

◀专家视点▶

doi:10.11911/syztjs.2024107

引用格式: 陈作, 赵乐坤, 卫然, 等. 深层地热热储改造技术进展与发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(6): 10–15.

CHEN Zuo, ZHAO Lekun, WEI Ran, et al. Technical advancements and development suggestions of geothermal heat reservoir stimulation in deep formations [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(6): 10–15.

深层地热热储改造技术进展与发展建议

陈 作, 赵乐坤, 卫 然, 刘 星

(中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206)

摘 要: 我国深层地热资源量非常丰富, 但因具有温度高、硬度高、应力高、施工压力高等“四高”特征, 通过热储改造经济利用其热能难度极大, 大量深层高温沉积岩及干热岩等深层地热资源因技术与经济原因尚未得到规模动用。总结分析了当前国内外深层地热热储改造技术的最新进展, 认识到传统的直井或斜井注采模式及笼统的压裂改造方法难以满足深层地热效益开发需求。为此, 提出了大力发展“直井+水平井”或“水平井+水平井”联合注采井网+分段压裂技术及配套的耐高温工具、材料与裂缝系统定量表征技术等建议, 可为加速我国能源转型与早日实现“双碳”目标提供参考。

关键词: 深层地热; 联合注采井网; 热储改造; 复杂裂缝系统; 换热

中图分类号: P314 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2024)06-0010-06

Technical Advancements and Development Suggestions of Geothermal Heat Reservoir Stimulation in Deep Formations

CHEN Zuo, ZHAO Lekun, WEI Ran, LIU Xing

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

Abstract: China has abundant geothermal resources in deep formations. Due to the characteristics of high temperature, high hardness, high stress, and high operation pressure, it is extremely difficult to economically utilize its heat energy through heat reservoir stimulation. A large number of geothermal resources in deep formations, such as high-temperature sedimentary rocks and dry hot rocks, have not been utilized on a large scale due to technical and economic limits. The latest research advancements of geothermal heat reservoir stimulation in deep formations in China and overseas was summarized. It was found that the conventional injection and production mode of vertical wells or inclined wells and the general fracturing method failed to meet the needs of geothermal economical development in the deep formation. Therefore, suggestions were proposed, i.e. extensively developing combined injector and producer pattern of “vertical wells+horizontal wells” or “horizontal wells+horizontal wells” +staged fracturing technology, supporting high temperature-resistant tools and materials, and fracture system quantitative characterization technology, so as to ramp up China’s energy transformation and facilitate the achievement of “carbon peaking and carbon neutrality” goals.

Key words: geothermal resource in deep formations; combined injection and production well pattern; heat reservoir stimulation; complex fracture system; heat exchange

地热能是存储在地壳内部的绿色可再生能源, 分为水热型和干热岩型 2 种, 全球地热能量达到 5.4×10^{27} J。其中, 水热型地热资源因对开发技术要求相对较低, 已得到商业开发利用, 广泛用来取暖、

发电。目前, 有 26 个国家的地热发电装机容量超过 1×10^4 MW。美国一共有 93 座地热发电站, 地热发电年装机容量约 3.8 GW^[1]。我国地热直接利用规模稳居世界首位^[2]。而目前开发利用的浅部水热型资源仅

收稿日期: 2024-03-18; 改回日期: 2024-11-07。

作者简介: 陈作 (1968—), 男, 四川大英人, 1991 年毕业于西南石油学院油藏工程专业, 2002 年获中国地质大学 (北京) 石油与天然气工程专业硕士学位, 正高级工程师, 主要从事低渗透油气藏压裂酸化基础理论研究工作。系本刊副主编。E-mail: chenzuo.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金重大项目“干热岩地热资源开采机理与方法” (编号: 52192621) 资助。

占地热资源的小部分,全球大量存在埋深超过 3 km 的深层高温沉积岩及干热岩资源。美国干热岩资源量超过 20×10^{22} J, 而我国陆域 3~10 km 深层干热岩资源量为 2.52×10^{25} J, 相当于 856×10^{14} t 标准煤。

