

干热岩储层裂隙准确识别关键技术探讨

谭现锋^{1,2}, 刘肖^{1,2}, 马哲民^{1,2}, 蔺文静³, 王贵玲³

(1. 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;

2. 山东省地热清洁能源勘查开发工程研究中心, 山东 济宁 272100;

3. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

摘要:干热岩资源是一种储量巨大的可再生清洁能源,干热岩的开发需通过深井将高压水注入深部岩层,使其渗透进入岩层的缝隙并吸收地热能量。裂隙网络作为流体的运移通道,在干热岩热能的开采与利用方面至关重要。储层裂隙因其分布的高度非均质性、控制和影响因素的多样性等,研究工作存在难点。本文在采用物探技术和地震探测进行靶区圈定和钻孔定位、钻井过程中进行裂隙垂向精准定位、综合测井判断热储层位置以及热储质量评价、微地震判别压裂过程中的裂缝空间展布等方面,系统总结分析干热岩储层裂隙准确识别的关键技术,对提高干热岩的开采和利用效率具有指导意义。

关键词:干热岩;储层裂隙;储层压裂;物探技术;钻井工艺;综合测井;微地震

中图分类号:P634;TE24 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)02-0047-10

Discussion on the key technology for fracture identification in hot dry rock reservoir

TAN Xianfeng^{1,2}, LIU Xiao^{1,2}, MA Zhemin^{1,2}, LIN Wenjing³, WANG Guiling³

(1. Shandong Provincial Lunan Geology and Exploration Institute (Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources No.2 Geological Brigade), Jining Shandong 272100, China;

2. Shandong Geothermal Clean Energy Exploration and Development Engineering Research Center,
Jining Shandong 272100, China;

3. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang Hebei 050061, China)

Abstract: Hot dry rock resource is a kind of renewable clean energy with huge reserves, the development of hot dry rock needs to inject high-pressure water into deep strata through deep wells, and make it penetrate into the crack of rock stratum and absorb geothermal energy. As the migration channel of fluid, fracture network is very important in the exploitation and utilization of thermal energy in hot dry rock. While the high heterogeneity of reservoir fracture distribution, and the diversity of control and influence factors lead to difficulties on the research work. In this paper, geophysical exploration technology and seismic exploration are used to delineate the target area and drill hole positioning, vertical accurate positioning of fractures during drilling, comprehensive logging to judge the location of thermal reservoir and thermal reservoir quality evaluation; and micro seismic to judge the fracture space distribution during fracturing. The key technologies for accurate identification of fractures in hot dry rock reservoirs are systematically summarized and analyzed, which has guiding significance for improving the exploitation and utilization efficiency of hot dry rock.

收稿日期:2022-04-28; 修回日期:2022-09-13 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.02.007

基金项目:国家重点研发计划项目“井储防垢除垢关键技术及工艺”(编号:2019YFB1504104);山东省地质勘查项目“山东省郯城地热田地热资源开发利用示范”(编号:鲁勘字(2018)40号)

第一作者:谭现锋,男,汉族,1977年生,研究员,地质工程专业,博士,主要从事深部地热资源勘探与开发、采煤沉陷区综合治理与生态修复研究工作,山东省济宁市兖州区九州中路107号,geotan1977@126.com。

引用格式:谭现锋,刘肖,马哲民,等.干热岩储层裂隙准确识别关键技术探讨[J].钻探工程,2023,50(2):47-56.

TAN Xianfeng, LIU Xiao, MA Zhemin, et al. Discussion on the key technology for fracture identification in hot dry rock reservoir[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 47-56.

Key words: hot dry rock; reservoir fracture; reservoir fracturing; geophysical prospecting technology; drilling technology; comprehensive logging; microseismic

0 引言

干热岩是指内部没有或者仅存少量流体、温度 $>180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的异常高温岩体,干热岩资源是埋藏在地球深部潜力巨大的可再生能源^[1-3]。干热岩的开发需通过深井将高压水注入深部岩层,使其渗透进入岩层的缝隙并吸收地热能量,再通过另外一个专用深井将岩石裂隙中的高温水、汽提取到地面,通过热交换及地面循环装置用于发电及综合利用^[4];冷却后的水再次通过高压泵注入地下热交换系统循环使用。整个过程都是在一个封闭的系统内进行^[5-6]。裂隙网络作为水的运移渠道,水在运动过程中吸收热储层岩石的热量^[7],然而因储层裂隙具有分布的高度非均质性、控制和影响因素的多样性等特点,成为其研究的难点^[8]。储层裂隙的准确识别能为提高干热岩热能的开采和利用提供指导。

从已经取得成功的干热岩开采项目来看^[9-10],压裂技术普遍适用于干热岩的开发,只是与油气藏压裂改造略有不同。当存在大的天然裂隙时,往往需要裂缝沿着天然裂缝延伸^[11],此时就需要准确识别储层裂缝。该研究的关键问题就是利用各种技术方法来确定储层裂缝形成和分布规律,掌握储层的空间展布。目前来看,EGS (Enhanced Geothermal Systems)的开发尚处于现场试验研发阶段,国内外目前主要针对该阶段2个关键问题即储层改造技术和热开采技术,投入了大量研究^[12-14],现已在压裂技术^[13]、水力压裂机理^[15]、压裂室内试验^[13,16-17]等方面取得了一定成果,但是针对干热岩裂缝识别尚未形成探测技术体系来指导干热岩的开发利用。20世纪末,随着地球物理技术的发展,人们对储层裂隙识别的研究工作才逐渐展开。在实际工程中,应用地球物理学的方法对热储层进行研究,主要有2种途径:测井方法和微地震监测法^[18],裂隙储层的研究需要解决储层裂缝发育层段、空间展布等问题,本文从干热岩靶区圈定、干热岩孔位选择、干热岩裂隙空间展布及精准定位等方面,结合已施工干热岩项目对干热岩储层裂隙准确识别涉及的关键技术进行探讨。

