

# 探秘“能源新星”——干热岩

王 文, 吴纪修, 施山山, 李小洋

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**干热岩是近些年逐渐发展起来的清洁能源,指埋藏于地球表面 3000 m 以深,不含或含少量水或蒸汽等流体,温度在 180 °C 以上且渗透率极低的岩体。对于干热岩的应用主要是建立增强型地热系统进行发电。目前对于干热岩的研究尚处于起步阶段,干热岩的热源、热储、形成机理、埋藏机制等都未形成完整的理论体系,干热岩的开发过程也面临诸如储层改造、高温钻探以及随钻监测等一系列的技术“瓶颈”。干热岩资源储量大,开发利用过程低碳环保、节能高效,是国际社会公认的优质清洁能源,但是干热岩研究程度低,开发难度大,需要不断的知识积累和技术积累。本文从科普的角度列举了干热岩的相关研究现状及存在的问题,以期能让更多的人对这一“能源新星”加深了解。

**关键词:**干热岩;清洁能源;增强型地热系统(EGS)

**中图分类号:**P967;TK529;P634 **文献标识码:**C **文章编号:**1672-7428(2020)03-0088-06

## Probe a new energy—hot dry rock

WANG Wen, WU Jixiu, SHI Shanshan, LI Xiaoyang

(The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** Hot dry rock (HDR) is a kind of clean energy resource emerging in recent years. It is buried in the deep earth (below 3000m), without or with little water or water vapor, and the temperature is over 180°C with very low permeability. Unlike conventional hydrothermal systems, the utilization of HDR needs to build Enhanced Geothermal System (EGS), where the fluid circulation must be stimulated artificially. At present, the study on HDR is in the early stage, and the theory on the heat source, the heat reservoir, the formation mechanism, the burial mechanism etc. is not complete. The development of HDR also faces a lot of problems such as reservoir stimulation, high temperature drilling technology, monitoring while drilling. In the world, there is a very large reserve of HDR, and it is recognized as a high-quality clean energy by the international society; However, little research has been done on HDR, and the high development difficulties need continuous accumulation of knowledge and technology. From the perspective of scientific popularization, this paper lists the current research status and problems about HDR so as to make HDR more popular.

**Key words:** hot dry rock; clean energy; Enhanced Geothermal System (EGS)

能源是人类社会发展必不可少的条件,从旧石器时代钻木取火,到工业革命以来化石燃料的大量开采利用,再到近年来可再生能源(风能、太阳能、生物能、核能、地热能等)的发现及利用,能源一直是人类赖以生存的源动力,它影响着人类社会的生产模式以及生活方式,更是人类得以进步、人类文明得以发展的基础。当今社会化石能源日益告急,人类对

于能源的探索未曾停止,近年来,一种叫做干热岩的能源逐渐走进了人们的视野,这是一种国际社会公认的低碳高效的清洁能源,符合人类对于保护地球环境以及合理利用能源资源的理念。

### 1 什么是干热岩?

干热岩是地热资源的一种,随着干热岩概念的

收稿日期:2019-10-07; 修回日期:2019-12-24 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.03.015

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“共和—略阳地区区域地质调查”(编号:DD20190072)

作者简介:王文,女,汉族,1990年生,助理工程师,地质资源与地质工程专业,硕士,从事区域地质调查工作,河北省廊坊市金光道77号,we-wang7846@163.com。

引用格式:王文,吴纪修,施山山,等.探秘“能源新星”——干热岩[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):88-93.

WANG Wen, WU Jixiu, SHI Shanshan, et al. Probe a new energy—hot dry rock[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(3):88-93.

提出,其定义也在不断发展。考虑其科学性、经济性及技术性,干热岩是指埋藏于地球表面 3000 m 以深,不含或含少量水或蒸汽等流体,温度在 180 °C 以上且渗透率极低的岩体,其热能在当前经济条件下可被利用(参见图 1)<sup>[1-4]</sup>。干热岩的热能赋存于岩石中,较常见的岩石有黑云母片麻岩、花岗岩、花岗闪长岩等,一般干热岩上部覆盖有沉积岩等隔热层。