但是,深层地热资源储层因其独特的地质特征,对热储改造工程技术要求极高、开发难度大。采用传统的直井、斜井注采模式和笼统的压裂改造方法时,压裂改造体积小、采出井流量与温度低、开发效益差等问题十分突出。对此,国内外一直处于探索研究与试验中,譬如 2015 年美国启动的“地热能前沿瞭望台计划(FORGE)”项目以及我国的《深部地热资源动态评价方法与储层改造增产关键技术》、《干热岩能量获取及利用关键科学问题研究》等项目,均针对深层地热开展场地水力压裂-热刺激联合建造工艺攻关,探索建立可复制的深层地热商业化开发模式,为经济动用深层地热资源提供技术支持。近两年来,国外深层地热资源热储改造技术取得了突破性进展,单井地热流量和功率输出均刷新了世界纪录^[3],引起了能源界的广泛关注,显示出深层地热资源经济动用大有可为。

我国具有丰富的深层地热资源^[4-5],但经济开发利用属世界性难题,国家非常重视深层地热开发利用技术攻关。为推动我国深层地热资源的有效开发,笔者总结分析了深层地热造储技术方面的国内外最新进展,剖析了当前面临的关键技术难题,并提出了发展建议。

1 国外深层地热热储改造现状

1974 年以来,国外一直在攻关深层地热热储改造技术,迟迟不见突破。近年来,加拿大、美国等改变了深层地热传统的直井或斜井注采模式以及笼统的压裂改造方法,研究采用了“直井+水平井”或“水平井+水平井”的注采模式+水平井分段压裂技术,现场试验创造了单井地热流量和功率输出新的世界纪录,有望通过不断的技术迭代升级,突破深层地热开发的技术与经济瓶颈,成为规模效益开发深层地热的主体技术。

1.1 深层地热注采井部署方式发展

对于油气资源而言,通过单井钻完井与压裂增产改造,产出的油气可直接利用。深层地热资源利用方式则有所不同:水热型地热钻井后酸洗或酸化后直接利用;干热型地热需钻注采井,对注采井进行压裂造储使裂缝系统在地下连通,再从注入井注

入换热流体循环换热,将热能采出后通过地面装置进行发电或取暖等利用。国内外传统注采井的部署,主要采用直井或斜井“一注一采”、“两注一采”(见图 1)或“多注多采”等方式^[6]。譬如,美国芬登山和澳大利亚库珀干热岩开发试验项目采用“一注一采”布井,法国苏尔茨干热岩则采用“一注多采”布井(见表 1)。近年来,正发展水平井注采或水平井与直井联合注采等方式。

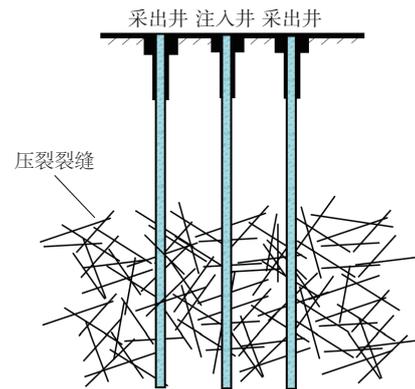


图 1 深层地热开发中传统的“两注一采”布井方式示意
Fig.1 Traditional “two injectors and one producer” arrangement for geothermal development projects in deep formations

表 1 国外深层地热项目布井方式统计

Table 1 Statistics on well arrangement methods for international geothermal projects in deep formations

名称	井深/m	布井方式	井型
美国芬顿山	2 700~4 200	一注一采	直井和斜井
法国苏尔茨	2 800~5 000	两注一采	直井和斜井
澳大利亚库珀	4 100~4 400	一注一采	直井和斜井

