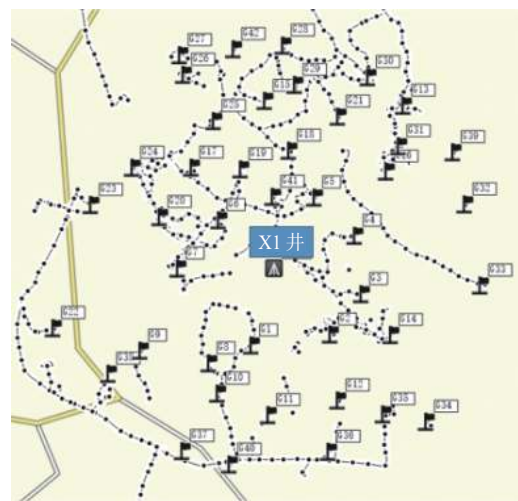


图 3 X1 井地面测斜仪的实际分布

Fig.3 Distribution of surface tiltmeters of Well X1



裂缝的方位, 据此可进行换热井井眼轨道设计。

青海共和 X1 井的压裂经历了吸水性测试、小型压裂测试、变排量注入压裂和胶液扩缝 3 个阶段, 前 2 个阶段的压裂液为清水, 第 3 个阶段的压裂液是胶液和清水。图 4、图 5 和图 6 分别为 3 个压裂阶段测斜仪监测到的结果(左图均为矢量场图, 右

图均为裂缝放大图; 图中绿色部分是压裂形成的垂直裂缝, 红色部分是压裂形成的水平裂缝, 对应了压裂过程中产生的复杂裂缝)。从图 4—图 6 可看出, X1 井 3 个压裂阶段形成垂直裂缝的方位都是北偏东方向, 与最大水平主应力的方位一致, 但每次方位略有不同, 具体跟地质条件和压裂工艺参数有关。