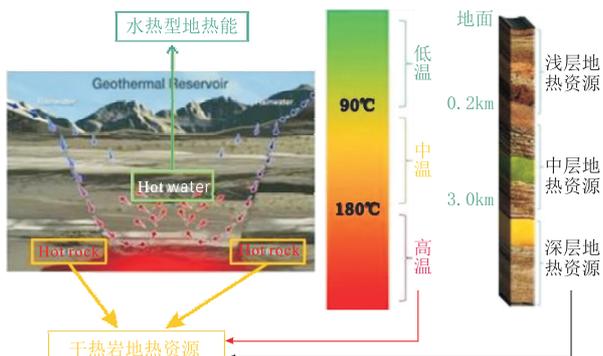


图 1 干热岩资源埋深及温度分布示意图(引自地源热泵网)  
Fig.1 Depth and temperature distribution of hot dry rock (according to dyrbw.com)

## 2 干热岩是怎样形成的?

地球内核温度高达 5000 °C 以上,其能量会通过岩石及地层流体向地表传递。对于一些特定区域,其上部覆盖有数千米厚的沉积岩作为保温隔热层,其下受到来自地球深部的辐射热与传导热等,使得这一特定区域成为“架在火堆上的岩石”,且热量无法得到有效散失,导致其地温梯度异常高于地壳的平均地温梯度(2.5 °C/100 m),在这些异常区域就会形成干热岩(见图 2)。目前广泛认为干热岩主要赋存于致密变质岩或花岗岩之中,而李德威等<sup>[1]</sup>在大陆动力学和地球系统动力学思想的指导下认为形成干热岩的岩石可以是漫长地质历史时期形成的各种变质岩和岩浆岩。

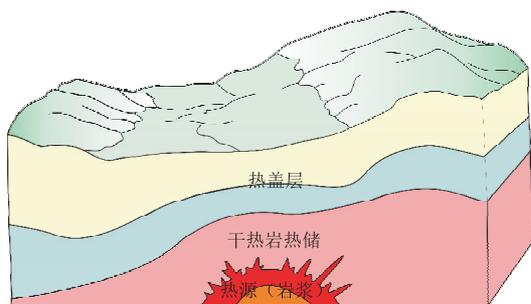


图 2 干热岩形成模拟图  
Fig.2 Simulated diagram of hot dry rock formation

对于干热岩的热源有 3 种解释:(1)深部超高温岩浆向浅部侵入后逐渐冷却释放热量;(2)高含铀、钍、钾等放射性元素的岩体自身放射性生热<sup>[2]</sup>(见图 3);(3)熔融态原岩在一定温压作用下变质形成新的动力变质岩,在此过程中释放热量(见图 4)<sup>[1]</sup>。

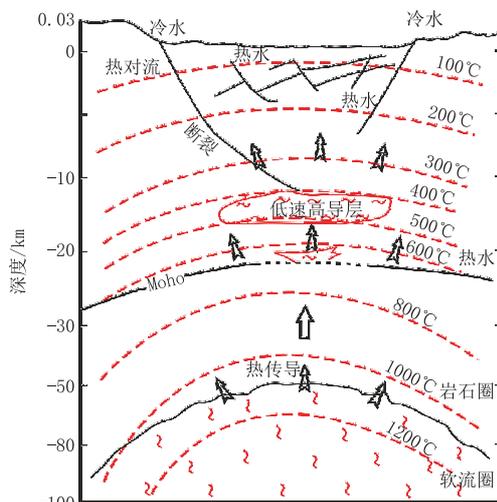


图 3 干热岩高放射性产热模式图<sup>[2]</sup>  
Fig.3 Pattern of high radioactive heat production type<sup>[2]</sup>

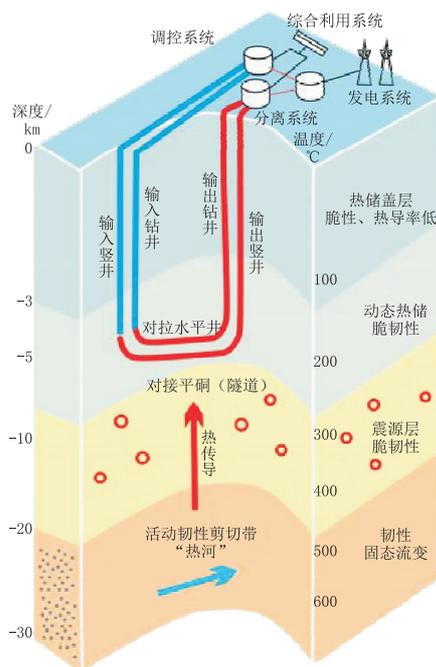


图 4 熔融态原岩变质作用热传导示意图<sup>[1]</sup>  
Fig.4 Schematic diagram of heat transfer due to the metamorphism of molten original rock<sup>[1]</sup>

