

干热岩水力压裂实验室模拟研究

许天福¹, 张延军^{1,2}, 于子望², 胡忠君², 郭亮亮²

1. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 长春 130000
2. 吉林大学建设工程学院, 长春 130026

摘要 地壳中干热岩所蕴含的地热能量巨大, 已成为世界各国重点研究开发的新能源。干热岩资源开发的增强型地热工程的场地试验研究投资大、周期长、风险大, 在现场压裂和人工热储层建造示范工程前, 实施干热岩水力压裂实验室研究很有必要。为此, 吉林大学深部地热和干热岩研究团队建设了大尺寸高温高压下干热岩水力压裂实验室模拟系统, 为现场压裂工艺设计和储层改造提供参数和技术支持。本文介绍模拟系统的实验设备、实验条件和初步的实验研究成果。

关键词 干热岩; 高温压实验; 水力压裂; 声发射; 导流换热实验

中图分类号 TU458

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.19.004

Laboratory study of hydraulic fracturing on hot dry rock

XU Tianfu¹, ZHANG Yanjun^{1,2}, YU Ziwan², HU Zhongjun², GUO Liangliang²

1. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130000, China
2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract Hot dry rock (HDR), which contains abundant geothermal energy, is a new type of geothermal resources and has become the worldwide focus in new energy utilization and development. The field test of enhanced geothermal engineering for development of HDR resources is costly, risky, and time-consuming. Therefore, it is necessary to carry out laboratory test for investigating the property of HDR before field fracturing and construction of artificial geothermal reservoir. The most urgent and essential problem is the research on hydraulic fracturing and micro seismic monitoring technology in the process of utilizing HDR. To further explore this issue to provide parameters and technical support for field fracturing and reservoir stimulation, Jilin University established a HDR laboratory simulation system that can carry out hydraulic fracturing of large-sized samples under high temperature and pressure. This paper focuses on the testing instrument, testing conditions and research results of the simulation system.

Keywords hot dry rock; high temperature and pressure test; hydraulic fracturing; acoustic emission; heat exchange test

地热能由于其清洁、运行稳定和空间分布广泛等优点, 已成为世界各国重点研究开发的新能源, 倍受国内外学者关注^[1,2]。目前利用的地热资源主要是水热型, 占探明地热资源的极小部分。干热岩是一种没有水(或含有少量水而不能流动)的高温岩体, 其温度范围很广, 为 150~650℃, 主要是变质岩或结晶类岩体。增强型地热系统(EGS)是人工压裂形成的地热储层, 是从地下深部低渗透性干热岩中经济地采出相当数量地热能的人工地热系统。

干热岩在地球上的蕴藏量十分丰富。保守估计地壳中

干热岩(3~10 km 深处)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。国家有关部门最新数据显示, 中国大陆 3~10 km 深处干热岩资源总量相当于 860 万亿 t 标准煤; 若能开采出 2%, 就相当于 2010 年全国一次性能耗总量(32.5 亿 t 标煤)的 5300 倍^[3]。可以预见, 随着不可再生化石能源的减少, 干热岩的开发将极有可能为中国节能减排新一轮能源结构调整做出重大贡献。

干热岩开发的增强型地热系统在世界上已进行了 40 余年的研究。美国于 1973 年开始资助芬顿山干热岩开发的

收稿日期: 2015-08-21; 修回日期: 2015-09-01

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA052801)

作者简介: 许天福, 教授, 研究方向为多相流反应溶质运移和 EGS, 电子信箱: tianfu.good@gmail.com; 张延军(通信作者), 教授, 研究方向为地下介质多场耦合、干热岩热能开发及二氧化碳地质封存, 电子信箱: zhangyanj@jlu.edu.cn

引用格式: 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.