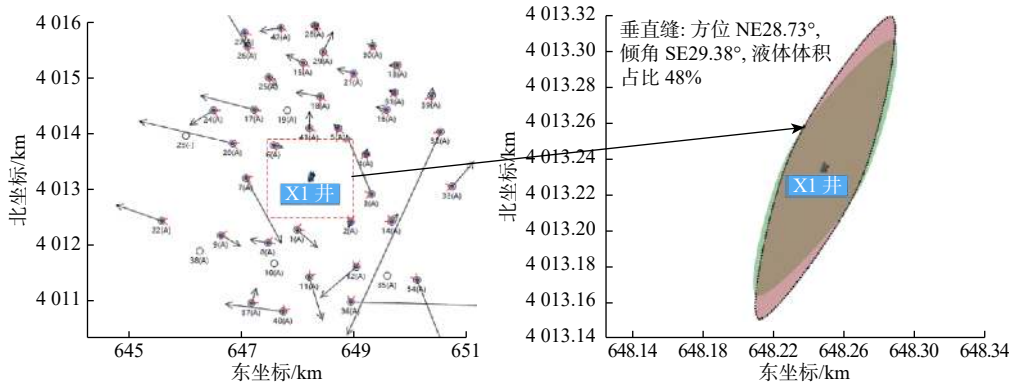


图 4 X1 井压裂第 1 阶段裂缝监测结果

Fig.4 Fracture mapping results of Well X1 in the first fracturing stage

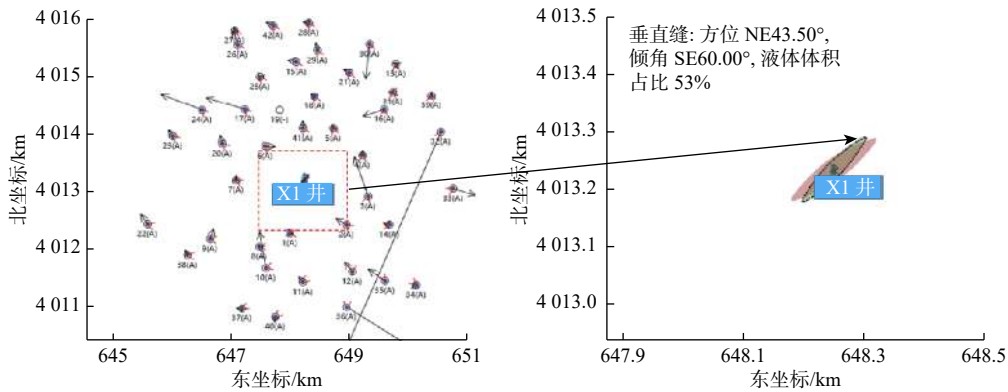


图 5 X1 井压裂第 2 阶段裂缝监测结果

Fig.5 Fracture mapping results of Well X1 in the second fracturing stage

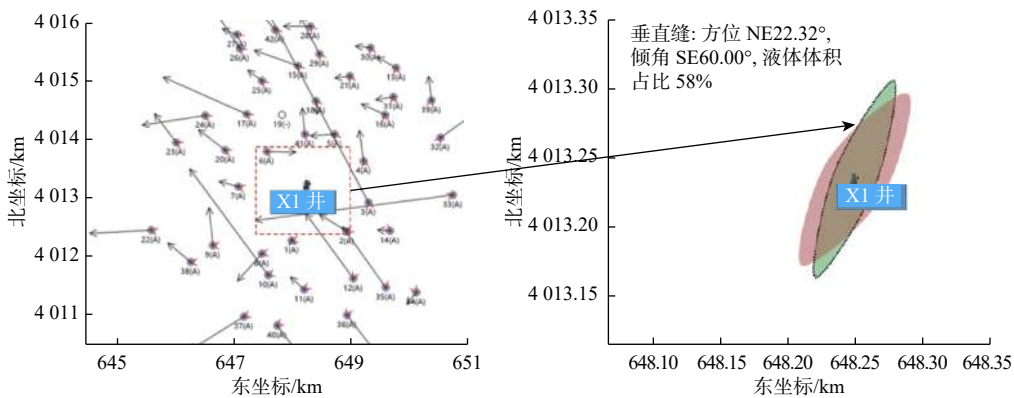


图 6 X1 井压裂第 3 阶段裂缝监测结果

Fig.6 Fracture mapping results of Well X1 in the third fracturing stage

表1为X1井3个阶段形成垂直裂缝的主要参数及监测结果。由于X1井的目的层天然裂隙比较发育,且前2个阶段的压裂液是清水,不但黏度低(1 mPa·s)而且排量低(0.5~1.5 m<sup>3</sup>/min),导致进入垂直裂缝压裂液的占比相对较低,分别为48%和53%(见表1),其余的清水都进入了被激活的水平天然裂隙,形成了一定程度的复杂裂缝。第3阶段采用了较高黏度的压裂液(胶液+清水),而且排量较高(2.0 m<sup>3</sup>/min),进入垂直裂缝压裂液的占比最高(58%),说明采用高黏胶液(20 mPa·s)进行初期造缝,造缝效果最好,所以此时的垂直裂缝方位最可靠,为北偏东22.32°,同时此时缝高也最高,达到64.00 m。

表1 X1井3个压裂阶段垂直裂缝的监测结果

Table 1 Mapping results of vertical fractures during three fracturing stages of Well X1

| 压裂阶段 | 裂缝方位     | 裂缝倾角     | 半缝长/m | 缝高/m  | 压裂液体积/m <sup>3</sup> | 液体进入垂直缝比例/% |
|------|----------|----------|-------|-------|----------------------|-------------|
| 第1阶段 | NE28.73° | SE29.38° | 81.00 | 51.00 | 163.50               | 48          |
| 第2阶段 | NE43.50° | SE60.00° | 76.20 | 51.00 | 190.61               | 53          |
| 第3阶段 | NE22.32° | SE60.00° | 76.20 | 64.00 | 330.10               | 58          |

青海共和X1井也利用地面微地震监测了裂缝,前2个阶段没有明确监测到裂缝的方位,第3阶段监测到裂缝方位为北偏东28.50°;根据地面测斜仪监测数据解释第3阶段裂缝方位为北偏东22.32°,两者相差6.18°。该结果从侧面证明了利用测斜仪可以监测干热岩压裂裂缝方位。