1 干热岩靶区的圈定

干热岩的形成条件与石油孕育条件有着相似之处,干热岩勘探可借鉴石油开发技术理论,可以从干热岩的“源”、“储”、“通”、“盖”四方面进行开发评价^[19-20],干热岩开发在于对干热岩靶区的圈定以及盖层、热储层、通道(裂隙延展)、基底等结构信息的精确获取,这些均可通过物探方法探测出来。地球物理探测的目的是揭示干热岩勘探区浅部地壳结构和寻找壳内异常热源(体),查明地下深大断裂(导热通道或作为深部热源运移有利通道),热储层、覆盖层的赋存状态(位置、埋深、规模等),判断热储层形成机制^[19]。在干热岩的地球物理勘探中,不同的地球物理方法对岩石的不同地球物理参数具有不同的敏感度,因此勘探效果是各不相同的^[21]。遥感红外方法、大地热流测量、浅层测温等用来圈定干热岩远景区;重力方法、磁法、地震方法、大地电磁等用来探测构造;大地电磁、可控源音频大地电磁等电磁探测方法主要用来探测干热岩岩体,针对岩体的电阻率进行探测,确定其规模、埋深等地质信息;而微震方法、井中地球物理方法、自然电场法等方法主要用于干热岩的开发监测,保证干热岩可持续开发。

1.1 重力方法探测技术

重力勘探是通过测量地球表面重力场的变化来研究地球内部密度不均匀体及其分布的一种物探方法。它的测量对象是地球表面的重力场分布^[22]。重力异常可用于揭示岩浆岩侵入体空间分布、寻找深大构造断裂、基岩拗陷中的凸起构造,该方法在研究地热的成因特征等方面作用巨大^[23]。图1为福建漳州地区重力异常推断断裂分布图^[24],根据重力测点数据,断裂往往显示为重力异常的梯度带,推测断裂分布,为圈定有利干热岩异常区提供数据支持。

赵雪宇等^[25]利用松辽盆地重力数据,反演莫霍面深度,圈定莫霍面深度较浅的区域,结合近地表地温梯度数据,寻找出地温高温场所在的区域,缩小了干热岩靶区区域。同时通过对重磁数据进行欧拉反褶积等相关处理,初步划明断裂构造。

1.2 大地电磁法探测技术

大地电磁(Magnetotelluric, MT)是利用天然交

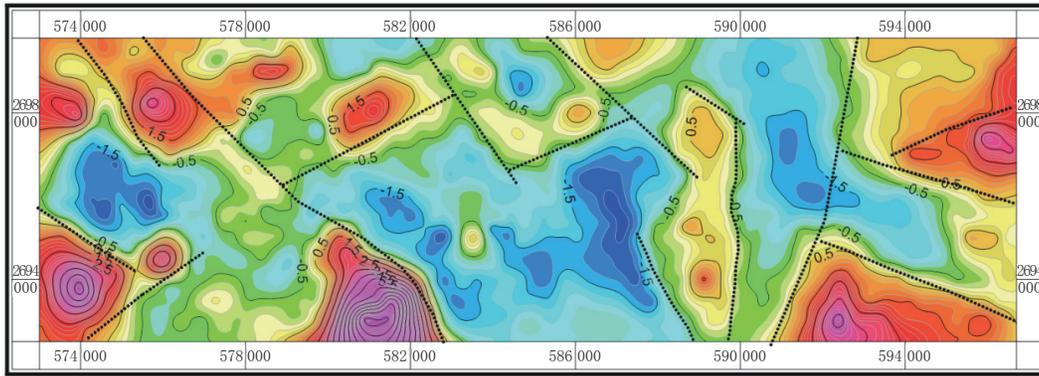


图 1 重力异常推断断裂分布^[24]

Fig.1 Fault distribution inferred by gravity anomaly

变电磁场来研究地球电性结构的地球物理勘探方法。电磁法的优势是相对成本较低,野外施工相对简单、效率较高而且勘探范围大,由于高温岩体与围岩的电性差异较为明显,为电法和电磁法的应用提供了物性基础^[26]。许多相关研究都是应用电磁法结果作为最终定钻的依据。Oskooi等^[27-28]对地热田进行了大地电磁探测,并对其地下结构进行了分析;Volpi等^[29]使用大地电磁测深方法对地热田结构进行了分析。

王家映^[30]研究认为对于地球物理探测、处理及反演,反演解具有非唯一性、多解性,因此,任何一种方法都不可能单独地确定地下介质的地球物理性质。要确定地下介质的地球物理性质,必须使用多种地球物理方法共同探测,才能更好地确定地下目标体的分布状态及其地球物理性质。孙知新等^[31]

和薛建球等^[32]通过浅层测温、深井测温、航磁资料、重力资料以及可控源电磁测深对青海贵德一共和盆地的干热岩存在的可能性进行了评价,亦对干热岩地球物理特征进行了总结。张前等^[33]综合重力测量和大地电磁测深法对海南陵水地区干热岩资源进行了勘查评价,并依据物探结果结合水文、地质等资料布设了ZK1、ZK2两个勘探钻孔位置。

图 2 为福建漳州地区大地电磁测深反演结果,根据大地电磁测深推断出断裂分布。同时结合图 1 重力异常推断断裂,联合反演推断出解释剖面(图 3),从解译结果看出,区内存在大范围的花岗岩侵入,第 4、9、19 岩体均为第三期 $\gamma 5^{2(3)c}$ 岩体,其他花岗岩体为更早期的;第 13、15 及 17 为花岗闪长岩体。在剖面的东部及西部 7 km 以下存在较大范围的低阻体(第 7 及 11 岩体),推断为半融熔岩体。