EGS 试验研究, 1977 年获得了技术上的成功, 最深钻孔达 4500 m, 岩体温度为 330°C^[3]。随后日本、英国、法国、德国、澳大利亚等国展开了相应的技术研究^[3]。获取干热岩热能的 EGS 工程第一期研究一般在 5 年左右, 耗时长; 现场实施钻孔、换热等要投入几千万到上亿的资金, 耗资和风险都很大。因此, 在现场压裂和人工热储层建造示范工程前, 实施干热岩水力压裂实验室研究很有必要, 可为示范工程的设计提供参数和方案优化, 确保工程的时间短、投入少、效率高。

很多国外学者, 在水力压裂实验室模拟研究方面, 做了一些探索性工作。1979 年, 美国科罗拉多采矿学院开发了一套大尺寸压裂装置, 该装置可进行压裂实验和换热实验, 可对 8 英寸 (203 mm) 立方体混凝土样品进行常温条件下的水力压裂实验, 主要应用在石油和天然气工业^[4,5]。1997 年, 日本山口大学, 构建了水力压裂仪和声发射装置, 对 200 mm×200 mm×200 mm 立方体岩石进行水力压裂实验, 研究压裂液对裂缝扩展的影响。主要用于采矿工程、干热岩取能和油藏刺激方面^[6-9]。2006 年, 荷兰代尔夫特理工大学建立了实验室研究水力压裂问题。室内实验采用 ϕ 400 mm×510 mm 砂岩, 进行了水力压裂, 主要研究水力压裂在油气井中的使用, 用井筒刺激技术提高低渗透地层产量^[7]。2006 年, 澳大利亚科廷大学也建立了实验室, 利用压裂机对尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的预设裂缝岩石实施压裂实验, 研究应力状态和预设裂缝对水力压裂结果的影响^[10,11]。2010 年, 德国亥姆霍兹国家研究中心开展了干热岩水力压裂问题研究, 利用材料三轴实验机 (MTS) 对岩石试样和混凝土试样, 进行真三轴条件下的水力致裂, 结合声发射探测系统对岩体致裂产生的裂纹进行模拟分析^[8,9]。

中国高温岩体地热开发研究起步较晚, 仅少数科研院校在这方面做了理论探讨并开展了室内实验研究。中国矿业的深部采矿重点实验室对 300 mm×300 mm×300 mm 试样进行了真三轴条件下的水力压裂问题研究, 主要研究对象为煤层气, 如: 低渗透煤层的瓦斯抽放问题^[12,13]。中国石油大学的石油工程国家重点实验室采用了 MTS 模拟压裂实验系统和大尺寸水力压裂机, 在常温条件下, 研究地层中天然裂缝网络对水力裂缝延伸的影响规律, 主要用于油藏和页岩气方面^[14]。

综上所述, 以往国内外学者对水力压裂的研究偏重于石油工程和采矿工程, 室内实验也侧重于油页岩、页岩气、低渗透油气田开发、提高采油率方面, 还没有侧重于干热岩压裂、换热研究的实验室。国内外现有的实验设备多数都在常温下实验, 没有考虑变温场作用下的岩石力学性质变化和压裂过程。常用实验样品规格较小, 大多为 ϕ 50 mm×100 mm 圆柱形试样, 事实上尺寸效应对实验结果影响很大。为更深入、更准确地对干热岩水力压裂进行理论探讨和实际操作, 保证实验过程的实时监测性, 吉林大学深部地热和干热岩研究团队建设了大尺寸高温高压下干热岩水力压裂实验室模拟系统, 本文着重介绍模拟系统的实验设备、实验条件和初步的实验研究成果。

