

doi:10.19509/j.cnki.dzkq.2019.0526

徐超, 窦斌, 田红, 等. 二氧化碳爆破致裂建造增强型地热系统热储层工艺探讨[J]. 地质科技情报, 2019, 38(5): 247-252.

二氧化碳爆破致裂建造增强型地热系统 热储层工艺探讨

徐超, 窦斌, 田红, 喻勇, 肖鹏

(中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

摘要:人工建造热储层是干热岩热能开发的关键技术,二氧化碳爆破致裂具有爆破压力大、爆破压力可控、作业时间短、造缝均匀、经济环保等优势,可用于建造增强型地热系统(EGS)热储层。分别从爆破压力、爆破过程、裂缝形态以及对岩体和环境的影响方面,探讨了二氧化碳爆破用于储层建造的可行性;并对二氧化碳致裂器的结构进行了改进,使其适应 EGS 热储层高温、大井深环境;提出了二氧化碳爆破与水力压裂相结合的分层分段致裂 EGS 热储层新工艺,即分层钻进注入井水平井段与生产井水平井段并使两者处于同一垂面,在各水平井段先进行二氧化碳爆破制造均匀裂缝,再使用水力压裂沿裂缝扩展贯通形成规模裂隙。该工艺可为建造 EGS 热储层、商业化开发干热岩提供参考。

关键词:干热岩;二氧化碳爆破;EGS 热储层;地热能

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7849(2019)05-0247-06

Process of Carbon Dioxide Blasting to Build EGS Thermal Reservoir

Xu Chao, Dou Bin, Tian Hong, Yu Yong, Xiao Peng

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: Artificially constructed thermal reservoir is the key technology for the development of thermal energy in hot dry rocks. Carbon dioxide blasting has the advantages of large burst pressure, controllable blasting pressure, short working time, uniform joint making, and environmental protection, and thus can be used as a construction technology of EGS thermal reservoir. The feasibility of carbon dioxide blasting for reservoir construction is demonstrated from the aspects of blasting pressure, post-fracture fracture morphology and the effect on rock mass and the environment. The carbon dioxide cracker has been modified to adapt to the high temperature and high well depth environment of the EGS thermal reservoir. A new process for the layered and sectioned construction of hot dry rock volume cracks by combining the carbon dioxide blasting and hydraulic fracturing is proposed. Stratified drilled horizontal wells in the injection well are in the same vertical plane as horizontal wells in the production well. In each horizontal well section, carbon dioxide blasting is first used to create uniform cracks, and then hydraulic fracturing is used to expand and penetrate through the cracks to form volumetric fractures. This study may provide reference

收稿日期: 2018-10-22 **编辑:** 杨勇

基金项目: 国家自然科学基金项目(41674180;41602374);中国地质大学(武汉)实验技术研究项目(SJ-201811)

作者简介: 徐超(1993—),男,现正攻读地质工程专业硕士学位,主要从事干热岩人工储层建造研究工作。E-mail: xuch@cug.edu.cn

通信作者: 窦斌(1973—),男,教授,主要从事干热岩开发研究及教学工作。E-mail: briandou@163.com

for the construction of EGS thermal reservoirs and the commercial development of hot dry rocks.

Key words: hot dry rock; carbon dioxide blasting; EGS thermal reservoir; geothermal energy

随着国家对能源的需求越来越大,以干热岩为代表的新型清洁能源愈发受到广泛关注,干热岩地热能是一种储藏在地壳深处岩石中的热能,具有资源量大、分布广、热能持续稳定、环境友好等优势,是未来新能源利用的一个重要方向。

干热岩是一种不含流体、渗透率极低、埋深为3~10 km、温度为150~650℃的高温岩体^[1]。增强型地热系统(EGS)是指采用人工形成地热储层的方法,从低渗透性干热岩体中经济地采出深层热能的人工地热系统。温度与深度双重因素导致干热岩开发难度大,并且热储岩体中没有良好的流体介质换热通道,不易从优质热储中直接开采热能^[2]。因此EGS热储层建造成为干热岩热能开发的必然选择,也是关键技术^[3]。