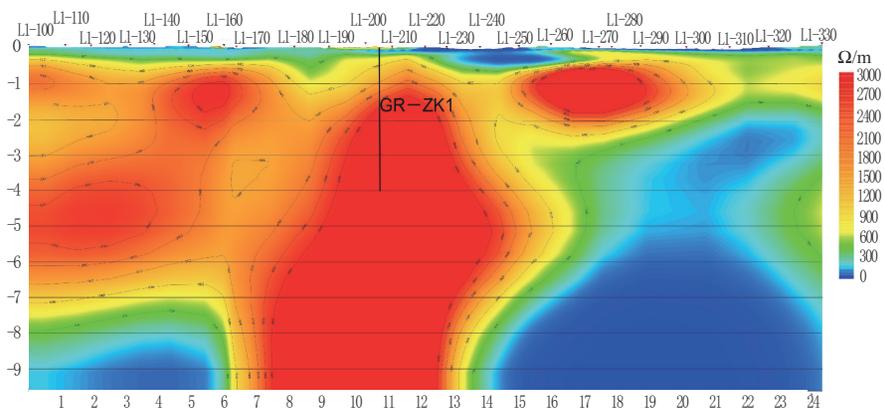


图 2 大地电磁测深反演结果^[24]

Fig.2 Inversion results of magnetotelluric sounding

大地电磁在探测深部构造上,其探测深度可达几十到上百公里,对地下电性构造有很好的区分。

在干热岩探测中,大地电磁法对于干热岩盖层的结构、形态、范围、厚度等都能有很好的反映;对于大型

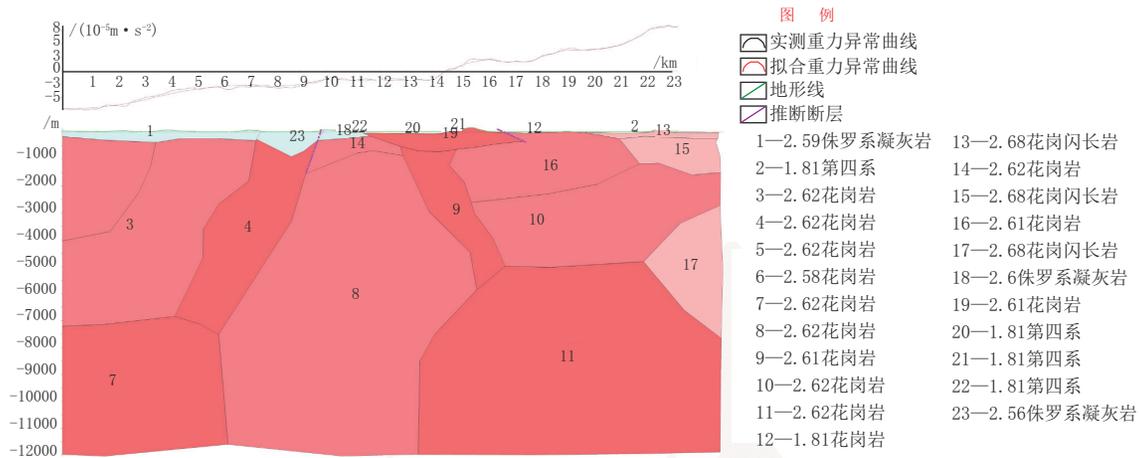


图3 重力和大地电磁联合反演推断解释剖面^[24]

Fig.3 Joint inversion of gravity and magnetotelluric to infer and interpret sections

导热断裂带,在大地电磁剖面测量中,也能有很好的反映^[18]。综合重力和大地电磁联合解译与区域地热地质条件,可以有效圈定干热岩地热异常区,可作为钻井施工孔位的有利目标区。下一步即针对这两处有利目标区开展精细地热地质调查与地球物理勘查,以确定最佳孔位。

1.3 地震探测和精细地热地质调查

在综合重力和大地电磁基础上,结合地震探测和精细地热地质调查,可精准实现干热岩孔位优选。地震勘探技术具有探测深度大、探测精度和分辨率高等优点,能够较好地对比岩性分界面进行精确刻画^[19],该方法能够精确推测断层性质、地层埋深等,在干热岩开发利用中有着极其重要的作用^[34]。Soma等^[35]利用人工源(声波)地震反射法对法国Soultz HDR试验区深部岩性储层、构造等进行探测。Karastathis等^[36]应用三维地震成像技术和居里面深度分析地热田深部构造。孙知新等^[31]通过地震反射波勘探和可控源大地电磁测深(CSAMT)推断出青海共和盆地基底界面,并推测盆地斜坡界面对应重力低异常可能是由花岗岩引起,初步推断为干热岩热源赋存区。地热储层内存在热水和蒸汽的对流运动,使得储层岩石能产生微小震动,从而引发地面可观测的微小震活动^[21]。可通过使用高精度微震仪对储层微震进行观测,根据微震数据反演可以圈定热储层热水通道及热水分布等的空间位置^[37-38]。在地热田勘查方面,地震方法也十分有效,能够精确推测断层位置、产状、地层埋深等,通过分析地震波速分布信息,也可圈定地热田的范围。

Ishii^[37]和Abiye^[39]对地热田进行地震勘探及分析,Majer^[38]也将地震资料应用到地热田的勘查工作中。Yang等^[40]采用微地震对美国加州COSO地热区进行泊松比和孔隙度的分布规律研究,可通过分析地下介质的纵横波速度的变化、泊松比和孔隙度的变化,推断可能的地热区、裂隙发育区和流体活跃区。

1.4 孔位优选实例

干热岩孔位应选在区域构造相对稳定、无明显断裂带经过地区,选择切割深度较深的断裂上盘,并避开断裂破碎带位置^[41-42]。综合前述各种技术手段,可进行干热岩孔位优选和精准定位。以福建漳州地热田干热岩选址为例进行说明,漳州地热田具有较高的地热能流值,是福建省干热岩资源开发的有利前景区^[43]。该研究区位于欧亚大陆板块东南缘与菲律宾海板块的交接部位,属环太平洋岩浆带的组成部分,地表为第四纪更新世冲洪积层覆盖,厚度 >20 m,其下为晚侏罗世灰色流纹质熔岩及火山碎屑岩夹凝灰质粉砂岩、沉凝灰岩等,厚度20~200 m,为燕山期二长花岗岩^[41],为进一步确定有利目标区的构造稳定性,可选择布置EH4物探测线,并对结果进行解译(见图4)。LH1测线可见一条由电阻率突变推测的断裂,为局部断裂。LH5线中部位置存在明显的电阻率突变,应为断裂存在的证据。

