

# 增强型地热系统(干热岩)开发技术进展

许天福<sup>1</sup>, 张延军<sup>1,2</sup>, 曾昭发<sup>3</sup>, 鲍新华<sup>1</sup>

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
3. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026

**摘要** 增强型地热系统(EGS), 又称干热岩, 是一种从低渗透率和低孔隙度的岩层(干热岩)中提取热量从而获取大量热能的一种工程。有关增强型地热系统的研究与开发已有 30 余年的历史, 但以往只局限于美国、英国、法国、德国、瑞士、日本、澳大利亚等国家。中国高温岩体地热开发研究起步较晚, 仅少数科研单位在这方面做了理论探讨和国际合作。本文主要讨论了增强型地热系统的基本理念、国内外研究现状与发展趋势、关键技术、存在的问题以及展望。

**关键词** 干热岩; 增强型地热系统; 人工压裂; 地球物理

**中图分类号** TK529

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.32.005

## Technology Progress in an Enhanced Geothermal System (Hot Dry Rock)

XU Tianfu<sup>1</sup>, ZHANG Yanjun<sup>1,2</sup>, ZENG Zhaofa<sup>3</sup>, BAO Xinhua<sup>1</sup>

1. Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130000, China
2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China
3. College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

**Abstract** Enhanced Geothermal System (EGS), known as Hot Dry Rock (HDR), is an engineering technology where the heat energy is extracted from low permeability and low porosity rock, namely, HDR in order to gain the quantity of energy. Although the history and development of EGS has been more than 30 years, only a small number of countries in the world have a voice in this respect, such as the United States, Britain, France, Germany, Switzerland, Japan, Australia, etc. The basic concept, research and development status, key technologies, issues and expectation involving the EGS are mainly discussed.

**Keywords** hot dry rock; EGS; artificial fracturing; Geophysics

### 1 增强型地热系统的概念

地热能由于其清洁可再生性和空间分布的广泛性, 已经成为位居水力、生物质能之后的世界第 3 大可再生能源。地热资源作为世界各国重点研究开发的可再生清洁能源, 主要分为水热型和干热岩型。世界上目前开采和利用地热资源主要是水热型地热, 占已探明地热资源的 10% 左右<sup>[1]</sup>。干热岩是一种没有水或蒸汽的热岩体, 主要是各种变质岩或结晶岩类岩体。干热岩普遍埋藏于距地表 3—10km 的深处, 其温度范围很广, 在 150—650℃ 之间<sup>[2]</sup>。现阶段, 干热岩地热资源是专指埋深较浅、温度较高、有开发经济价值的热岩体, 保守估计地壳中干热岩(3—10km 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。

干热岩在地球上的蕴藏量十分丰富。若将它开采出来加以应用, 可以满足人类长期使用。据麻省理工学院(MIT)2006 年报告, 只要开发 3000—10000m 深度 2% 的干热岩资源储量, 就将达到  $200 \times 10^{18}$  EJ, 是美国 2005 年全年能源消耗总量的 2800 倍<sup>[3]</sup>。据美国地热能市场评估报告数据(2007), 美国国内地热项目开发的数目增至 193 个, 正在开发的地热能量 1035MW, 而地热潜力估计 12271369MW<sup>[4]</sup>, 有极大的开发潜力。

增强型地热系统 (Enhanced Geothermal Systems, EGS) 是在干热岩技术基础上提出的, 美国能源部的定义是采用人工形成地热储层的方法, 从低渗透性岩体中经济地采出深层热能的人工地热系统, 如图 1 所示。据美国能源部的增强型地热系统技术评估报告(2008), 需要对 EGS 技术中 3 个关键方面

收稿日期: 2012-09-11; 修回日期: 2012-10-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA052801); 国家自然科学基金(40972172)

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, 研究方向为岩石力学和 EGS, 电子信箱: zhangyanj@jlu.edu.cn

进行评估,即地质条件、经济可行性和 EGS 在其他技术领域的适用性,最后通过耦合模型预测评价能源开发的可行性<sup>[5]</sup>。

需要指出的是,本文中使用的干热岩和增强型地热系统两个名词概念没有严格的区分,可交换使用。

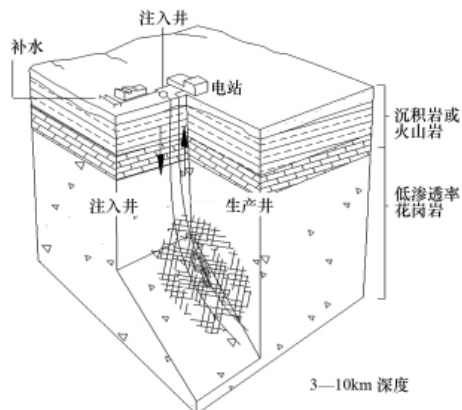


图 1 干热岩热能开发的增强型地热系统示意  
Fig. 1 Scheme of the enhanced geothermal system in hot dry rock