目前EGS热储层建造基本都是采用水力压裂技术^[4]。美国芬顿山干热岩项目EE-3井经水力压裂未能与EE-2井形成较好的水力联通^[5];日本雄胜(Ogachi)项目^[6]OGC-1井和OGC-2井经水力压裂联通,但注水回收率只有10%,再次压裂后,回收率也只达到25%;澳大利亚库珀盆地项目^[7]Habano1激发持续了9 d,注入水量超过20 000 m³,并诱发了3.7级微震。虽然利用该技术取得了一系列可观的成果,但也存在很多问题:峰值压力低,作业时间长,水体滤失严重,难以形成大规模裂隙,易诱发微震等^[8]。为此,提出了利用二氧化碳爆破致裂建造EGS热储层的新方法,为形成EGS热储层、商业化开发干热岩提供了新方案。

1 二氧化碳爆破致裂技术

二氧化碳爆破原理是利用二氧化碳气、液两相间转换特性进行爆破致裂的^[9]。爆破装置结构^[10]如图1所示,储存在致裂器内的液态二氧化碳在吸收了活化器产生的大量热能后,可在20~40 ms内迅速气化,体积瞬间膨胀600多倍并产生高压,当压力达到某一极限时,定压剪切片破断,高能二氧化碳气体瞬间从释放管中爆发,作用于岩体,使其产生裂隙^[11]。二氧化碳爆破作为一种具有爆炸能量的致裂技术,经过大量试验总结,得到其爆炸能量的计算公式及爆炸当量计算公式如式(1)、(2)^[11]。

$$W = \frac{P_1 V}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (1)$$

$$W_{\text{TNT}} = \frac{W}{Q_{\text{TNT}}} \quad (2)$$

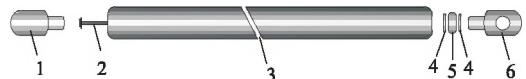
式中:W为爆破能量;P₁为爆破压力;P₂为标准大

气压力;V为致裂器内空间体积;k为二氧化碳绝热系数;W_{TNT}为TNT爆炸当量;Q_{TNT}为1 kg的TNT爆炸的能量,取4 520 kJ。

常用的致裂器爆破压力为200~250 MPa,换算后,相当于0.15~0.18 kg的TNT爆炸当量,释放能量达622~782 kJ,爆破压力及爆破能量可观。

二氧化碳爆破具有以下优势:①爆破压力大,是普通水力压裂所产生压力的2~3倍;②爆破压力可控,通过选择不同活化器、二氧化碳充装量和定压剪切片等调控爆破压力;③爆破作业时间短,节约工时;④爆破造缝均匀,可形成高质量裂隙区;⑤爆破装置简易,适用性强并可重复利用;⑥经济环保,产物为二氧化碳气体,对环境几乎没有污染。

从表1可知,二氧化碳爆破在峰值压力、升压时间、加载速率等方面都比水力压裂具有优势,可在短时间内快速致裂岩体,造成体积破碎。将二氧化碳爆破技术用于EGS热储层建造,现从以下几方面探讨该技术运用于储层建造的可行性。



1. 充能头; 2. 活化器; 3. 储液管; 4. 垫片; 5. 定压剪切片; 6. 泄能头

图1 二氧化碳致裂器结构图

Fig. 1 Structure of carbon dioxide crackers

表1 2种致裂方法技术参数

Table 1 Technical parameters of the two methods

类型	峰值压力/ MPa	升压时间/ s	加载速率/ (MPa·s ⁻¹)	总过程/ s
水力压裂	100	10 ²	<10 ⁻¹	10 ⁴
二氧化碳爆破	250	10 ⁻³	10 ² ~10 ⁶	10 ⁻²