1.2 国外深层地热热储改造技术进展

自 1974 年美国与英国、法国、德国、日本等国家在美国新墨西哥州中北部的芬顿山成立联合干热岩研究中心,直至 2020 年以前,国外一直以直井或斜井为重点研究深部干热岩热储压裂改造技术,基本形成了相应的技术体系,支撑了法国苏尔茨、德国兰道、美国盖瑟尔斯等试验项目成功并网发电^[7]。归纳以干热岩为主的深层地热热储改造技术,主体采用清水或活性水恒定中小排量大规模压裂技术,或者“水力压裂+辅助化学刺激”复合改造技术^[8],压裂改造最大深度 5 270 m,单井压裂液最大用量 $75\ 903\ \text{m}^3$,施工排量 $1.4\sim 6.5\ \text{m}^3/\text{min}$ 。但改造后裂缝系统普遍存在不够复杂,甚至以主导型高渗通道为主等缺陷,使采出井采出流体的温度和

流量低,井口压力高,达不到经济开发要求,以至于无法大规模效益开发,可复制推广的热储改造技术一直处于探索试验中。

自2020年开始,支撑页岩油气规模开发的水平井+分段压裂技术,逐步被引入地热行业并取得突破性进展,引起了行业广泛关注。加拿大地热发电开发商 DEEP 公司,于2020年宣布在萨斯喀彻温省美加边境的威利斯顿沉积盆地(巴肯油田)的高温砂岩盐水层内首次进行地热发电开发获得初步成功。该项目第一阶段通过2口直井注水,在地下热储层加热后从1口水平井通过电潜泵采出,水平井垂深3 450.00 m,井底温度125 ℃,水平段长度2 000.00 m,采用 $\phi 114.3$ mm尾管固井,并将水平段分成20段进行压裂,在压后53 d的试采期内获得了1 728~2 000 m³/d地热流量,采出液地面温度约120 ℃。在注水井中添加的化学示踪剂进行监测,试采期间采出井的每日取样中未发现该示踪剂,表明所形成的地下人工缝网内部可能并未形成可以造成注入水提前突破的高渗通道,单井产液量有望提升至8 640 m³/d。

由美国能源部赞助的 FORGE 地热项目,位于内华达州的花岗岩地热储层,热储温度224 ℃,采

用2口斜井组成注采系统。注入井于2021年冬季完钻,井斜角65°,采用 $\phi 177.8$ mm套管固井,于2022年将注入段分成3分段进行压裂,以形成所需的热交换缝网。采出井于2023年以平行斜井方式钻入注入井所形成的缝网,完钻段比注入井完井段上移约91.5 m,注入井压裂作业中注入了荧光示踪剂和少量陶粒微支撑剂。

2023年,美国地热技术初创公司 Fervo Energy 在内华达州进行了双水平井注采地热开发试验并取得突破,水平井储层岩性为由千枚岩、石英岩、闪长岩和花岗闪长岩组成的变质沉积岩和火成岩,注入水平井(34A-22井)完钻井深3 419.90 m,垂深2 335.90 m,水平段长990.90 m,采出水平井(34-22井)完钻井深3 421.40 m,垂深2 211.00 m,水平段长1 008.90 m,均采用 $\phi 177.8$ mm套管完井^[9],见图2。借鉴页岩油气水平井簇射孔+桥塞分段压裂技术,在储层中压裂形成地下热交换器,井底温度191 ℃,“Project Red”项目的30 d试采取得了5 530 m³/d的地热流体流量,相当于实现3.5 MW电力输出,是迄今为止地热行业在增强型地热系统(ESG-Enhanced Geothermal System)下所取得的单井最高产能,单井地热流量和功率输出均刷新了世界纪录。