## 2 国内外研究现状与发展趋势

增强型地热系统已有 30 多年的研究历史,但以往只局限在美国、英国、法国、德国、瑞士、日本、澳大利亚等国家。

美国是最早对干热岩的工程开发进行研究的国家,在新墨西哥州中北部的芬顿山成立了干热岩研究中心。美国政府于 1973 年资助针对干热岩开发的 EGS 试验研究,1977 年获得了成功,最深钻孔达 4500m,岩体温度为 330℃,热交换系统深度为 3600m。1984 年建成了世界上第一座高温岩体地热发电站,发电功率由最初的 3MW 提高至 10MW,地热流值达 250mW/m<sup>2</sup>。

从 1980 年开始,日本政府资助了一项研究干热岩发电技术可行性的项目。在山形县实施了 4 个钻孔,深度在 2000—2200m,岩体温度为 250℃,并进行了多次短期的水压测试。1988 年,日本政府和几个私人机构还在岩手县资助了一项研究水-岩体间热交换项目<sup>[6]</sup>。

1977—1986 年,欧共体资助德国在巴伐利亚东北部的 Falkenberg 开展了一项 EGS 研究:在较浅的深度下,研究岩石的自身裂隙、水压产生裂隙的形成机制以及水在这些裂隙中的运移机制<sup>[7]</sup>。

国际能源署(IEA)领导并实施了一系列有关地热利用的国际合作项目。在众多的地热利用国际合作项目中,与干热岩较紧密联系是“地热执行协议”(GIA)中一个为期 4 年(1997—2001)的重大计划——“干热岩行动计划”(Hot Dry Rock Task),该计划由日本的新能源和工业技术发展组织(NEDO)担任总执行机构,参与该计划的国家有澳大利亚、德国、日本、瑞士、英国、美国以及欧共体。

澳大利亚在 2003 年在库珀(Cooper)盆地开展了有一个 EGS 的项目,勘查结果显示该盆地的热能储量高达 500 亿

桶油当量(据澳大利亚 Metasource 公司网站),在 4500m 的深处干热岩的温度高达 270℃<sup>[8]</sup>。Geodynamics 有限公司在 2003 年 9 月完成了第一口注水井,而且通过注水在花岗岩岩体上压裂并形成了一系列永久的连通裂隙。

2008 年初,美国麻省理工学院历时 3 年完成了一份研究报告——《地热能的未来》,其副标题是“21 世纪增强型地热系统(干热岩)对美国的影响”。研究报告指出,增强型地热系统,或称工程型地热系统(即以前所称的干热岩),开发应用潜力巨大,不受地域限制,对环境的影响最小,预示美国干热岩开发技术的商业化运行可望在 10—15 年内实现。

中国高温岩体地热开发研究起步较晚,仅少数科研单位做了理论探讨并参与了干热岩或 EGS 国际合作。1993—1995 年,中国国家地震局地壳应力研究所和日本中央电力研究所开展合作,在北京房山区进行了干热岩发电的研究试验工作<sup>[9]</sup>。2000 年,赵阳升教授领导的研究团队开始了高温岩体地热开发的有关问题研究,并对相关技术做了较系统的介绍。2007 年中国能源研究会地热专业委员会与澳大利亚 Petratherm 公司签订了 2 年的合作协议,开展了“中国工程型地热系统资源潜力的研究”国际交流项目,中澳专家已联合在一些可望有潜力的选定地区开展了初步调查,采集了一些试验样品,并进行了一系列分析测试、模型研究等工作<sup>[10]</sup>。2009 年 6 月 29 日大庆市组织召开全市新能源利用座谈会,认为大庆市的地热资源非常丰富,分布面积达 5000km<sup>2</sup>,地下 4000—5000m 深的干热岩所蕴藏的地热能源相当于全市油气能量的 1 万倍,开发潜力巨大<sup>[11]</sup>。2009 年 11 月底—12 月初,中国能源研究会地热专业委员会和中国地质环境监测院组团,对澳大利亚“地球动力”公司在南澳大利亚 Cooper 盆地的干热岩开发利用现场进行了实地考察。2010 年,福建省天华能源科技有限公司开展了福建省泉州市晋江地域增强型地热利用系统工程及地震监测试验研究项目。