结合地球物理解译与野外岩性、构造勘查,绘制出了清泉林场目标区钻井孔位概念模型(见图5)。可以看出,在清泉林场目标区内,F2断裂以西大于1 km以外的位置进行钻井,即不会打穿F2断裂,且位于断裂上盘。

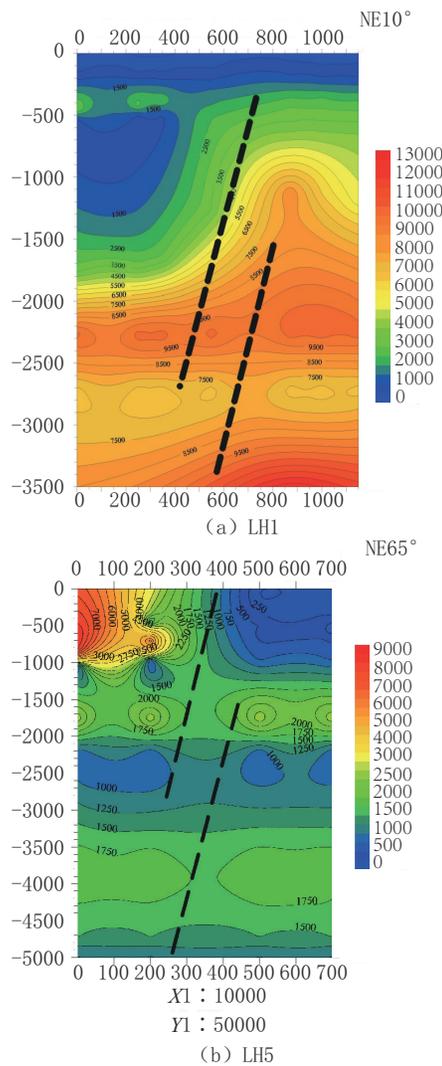


图 4 LH1、LH5 大地电磁测深电阻率等值断面图^[41]
 Fig.4 Equivalent sections of resistivity of LH1 and LH5 magnetotelluric sounding

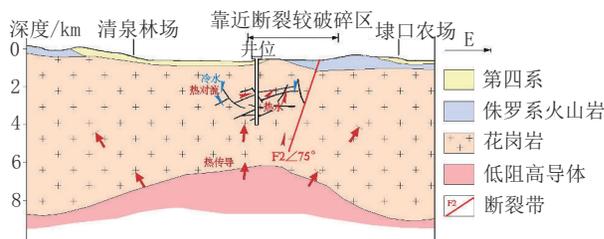


图 5 清泉林场目标区钻井孔位概念模型
 Fig.5 Conceptual model of drilling hole location in the target area of Qingquan Forest Farm

2 干热岩垂向裂隙空间展布精准定位

开采干热岩资源的方法是钻开储层、建立增强型地热系统(EGS),因此干热岩钻井工作至关重要

要^[44-45]。同时钻井也是最准确、最直接识别干热岩储层垂向裂隙发育情况的一种手段,通过钻井进尺深度和快慢、观察岩心、地层岩性变化,可以实现裂隙的垂向精准定位;通过观察钻进过程中漏浆位置与漏浆量、随钻堵漏材料的消耗量等判别裂隙发育程度的大小与位置,精确定位裂缝发育程度和漏失段。

在福建漳州干热岩井进行了取心,取心钻进中采用“孕镶金刚石钻头+取心钻具+螺杆钻具”复合钻进。钻井效率 0.6~1.2 m/h,累计取心进尺 118.26 m,获取岩心 101.09 m,岩心采取率 85.48%。在靠近断裂部位进行钻井工作,随着钻井深度的增加其衍生次级断裂及小裂隙逐渐增多(见图 6),且随深度增加地层压力不断增大,钻遇贯通裂隙后,由于井内钻井液与地层之间压差作用,发生漏浆。



图 6 福建漳州干热岩井岩心
 Fig.6 Cores from a hot dry rock well in Zhangzhou, Fujian

漏浆量的多少能够间接反映热储裂隙发育程度,根据福建漳州干热岩井钻进情况记录,该井全井段均有不同程度的漏浆现象发生。其中一开、二开过程中漏浆现象特点为:漏浆段较短,漏失量较小,持续时间短,该过程指示钻进过程中揭露的裂隙为小裂隙,裂隙之间贯通性较差,且地层压力与钻井液压力基本持平。三开过程的漏浆特点为:漏失量较大,漏浆较为频繁,持续时间较长,该过程指示钻进过程中,随深度增加,钻井液压力与地层之间压力差值逐渐加大,并且次级断裂较多,裂隙之间形成贯通的过水通道,造成漏浆现象持续发生。

3 干热岩储层定性探测研究

测井是将地球物理仪器放入钻井孔内,通过测量井壁周围岩石的地球物理响应,得到井壁围岩与深度相关的不同物理场记录曲线,通过对测井曲线

的分析,推断钻孔周围介质的性质^[19]。通过对测井资料分析,结合物探和施工钻井,反演校核裂隙发育程度并对岩性进行分析。利用该技术可进行井间测温和电阻率探测等,为判断热储层位置以及热储质

量评价提供重要依据。

以福建漳州干热岩测井资料为例(见表1、图7),该干热岩井主要岩性为花岗岩、辉长岩等,岩性整体致密。

表1 福建漳州干热岩井测井解释成果

Table 1 Logging interpretation results of the dry hot rock well in Zhangzhou, Fujian

