

共和盆地增强型地热系统开采过程数值模拟

岳高凡¹, 邓晓飞², 邢林啸¹, 蔺文静¹, 刘峰¹, 刘彦广¹, 王贵玲¹

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061
2. 青海省环境地质勘查局, 西宁 810000

摘要 干热岩资源是未来重要的清洁型能源, 增强型地热系统(EGS)能够实现干热岩资源的开发利用。青海共和盆地干热岩资源储量巨大, 可以作为EGS系统的靶区之一。水在热储层中的运移包含复杂的水-热耦合过程, 不同的EGS运行方案对电厂发电能力有重要影响。本文基于共和盆地深部地质条件, 建立了表征EGS系统水热特征的数值模型, 研究了温度场、压力场的时空分布特征, 并分析注入流体温度和循环流速两个可控因素对提热过程的影响。结果表明: 在设计的运行方案(循环流速20 kg/s; 注入温度60℃)下, 最大提热速率可达11 MW, 储层寿命为22年。注入温度每降低10℃, 系统最大提热速率约增加10%, 且对储层寿命没有明显影响; 增加循环流速可以得到更大的热提取速率, 但会减少储层寿命。

关键词 增强型地热系统; 数值模拟; 水热耦合

中图分类号 TK529

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.19.010

Numerical simulation of hot dry rock exploitation using enhanced geothermal systems in Gonghe Basin

YUE Gaofan¹, DENG Xiaofei², XING Linxiao¹, LIN Wenjing¹, LIU Feng¹, LIU Yanguang¹, WANG Guiling¹

1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China
2. Qinghai Bureau of Environmental Geological Survey, Xining 810000, China

Abstract Hot dry rock, which will become one of the most important resources in the future, can be developed and utilized using enhanced geothermal systems (EGSs). Hot dry rock resources are abundant in Gonghe basin, Qinghai province. Complex water-thermal coupling processes occur during water flow in the reservoir, and the power generation capacity of power plants is dependent on the EGS operation scheme. Based on the deep geological conditions of Qiabuqia in Gonghe basin, we established a numerical model to characterize the hydrothermal features of EGS, researched the temporal and spatial distribution of the temperature field and pressure field, and analyzed the influence of injection temperature and flow rate on heat extraction rate. The results show that the maximum heat extraction rate reached 11Mw under the base scheme (20kg/s, 60oC), and the reservoir life was 22 years. The heat extraction rate will increase by about 10% with 10oC increase of injection temperature, while the reservoir life remains the same. Increased flow rate will lead to a greater rate of heat extraction but shorter reservoir life.

Keywords enhanced geothermal systems; numerical simulation; water-thermal coupling

收稿日期: 2015-06-31; 修回日期: 2015-07-31

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212011220842); 中国地质科学院水文地质环境地质研究所基金项目(SK201408); 国家自然科学基金项目(4140020889)

作者简介: 岳高凡, 研究实习员, 研究方向为水文地质、地热等数值模拟, 电子信箱: gaofan3904@163.com; 王贵玲(通信作者), 研究员, 研究方向为水文地质、地热地质及环境地质, 电子信箱: guilingw@163.com

引用格式: 岳高凡, 邓晓飞, 邢林啸, 等. 共和盆地增强型地热系统开采过程数值模拟[J]. 科技导报, 2014, 33(19): 62-67.

地热资源具有清洁可再生性和空间分布的广泛性,已经成为极具竞争力的能源之一。地热资源按其成因和产出条件分为水热型地热资源和干热岩型地热资源。其中,干热岩(HDR)资源储量巨大且不受地域限制,被称作可能改变未来的新能源^[1,2]。中国地质调查局评价了中国陆区干热岩资源潜力,中国大陆3~10 km深处干热岩资源总量为 2.52×10^{25} J,相当于860万亿吨标准煤,按2%的可开采资源量计算,相当于中国2010年能源消耗总量的5300倍,资源量巨大^[3]。