中国幅员辽阔,地热资源丰富,中国地热资源潜力为 11×10<sup>6</sup>EJ/a,占全球的 7.9%<sup>[12]</sup>。中国有极丰富的深层地热资源。根据板块构造理论,中国西南部受印度洋板块的挤压作用,东南部受菲律宾板块的挤压作用,东部受太平洋板块的挤压和俯冲作用,地质体活动强烈,发生频繁的火山喷发和地震。这些地区有很高的地热梯度,典型代表如西藏羊八井地区、云南腾冲地区、海南琼北地区、台湾及东南沿海地区、长白山地区等地,都具有极丰富的高温岩体地热资源和很优越的开发条件。

自 1972 年美国 Smith 等将干热岩的开发利用研究从概念模式转入实验阶段以来,这种发电技术引起了世界各国的广泛关注,通过国际合作和各国不断努力,美国、日本、英国、法国、德国等国家在过去 20 年间相继进行了有关方面的实验,试验电厂的发电量也逐渐由 3MW 增大到 11MW,逐渐接近商业开发的规模。

在干热岩领域,中国前期投入较小,主要资助开展学术交流、探索研究,并未形成国家层面的干热岩技术研发基地和装备条件。中国以往的地热开采一般在 1000m 以内,以浅层

地热开发为主。浅层地热的大量开采在一些地区造成了地下水位大幅度下降、地面沉降等后果,同时浅层地热的温度、水量等难以满足高附加值的相关领域,诸如发电、工业加工、农副业加工等的需要。这使得对 EGS 的研究及工程应用成为今后中国地热资源开发的主导方向。

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。下设 4 个课题,吉林大学、中国科学院广州能源研究所、清华大学和天津大学各承担一个课题,吉林大学为项目的牵头单位。大庆油田,中国科学院地质和地球物理研究所,中国科学院武汉岩土力学研究所和中国地质科学院水文地质环境地质研究所等参加这一研究项目。这一项目为开展 EGS 的技术研究提供了一个很好的机会,可为将来的工程应用提供技术支撑。

### 3 增强型地热系统关键技术

干热岩资源有着巨大的开发潜力,但在国内外的干热岩开发利用过程中存在很多科学和工程问题,特别是在以下多个方面需要进一步开展研究:资源靶区定位技术;人工压裂;微地震、示踪等监控监测技术;资源评价方法;地热地质模型;地下高温岩体多场耦合过程;地热介质的换热特性机制;能源转换效率评价;发电系统高效利用;示范试验现场建立等。在这些研究领域中 2 个最为关键的技术是水力压裂和地球物理探测技术。本文对这些关键技术做简要介绍。

#### 3.1 干热岩体人工压裂

EGS 用于工业化生产最关键的一步是“储层刺激”,即通过钻孔向深部干热岩石裂隙注入高压流体,为裂隙剪切破坏创造有利条件,或使断裂的一个或者两个面产生平移运动,这样会在粗糙面之间形成不整合面,这个不整合面会增加岩层的孔隙度和渗透率。

注入深井钻孔完成后,利用场地实验获取储层相关基本参数(如地应力、节理裂隙特征、流体特征和岩石力学参数等)。在压裂模型和地热开发数值模型技术的基础上规划和设计水力压裂(区域、压力、岩体体积、流体、支撑剂和压裂工艺)。探测仪器选址并安装后,利用微震活动性、微重力测量、重力分析法、自然电位法和倾斜仪阵列等映像和成像手段,探测岩层裂隙分布及流体通道。压裂过程中对流速实时、有效的控制,通过数值模型及其控制技术实现。在控制流速的基础上,采用重复水力压裂或使用携带一定浓度的化学物质(如钡硫酸盐)的水进行压裂或使用爆破技术对流体通道进行扩展,同时利用支持剂的剥落和溶解作用保证流体通道的畅通,并通过低流速注入检测永久性残余增强渗透率。最后对裂隙扩展和热储分别进行软件模拟,同时进行敏感度分析。

近年来,国外的很多学者着手化学刺激技术的开发,主要包括以一定的破裂压力把酸或碱溶液注入地层,以达到溶解裂隙表面可溶性矿物或井筒附近沉积物的方法。化学刺激技术最早应用在石油行业中,以提高石油和天然气井的产量,其中许多方法和化学试剂可以借鉴。

#### 3.2 地球物理勘查和监测技术

地球物理方法技术在干热岩勘探与开发各个环节中具有重要的作用,适宜于查明各种断裂的方向和性质;圈定地下深部热储的位置;确定与地下热水有关的地质构造;查明火成岩体的分布、规模和性质;监测地下水 and 热储的水文地质变化特征;判断地下热水的分布与埋藏状况等。地球物理方法技术包括以下内容。