层号	井段/ m	层厚/ m	电阻率/ Ω	声波时差/ ($\mu\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)	孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	泥质含量/ %	井温/ $^{\circ}\text{C}$	解释结论
1	492.5~494.3	1.8	1368.0	282.5	13.9	25.2	0.05	45.1	一类裂缝层
2	499.5~502.6	3.0	1193.4	213.5	1.7	0.1	0.06	45.2	三类裂缝层
3	672.8~673.9	1.1	1766.8	210.9	0.9	0.1	0.08	46.9	三类裂缝层
4	738.8~743.1	4.3	638.9	191.3	1.2	0.1	0.06	48.1	三类裂缝层
5	892.1~895.4	3.3	1482.5	230.3	1.0	0.1	0.10	49.7	三类裂缝层
6	945.6~946.4	0.8	1594.9	223.3	2.9	0.1	0.07	50.7	三类裂缝层
7	948.9~951.0	2.1	596.6	274.8	9.4	3.4	0.07	50.6	二类裂缝层
8	1214.4~1222.5	8.1	750.1	190.8	1.8	0.2	0.07	54.1	三类裂缝层
9	1243.8~1244.9	1.1	1765.7	221.6	4.7	0.4	0.07	54.4	三类裂缝层
10	1286.4~1287.5	1.1	1546.9	301.2	11.4	8.6	0.08	55.2	二类裂缝层
11	1345.8~1347.9	2.1	746.3	261.7	10.0	5.2	0.05	55.8	二类裂缝层
12	1446.9~1448.1	1.2	1619.2	211.3	3.6	0.1	0.03	57.3	三类裂缝层
13	1890.3~1894.3	4.0	1787.9	210.2	3.3	0.3	0.06	64.0	三类裂缝层
14	1902.1~1907.5	5.4	1041.5	171.7	1.2	0.1	0.06	64.7	三类裂缝层
15	2157.0~2161.0	4.0	697.0	247.1	4.7	2.6	0.10	68.6	三类裂缝层
16	2168.9~2172.4	3.5	863.0	292.1	11.4	20.9	0.08	68.8	一类裂缝层
17	2258.0~2260.0	2.0	807.0	245.6	3.1	0.1	0.08	69.9	三类裂缝层
18	2264.9~2268.9	4.0	386.9	200.2	1.7	0.1	0.07	70.0	三类裂缝层
19	2296.6~2298.3	1.7	1385.5	239.7	4.7	0.1	0.06	70.6	三类裂缝层

测井资料显示电阻率较高,声波时差数值较小,与花岗岩地层的测井响应特征一致。本井地层总的特点是地层比较致密,容水孔隙比较少,有效孔隙度低,可能的地下水储集空间应该是裂缝和溶蚀孔隙,因此测井解释主要是在该类地层中寻找裂缝和溶蚀孔隙井段,并根据发育程度判断地层产水能力。其主要方法是在高电阻率背景下寻找低电阻率异常,并通过自然伽马、声波时差分析电阻率降低的原因是否是岩性变化影响,若不是则可能是地层裂隙发育所致,再进一步分析自然电位、井径、井温曲线有无异常变化,通常较大规模的裂缝发育段会出现泥浆漏失,从而引起自然电位异常,井温偏低,井径值异常。本井电阻率整体较高,且纵向变化较小,反映地层致密、粒间孔隙度比较小,原生孔隙容水性比较

差,地下水主要靠溶蚀孔隙和裂缝容水。

1、16号层自然电位在该段整体显的较高,存在明显正异常,这2层段上下地层的平均电阻率都高于层内平均电阻率,自然伽马低值,井径值变大,双感应八侧向出现明显低值,对应的声波时差明显增大,分析认为是地层存在裂隙的原因,该层段裂缝发育良好;根据测井曲线响应的变化程度,测井综合解释结论:一类裂缝层。

7、10、11号层自然电位在该段整体比较高,存在明显正异常,该3层上下地层的平均电阻率都高于层内平均电阻率,自然伽马低值,井径值变大,双感应八侧向出现低值,对应的声波时差也有所增大,分析认为是地层存在裂隙原因,该层段裂缝比较发育;根据测井曲线响应的变化程度,测井综合解释

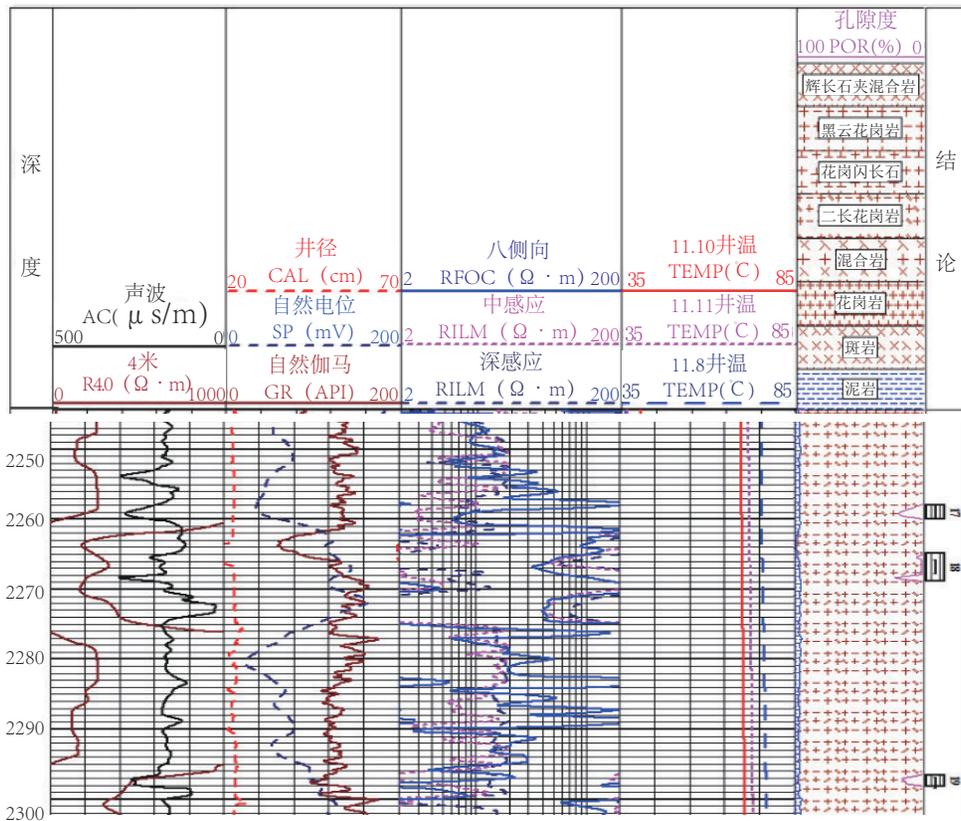


图 7 福建漳州干热岩井测井曲线成果^[42]