1 实验室建立背景

2012 年国家高技术研究发展计划 (863 计划) 启动了“干热岩热能开发与综合利用关键技术研究”项目。吉林大学做为项目的牵头单位承担了课题——“干热岩靶区工程测试及人工压裂工艺技术研究”。这一课题在中国科学院地质地球物理研究所、中国科学院武汉岩土力学研究所和大庆油田井下分公司的协作下完成。课题旨在研究并解决干热岩开发的地下关键技术问题, 主要包括: 三维地质-地球物理模型技术; 干热岩资源勘查的地球物理探测技术; 地下高温岩体裂隙水热耦合模型技术; 水力压裂刺激对干热岩储层的改造技术和压裂工艺优化; 化学刺激对干热岩储层的改造技术; 微震技术与压裂现场微震监测设计; 示踪技术评价裂隙储层连通性及热交换面积; 干热岩储层产能效果分析等。建设干热岩水力压裂模拟实验室是一项重要研究任务, 在课题的执行过程中, 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室完成了这一实验室建设, 并做了初步实验研究工作。

利用该实验平台可以模拟岩石在三向地应力以及高温高压条件下进行人工压裂的试验。该平台采用声发射等监测技术模拟人工压裂过程, 对岩石内部裂缝产生、扩展、闭合及断裂等过程进行探测, 同时还可模拟水和岩石的热交换过程的裂隙渗透、导热性能的关系, 研究裂缝监测评价方法, 获得人工压裂岩石力学参数。该实验室将为干热岩资源的开发、高温高压元素地球化学行为、精细地球物理过程、高温高压岩体力学行为等研究提供室内实验平台。

2 实验室模拟系统

吉林大学研发的干热岩水力压裂实验室模拟系统分为 4 个部分, 高温断裂韧性测试装置、改进的岩石三轴模拟装置、300 mm×300 mm×300 mm 大尺寸压裂装置和岩芯裂隙导流换热装置, 可以完成变温条件下岩石力学参数测试、变温条件下岩心水力压裂测试和 300 mm×300 mm×300 mm 大尺寸水力压裂测试, 以及裂隙导流换热模拟实验。

2.1 高温断裂韧性测试装置

断裂韧性测试装置由计算机系统和板卡式数字测量控制系统组成 (图 1), 该仪器可用于高温高压条件下, 金属和非金属材料的拉伸、压缩、弯曲、剪切等实验。实验在高温腔内进行 (图 1(b)), 腔体内最高温度可达 200°C。该设备最大压力为 100 kN, 最大位移为 100 cm。

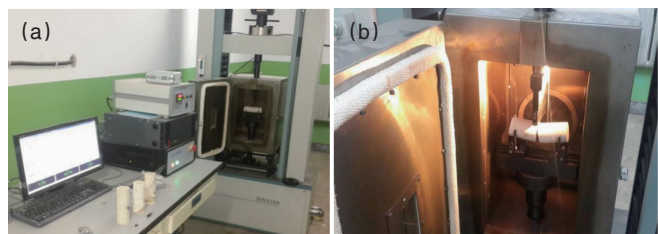


图 1 高温断裂韧性测试装置 (a) 和高温腔 (b)
Fig. 1 Test device of fracture toughness at high temperature (a) and high temperature chamber (b)

利用断裂韧性测试装置,研究了温度场变化下某储层流纹岩的断裂韧性的变化。采用尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 140\text{ mm}$ 的流纹岩进行三点弯曲实验。如图2所示,随着温度的增加,流纹岩的断裂韧性减小,80℃后断裂韧性减低,并随着温度升高趋向稳定,高温时断裂韧性值近于 $1.2\text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 。岩石的断裂韧性是压裂过程中裂缝启裂和延伸的关键影响因素,其大小与施工泵压的高低成正比,与水力裂缝缝长的长短成反比。