增强型地热系统(enhanced geothermal systems, EGS)是在干热岩技术基础上提出的,指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^[4]。地热流体的流动过程包含温度场、压力场、力学场和化学场等多场的相互影响作用,并在时空上发生复杂的变化,数值模拟能够全面精确地刻画这种复杂耦合过程,在EGS研究中发挥着巨大的作用。Pashkevich等^[6]研究了Mutnovsky火山EGS系统的热表现,发现井流速、生产区域渗透性、注入/生产井压力差和井布局均对EGS系统的热生产率有影响。Baujard等^[7]研究了EGS裂隙储层的压裂过程和水循环特征,结果表明注入水的密度对压力场分布、裂隙分布和体积有明显影响。Pruess^[8]、Spycher等^[9]和Borgia等^[10]分别研究了超临界CO₂作为载热介质的优缺点。雷宏武等^[11]模拟了松辽盆地EGS开发热-水动力耦合过程,研究了孔隙基质和裂隙介质的渗透率和孔隙度、岩石导热系数、井径、注入压力、注入温度及裂隙周围基质因素对地热能开发的影响。

本研究以青海共和盆地恰卜恰干热岩储层为对象,建立表征EGS系统水热特征的数值模型,研究EGS开发过程中的温度场、压力场时空分布特征,评估EGS工程热提取速率,预测储层寿命,并分析注入流体温度和循环流速两个可控因素对提热过程的影响。

1 研究区概况

共和盆地处于昆仑山脉与秦岭山脉之间,为一个呈NWW向展布的菱形山间盆地。大地构造单元属于秦祁昆断褶系东昆仑、西秦岭造山带接合部位。共和盆地是一个自中生代以来形成的断陷盆地,四周被断裂、褶皱隆起带围限,其内堆积有大厚度的第四纪和新近纪地层,揭露厚度达900~1440 m,侵入岩主要是印支-燕山期,以花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩和斑状花岗岩等为主(图1,修改自文献[12])。资料显示,盆地内的热流值较高,基底花岗岩平均地温梯度大于5℃/100 m,热异常明显^[12-14]。

恰卜恰地热区位于共和盆地东北部共和县,在区域尺度上位于秦祁昆造山带,处在祁连、东昆仑、西秦岭等构造接合部。以往研究成果显示,该区地热能属传导型地热,热源来自地下深处,与壳幔结构中的热异常有关,井测温曲线具有线性特征。

2011—2014年青海省国土资源厅在恰卜恰镇布置了

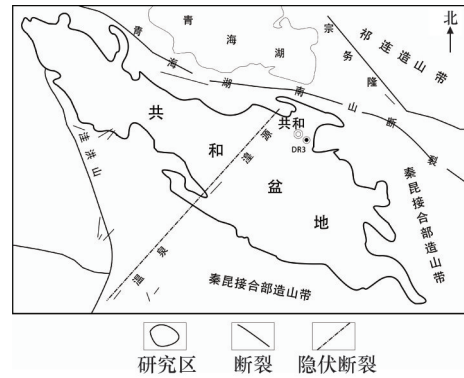


图1 共和盆地地质概况

Fig. 1 Geological profile of Gonghe Basin

DR1、DR2、DR3和DR4个地热钻孔,其中DR3和DR4为深孔,以调查干热岩为主。DR3井在1340 m处揭露到花岗岩基底,厚度达2000 m以上,岩体温度高,增温梯度异常明显,平均为6℃/100 m,最高可达7℃/100 m。在2230 m时,温度达到153℃,达到干热岩的要求,在2800 m处温度达到180℃。目前该钻井工作仍在进行,下一步将进行EGS相关研究工作。

2 模型建立

2.1 模拟工具

数值模拟技术经过几十年的发展,学者们已经开发出很多适用于干热岩的模拟工具,如FRACTURE^[15]、GEOH3D^[16]、TOUGH2^[17]等。TOUGH2系列软件是一款先进的非等温多相组分模拟软件,基于组分质量和能量守恒求解多相流动过程中压力、温度、饱和度和组分质量分数的时空分布,采用的空间离散方法是积分有限差,时间离散是隐式差分,非线性方程求解采用Newton-Raphson迭代^[17]。TOUGH2能够解决一维、二维和三维孔隙、裂隙介质的水热耦合问题,被广泛应用于与地热有关的研究。Xu等^[18]使用TOUGHREACT研究了地热系统运行过程中的矿物沉淀堵塞作用。Zeng等^[19]建立了Desert Peak场地的双水平井数值模型,研究发现电力生产能力与水的注入速率和注入温度有关,热提取效率取决于储层渗透性和水的生产速率。