Fig.7 Logging curves of the dry hot rock well in Zhangzhou, Fujian

结论:二类裂缝层。

2~6、8、9、12~15、17~19号层的电阻率降低程度较小,声波时差在该段变化较小,井径值变化较小,伽马值较低,因此分析该层裂缝发育较上面3层差,根据测井曲线响应的变化程度,测井综合解释结论:三类裂缝层。

4 裂隙的空间展布探测

井中地球物理、地震方法、自然电场法等可以用来监测干热岩开发的运行状态,对于干热岩资源顺利开发及可持续运行具有重要意义。开发利用干热岩资源一个最关键的技术就是储层改造,主要改造手段是水力压裂。水力压裂是一种通过增加地层与井之间流体通道(即裂缝)的数量和延伸范围来提高产量的技术,作业过程中必然会产生微地震^[46]。水力压裂引起的微震活动被广泛应用于非常规油气生产中,用于描述裂缝网络的几何形状和评价受激储层体积(SRV)的分布,该技术被称为微震监测(MSM)^[47]。近年来微震方法广泛应用在干热岩开

发利用过程中,该方法对干热岩系统开发过程中产生的裂隙拓展过程反映敏感,能够定位出微小震源,能起到较好的监测作用,同时还应用于监测和控制水力压裂规模和效果^[48]。Michelet等^[49]对法国Soultz-sous-Forets干热岩试验基地用震源联合定位法结合微地震观测资料进行处理,提高了对地下热流流动路径的探测精度。Newberry EGS场地、美国Raft River EGS场地、法国Rittershoffen EGS场地均进行了微震监测,通过对微震监测数据分析,显示干热岩热储层刺激岩体产生的裂隙在空间的展布分布位置,为EGS系统中设计井位布设和储层再造方位提供了关键参考依据^[14]。徐胜强等^[50]将测斜仪监测技术在共和盆地干热岩井压裂中进行了应用,利用该技术成功地监测地热井压裂改造过程,获得了裂缝的发育方位等重要参数,探索和丰富了地热井压裂监测方法。Fisher等^[51]使用微地震监测仪进行成像对Fort Worth Basin核心区11口水平井进行监测,对裂缝扩展等进行了研究。深听科技开发了基于震源机制的水力裂缝离散网络建模方法,每个微

震事件的震源机制确定了该位置的裂缝/断层的产状(走向、倾角)和大小(震级源半径),同时,在需要的情况下可根据事件点的时空分布进行连接,在后期的工作中采用微地震判别压裂过程中的裂缝空间展布,并结合钻孔漏浆位置(同时也是裂缝发育位置)和综合测井来综合识别判定,实现对裂隙空间展布的精准探测,以指导计算压裂的体积和精准预估换热量。

5 讨论

在干热岩勘探选区过程中,需要借助各类地球物理方法进行间接探测从而确认钻井位置^[19],在不同的探测阶段需要的探测方法也不同,不同的地形地貌条件对仪器及方法技术的选择的影响也需要考虑。可利用遥感技术在干热岩远景圈定阶段圈定高温异常区,之后可选择重力、磁法勘探对区域构造进行研究从而圈定干热岩有利区,重力异常对于基底的隆起、凹陷,和断裂构造位置、走向反演十分敏感。依据重力布格异常,基底隆起往往产生高重力异常,基底凹陷则产生低异常,断裂构造的位置及走向往往显示为重力布格异常的梯度带^[52]。最后开展深部电磁勘探或三维地震勘探对干热岩赋存状态进行精细刻画。一般在同一阶段也需要多种方法相互结合来弥补自身的缺点,例如CSAMT方法可以探测深部电性信息,但存在浅部盲区,此时结合MT方法可以对浅部电性信息进行解译,通过2种方法相互结合解译能更好指导下一步工作。干热岩裂隙储层识别,在地球物理探测阶段综合使用多种物探手段可建立精确模型,指导孔位和储层再造方位选择,钻井识别是最直接、最准确识别储层裂隙发育的手段,可通过钻井取心和上返岩屑判断地层岩性变化;通过漏浆位置与漏浆量、随钻堵漏材料的消耗量等判别裂隙发育程度的大小与位置,并结合微地震监测可精准判定压裂条件下的裂隙空间展布和方位,通过对综合测井曲线的解译分析,可以在地层中识别裂缝和溶蚀孔隙发育段,并结合钻井漏浆位置和漏浆量、钻井取得的岩心裂隙发育程度综合评定地层产水能力和储层再造能力。

6 结语

干热岩裂隙储层识别,在干热岩热能的开采与利用方面至关重要,综合采用物探技术和地震探测

进行靶区圈定以及钻孔定位,综合测井判断热储层位置以及热储质量评价、微地震判别压裂过程中的裂隙空间展布,但现有测井软件主要是石油系统针对沉积岩地层进行的研发,仍须进一步研发针对火成岩或变质岩专用测井软件以提高地层的识别精确度;进一步加大综合测井设备耐高温、耐高压的适应性研发以及高温随钻测量装备的研发。

参考文献(References):