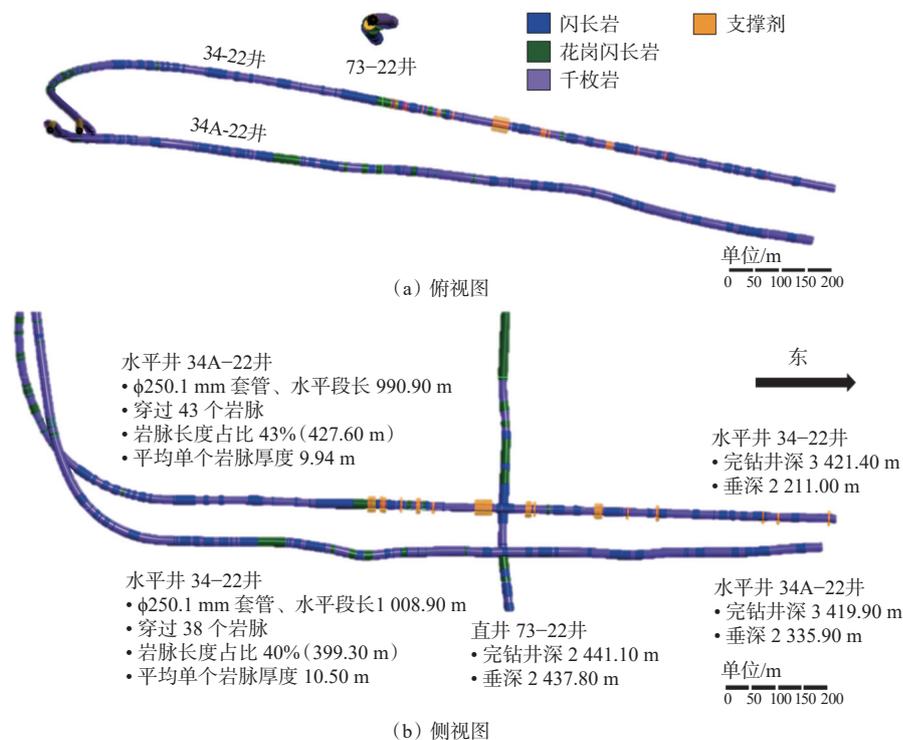


图2 双水平井注采地热开发试验项目井位示意

Fig.2 Well locations for dual horizontal well injection and production geothermal development experimental project

2 国内深层地热热储改造现状

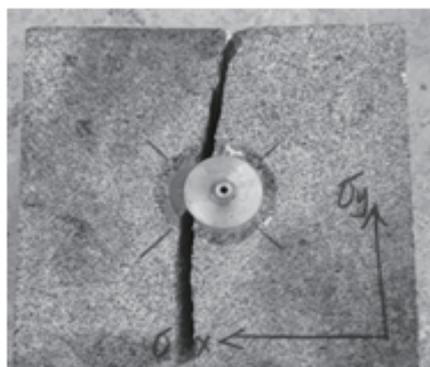
近 10 年来,我国加大了深层地热勘查试验示范力度,设立了重点研发计划项目、自然科学基金重大项目以及政府间合作项目,开展基础与机理研究,国家部委、企业、地方政府大力投入资金开展场地试验,在高温高压试验平台建设、高温高压力学特性、地层破裂模式、裂缝扩展规律与导流机制、体积改造工艺方法等方面取得了积极进展。青海共和盆地和唐山马头营深层地热试验示范项目实现了发电的突破,但与规模效益开发利用还有很大距离。

2.1 基础研究进展

中国矿业大学、太原理工大学等高等院校研制了耐温 600 °C、20 MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机,可模拟高温高压进行岩石应力-应变、抗拉强度及抗压强度等岩石力学试验^[10-12]。中国科学院武汉岩土力学研究所与中国石油大学(北京)等搭