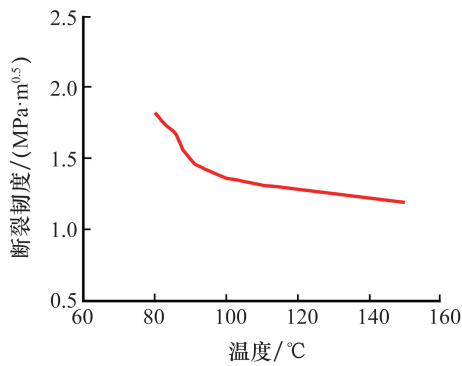


图2 断裂韧度随温度变化趋势曲线

Fig. 2 Variation of fracture toughness with temperature

2.2 改进的岩石三轴模拟装置

改进的岩石三轴压力实验装置由轴向加载系统、围压系统、加热系统、控制系统、计算机系统组成,如图3所示。将岩石样品放入压力室内,通过上下两侧压头和压力提升装置压缩使岩石样品破坏,并通过压力传感器将数据传至计算机。该仪器可以实现不同围压(0.1~100 MPa)、不同温度(室温~200℃)下的三轴压缩实验和岩芯水力压裂过程测试。岩石试样尺寸为 $\phi 25\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 、 $\phi 38\text{ mm}\times 75\text{ mm}$ 和 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,最大孔隙水压力80 MPa。



图3 改进的岩石三轴压力实验装置

Fig. 3 Modified triaxial pressure testing machine on rock

利用改进的岩石三轴压力实验装置,研究不同温压下岩石力学参数(弹性模量、泊松比)的变化规律。采用 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 花岗岩试样进行三轴压缩实验。由图4可知,弹性模量随温度和围压的增加明显增大。当温度为30℃、压力为0.1 MPa时,弹性模量为48.6 GPa;当处于150℃、60.0 MPa时,弹性模量为55.8 GPa,高温和高围压下的岩石试样比常温压

条件时具有较高的弹性模量。泊松比也随温度和围压的升高成增长趋势,在0.176~0.220之间变化。

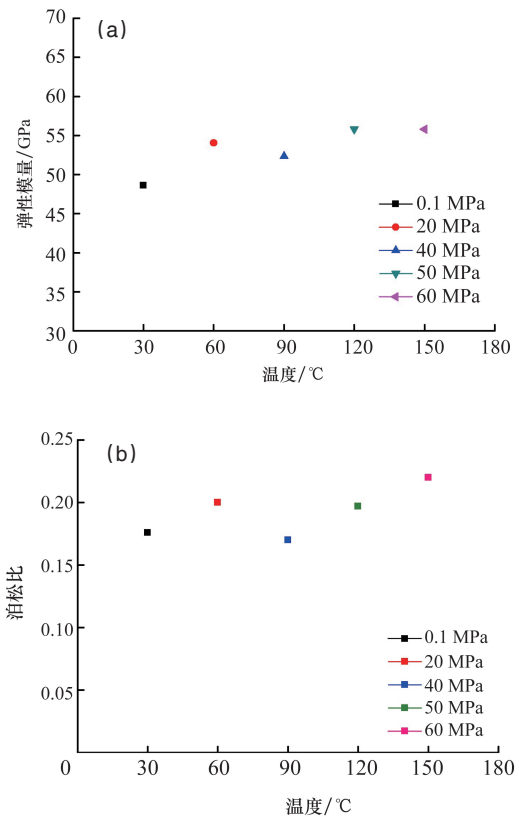


图4 不同围压条件下岩石弹性模量(a)和泊松比(b)随温度变化曲线

Fig. 4 Variations of elastic modulus (a) and Poisson's ratio (b) with temperature at different confining pressures

随后建立了干热岩的储层水力压裂数值模型,进行弹性模量的单变量敏感性分析。从数值模拟结果(图5)看出,弹性模量主要影响裂缝的半长和高度,而对裂缝开度和导流能力无影响。随储层弹性模量的增大,裂缝半长减小,裂缝高度增大。

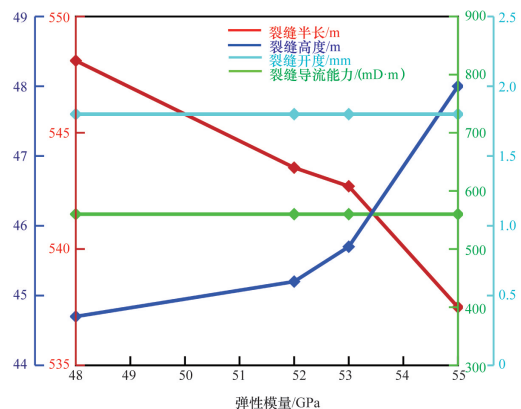


图5 不同模量下裂缝几何形状和导流能力变化
Fig. 5 Fracture geometry and flow conductivity under different elastic modulus