## 3 干热岩资源储量及开发利用优势

国土资源部中国地质调查局 2015 年调查结果显示,全国干热岩资源量折合 856 万亿吨标准煤,是

全国 336 个地级以上城市浅层地热年可开采资源量的  $1.22 \times 10^6$  倍,是全国水热型地热年可开采资源量的  $0.45 \times 10^6$  倍<sup>[5]</sup>。干热岩资源与煤、石油等化石能源相比,是取之不尽用之不竭的;与风能、太阳能等可再生能源相比,又具有以下优越性:(1)稳定,不会受到季节、昼夜以及天气变化的影响;(2)清洁环保,是国际社会公认的高效低碳清洁能源;(3)可综合利用,可在发电、取热、养殖等各个方面加以应用。由此可见,干热岩具有储量巨大、分布广泛并且可利用时间长等特点,地热能尤其是干热岩势必成为未来能源的一个重要组成部分。

#### 4 如何开发利用干热岩

开发干热岩必须是在进行详细的地质勘查前提下,查明其形成的地质背景及分布,科学评价其资源量。目前干热岩的开发主要是建立增强型地热系统(Enhanced Geothermal System)用于发电,美国能源部对增强型地热系统的定义是通过采用人工形成地热储层的方法,将深层热能从地下深处的低渗透岩体中开采出来的人工地热系统<sup>[6]</sup>。其基本原理是:建立一系列的注水井、生产井、人工热储层、地面发电设备等,使用人工压裂的方法在干热岩岩层中制造缝隙,形成人工地热储层,将高压水通过注水井注入,使其流经地热储层吸收热量,形成高温流体(水、汽),再通过生产井将储层中的高温流体(水、汽)抽取至地面,这些蕴含巨大热量的高温流体(水、汽)便可以用于发电,而经过发电之后的流体冷凝后可再次通过注水井注入地下吸取干热岩热量,如此循环往复,理想情况下整个过程是一个封闭式循环系统,绿色环保,不会产生任何污染(参见图 5),在此过程中,水作为取热介质进行稳定发电的关键因

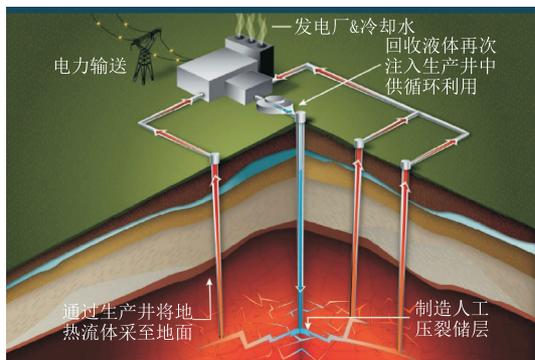


图 5 增强型地热系统(EGS)模式图

Fig.5 Pattern of the Enhanced Geothermal System (EGS)

素是在储层中进行有效的热交换<sup>[7,9-10]</sup>。

除了发电,干热岩还可应用到其他更广泛的领域,王贵玲等<sup>[4]</sup>指出,干热岩的开发应遵循地热梯级利用的原则(见图 6),以高效、充分地利用资源:温度介于  $200 \sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,可用于直接发电,温度介于  $150 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$  可用于取暖、制冷、工业干燥、工业热加工、双循环发电等,温度低于  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  还可以用于采暖、养殖、医疗、洗浴等。此外,王学忠<sup>[11]</sup>还提出可以利用干热岩代替燃烧原油的方式开采稠油,即将干热岩生产井采出的高温水、汽用于加热油层,增加油层中稠油的流动能力,从而提高原油的采收率、降低开采成本。