(1) 地震勘探与微震监测技术。地震勘探方法技术具有高精度和高分辨率特点,在干热岩的勘探与开发中作用巨大。微震方法对于了解干热岩地热储层的形成及其开发过程中发生的岩石动力学过程,有着极其重要的作用。采用微地震监测技术对油田地层压裂过程和注水采油过程开展监测方面取得较好的效果,可以借鉴到干热岩的开发中<sup>[13-15]</sup>。

(2) 电法、电磁法。干热岩的目标体具有较明显的电性差异,为电法和电磁法的应用提供了基础。电法和电磁方法技术种类较多,根据频率分类包括直流电法、大地电磁测深、可控源音频电磁测深、瞬变电磁、探地雷达等。由于探测的深度和分辨能力不同,电法和电磁法广泛应用于干热岩勘查和开发的各个阶段。其作用包括探测与地下热水有成因关系的断裂构造位置;圈定地下热水分布范围;确定覆盖层厚度、热源的位置以及隐伏基岩岩性;分析热储的裂隙分布规律;分析水热耦合交换的规律等<sup>[16-18]</sup>。

(3) 重磁方法。该方法是以介质的密度和磁化率差异为目标来探测干热岩位置和监测干热岩的开发过程。在以下方面具有重要作用:研究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;研究地热的成因特征等<sup>[19]</sup>。随着重磁方法的仪器技术发展,测量参数增加和精度提高,重磁方法越来越多地应用于干热岩开发中的监测与评价过程。

(4) 井中地球物理方法。通过井中地球物理方法技术测试,研究温度随深度变化的规律,精细研究岩石裂隙的分布规律;精细研究流体与岩石的分布特点以及温度与流体间的变化关系。该测试方法为以上研究工作提供了重要的基础资料。

#### 3.3 示踪剂技术

除了用地球物理方法研究压裂效果外,示踪剂方法是研究压裂产生的裂隙密度、联通性和热交换面积的有效方法,同时示踪剂方法也是评价热能产出能力的重要手段。除了经常使用的保守的示踪剂和温度敏感的示踪剂外,一种利用天然的化学组分和同位素,对刺激诱导开裂裂隙面发育情况进行示踪研究的新技术正在开发中。利用现有的解析解和数值模拟技术,通过示踪剂可研究复杂结构面和裂缝处的精确突破曲线。通过设计和分析示踪剂实验,同时测量吸附行为(分配系数),可获得断裂面面积和裂缝间距。设计和分析非等温注射回流示踪现场试验,是 EGS 的一项不可缺少的技术。

#### 3.4 其他关键技术

干热岩的经济有效的开发,还需要诸如以下关键技术和方法。(1) 野外靶区表征与选址方法,结合地质、物探、干热岩

技术指标体系,进行综合研究,建立靶区地质模型。(2)水-岩-气-热作用机制(包括传热传质、水与管道之间),研究水-气-岩-热的物理-化学反应机制;构建高温高压条件下水-气-岩相互作用的热力学和动力学数据库,构建干热岩实验室模拟系统。(3)干热岩地下水动力-热传递-力学-化学(THMC)多场耦合数值模拟软件开发,建立近井和大尺度的THMC耦合模型,并通过实验室和现场数据验证模型。(4)干热岩经济分析、地下地上结合以及考虑防腐因素的优化实施方案方法。(5)在确定的野外靶区上进行干热岩钻探,同时开展测井工作,进行岩心(样)分析测试,结合测井和分析测试结果验证和完善干热岩关键技术模型,为今后开展干热岩资源研究、开发利用和其他相关地学科学研究提供试验基地。

#### 4 展望

近年来中国在钻井、压裂、微地震监测、数值模拟等方面的技术都有了较大提升,但在干热岩热能开发与综合利用技术方面还面临很多瓶颈,如干热岩资源评价及靶区定位技术、人工压裂及探测评价技术、地下多场耦合作用、高温高压流体运移及高效发电技术等方面。为了克服技术难点,需要国家的持续支持,产学研合作和多学科联合攻关,促进中国干热岩热能开发与综合利用事业的发展,为中国的新能源建设做出贡献。