岩石水力破坏强度是指岩石内部在水压力作用下,岩石抵抗破坏的能力的指标。初始实验采用 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 柱状花岗岩,于岩石中心取 12 mm 圆孔注水,进行岩石水力压裂实验。实验预设轴压为 5 MPa ,围压为 10 MPa 。由图6可知, 80°C 条件下,花岗岩在水压达到 25.6 MPa 时发生破坏,而后岩石残余压力为 13.0 MPa ,岩石水力压裂强度为 25.6 MPa ,流纹岩小于花岗岩。

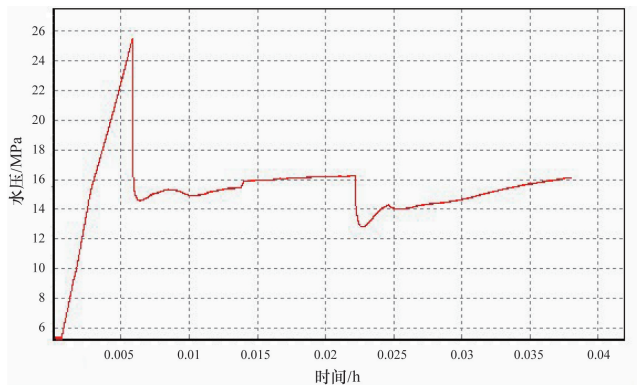


图6 花岗岩水力压裂曲线

Fig. 6 Hydraulic fracturing curve of granite

2.3 大尺寸压裂装置

大尺寸压裂实验装置(图7)主要由实验操作台、仪表显示器、计算机操作系统和声发射系统组成。该仪器可进行不同温度、不同围压($0.1\sim 50.0\text{ MPa}$)下的真三轴水力压裂实验,孔隙水压力最大可达 70.0 MPa 。实验样品规模为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 立方体。实验操作台外设恒温箱,实验在恒温箱内进行,确保实验过程中预设实验温度恒定并使得岩石试样受热均匀。实验过程中各项参数可在仪表显示器中读出,且随时可以调节参数仪表,改变实验条件。声发射监测系统由8个声发射探头组成,探头设置在方形模型箱体的两个垂直侧面上,每个侧面4个,各监测点距离各边框 20 mm 。通过传感器将声发射探头连接至计算机操作系统,对人工压裂实验过程中,岩石内部裂缝产生、扩展、闭合及断裂等过程进行监测。



图7 大尺寸压裂实验装置

Fig. 7 Large-scale hydraulic fracturing test device

室内水力压裂实验可采用天然岩样或人工岩样进行,初次实验采用混凝土试样进行模拟压裂实验。按水沙比 $1:1$ 制备 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 混凝土立方体试样。实验预设

围压 $\sigma_1=15\text{ MPa}$, $\sigma_2=10\text{ MPa}$, $\sigma_3=5\text{ MPa}$,预设温度 120°C 。施加水压致裂,图8为混凝土水力压裂过程中的声发射结果,可以看出探测点2和5附近的反应点较为致密。观察破裂试样(图9),可以在试样表面看见一明显裂纹,裂纹沿岩体中心(注水嘴处)向某一侧面延伸,与声发射结果相符。