TOUGH2软件针对不同的问题采用模块化设计,其中EOS1模块能够精确刻画纯水和水蒸汽两相共存系统,最高温度可达647.3 K,其两相饱和线、密度、黏度、热焓等根据国际公式化委员会提供的模型计算。本文使用EOS1模块,详细的数学方程见文献[17]。

2.2 模型概化

深部热储孔隙度和渗透率一般都比较低,需要进行人工压裂形成裂隙网络来达到增加生产能力的目的。人工压裂是一项及其复杂的工程,研究表明目前已经可以在控制下建立1 km³的裂隙网络^[4]。本次研究选取DR3井3 km处花岗岩

为目标储层,并假设已经进行了较为理想的人工压裂,形成了500 m×1000 m×50 m的均匀裂隙网络,并假设裂隙间距小于2 m(图2)。

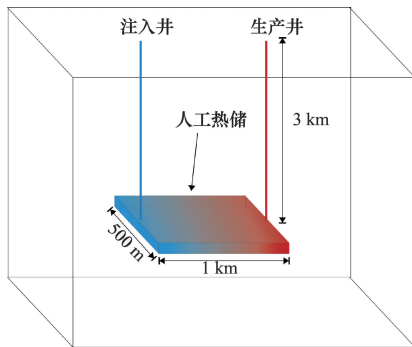


图2 人工热储及布井方式示意

Fig. 2 Schematic of the artificial reservoir and well pattern

裂隙系统分为裂隙和基质两部分,目前主要有等效温度法(equivalent temperature)、基质-裂隙温度(matrix-fracture temperature)法和岩石-流动温度(rock-fluid temperature)方法^[20,21]3种刻画裂隙系统水热运移的方法。当裂隙间距小于2 m时,便可以假设裂隙和基质处于热平衡状态,此时可以用单一孔隙介质刻画裂隙介质。这一方法不仅能够准确描述该情况下裂隙介质的水热状态,并且能大大减少模型计算量,被广为使用^[19]。本次研究将裂隙储层概化为单一均质的孔隙介质,模型大小为500 m×1000 m×50 m,孔隙度根据测井资料定为3%,储层压裂后的渗透率为 $50 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ^[19],并假设模型的物理属性(如裂隙间距等)在模拟过程中保持不变,详细的储层参数如下:长度1000 m,宽度500 m,厚度50 m,热传导系数 $2.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,比热容 $1100 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,密度 $2850 \text{ kg}/\text{m}^3$,孔隙度3%,渗透率 $K_x=K_y=K_z=50 \times 10^{-15} \text{ m}^2$;初始温度 192°C ,初始压力30 MPa,注入速率(Base方案)20 kg/s,注入比焓(Base方案)262.12 kJ/kg,生产指数 $8.18 \times 10^{-12} \text{ m}^3$,生产井压力29 MPa。剖分地段使用 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 矩形网格,共计1250个。

花岗岩在非压裂情况下渗透能力很低,且共和盆地地热资源属于传导型,对流交换作用不明显,与人工储层的体积相比,边界影响可忽略不计^[22],因此本次模拟四周和顶底边界

均设为零流量零热交换边界。目标储层位于地下3 km,根据静水压力分布,初始压力为300 bar($1 \text{ bar}=10^5 \text{ Pa}$);由2800 m处的地温和平均地温梯度推算出3 km处的地温约为 192°C ,作为模型的初始温度。

2.3 模拟方案

本次模拟采用双井模式,即一口注入井和一口生产井(图2),井间距为1 km。井径为0.2 m,采用生产指数模型刻画生产井流量^[17],生产指数 $PI=8.18 \times 10^{-12} \text{ m}^3$ 。

理想的EGS系统生产温度为 180°C ,生产流量为40 kg/s,但是目前绝大部分场地未能达到该目标^[5]。考虑到实际可能的压裂效果,本次模拟采用20 kg/s的循环流量,水进入储层的温度为 60°C (地面至储层存在地层增温作用,使注入水温度上升, 60°C 为注入井井底温度),生产井低于储层压力10 bar(即为290 bar),系统运行时间为30年。在此基础上,对循环流量和注入温度两个可控因素进行参数敏感性分析,详细方案见表1。