建了 300 mm×300 mm×300 mm 岩样、温度 200 °C 以上的裂缝起裂与扩展物理模拟试验平台。

中石化石油工程技术研究院有限公司、吉林大学、中国石油大学(北京)等单位研究了干热岩的高温力学特性,探索了干热岩热储改造裂缝起裂、扩展形态规律及导流机制,初步明确了热储复杂裂缝的形成条件和主控因素,提出了直井/大斜度井体积改造方法。认识到干热岩具有杨氏模量和应力高及水平两向应力差大等力学特性^[11],岩体破裂以张性和剪切混合破坏为主,干热岩缝宽小,剪切裂缝较张性裂缝具有更高的导流能力,循环换热过程中支撑剂容易在裂缝内运移堆积导致其导流能力降低;较小应力差条件、发育的天然裂缝系统、中低注入排量和低黏液体(或二氧化碳和液氮等冷流体)、温差效应以及疲劳损伤效应有利于复杂裂缝的形成,注入液氮(-172 °C)后岩石破裂产生的裂缝走向不服从沿最大主应力方向延伸的规律,而是无规则扩展(见图 3),表明低温流体可大幅提高裂缝的复杂性。



(a) 注入清水



(b) 注入液氮

图 3 岩样注入清水和液氮破裂后的裂缝扩展情况

Fig.3 Fracture propagation of rock samples after injection of fresh water and liquid nitrogen

针对地下高效换热对裂缝系统换热表面积、裂缝连通性以及避免形成主导型高渗通道等要求,基于温差效应和疲劳损伤效应,提出了干热岩热储改造工艺设计方法,即“低排量低黏度压裂液造微缝+高黏液段塞促缝高+大规模循环交替注入扩体积+缝内暂堵促复杂+化学刺激增渗透”的复合改造工艺,并研制了耐 200 °C 高温的水力喷射分段压裂管柱和压裂液体系。

2.2 场地试验进展

青海共和盆地和唐山马头营于 2019 年前后进行了热储改造、循环连通和发电试验等场地试验,初步验证了深层地热体积改造工艺,实现了国内利用深层地热发电的突破。青海共和盆地和唐山马头

营勘查试验项目,采用了直井和斜井“一注一采”和“两注一采”的布井方式,热储改造采用清水或滑溜水中低排量大液量笼统改造工艺,施工排量 1.5~5.0 m³/min,以 2~3 m³/min 为主,单井用液规模 15 000~20 000 m³,压裂过程中采用微地震、广域电磁法或测斜仪联合监测^[13],微地震监测显示形成了复杂裂缝系统^[14],单井改造体积 2 000×10⁴ m³ 以下,循环连通后采出井地热流量小于 900 m³/d,温度低于 130 °C,发电获得突破,电力输出小于 1 MW。

从国内室内研究与现场试验结果来看,虽然获得了深层地热岩石力学特性、破裂特征及裂缝扩展规律的基本认识,初步验证了热储体积压裂的可行性,但采出井流量和温度以及电力输出均未达到设

计要求,效益开发技术探索尚未真正突破^[15-16],需要系统性统筹注采井部署与热储改造技术一体化攻关。

3 面临的挑战及攻关建议

3.1 面临的挑战

从我国深层地热的地质力学特性^[17-19]及场地压裂改造试验结果来看,要真正突破深层地热效益开发关,除在地质上寻找有利区、钻井上优快成井外,在热储改造方面还面临诸多技术挑战,需进一步攻克。

1)联合注采井的适应性需进一步分析与实践。国外深层地热“直井+水平井”或“水平井+水平井”的联合注采井和水平井分段压裂实践证明效果较好,有望成为深层地热开发利用的主体技术,但我国的地质条件与国外存在差异,联合注采井模式与改造技术是否适合我国还需要进一步评估分析与实践。

2)长效换热裂缝系统改造工艺与控制方法不成熟。以往国内外深层地热压裂改造主要存在2方面问题:一是对水热型地热高温高压条件下酸岩反应特性和成缝规律认识程度低,现有的酸化、酸压等热储改造工艺穿透距离短、导流能力低^[20],难以实现大幅度的增产增效^[14],地热井改造后水量增加幅度小,有效期短;二是干热岩长效换热裂缝系统改造工艺与控制方法不成熟,水力压裂未能产生并保持足够多的人工裂缝通道,导致注采井无法通过缝网高效换热,且人工缝网存在主导型高渗通道,导致注入剖面难以优化,注入冷水在尚未充分加热情况下提前突破进入采出井,导致换热不充分,造成采出液温度低。