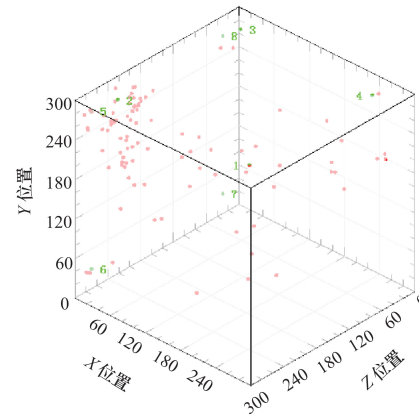


图8 混凝土水力压裂过程中的声发射结果

Fig. 8 Acoustic emission results on concrete in the hydraulic fracturing test



图9 水力致裂后的混凝土试样

Fig. 9 Concrete sample after hydraulic fracturing

2.4 裂隙导流实验模拟系统

在改进岩石三轴模拟装置(图3)的基础上,增加导热换热实验腔,将其改装成裂隙导流换热模拟系统(图10)。实验腔两端设置流体进出管路,最高设计温度为 200°C ,可以完成裂隙介质(或多孔介质)的导流换热过程实验。

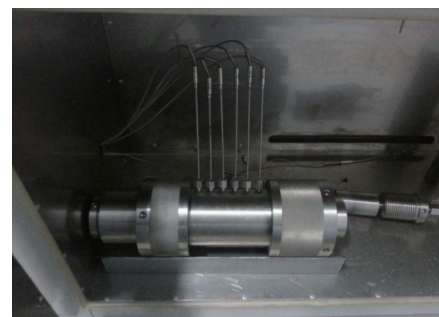


图10 岩体导流换热模拟系统

Fig. 10 Simulation system of rock conductivity and transfer

岩心夹持器内部设8个测温点,连接8个测温探头(外部连接6个,进出口处内部各连接1个),对导热换热过程中岩石各个部位进行实时温度监测。岩石试样实验可用尺寸为 $\phi 38\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 、 $\phi 50\text{ mm}\times 140\text{ mm}$ 或 $\phi 100\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 。

3 前景与展望

下一步将利用该模拟系统开展不同条件下的 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 大尺寸样品的模拟实验。分别对人工砂岩、流纹岩、花岗岩等试块进行流体致裂实验,研究天然样品、预设裂缝样品、含支撑剂样品在不同温度、围压下,裂缝发生、扩展、发育规律。目的是为现场干热岩压裂工艺设计和储层改造提供参数和技术支持^[15,16]。

吉林大学的干热岩水力压裂实验室模拟系统刚具初形,更多的实验正在进行中。所研发的大尺寸压裂机可以模拟岩石在三向地应力以及高温高压条件下人工压裂过程,获取相关固体-流体力学和热交换性能参数。干热岩地热的获取一般在3~10 km,温度在150℃以上^[17,18],实验模拟还原地下应力场和温度场时,往往受仪器条件限制。为更深入准确地研究干热岩特性,获取干热岩地热,在今后的实验中有必要进一步改进高温高压岩石动态三轴模拟系统。

近年来中国在水力压裂和微地震监测方面的技术有了较大提升,但仍面临很多瓶颈,如实验手段不完善、室内实验与实际场地结合不理想等方面,为克服技术难点,需要国家的持续支持和产学研合作多学科联合攻关,促进中国干热岩热能开发与综合利用事业的发展,为中国的能源结构调整做出贡献。干热岩是储量巨大的新型能源,实验室模拟必将为干热岩开发的场地工程示范和将来的商业化运作提高技术支持^[19,20]。

参考文献(References)