表1 模拟方案参数设置

Table 1 Parameters of simulation schemes

方案编号	循环流速/ $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	注入温度/ $^\circ\text{C}$
Base	20	60
V15	15	60
V25	25	60
T50	20	50
T70	20	70

3 结果及分析

3.1 压力场时空变化特征

从储层压力场的时空分布特征(图3)可以看出,随着水不断注入,整个储层的压力呈上升趋势,尤其以注入井附近区域上升最快。10年时注入井附近压力由最初的30 MPa,上升到36 MPa左右,20年时达38 MPa,到30年时已经上升到40 MPa。生产井是恒定的低压区(29 MPa),由此形成了注入井高压区向生产井低压区的压力梯级分布,形成注入井到生产井的循环流动。

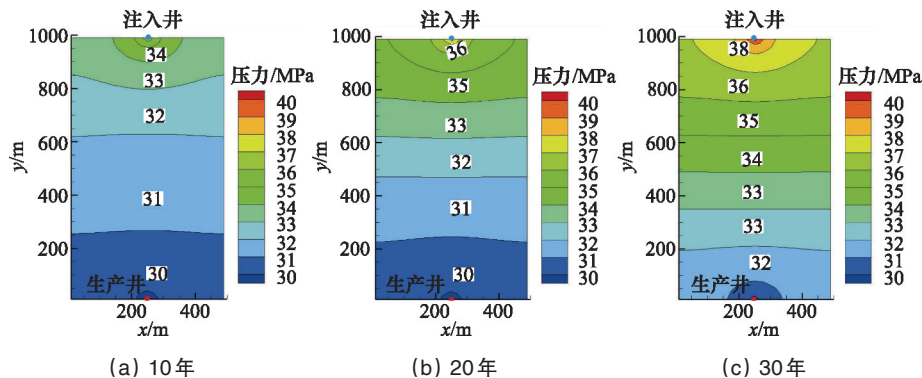


图3 储层压力场时空变化

Fig. 3 Spatial and temporal distribution of pressure

由图3还可以看出,循环初期注入井附近压力梯度大于生产井附近,随时间推移这种差距逐渐缩小,压力分布趋于均匀。这是因为水的流动性^[11](ρ/μ , ρ 和 μ 分别为流体密度和黏度)在这两处不同导致的。在系统循环初期(图3(a)),注

入井附近由于冷水注入温度迅速降低,导致水的流动性大大降低,水流阻抗明显,压力梯度较大,生产井附近未受明显影响;在循环后期(图3(c)),储层热量已经被提取出来,大部分储层温度趋于同一水平(图4),压力分布地趋于均匀。

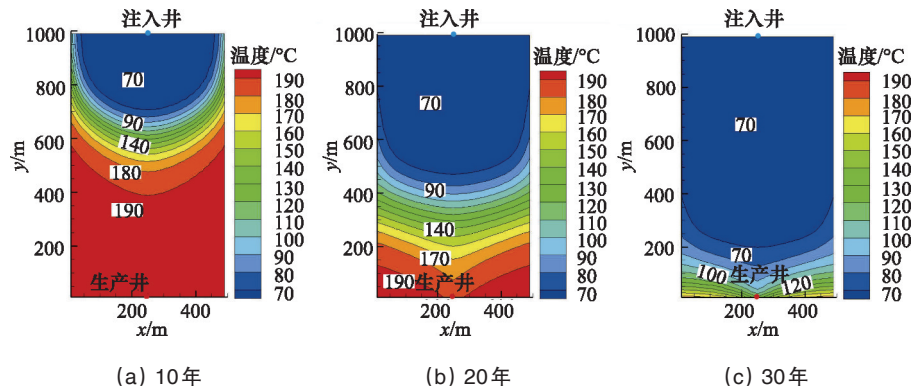


图4 储层温度场时空变化

Fig. 4 Spatial and temporal distribution of temperature

3.2 温度场时空变化特征

图4显示出储层温度场的时空分布特征。冷水(60℃)的注入导致注入井附近温度迅速降低,形成约70℃的低温区,并随时间不断扩大。10年时(图4(a))70℃温度区距离生产井约700 m,20年时距离约450 m,到30年时仅150 m左右,表示储层的热量逐渐被提取出来。图5给出了生产井水温随时间的变化。可见生产井水温18年左右开始降低,表示18年时冷水已经接近生产井,发生热突破。22年时,生产井温度降低为180℃,按照MIT的10℃温降标准,可以确定该系统的稳定运行时间为22年。