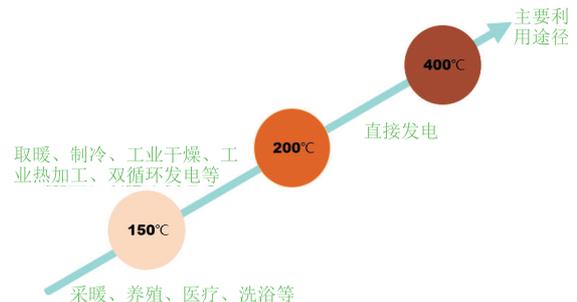


图 6 地热资源梯级利用<sup>[4]</sup>

Fig.6 Classified utilization of the geothermal resources<sup>[4]</sup>

#### 5 干热岩的研究现状及展望

##### 5.1 国外干热岩开发历程

1974 年,世界上第一次利用干热岩资源的项目源于美国位于新墨西哥州的芬顿山(Fenton Hill)干热岩项目,最初由美国政府资助,后来英国、法国、德国和日本等国参与进行了开创性的工程研究。芬顿山干热岩项目验证了在人工干预下开采干热岩热量是可行的,为地热能的开发研究展示了美好的前景<sup>[13-14]</sup>。受芬顿山项目成果的鼓舞,各国开始了一系列干热岩研究,1977 年,英国启动了 Rosemanowes 项目,进行了岩石力学方面的研究,证实了裂隙的发展受原始地应力影响,天然裂隙决定了最终的人工裂隙系统,并且,在此项目中首次使用了沙粒作为支撑剂,用于改善岩石的孔隙度及渗透率。此后,日本先后在 1989 年和 1990 年开展了 Hijiori 和 Ogachi 项目,也证实了原始地应力和天然裂缝的分布状况决定了人工创造热储的效果。由于干热岩项目需要庞大的人力物力支持,英、法、德等国联合开展了 Soultz 项目(见图 7)<sup>[15-16]</sup>,于 2010 年建成了世界上第一个 EGS 示范电站,装机容量为 1.5 MW。

此外,瑞典于 1984—1994 年开展的 Fjällbacka 项目,德国于 1978—1983 年分别开展的 Falkenberg、Bad Urach 和 Horstberg 项目,法国的 Le Mayet 项目都是规模较大的 EGS 试验性项目,为干热岩资源开发技术的发展积累了宝贵的经验<sup>[13]</sup>。



图 7 法国 Soutz 干热岩发电站

Fig.7 Soutz hot dry rock power station in France

干热岩作为储量巨大的清洁能源,具有广阔的开发前景,预计到 2050 年将有超过 7000 万 kW 的 EGS 装机容量<sup>[17]</sup>。为实现干热岩资源的广泛利用,各国均加大了对 EGS 的科研、资金投入,以期在未来新兴能源市场上占得先机。

## 5.2 我国干热岩研究的发展历程

目前,中国干热岩资源勘查开发研究尚属于起步阶段。孙知新等<sup>[18]</sup>利用钻探、地震反射波以及可控源音频大地电磁测深等方法探讨了青海共和盆地存在干热岩的可能性;甘浩南等<sup>[19]</sup>、WANG Guiling 等<sup>[2]</sup>在考虑中国地壳结构背景的基础上认为干热岩的赋存类型为高放射性产热型、沉积盆地型、近代火山型和强烈构造活动带型 4 种类型,并指出我国干热岩开发的有利地区为西藏南部、云南西部、东南沿海、渤海拗陷斜坡地区、松辽盆地以及广州盆地;李德威等<sup>[1]</sup>认为干热岩的构造背景应当是地球热构造活动强烈、深部热源长期动态演变的热异常区,干热岩的优先选区应考虑在低速低阻层发育、地震活动性强、浅层脆性断层少、隔热盖层好的区域。

2010 年,国土资源部启动中国首个干热岩科学钻探项目地——“我国干热岩勘查关键技术研究”,对包括钻探器具、钻探设备配套技术以及孔底连通技术等方面的技术难题进行了研究;2011 年,中国地质调查局对我国大陆地区的干热岩资源进行了潜力评估,初步估算干热岩的远景资源量为  $2.52 \times$