2 可行性探讨

2.1 致裂压力分析

根据断裂力学理论,深井中的裂缝起裂以张开型为主,裂缝是否扩展取决于裂缝尖端的应力强度因子是否大于裂缝的临界断裂韧度值^[12],裂缝尖端的应力强度因子为:

$$K_I = \sqrt{\pi(L+r_b)} \left[\frac{\pi L - 2L - 2r_b}{\pi(L-r_b)} P_m - \sigma \right] \quad (3)$$

式中:K_I为裂缝尖端的应力强度因子;σ为地应力;r_b为致裂孔直径;L为裂缝扩展瞬间长度;P_m为致

裂压力。

裂缝失稳扩展条件为:

$$K_f \geq K_{rd} \quad (4)$$

式中: K_{rd} 为岩石断裂韧度。

由式(3)可知裂缝尖端的应力强度因子与致裂压力和地应力有关,岩石的断裂韧度为一固定值,一般认为,岩石材料的各个断裂韧度与对应的强度之间存在一定的联系,岩石的张开型断裂韧度与其抗拉强度存在良好的正比例关系^[13]。因此,压开一定深度的坚硬岩石就需要有足够的致裂压力。

EGS 热储岩石基质坚硬,完整性好,一般为花岗岩,导致其破裂压力极高。韩国 Pohang 干热岩地热储层^[14]在井深为 4 100 m 处开展水力压裂施工,初期预测破裂压力不超过 60 MPa,但实际施工过程中泵入压力超过 100 MPa 后仍然没有压开,最

后不得不停止施工,改变压裂位置重新压裂。在 EGS 热储层建造中,可将水力压裂的井底压力作为 EGS 热储岩石的致裂压力。由于井底高温高压环境,目前测量设备难以获得高精度的井底压力值,因此诸多储层激发工程的井底压力值是根据计算公式(5)^[15]换算得到。

$$P_{BH} = P_{WH} + \rho_w g h \quad (5)$$

式中: P_{BH} 为井底压力; P_{WH} 为井口压力; ρ_w 为压裂液密度; h 为井底深度。各储层激发工程数据^[15-18]如表 2 所示,从表中数据可知,水力压裂试验的最大井底压力值皆小于 150 MPa,而二氧化碳爆破压力一般为 200~250 MPa,最高可达 300 MPa^[13],故二氧化碳爆破可压开综合条件下岩体强度值低于 300 MPa 的 EGS 热储岩体。

表 2 世界主要干热岩 EGS 储层建造工程水力压裂试验数据

Table 2 Experimental data of hydraulic fracturing in the EGS reservoir of main hot dry rocks in the world

工程名称	井号	井深/m	最大井口压力/MPa	最大井底压力/MPa	资料来源
Soutlz	GPK4	4 490~4 980	18.3	64.7	[15]
Hijiori	HDR1	2 150~2 200	26.0	47.3	[17]
Basel	Basel1	4 630~5 000	29.6	76.8	[15]
Rosema	RH15	2 060	15.0	35.2	[15]
Cooper B.	Hab. 1	4 140~4 420	65.0	106.9	[18]
Cooper B.	Jol. 1	4 320~4 910	69.0	114.2	[18]
Fenton H.	EE-2A	3 450~3 470	38.0	71.9	[16]

2.2 裂缝形成过程分析

水力压裂是通过地面高压泵将压裂液注入井筒,在裸眼地层中产生高压,当水压超过地层岩石破裂强度时,导致岩石开裂而产生裂缝,水体进入裂缝并沿裂缝扩展,直至水压值小于岩石破裂强度时停止。形成的裂缝一般条数比较少,以长主裂缝为主,如图 2-a 所示。