- [1] 汪集旻,胡圣标,庞忠和,等.中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J].科技导报,2012,30(32):25-31.
WANG Jiyang, HU Shengbiao, PANG Zhonghe, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 25-31.
- [2] 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.
- [3] 马峰,蔺文静,郎旭娟,等.我国干热岩资源潜力区深部热结构[J].地质科技情报,2015,34(6):176-181.
MA Feng, LIN Wenjing, LANG Xujuan, et al. Deep geothermal structures of potential hot dry rock resources area in China [J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(6): 176-181.
- [4] 窦斌,高辉,周刚,等.我国发展增强型地热开采技术所面临的机遇与挑战[J].地质科技情报,2014,33(5):208-210.
DOU Bin, GAO Hui, ZHOU Gang, et al. Opportunities and challenges of developing enhance geothermal system technology in China [J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(5): 208-210.
- [5] 杨洲,杨闪,陈雄.干热岩开发中裂隙内流体温度的影响因素分析[J].矿产勘查,2015,6(1):98-101.
YANG Zhou, YANG Shan, CHEN Xiong. Analysis of influencing factors of the fissure water temperature of the injection well during development of hot day rock [J]. Mineral Exploration, 2015, 6(1): 98-101.
- [6] Armstead C H, Tester J W. Heat Mining: A New Source of Energy [M]. New York: E & FN Spon., 1987.
- [7] 李川,王时龙,张贤明,等.干热岩在地热发电中的应用[J].热力发电,2008,37(11):138-139.
LI Chuan, WANG Shilong, ZHANG Xianming, et al. Application of dry hot rock in geothermal power generation [J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(11): 138-139.
- [8] 童亨茂.储层裂缝描述与预测研究进展[J].新疆石油学院学报,2004,16(2):9-13.

- DONG Hengmao. Research progress of reservoir fracture description and prediction[J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2004, 16(2):9-13.
- [9] Legarth B, Huenges E, Zimmermann G. Hydraulic fracturing in a sedimentary geothermal reservoirs: Results and implications[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(7/8):1028-1041.
- [10] Legarth B, Tischner T, Huenges E, et al. Stimulation experiments in sedimentary, low-enthalpy reservoirs for geothermal power generation[J]. Geothermics, 2003, 32(4/6):487-495.
- [11] 罗天雨,刘全稳,刘元爽.干热岩压裂开发技术现状及展望[J].中外能源,2017,22(10):23-27.
- LUO Tianyu, LIU Quanwen, LIU Yuanshuang. Present situation and prospect on hydraulic fracturing development technique of hot dry rock[J]. Sino-Global Energy, 2017, 22(10):23-27.
- [12] 夏杰勤,窦斌,徐超,等.干热岩热储建造的二氧化碳爆破致裂器优化设计[J].钻探工程,2021,48(1):75-80.
- XIA Jieqin, DOU Bin, XU Chao, et al. Optimum design of CO₂ fracture initiator for thermal reservoir construction in hot dry rock [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1):75-80.
- [13] 郭亮亮.增强型地热系统水力压裂和储层损伤演化的试验及模型研究[D].长春:吉林大学,2016.
- GUO Liangliang. Test and model research of hydraulic fracturing and reservoir damage evolution in enhanced geothermal system [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [14] 许天福,胡子旭,李胜涛,等.增强型地热系统:国际研究进展与我国研究现状[J].地质学报,2018,92(9):1936-1947.
- XU Tianfu, HU Zixu, LI Shengtao, et al. Enhanced geothermal system: International progresses and research status of China[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(9):1936-1947.
- [15] Baria R, Jung R, Tischner T, et al. "Creation of an HDR/EGS reservoir at 5000 m depth at the European HDR project" Proc[C]// 31st Stanford Geothermal Workshop, Calif.: 2006.
- [16] Luis A. Large scale hydraulic fracturing test on a rock with artificial discontinuities[D]. Colorado: Golden, 2007.
- [17] Teufel LW, Clark JA. Hydraulic fracture propagation in layered rock experimental studies of fracture containment[J]. SPEJ9878, 1984, 24(2):449-456.
- [18] 张万鹏.用近接型相似微地震对判定干热岩热储层主要裂隙方位的研究[D].焦作:河南理工大学,2012.
- ZHANG Wanpeng. The azimuth determination research of the main fractures in hot dry rock reservoir by proximity similar microseismic doublets[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2012.
- [19] 杨冶,姜志海,岳建华,等.干热岩勘探过程中地球物理方法技术应用探讨[J].地球物理学进展,2019,34(4):1556-1567.
- YANG Ye, JIANG Zhihai, YUE Jianhua, et al. Discussion on application of geophysical methods in hot dry rock (HDR) exploration[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(4):1556-1567.
- [20] 卢予北,张晗,王攀科,等.河南省干热岩赋存地质环境及找矿方向[J].钻探工程,2021,48(2):1-7.
- LU Yubei, ZHANG Han, WANAG Panke, et al. Geological environment and prospecting fields of hot dry rocks in Henan province[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2):1-7.
- [21] 陈雄.地球物理方法在干热岩勘查中的应用研究[D].长春:吉林大学,2016.
- CHEN Xiong. Research on the application of geophysical methods in hot dry rock prospecting[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [22] 焦新华,吴彦冈.重力与磁法勘探[M].北京:地质出版社,2009.
- JIAO Xinhua, WU Yangang. Gravity and Magnetic Exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [23] 刘义波.长春市净月区地热地球物理勘查与研究[D].长春:吉林大学,2014.
- LIU Yibo. Geothermal geophysical prospecting and research in Jingyue district[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [24] 中国地质科学院水文地质环境地质研究所.福建漳州干热岩资源地球物理勘查报告[R].石家庄:中国地质科学院水文地质环境地质研究所,2014.
- Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS. Geophysical exploration report of hot dry rock resources in Zhangzhou, Fujian province [R]. Shijiazhuang: Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, 2014.
- [25] 赵雪宇,曾昭发,吴真玮,等.利用地球物理方法圈定松辽盆地干热岩靶区[J].地球物理学进展,2015,30(6):2863-2869.
- ZHAO Xueyu, ZENG Zhaofa, WU Zhenwei, et al. Determining the target area of dry hot rock in Songliao Basin by geophysical method[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(6):2863-2869.
- [26] 陆川,王贵玲.干热岩研究现状与展望[J].科技导报,2015,33(19):13-21.
- LU Chuan, WANG Guiling. Research status and prospects of hot dry rock[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19):13-21.
- [27] Oskooi B, Pedersen L B, Smirnov M, et al. The deep geothermal structure of the Mid-Atlantic Ridge deduced from MT data in SW Iceland[J]. Phys. Earth Planet. Inter., 2005, 150(1-3):183-195.
- [28] Oskooi B, Manzella A. 2D inversion of the Magnetotelluric data from travale geothermal field in Italy[J]. Journal of the Earth & Space Physics, 2011, 36(4):1-18.
- [29] Volpi G, Manzella A, Fiordelisi A. Investigation of geothermal structures by magnetotellurics(MT): An example from the Mt. Amiata area, Italy[J]. Geothermics, 2003, 32(2):131-145.
- [30] 王家映.地球物理反演理论[M].北京:高等教育出版社,2011.
- WANG Jiayin. Geophysical Inversion Theory [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [31] 孙知新,李百祥,王志林.青海共和盆地存在干热岩可能性探讨[J].水文地质工程地质,2011,38(2):119-124.
- SUN Zhixin, LI Baixiang, WANG Zhilin. Exploration of the possibility of hot dry rock occurring in the Qinghai Gonghe Basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(2):119-124.