$10^{25}$  J,约合  $85.6 \times 10^5$  亿吨标准煤;2012 年,吉林大学、清华大学、中国科学院广州能源研究所等多个科研院所进行了“干热岩热能开发及综合利用关键技术研究”,自此,我国开始了针对干热岩而进行的专门研究;2014 年,中国地质调查局开启了“大型盆地和东南沿海典型地区深部水文地质调查与综合评价”项目,在福建漳州龙海市白水镇确定了理想的干热岩钻探孔位置,并于 2015 年 5 月开钻,标志着我国干热岩勘探开发进入实践探索阶段;2017 年,在海南澄迈打出中国南部第一口温度超过  $185\text{ }^{\circ}\text{C}$  的干热岩井(见图 8),为我国新能源事业展现了美好的前景;2015—2017 年,中国地质调查局和青海省国土资源厅在青海共和盆地成功施工 2 眼干热岩勘探孔,孔深在 3000~3705 m,井底温度达到  $180\sim 236\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,均获干热岩体,其中 GR1 孔孔深 3705 m,孔底温度达  $236\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,孔内 3366 m 以深深度平均地温梯度为  $8.8\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ,根据国际标准,属高品质干热岩体。这是我国首次钻获埋藏最浅温度最高的干热岩体,实现了我国干热岩勘查的重大突破。



图 8 我国第一口干热岩开发井——海南澄迈干热岩开发一井

Fig.8 First hot dry rock development well in China: HDR-1 in Chengmai, Hainan province

## 5.3 干热岩开发利用过程中存在的问题

我国干热岩的勘探开发尚处于初级阶段,需要不断的开展理论和技术积累,在勘探与开发方面存在的众多技术“瓶颈”影响干热岩资源的发展,是我们未来需要重点突破的领域。

### 5.3.1 干热岩形成的地质背景及分布不明确

干热岩是怎样形成的,其分布模式是怎样的,其

评价机制该如何确定,如何探索有效的勘探及开发方法,这些都是干热岩研究初期必须解决的问题,只有了解了干热岩的孕育环境、形成机理和分布规律,才能合理划分远景区,准确寻找开采靶区。为此,在经济条件允许的条件下应广泛应用物探、化探、钻探等技术方法,结合地质、热储工程、地球化学、地球物理、钻探测井、储层建造等多个学科及技术,综合探寻干热岩的地质背景及分布特征。

### 5.3.2 干热岩资源的开发技术不成熟

干热岩的开发面临着人工储层改造、高温钻探、微震监测等一系列技术“瓶颈”。干热岩地层坚硬致密改造难度极高,如何在深部热储层中造缝织网,以增强换热介质与热储层的换热效果;井底温度超180℃,常规钻具与钻井流体耐温能力有限,如何解决井下工具、入井流体在高温下损坏失效的难题,以保障高温层段钻探作业的安全高效<sup>[20]</sup>;干热岩工程压裂有引起地质灾害的潜在风险,如何在造缝织网的过程中通过地表及井下设备实时监测地下事件数量、强度及热储层裂缝走向、位置,以实时指导现场压裂作业并为后续生产井靶点选择提供参考。

### 5.3.3 干热岩合理开发场址难确定

干热岩资源埋藏深度深且地表情况不确定,如何充分考虑自然环境、地热地质以及资源分布等条件,优选出用于EGS工程的场址;EGS系统的主流换热介质为水,富含干热岩资源的区域可能存在水源供应不足且地层水严禁开采的问题,从而产生水资源的供需矛盾。在这种情况下,是否可以寻找一种替代性换热介质(如CO<sub>2</sub>)<sup>[21]</sup>并解决替代介质应用的技术难题,以应对水资源供需矛盾,且能适当缓解温室效应。

## 6 结语

干热岩资源量大,碳排放量低,开发利用干热岩资源能够填补能源供需缺口,更符合环境友好型社会的建设。因此,研究干热岩的脚步一刻也不能停歇。在研究干热岩的过程中,应针对我国资源能源的需求,最大限度地获取与转换干热岩能量,达到高效利用的目的,在干热岩开发的过程中充分掌握控制干热岩网状裂缝系统的方法,掌握储层网状裂缝系统中热能的传递与转换机理,准确评价干热岩储量,提升干热岩能量赋存、获取、传递的理论研究和自主创新能力。希望在不久的将来,干热岩的开发