二氧化碳爆破过程中,由于气体膨胀产生的静应力作用与应力波作用同时发生,因此爆破作用过程复杂。激发活化器加热储液管内的二氧化碳,使管内压力大于定压剪切片的破断压力,剪切片失去承载能力而被剪破。爆破瞬间所产生的冲击波对干热岩体做功,致使裂孔周围的被爆介质产生径向压缩应力和环向拉伸应力。冲击载荷所产生的应力会远远大于岩体的动抗压强度,因此致裂孔周围的岩体产生强烈的压缩变形,形成体积裂缝区。冲击波具有能量大、衰减快的特点,冲击波迅速衰减为应力波,继续对干热岩体做功。首先,岩体在应力波的作用下会使切向方向上产生宏观的拉伸变形,随着变形量的不断积累,其内部产生了拉伸破坏的径向裂缝,这些裂缝与爆破初期所产生的体积裂缝区裂纹贯通。其次,大量二氧化碳气体顺着裂缝网络迅速

楔入岩体内部,在裂纹尖端处产生强烈的应力集中,促使前一个阶段所产生的径向裂纹与岩体内部的原始裂纹在静应力作用下进一步扩展。

由于岩体受到强烈压缩、拉伸变形和裂纹尖端拉伸变形,在其内部积累了一定的弹性变形势能。当应力波作用阶段和二氧化碳静应力作用阶段结束后,储存在岩体内部的弹性变形势能会对岩体产生与径向压应力方向相反的向心拉应力,岩体的动抗拉强度不足以抵抗向心拉应力的强度时,岩体就会被拉断从而产生环向的裂纹,致裂的最终效果如图 2-b 所示。

同等条件下,二氧化碳爆破致裂所得的裂缝条

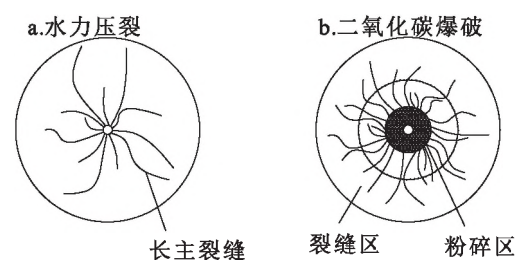


图 2 水力压裂(a)与二氧化碳爆破(b)致裂效果图
Fig. 2 Effect diagram of hydraulic fracturing (a) and carbon dioxide blasting (b)

数多、分布均匀、缝宽适宜、形成裂缝区^[15]的换热面积比水力压裂所形成的单一主裂缝(可能有少许其他裂缝)的换热面积更大,更接近于体积压裂,有利于流体介质充分换热。

2.3 对岩体及环境的影响分析

水力压裂需向地层中泵入大量的压裂液,压裂液主要组分为清水,其中混合了大量的化学药剂。为了在高温储层中达到足够的黏度并提高其高温稳定性,向压裂液中加入硼、锆、钛等无机和有机金属离子组合凝胶。高温高压状态下压裂液易于和岩石矿物发生反应,伤害地层裂缝,或堵塞裂缝。压裂作业的返排液中含有高分子聚合物、有毒重金属、放射性物质等,对环境造成严重污染^[19]。

二氧化碳爆破作业所产生的气体为二氧化碳,其为非极性惰性气体,对环境零污染,一般难与岩石矿物发生反应,对致裂所造裂缝几乎没有伤害,且致裂后的气体仍具有一定的压强,可抑制岩体裂缝在围压作用下的缓慢闭合。

综上所述,从爆破压力、致裂过程、裂缝形态以及对岩体及环境的影响方面探讨二氧化碳爆破致裂技术用于 EGS 热储层建造的可行性,得出该技术在以上方面都优于水力压裂,可作为一种建造 EGS 热储层的技术手段。

3 二氧化碳致裂器的改进

二氧化碳致裂器最早由欧美国家研制,早期主要用于煤矿开采,后期扩展到其他民用爆破等领域。对于液态二氧化碳相变膨胀致裂技术的研究已有一定成果。Singh^[20]介绍了这种装置的结构和使用方法,通过在 Bulawayo 金矿的试验,证实双管联爆取得的效果与 5 个装有普通炸药钻孔爆破效果相同,指出 Cardox 装置可以用于采石场大规模开挖和水库、大坝附近的爆破;李付涛^[9]试验证明了二氧化碳爆破在煤层卸压增透中具有快速、高效、安全的优点,为该技术的推广利用提供了参考;黄晓实等^[21]