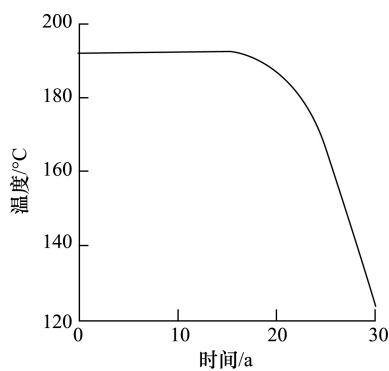


图5 生产井温度变化

Fig. 5 Temperature variation with time at the production well

3.3 热提取速率变化特征

提热效率是评价EGS工程发电能力的关键指标,也是判断储层运行周期的重要参考因素。本次研究提热效率根据提热速率参数评价(Pruess等^[17]):

$$G = F_{pm}h_{pm} - F_{inj}h_{inj} \quad (1)$$

式(1)中, G 表示提热速率, F_{pm} 和 F_{inj} 分别表示生产井和注入井流量, h_{pm} 和 h_{inj} 分别表示生产井和注入井流体的比焓值。

图6给出了系统运行期间生产井流量和提热速率的变化情况。生产流量在很短时间便能达到20 kg/s,与注入流量相同,建立起持续的循环系统,并保持不变。与生产流量变化趋势相同,热提取速率也很快达到最大,约11 MW,并保持稳定到18年左右。此后,便开始下降,22年时约为10 MW,30年时降低到5 MW。主要原因是,从18年开始,生产井流体温度开始降低,在流量不变的情况下,热提取速率相应降低。

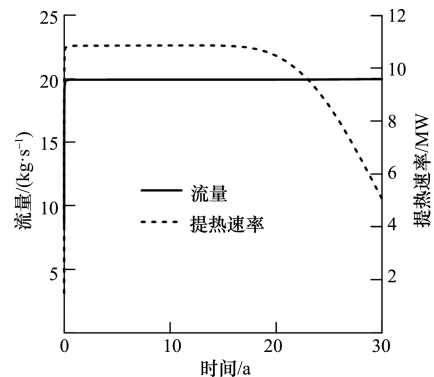


图6 生产井流速与热提取速率变化

Fig. 6 Variation of production velocity and heat extraction rate with time

4 参数敏感性分析

4.1 注入温度

图7给出不同注入温度(50、60、70℃)下的提热速率对比。50℃的注入温度能达到12 MW左右的提热速率,而70℃

下仅为 10 MW 左右。可见在循环流量一定的情况下,注入温度越低,提热速率越大;而且,不同注入温度,对储层寿命没有显著影响。注入温度每提高 10℃,系统最大提热速率增加约 10%。因此,EGS 发电应尽可能降低注入流体温度以获得更大的提热速率和发电量。

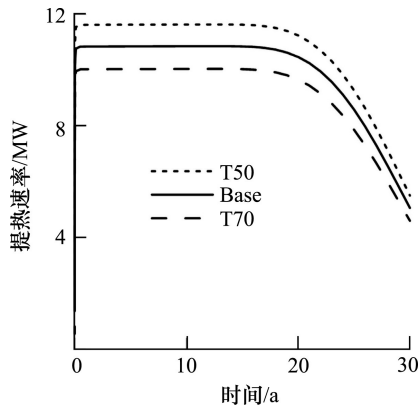


图7 不同注入温度下的提热速率
Fig. 7 Variation of heat extraction rate with time under different injection temperature

4.2 循环流速

图8和图9显示了不同循环流速下热提取速率和总量的差异。25 kg/s的循环流速最大提热速率可达13 MW左右,但是储层寿命明显缩减为18年;15 kg/s循环流速的最大提热速率为8 MW,但在30年内基本未变,储层寿命较长。可见,增加循环流速可以得到更大的热提取速率,但会相应的减少储层寿命。若以Base方案22年为运行周期,15、20和25 kg/s的循环流速,总热提取量分别为 5.1×10^{15} 、 6.8×10^{15} 和 8.3×10^{15} J (图9)。在相同的运行周期内(22年),循环流速越大,热提取总量越大。