利用能够更精细化、规模更大,与其他清洁能源取长补短,让清洁能源走进千家万户,让地球重现勃勃生机。

## 参考文献(References):

- [1] 李德威,王焰新.干热岩地热能研究与开发的若干重大问题[J].地球科学—中国地质大学学报,2015(11):1858—1869.  
LI Dewei, WANG Yanxin. Major issues of research and development of Hot Dry Rock geothermal energy[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2015(11): 1858—1869.
- [2] WANG Guiling, LIN Wenjing, ZHANG Wei, et al. Research on Formation Mechanisms of Hot Dry Rock Resources in China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2016,90(4): 1418—1433.
- [3] NB/T 10097—2018,地热能术语[S].  
NB/T 10097—2018, Terminology of geothermal energy[S].
- [4] 王贵玲,简文静.干热岩开发的破冰之秘[J].国土资源科普与文化,2018(1):22—27.  
WANG Guiling, LIN Wenjing. The secret of hot dry rock[J]. Scientific and Cultural Popularization of Land and Resources, 2018(1)22—27.
- [5] 王贵玲,张薇,梁继运,等.中国地热资源潜力评价[J].地球学报,2017,38(4):448—459.  
WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2017,38(4):448—459.
- [6] The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century [R]. Boston USA: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [7] 张二勇,王璜,王贵玲.干热岩:前景可期的新能源[J].紫光阁,2018(3):87.  
ZHANG Eryong, WANG Huang, WANG Guiling. Hot dry rock: the prospective new energy[J]. Purple Light Pavilion, 2018(3):87.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Grubelich M.C., King D., Knudsen S., et al. An Overview of A High Energy Stimulation Technique for Geothermal Applications[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne Australia; 2015.
- [11] 王学忠.利用干热岩替代原油燃烧降低稠油开发成本[J].油气田地面工程,2010,29(9):71—72.

- WANG Xuezhong. Decreasing of heavy oil production cost by substituted-oil burning of hot dry rock[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2010,29(9):71-72.
- [12] Boden D.R. Geologic Fundamentals of Geothermal Energy [M]. Boca Raton Florida USA: CRC Prss, 2016.
- [13] 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. Current Status and Prospect of Hot Dry Rock Research[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19):13-21.
- [14] 杨丽,孙占学,高柏.干热岩资源特征及开发利用研究进展[J].中国矿业,2016,25(2):16-20.
- YANG Li, SUN Zhanxue, GAO Bai. A review on geothermal resources characteristics and development potential for hot dry rock[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(2): 16-20.
- [15] Moriya, H., H. Niitsuma, et al. Estimation of Critical Pore Pressure for Shear Slip of Fractures at the Soultz Hot Dry Rock Geothermal Reservoir Using Microseismic Multiplets [J]. Elsevier Geo-Engineering Book Series, 2004, 2(4):691-695.
- [16] Cuenot, N., J.P. Faucher, et al. The European EGS project at Soultz-sous-Forêts: From extensive exploration to power production[C]//. IEEE. Power and Energy Society General Meeting-conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh PA USA: 2008.
- [17] 蔺文静,孙猛,习宇飞.沉睡的宝贝——干热岩[EB/OL]. (2018-02-01)[2019-10-07]. <http://www.china-shj.org.cn/post/3235> (地质调查科普网). .
- LIN Wenjing, SUN Meng, XI Yufei. The untapped treasure—hot dry rock[EB/OL]. (2018-02-01)[2019-10-07]. <http://www.china-shj.org.cn/post/3235>.
- [18] 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):119-124,129.
- SUN Zhixin, LI Baixiang, WANG Zhilin. Exploration of the possibility of hot dry rock occurring in the Qinghai Gonghe Basin[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011,38(2):119-124,129.
- [19] 甘浩男,王贵玲,蔺文静,等.中国干热岩资源主要赋存类型与成因模式[J].科技导报,2015,33(19):22-27.
- GAN Haonan, WANG Guiling, LIN Wenjing, et al. Research on the occurrence types and genetic models of hot dry rock resources in China[J]. Science & Technology Review, 2015,33(19):22-27.
- [20] 贾军,张德龙,翁炜,等.干热岩钻探关键技术及进展[J].科技导报,2015,33(19):40-44.
- JIA Jun, ZHANG Delong, WENG Wei, et al. Key technology and development of hot dry rock drilling[J]. Science & Technology Review, 2015,33(19):40-44.
- [21] 贺凯.二氧化碳开发干热岩技术展望[J].现代化工,2018,38(6):56-58,60.
- HE Kai. Prospects for developing hot dry rock by carbon dioxide[J]. Modern Chemical Industry, 2018,38(6): 56-58, 60.

(编辑 王建华)