阐明了二氧化碳致裂器的优势,归纳分析了目前二氧化碳致裂器释放嘴结构状况,并进行了模拟分析。虽然二氧化碳爆破从理论研究、设备研制到实际应用已经建立了一套成熟的体系,但都只能用于浅层岩体开采,尚不能应用于深井高温高压环境下。

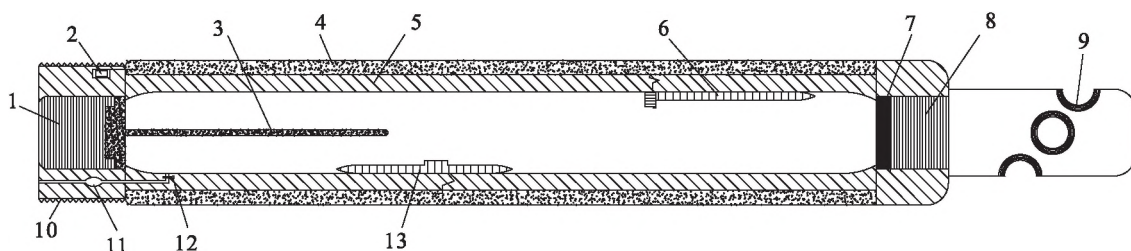
二氧化碳致裂器应用于 EGS 热储层建造面临的主要难点包括:①高温会使致裂器中液态二氧化碳快速受热升温,温度超过临界值气化,反映在宏观上即为二氧化碳致裂器的自爆;②大井深会使得二氧化碳致裂器井下运输与状态监测困难;③由于二氧化碳致裂器井下运输需与钻杆相连,爆破时强烈振动会使钻杆损伤,甚至会使致裂器与钻杆脱离,造成井底事故。基于以上因素,需对二氧化碳致裂器进行重新设计及优化,才能够用于干热岩开发。

传统的二氧化碳致裂器由储液管、充能头、泄能头、活化器、定压剪切片和垫片 6 个主要部分组成。改进后的致裂器,在管体的外围增设了保温隔热环,充能头外设计了可与钻杆相连接的螺纹,在致裂器与钻杆之间增设了减振器,充能头内设有启闭阀门与防爆通道组成的防爆系统,充能头内还设有中心控制器可与远程控制终端进行无线连接,启闭阀门与中心控制器相连,充能头内侧设有可与中心控制器相连的温度传感器和压力传感器。重新设计的致裂器结构示意图如图 3 所示,与现有技术相比,具有如下优势。

(1)保温隔热环能有效防止液态二氧化碳吸收外部热量而引起自爆,其外部为钢制材料,可有效减缓下放过程中致裂器与套管和井壁的碰撞,使其安全完好地到达预定起爆位置。

(2)通过螺纹设计,二氧化碳致裂器可置于钻杆前端,随钻杆下放到达干热岩储层预定位置,解决了二氧化碳致裂器深井致裂干热岩的下入问题。

(3)防爆系统可小范围调节管体内的压力。在运输过程中由于传热或碰撞而使管体内二氧化碳局部受热膨胀,管体内压力小范围上升,当温压数据达到预设安全值时,启闭阀门接收中心控制器发出的



1. 充能头;2. 中央控制器;3. 活化器;4. 保温隔热环;5. 管体;6. 温度传感器;7. 剪切片;8. 泄能头;9. 伸缩管;10. 螺纹;11. 防爆通道;12. 启闭阀门;13. 压力传感器

图 3 干热岩二氧化碳致裂器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of carbon dioxide cracker structure of hot dry rocks