## 5 结论

1)利用地面测斜仪成功监测了青海共和干热岩X1井的压裂裂缝,监测结果表明,可以利用地面测斜仪监测干热岩井压裂裂缝的方位,为干热岩换热井井位部署和压裂设计方案优化提供依据。

2)X1井3个压裂阶段形成垂直裂缝的方位都是北偏东方向,但方位略有不同,当排量和压裂液黏度都较大时,垂直裂缝方位为北偏东22.32°。该结果与地面微地震解释结果基本相同。

3)X1井目的层天然裂隙发育,对形成适度的复杂热储裂缝非常有利。X1井3个压裂阶段都形成了既包含垂直裂缝,又包含被注入压裂液激活水平天然裂隙的复杂裂缝。

## 参考文献

### References

- [1] BROWN D. The US hot dry rock program-20 years of experience in reservoir testing: proceedings of World Geothermal Congress, Florence, May 18-31, 1995[C].
- [2] 许天福,袁益龙,姜振蛟,等.干热岩资源和增强型地热工程:国际经验和我国展望[J].吉林大学学报(地球科学版),2016,46(4):1139-1152.  
XU Tianfu, YUAN Yilong, JIANG Zhenjiao, et al. Hot dry rock and enhanced geothermal engineering: international experience and China prospect[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(4): 1139-1152.
- [3] 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 Yijin. Technical progress and thinking for development of hot dry rock(HDR) geothermal resources[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(2): 1-7.
- [4] 张森琦,严维德,黎敦朋,等.青海省共和县恰卜恰干热岩体地质地质特征[J].中国地质,2018,45(6):1087-1102.  
ZHANG Senqi, YAN Weide, LI Dunpeng, et al. Characteristics of geothermal geology of the Qiabuqia HDR in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. Geology in China, 2018, 45(6): 1087-1102.
- [5] 张盛生,张磊,田成成,等.青海共和盆地干热岩赋存地质特征及开发潜力[J].地质力学学报,2019,25(4):501-508.  
ZHANG Shengsheng, ZHANG Lei, TIAN Chengcheng, et al. Occurrence geological characteristics and development potential of hot dry rocks in Qinghai Gonghe Basin[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(4): 501-508.
- [6] 谢文萃,路睿,张盛生,等.青海共和盆地干热岩勘查进展及开发技术探讨[J].石油钻探技术,2020,48(3):77-84.  
XIE Wenping, LU Rui, ZHANG Chengsheng, et al. Progress in hot dry rock exploration and a discussion on development technology in the Gonghe Basin of Qinghai[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 77-84.
- [7] 唐显春,王贵玲,马岩,等.青海共和盆地地热资源热流机制与聚热模式[J].地质学报,2020,94(7):2052-2065.  
TANG Xianchun, WANG Guiling, MA Yan, et al. Geological model of heat source and accumulation for geothermal anomalies in the Gonghe Basin, Northeastern Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 2052-2065.
- [8] 郑宇轩,单文军,赵长亮,等.青海共和干热岩GR1井钻井工艺技术[J].地质与勘探,2018,54(5):1038-1045.  
ZHENG Yuxuan, SHAN Wenjun, ZHAO Changliang, et al. The drilling technology for the GR1 Well in hot-dry rock of Gonghe, Qinghai Province[J]. Geology and Exploration, 2018, 54(5): 1038-1045.
- [9] SUN R J. Theoretical size of hydraulically induced horizontal fractures and corresponding surface uplift in an idealized medium[J]. Journal of Geophysical Research, 1969, 74(25): 5995-6011.
- [10] WRIGHT C A, DAVIS E J, MINNER W A, et al. Surface tiltmeter fracture mapping reaches new depths-10 000 feet, and beyond[R]. SPE 39919, 1998.
- [11] 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.
- [12] 修乃岭,王欣,梁天成,等.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, et al. Application of surface tiltmeter in fracturing fractures surveillance for CBM well group[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(4): 147-150.
- [13] YOSHIMITSU OKADA. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82(2): 1018-1040.
- [14] 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.