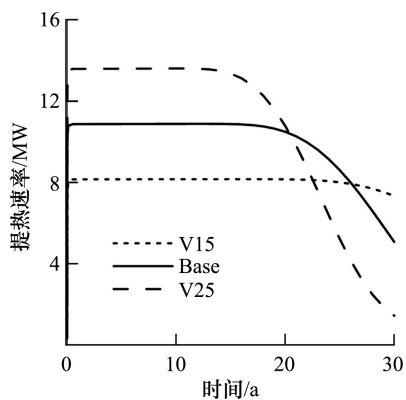


图8 不同循环流速下的提热速率
Fig. 8 Variation of heat extraction rate with time under different circulation velocity

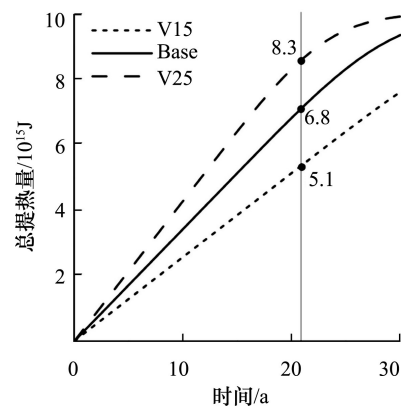


图9 不同循环流速下的总提热量
Fig. 9 Cumulative heat extraction under different circulation velocity

5 结论

1) 共和盆地恰卜恰地区热异常明显,地温梯度高,埋深 3 km 温度可达 190℃,是良好热储层;其岩性为花岗岩,孔隙度和渗透率低,如进行理想的人工压裂,可以形成良好的 EGS 储层。

2) 在定流速(20 kg/s)开采情况下,储层压力均有所升高,且会因为水的流动性差异形成不同的压力梯度带。冷水突破到生产井需要 18 年,储层寿命为 22 年,最大提热速率可达 11 MW。

3) 循环流速一定的情况下,注入流体温度越低,热提取速率越大,注入温度每降低 10℃,系统最大提热速率约增加 10%。注入温度对储层寿命没有明显影响。

4) 注入温度一定的情况下,增加循环流速可以得到更大的热提取速率,但会减少储层寿命。在相同的运行周期内(22年),循环流速越大,热提取总量越大。

本次研究结果是在特定参数条件下获得的,还有很多因素未加考虑,如应力场和化学场的影响、流体流动过程中储层物理性质的改变、井筒流动对热提取的影响等,而且实际的 EGS 工程要更加复杂,因此,还需在今后的研究中进一步深入。

参考文献(References)

- [1] 汪集旻, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 25-31.
Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32):25-31.
- [2] 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 Zhaoafa, et al. Technology progress in an enhanced geothermal system (Hot Dry Rock) [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 42-45.
- [3] 蔺文静, 刘志明, 马峰, 等. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. 地球学