- [32] 薛建球,甘斌,李百祥,等.青海共和—贵德盆地增强型地热系统(干热岩)地质-地球物理特征[J].物探与化探,2013,37(1):35-41.
XUE Jianqiu, GAN Bin, LI Baixiang, et al. Geological-geophysical characteristics of enhanced geothermal systems (hot dry rocks) in Gonghe-Guide Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(1):35-41.
- [33] 张前,吴小洁,谢顺胜,等.综合物探方法在海南陵水地区干热岩资源勘查中的应用[J].工程地球物理学报,2015,12(4):477-483.
ZHANG Qian, WU Xiaojie, XIE Shunsheng, et al. The application of comprehensive geophysical methods to exploration of hot dry rock resources in Lingshui area of Hainan[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(4):477-483.
- [34] 曾昭发,刘四新.工程与环境地球物理[M].北京:地质出版社,2010.
ZENG Zhaofa, LIU Sixin. Engineering and Environmental Geophysics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [35] Soma N, Niisuma H, Baria R. Estimation of deeper structure at the soultz hot dry rock field by means of reflection method using 3C AE as wave source[J]. Pure & Applied Geophysics, 1997, 150(3-4):661-676.
- [36] Karastathis V K, Papoulia J, Fiore B D, et al. Deep structure investigations of the geothermal field of the North Euboean Gulf, Greece, using 3-D local earthquake tomography and curie point depth analysis[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2011, 206(3-4):106-120.
- [37] Ishii Y. Passive and active seismic prospecting in geothermal area [J]. Geophys, Explor., 1976, 29:14-31.
- [38] Majer E L, Mcevilley T V. Seismological investigations at the Geysers geothermal field[J]. Geophys. 1979, 44:246-269.
- [39] Abiye T A, Haile T. Geophysical exploration of the Boku geothermal area[J]. Central Ethiopian Rift. Geothermics, 2008, 37(6): 586-596.
- [40] Yang Y J, Ritzwollerit M H, Jones C H. Subsurface characterization of the COSO geothermal field and surroundings by ambient noise tomography[J]. Geochemistry, Geophysics, and Geosystems, 2010:1-43.
- [41] 蔺文静,王凤元,甘浩男,等.福建漳州干热岩资源选址与开发前景分析[J].科技导报,2015,33(19):28-34.
LIN Wenjing, WANG Fengyuan, GAN Haonan, et al. Site selection and development prospect of a hot dry rock resource project in Zhangzhou geothermal field, Fujian province[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19):28-34.
- [42] 谭现锋,刘肖,王贵玲,等.利津干热岩型地热资源调查评价关键技术研究[J].地质学报,2020,94(7):2166-2176.
TAN Xianfeng, LIU Xiao, WANG Guiling, et al. Research on the key technology of investigation and evaluation of hot dry rock geothermal resources in Lijin[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7):2166-2176.
- [43] 胡圣标,何丽娟,汪集旸.中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J].地球物理学报,2001,44(5):611-626.
HU Shengbiao, HE Lijuan, WANG Jiyang. Compilation of heat flow data in the continental area of China (Third edition) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(5):611-626.
- [44] 谭现锋,王景广,郭新强,等.螺杆钻进工艺在青海共和干热岩GR1钻井中的应用[J].钻探工程,2021,48(2):49-53.
TAN Xianfeng, WANG Jingguang, GUO Xinqiang, et al. Application of PDM drilling technology in Well-GR1 drilling in hot dry rock[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2):49-53.
- [45] 谭现锋,马哲民,段隆臣,等.复合动力钻进工艺在干热岩钻井中的应用研究[J].钻探工程,2021,48(7):1-8.
TAN Xianfeng, MA Zhemin, DUAN Longchen, et al. Application of compound power drilling technology in hot dry rock drilling [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7):1-8.
- [46] 王尧,郭迟辉,吕承训,等.国际水力压裂与地震关系研究进展及地质工作建议[J/OL].地质通报:1-10[2021-05-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.p.20210326.1547.002.html.
WANG Yao, GUO Chihui, LÜ Chengxun, et al. Research progress on the relationship between international hydraulic fracturing and earthquakes and suggestions for geological work[J/OL]. Geological Bulletin of China: 1-10[2021-05-11]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.p.20210326.1547.002.html.
- [47] Li L, Tan J, Wood D A, et al. A review of the current status of induced seismicity monitoring for hydraulic fracturing in unconventional tight oil and gas reservoirs[J]. Fuel, 2019, 242:195-210.
- [48] Cipolla CL, Wright CA. Diagnostic techniques to understand hydraulic fracturing: what? why? and how?[J]. SPE Production & Facilities, 2002, 17(1):23-35.
- [49] Michelet S, Toksoz M N. Fracture mapping in the Soultz-sous-Forêts geothermal field using microearthquake locations[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2007, 112(B7):1-14.a
- [50] 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.
- [51] Fisher M K, Heinze J R, Harris C D, et al. Optimizing horizontal completion techniques in the Barnett shale using microseismic fracture mapping[C]//The SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston: SPE, 2004:1-11.
- [52] 刘瑞德.地热田电磁法勘查与应用技术研究[D].北京:中国地质大学(北京),2008.
LIU Ruide. The study of electromagnetic prospecting and applied technology on geothermal field[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008.