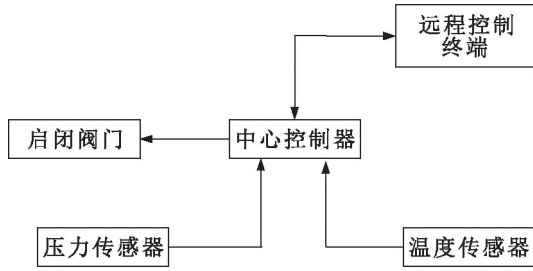


图 4 信息传输工作原理图

Fig. 4 Diagram of information transmission working principle

指令,阀门开启,通过泄去小部分二氧化碳平衡了管体内温度和压力,启闭阀门再次接受指令关闭,以此实现二氧化碳致裂器运输过程中的防爆目的(图 4)。

(4)温度、压力传感器可实时反映致裂器内部温压情况。通过无线传输,地面操控人员可实时监测深井中致裂器的内部状态,对于紧急突发情况可进行及时处理,解决了二氧化碳深井致裂干热岩中的状态监测问题。

4 EGS 热储层建造工艺

二氧化碳爆破致裂易于形成裂隙区,制造均匀裂缝,而水力压裂易于扩展裂缝,形成长主裂缝,2 种技术各有所长,故提出了一种建造 EGS 热储层的新方法,即采用“一注多采”方案设计井组,利用二氧化碳爆破与水力压裂相结合分层分段致裂。具体的建造示意图、工艺流程图如图 5,6 所示,该工艺施工步骤如下。

(1)在圈定的地热靶区进行井组布置,布置方案为多边形,中心位置为注入井,周边为生产井,注入井与生产井的间距满足生产要求。

(2)根据前期地质资料,设计注入井和生产井的

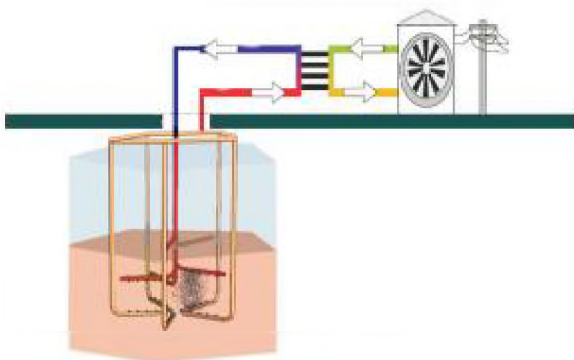


图 5 二氧化碳爆破建造 EGS 热储层示意图

Fig. 5 Schematic diagram of EGS thermal reservoir constructed by carbon dioxide blasting