- [1] 康玲,王时龙,李川. 增强地热系统EGS的人工热储技术[J]. 机械设计与制造, 2008(9): 141-143.
Kang Ling, Wang Shilong, Li Chuan. Reservoir technology in EGS[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(9): 141-143.
- [2] Brown D. The US hot dry rock program - 20 years of experience in reservoir testing[C]. Proceedings of World Geothermal Congress, Florence, Italy, 18-31 May, 1995.
- [3] 许天福,张延军,曾昭发,等. 增强型地热系统(干热岩)开发技术进展[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 42-45.
Xu Tianfu, Zhang Yanjun, Zeng Zhaofa, et al. Technology progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock)[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 42-45.
- [4] Ahmed U, Abou-Sayed A S, Jones A H. Experimental evaluation of fracturing fluid interaction with tight reservoir rocks and propped fractures[C]. Society of Petroleum Engineers, Symposium on Low Permeability Gas Reservoirs, Denver, USA, May 20-22, 1979.
- [5] Cha M, Yin X L, Kneafsey T. Cryogenic fracturing for reservoir stimulation - Laboratory studies[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 124: 436-450.
- [6] Kitano K, Hori Y, Kaieda H. Outline of the ogachi hdr project and character of the reservoirs[C]. Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000.
- [7] Ishida T, Chen Q, Mizuta Y. Effect of injected water on hydraulic fracturing deduced from acoustic emission monitoring[J]. Pure and Applied Geophysics, 1997, 150: 627-646.
- [8] Matsunag I, Kobayashi H, Sasaki S, et al. Studying hydraulic fracturing mechanism by laboratory experiments with acoustic emission monitoring [C]. American Rock Mechanics Association, The 34th U. S. Symposium on Rock Mechanics, Madison, USA, June 28-30, 1973.
- [9] Ishida T. Acoustic emission monitoring of hydraulic fracturing in laboratory and field[J]. Construction and Building Materials, 2001, 15: 283-295.
- [10] Bohloli B, Pater C J de. Experimental study on hydraulic fracturing of soft rocks: Influence of fluid rheology and confining stress[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2006, 53: 1-12.
- [11] Hunt S P, Morelli C. Cooper Basin HDR hazard evaluation: predictive modeling of local stress changes due to HFR geothermal energy operations in South Australia[R/OL]. [2015-06-20] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.113.3593&rep=rep1&type=pdf>.
- [12] Sarmadivaleh M, Rasouli V. Test design and sample preparation procedure for experimental investigation of hydraulic fracturing interaction modes[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48 (1): 93-105.
- [13] Stober I. Depth and pressure dependent permeability in the upper continental crust: Data from the Urach 3 geothermal borehole, southwest Germany[J]. Hydrogeology Journal Germany, 2011, 19(3), 685-699.
- [14] Reinicke A, Rybacki E, Stanchits S. Hydraulic fracturing stimulation techniques and formation damage mechanisms - Implications from laboratory testing of tight sandstone - proppant systems[J]. Chemie der Erde-Geochemistry, 2010, 70(S3): 107-117.
- [15] 黄炳香,程庆迎,刘长友,等. 煤岩体水力致裂理论及其工艺技术框架[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 167-173.
Huang Bingxiang, Cheng Qingying, Liu Changyou, et al. Hydraulic fracturing theory of coal rock mass and its technical framework[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 167-173.
- [16] 黄炳香. 煤岩体水力致裂弱化的理论与应用研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2009.
Huang Bingxiang. Research on theory and application of hydraulic fracture weakening for coal-rock mass[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2009.
- [17] Jia L C, Chen M, Sun L T. Experimental study on propagation of hydraulic fracture in volcanic rocks using industrial CT technology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 405-408.
- [18] 孔令珍. 中国地热能发展趋势[J]. 煤炭技术, 2006, 25(7): 107-108.
Kong Lingzhen. Development trend of geothermal energy resource in china[J]. Coal Technology, 2006, 25(7): 107-108.
- [19] 毛宏举,马洪伟. 增强型地热发电技术及广东省应用前景分析[J]. 新能源及工艺, 2010(5): 25-28.
Mao Hongju, Ma Hongwei. Discussion on the technology of enhanced geothermal generation and its application prospect in Guangdong province[J]. Energy engineering, 2010(5): 25-28.
- [20] 殷秀兰. 干热岩地热资源利用前景无限[N]. 中国矿业报, 2008-10-14.
Yin Xiulan. Hot dry rock geothermal resources utilization prospect of unlimited[N]. China Mining News, 2008-10-14.

(编辑 田恬)