早期和现今美国、日本、欧洲和澳大利亚尝试发展EGS都是利用水作为热传递载体。水做为热载体,具有许多优势属性,但同时它也存在严重的缺陷。水的一个不利属性是在高温下它会成为溶解岩石矿物质的强溶剂。水注入到热的岩石裂隙中后,产生强烈的溶解和沉淀作用,这种作用改变裂隙的渗透率,这就使得在稳定方式下操作EGS变得困难<sup>[9]</sup>。正确设计和实施“储层刺激”措施,必须以可靠的预测流体与岩石间的化学反应为基础。同时由于水是一种宝贵的、非常有价值的资源(商品),而在热循环中不可避免的水量流失会造成严重的经济损失。

鉴于水作为热载体的EGS运行中的问题,近年来国内外学者和相关机构进行了用超临界二氧化碳作循环液的强化地热系统的研究。这一方法可以避免水溶液注入可能产生的一系列问题,在实现了CO<sub>2</sub>的资源化的同时,又能使其被储存于地下介质中。以CO<sub>2</sub>替代水作为循环液体的强化地热系统(CO<sub>2</sub>-EGS)是一个新兴的研究领域,国际上刚刚起步。CO<sub>2</sub>-EGS系统对CO<sub>2</sub>减排和可再生能源利用具有重要意义,这方面的研究正展现出广阔的应用前景。

#### 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. *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, Italy, 1995:

2607-2611.

- [3] Massachusetts Institute of Technology. The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century [R]. MIT: Cambridge, MA, 2006. [http://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2012/05/future\\_of\\_geothermal\\_energy.pdf](http://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2012/05/future_of_geothermal_energy.pdf).
- [4] Islandsbanki Geothermal Energy Team. United States geothermal energy market report[R]. Glitnir Geothermal Research, Iceland, 2007: 1-24.
- [5] Geothermal Technologies Program. An evaluation of enhanced geothermal systems technology[R]. Energy Efficiency and Renewable Energy, America, 2008: 1-37.
- [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: 3773-3778.
- [7] 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.
- [8] 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]. University of Adelaide, Australia. <http://www.iea-gia.org/documents/InducedSeismicityReportSHuntDraftOctober2006Malvazos4Jan07.pdf>. [2006-10-16].
- [9] 殷秀兰. 干热岩地热资源利用前景无限[DB/OL]. [2010-03-08]. <http://www.cn-mineralwater.com/show.aspx?id=1267&cid=11>, 2010/03/08.  
Yin Xiulan. Unlimited prospect for utilization for hot dry rock geothermal resource[DB/OL]. [2010-03-08]. <http://www.cn-mineralwater.com/show.aspx?id=1267&cid=11>.
- [10] 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]. 能源工程, 2010(5): 25-28.  
Mao Hongju, Ma Hongwei. *Energy Engineering*, 2010(5): 25-28.
- [11] 新能源开发在大庆挺热 [DB/OL]. [2009-07-30]. [http://www.dqdaily.com/ztxw/kxfzg/2009-07/30/content\\_145129\\_2.htm](http://www.dqdaily.com/ztxw/kxfzg/2009-07/30/content_145129_2.htm).  
New Energy Development in Daqing quite hot[DB/OL]. [2009-07-30]. [http://www.dqdaily.com/ztxw/kxfzg/2009-07/30/content\\_145129\\_2.htm](http://www.dqdaily.com/ztxw/kxfzg/2009-07/30/content_145129_2.htm).
- [12] 孔令珍. 中国地热能发展趋势[J]. 煤炭技术, 2006, 25(7): 107-108.  
Kong Lingzhen. *Coal Technology*, 2006, 25(7): 107-108.
- [13] Kristinsdottir L H, Flovenz O G, Arnason K, et al. Electrical conductivity and P-wave velocity in rock samples from high-temperature Icelandic geothermal fields[J]. *Geothermics*, 2010, 39(1): 94-105.
- [14] Jaya M S, Shapiro S A. Temperature dependence of seismic properties in geothermal rocks at reservoir conditions[J]. *Geothermics*, 2010, 39(1): 115-123.
- [15] Yang Y, Ritzwoller 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Schwarz G, Haak V, Rath V. Electrical conductivity studies in the travale geothermal field, Italy[J]. *Geothermics*, 1985, 14: 654-662.
- [19] Karastathis V K, Papoulia J, Di Fiore B, et al. Deep structure investigations of the geothermal field of the North Euboean Gulf, Greece, using 3-D Local Earthquake Tomography and Curie Depth Point analysis [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2011, 206 (3-4): 106-120.
- [20] Xu T, Pruess K, Apps A J. Numerical studies of fluid-rock interactions in Enhanced Geothermal Systems (EGS) with CO<sub>2</sub> as working fluid[C]// Proceedings of 33th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, CA, Jan 28-30, 2008.

(责任编辑 吴晓丽)