3)耐高温工具与材料适应不了长期高温高压环境。深层地层温度高、压裂施工压力高以及水平井分段压裂施工时间长等特点,对封隔器、桥塞、暂堵材料以及压裂液的长期耐温压性能提出更高的要求。

4)高效换热裂缝系统无法准确定量表征。注采井主要依靠压裂形成的裂缝系统来换热获得热能,裂缝系统能否高效换热主要取决于裂缝表面积大小及其连通性,现有监测手段与评价方法还无法准确定量表征裂缝表面积大小及其连通性,致使压裂方案设计、优化、现场调控缺乏有效指导。

3.2 攻关建议

1)探索实践适合我国深层地热开发的联合注采井网+分段压裂技术。国内外实践表明,传统的

直井注采井网已不适应深层地热资源的开发利用,要依据我国深层地热的地质条件及工程技术水平,研究适合我国深层地热开发的联合注采井网型式+分段压裂技术,包括水平井井距、水平井段长度、注入井与采出井的位置关系、直井与水平井的位置关系以及地热井的分段压裂技术等,并开展场地实践。

2)攻关长效换热裂缝系统改造工艺与控制方法。研究高温酸岩反应特性、二氧化碳和液氮等冷流体裂缝起裂与扩展规律以及天然裂隙/缝洞对人工裂缝扩展的干扰机制,研发深穿透酸压工艺、无主导型高渗通道复杂裂缝系统压裂新工艺及现场实施控制方法。

3)研制耐高温工具与材料。研制直井分层与水平井分段压裂改造的封隔器、全金属桥塞等封隔工具与暂堵剂、暂堵球、酸液稠化剂、压裂降阻剂等材料,提升其长期耐高温高压的性能,满足高温高压环境下长时间压裂施工作业需求。

4)研究高效换热裂缝系统定量表征方法。研究基于光纤、微地震和示踪剂等换热裂缝系统监测与表征方法,实时定量表征裂缝换热表面积和连通性,为压裂过程中实时调控裂缝参数与压后评估压裂裂缝质量提供依据。

4 结束语

深层地热是一种资源量巨大的清洁能源,对实现能源转型与“双碳”目标意义重大,但其规模效益开发难度极大,国外经过近50年的不懈探索试验,“直井+水平井”或“水平井+水平井”联合注采井网+分段压裂技术实现地热高流量、高功率输出已初现曙光,全面突破为期不远。我国深层地热勘查与试验开发还处在初期阶段,基础机理研究薄弱,场地压裂改造与注采试验仅取得初步进展,尚未取得重大突破,离规模效益开发利用相去甚远。因此,亟需加强深层地热热储改造基础机理研究,探索实践适合我国深层地热开发的联合注采井网+分段压裂技术,攻关二氧化碳和液氮等冷流体改造热储新工艺,研制耐超高温长效分层/分段压裂工具及材料,研究高效换热裂缝系统定量表征方法,通过现场试验、示范和技术迭代,形成适合于我国的深层地热资源开发注采井网、分段压裂技术以及新工艺、新工具与新材料等,为早日实现我国深层地热资源规模效益开发提供技术支撑。