- 报, 2012, 33(5): 807-811.
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Ma Feng, et al. An estimation of HDR resources in China's mainland[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(5): 807-811.
- [4] 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.
- [5] Evans K. Enhanced/Engineered Geothermal System: An introduction with overviews of deep systems built and circulated to date[R]. Beijing: China Geothermal Development Forum, 2010: 395-418.
- [6] Pashkevich R I, Taskin V V. Numerical simulation of exploitation of supercritical Enhanced Geothermal System[R]. California: Proceedings of thirty-fourth workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 2009.
- [7] Baujard C, Bruel D. Numerical study of the impact of fluid density on the pressure distribution and stimulated volume in the Soultz HDR reservoir[J]. Geothermics, 2006, 35: 607-621.
- [8] Pruess K. Enhanced geothermal system (EGS) using CO₂ as working fluid-A novel approach for generating renewable energy with simultaneous sequestration of carbon[J]. Geothermics, 2006, 35: 351-367.
- [9] Spycher N, Pruess K. A phase-partitioning model for CO₂-brine mixtures at elevated temperatures and pressures: Application to CO₂-enhanced geothermal systems[J]. Transport in Porous Media, 2010, 82: 173-196.
- [10] Borgia A, Pruess K, Kneafsey T J, et al. Numerical simulation of salt precipitation in the fractures of a CO₂-enhanced geothermal system[J]. Geothermics, 2012, 44: 13-22.
- [11] 雷宏武, 金光荣, 李佳琦, 等. 松辽盆地增强型地热系统(EGS)地热能开发热-水动力耦合过程[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44(5): 1633-1646.
- Lei Hongwu, Jin Guangrong, Li Jiaqi, et al. Coupled Thermal-Hydrodynamic Process for Geothermal Energy Exploitation in Enhanced Geothermal System at Songliao Basin, China[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2014, 44(5): 1633-1646.
- [12] 严维德, 王焰新, 高学忠, 等. 共和盆地地热能分布特征与聚集机制分析[J]. 西北地质, 2013, 46(4): 223-230.
- Yan Weide, Wang Yanxin, Gao Xuezhong, et al. Distribution and aggregation mechanism of geothermal energy in Gonghe Basin[J]. Northwestern Geology, 2013, 46(4): 223-230.
- [13] 赵振, 陈惠娟, 马建青, 等. 青海省共和盆地恰卜恰地区地热资源评价与开发利用[J]. 青海环境, 2009(2): 81-84.
- Zhao Zhen, Chen Huijuan, Ma Jianqing, et al. Evaluation and utilization of geothermal energy at Qiabuqia in Gonghe Basin, China [J]. Journal of Qinghai Environment, 2009(2): 81-84.
- [14] 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): 119-129.
- Sun Zhixin, Li Baixiang, Wang Zhilin. Exploration of the possibility of hot dry rock occurring in the Qinghai Gonghe Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(2): 119-129.
- [15] Kohl T, Hopkirk R J. "FRACTure": A simulation code for forced fluid flow and transport in fracture, porous rock[J]. Geothermics, 1995, 24(3): 333-343.
- [16] Yamamoto T, Kitano K, Fujimitsu Y, et al. Application of simulation code, GEOTH3D, on the Ogachi HDR site[R]. Stanford University: Proceedings of the 22nd Annual Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 1997.
- [17] Pruess K, Curt O, George M. TOUGH2 user's guide, version 2.0[D]. Berkeley: University of California, 1999.
- [18] Xu T, Pruess K. Numerical simulation of injectivity effects of mineral scaling and clay swelling in a fractured geothermal reservoir[J]. Geothermal Resources Council Transactions, 2004, 28: 269-276.
- [19] Zeng Y C, Su Z, Wu N Y. Numerical simulation of heat production potential from hot dry rock by water circulating through two horizontal wells at Desert Peak geothermal field[J]. Energy, 2013, 56: 92-107.
- [20] Rees D, Bassom A, Siddheshwar P. Local thermal non-equilibrium effects arising from the injection of a hot fluid into a porous medium [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 294: 379-398.
- [21] He L W, Jin Z H. A local thermal nonequilibrium poroelastic theory for fluid saturated porous media[J]. Journal of Thermal Stress, 2010, 33(8): 799-813.
- [22] Zhang Y J, Li Z W, Guo L L, et al. Electricity generation from enhanced geothermal systems by oilfield produced water circulating through reservoir stimulated by staged fracturing technology for horizontal wells: A case study in Xujiaweizi area in Daqing Oilfield, China[J]. Energy, 2014, 78: 788-805.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



中国科学技术协会

第40期中国科技论坛在内蒙古鄂尔多斯市召开

2015年9月9日,由中国科协主办、中国煤炭学会承办,主题为“能源与矿业发展”的第40期中国科技论坛在内蒙古鄂尔多斯市召开。来自大专院校、科研院所等从事矿业研究和应用的735名代表参加会议。中国煤炭学会秘书长、教授级高工刘峰,中国矿业大学(北京)教授、中国工程院院士彭苏萍,中煤科工集团有限公司董事长、研究员王金华,鄂尔多斯市副市长王挺担任学术召集人。中国科学院院士宋振骐、金之钧、何满潮,中国工程院院士蔡美峰、金涌、裴荣富等作学术报告。

经大会广泛讨论,对中国矿产资源精细高效勘探、智慧矿山技术与装备发展、生态矿山与资源节约、矿山资源绿色选冶、大宗矿产开发与保障、战略稀缺资源开发等科技发展方向形成了“鄂尔多斯共识”。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35533/n38575/16656226.html>。