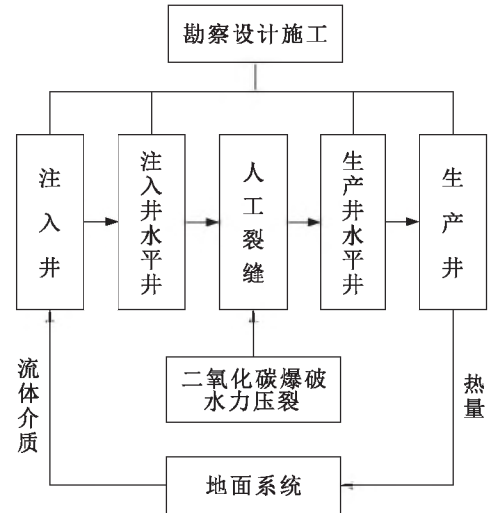


图 6 EGS 储层建造工艺流程图

Fig. 6 Flow chart of EGS reservoir construction

井身结构,确保生产井水平井段与注入井水平井段的垂直距离合理,并且位于同一垂面。

(3)施工注入井至预计温度干热岩层位,然后改变钻进方向,分层形成多个方向的水平井,任意两水平井的垂直距离相对较小且符合设计要求。

(4)施工生产井至预计干热岩层位,并在对应注入井水平井段方位钻进生产井水平井段,确保上下对应的水平井处于同一垂面。

(5)组装二氧化碳致裂器,充装液态二氧化碳至管体内,达到设计充装量后停止。

(6)在各水平井分段采用脉冲射孔技术,形成等间距且间距合理的起爆孔空腔。

(7)将致裂器与钻杆连接,向井下运输至水平井段预定起爆位置,调整二氧化碳致裂器位置使其泄能头对准射孔所形成的空腔。

(8)起爆二氧化碳致裂器,并监测爆破效果,可多次实施爆破作业,直至空腔内形成几乎均等裂隙满足设计要求。

(9)在各起爆孔空腔内再采用水力压裂,沿已有裂隙扩展形成规模裂隙,贯通上下水平井。

(10)下放井筒封堵器至注入井水平井段和生产井水平井段,并将其安置在每 2 个起爆点之间,以阻隔流体介质直接沿井筒流通。

(11)流体介质依次流经注入井、注入井水平井、起爆点、人工裂隙、生产井水平井、生产井,获得足够热量后到达地面热交换系统。

5 结 论

(1)从二氧化碳爆破压力、爆破过程、储层裂缝形态以及对储层岩体和环境的影响方面探讨了二氧

化碳爆破技术应用于 EGS 热储层建造的可行性。

(2)进行了二氧化碳致裂器的改进,通过结构设计,使其能适应 EGS 热储层的高温、大井深的恶劣环境。

(3)提出了一种利用二氧化碳爆破与水力压裂相结合的致裂方法以及 EGS 热储层分层分段建造工艺。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 马峰,蒯文静,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.
- [3] 王晓星,吴能友,苏正,等.增强型地热系统开发技术研究进展[J].地球物理学进展,2012,27(1):355-362.
- [4] 许天福,张延军,于子望,等.干热岩水力压裂实验室模拟研究[J].科技导报,2015,33(19):35-39.
- [5] 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.
- [6] Norio T, Tsutomu Y, George Z. The Hijiori hot dry rock test site, Japan: Evaluation and optimization of heat extraction from a two-layered reservoir[J]. Geothermics, 2008, 37(1): 19-52.
- [7] 王贵玲,马峰,蒯文静,等.干热岩资源开发工程储层激发研究进展[J].科技导报,2015,33(11):103-107.
- [8] 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.
- [9] 李付涛.二氧化碳爆破增透技术的试验应用[J].煤,2016,25(1):16-18.
- [10] 杜泽生,范迎春,薛宇飞,等.二氧化碳爆破采掘装备及技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(9):36-42.
- [11] 黄园月,尹岚岚,倪昊,等.二氧化碳致裂器研制与应用[J].煤炭技术,2015,34(8):123-124.
- [12] 张开加.不同埋深条件下二氧化碳致裂爆破技术增透效果试验研究[J].中国煤炭,2018,44(7):110-114,119.
- [13] 朱敏,邓华锋,周时,等.水岩作用下砂岩断裂韧度及抗拉强度的试验研究[J].三峡大学学报:自然科学版,2012,34(5):34-38,51.
- [14] 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(6):1-6.
- [15] Linmao X, Ki-Bok M, Yoonho S. Observations of hydraulic stimulations in seven enhanced geothermal system projects[J]. Renewable Energy, 2015, 79: 56-65.
- [16] Sharad K, Giday W, Kenneth R. Lessons learned from the pioneering hot dry rock project at Fenton Hill, USA[J]. Geothermics, 2016, 63: 5-14.
- [17] Michio K, Norio T. Development of hot dry rock technology at the Hijiori test site[J]. Geothermics, 1999, 28(4/5): 627-636.
- [18] Zhou Changbing, Wan Zhijun, Zhang Yuan, et al. Experimental study on hydraulic fracturing of granite under thermal shock[J]. Geothermics, 2018, 71: 146-155.
- [19] 刘石,蒋海岩,袁士宝.水力压裂施工污染源分析及防控建议[J].油气田环境保护,2017,27(5):19-22,60-61.
- [20] Singh S P. Non-explosive applications of the PCF concept for underground excavation[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 1998, 13(3): 305-311.
- [21] 黄晓实,张范立,张政,等.二氧化碳致裂器在岩石中深孔预裂爆破中的应用研究[J].爆破,2017,34(3):131-135.