参 考 文 献

References

- [1] 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.
- [2] 孙焕泉, 毛翔, 吴陈冰洁, 等. 地热资源勘探开发技术与发展方向 [J]. *地学前缘*, 2024, 31(1): 400-411.
SUN Huanquan, MAO Xiang, WU Chenbingjie, et al. Geothermal resources exploration and development technology: Current status and development directions[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(1): 400-411.
- [3] NORBECK J H, LATIMER T M. Commercial-scale demonstration of a first-of-a-kind enhanced geothermal system [EB/OL]. (2023-07-18) [2024-03-15]. <https://doi.org/10.31223/X52X0B>.
- [4] 丁栋. 地热资源勘探开发技术与发展方向 [J]. *石化技术*, 2024, 31(4): 85-87.
DING Dong. Geothermal resource exploration and development technology and development direction[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2024, 31(4): 85-87.
- [5] 孙雷. 吉林省地热能开发利用现状及前景展望 [J]. *吉林电力*, 2023, 51(4): 27-30.
SUN Lei. Prospects and suggestions of geothermal energy development and utilization in Jilin Province[J]. *Jilin Electric Power*, 2023, 51(4): 27-30.
- [6] 杨彩宏, 周春伟. 中深层地热能开发及开采井型 [J]. *中国高新区*, 2019(19): 103-105.
YANG Caihong, ZHOU Chunwei. Development and mining well types of mid to deep geothermal energy[J]. *Science & Technology Industry Parks*, 2019(19): 103-105.
- [7] 付亚荣, 李明磊, 王树义, 等. 干热岩勘探开发现状及前景 [J]. *石油钻采工艺*, 2018, 40(4): 526-540.
FU Yarong, LI Minglei, WANG Shuyi, et al. Present situation and prospect of hot dry rock exploration and development[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2018, 40(4): 526-540.
- [8] 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): 1-8.
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): 1-8.
- [9] TITOV A, NORBECK J, DADI S, et al. Case study: completion and well placement optimization using distributed fiber optic sensing in next-generation geothermal projects[R]. URTEC 3852680, 2023.
- [10] 万志军, 赵阳升, 董付科, 等. 高温及三轴应力下花岗岩体力学特性的实验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(1): 72-77.
WAN Zhijun, ZHAO Yangsheng, DONG Fuke, et al. Experimental study on mechanical characteristics of granite under high temperatures and triaxial stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(1): 72-77.
- [11] 杜守继, 刘华, 职洪涛, 等. 高温后花岗岩力学性能的试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(14): 2359-2364.
DU Shouji, LIU Hua, ZHI Hongtao, et al. Testing study on mechanical properties of post-high-temperature granite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(14): 2359-2364.
- [12] 邵保平, 赵阳升. 600 °C 内高温状态花岗岩遇水冷却后力学特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(5): 892-898.
XI Baoping, ZHAO Yangsheng. Experimental research on mechanical properties of water-cooled granite under high temperatures within 600 °C[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 892-898.
- [13] 陈作, 张保平, 周健, 等. 干热岩热储体积改造技术研究与试验 [J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(6): 82-87.
CHEN Zuo, ZHANG Baoping, ZHOU Jian, et al. Research and test on the stimulated reservoir volume technology of hot dry rock[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(6): 82-87.
- [14] 周健, 曾义金, 陈作, 等. 青海共和盆地干热岩压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.
- [15] CHEN Zuo, XU Guoqing, ZHOU Jian, et al. Fracture network volume fracturing technology in high-temperature hard formation of hot dry rock[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 2021, 95(6): 1828-1834.
- [16] 陈龙, 乔勇, 张益国, 等. 2022 年我国地热能发展进展及建议 [J]. *水力发电*, 2023, 49(12): 1-4.
CHEN Long, QIAO Yong, ZHANG Yiguo, et al. Progress and suggestions on the development of geothermal energy in China in 2022[J]. *Water Power*, 2023, 49(12): 1-4.
- [17] 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.
- [18] 张森琦, 严维德, 黎敦朋, 等. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征 [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.
- [19] 谢文革, 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 Wenchang, LU Rui, ZHANG Shengsheng, 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.
- [20] 陈臻, 关俊朋, 王丽娟, 等. 增强型地热系统在碳酸盐岩型深层地热能开发利用中的应用进展 [J]. *地质学刊*, 2023, 47(2): 216-224.
CHEN Zhen, GUAN Junpeng, WANG Lijuan, et al. Progress in the application of enhanced geothermal systems in the exploitation and utilization of deep geothermal energy in carbonate rocks[J]. *Journal of Geology*, 2023, 47(2): 216-224.