

冯波,许佳男,许天福,等. 化学刺激技术在干热岩储层改造中的应用与最新进展[J]. 地球科学与环境学报, 2019, 41(5): 577-591.
FENG Bo, XU Jia-nan, XU Tian-fu, et al. Application and Recent Progresses of Chemical Stimulation on Hot Dry Rock Reservoir Modification[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2019, 41(5): 577-591.

化学刺激技术在干热岩储层改造中的应用与最新进展

冯波¹, 许佳男¹, 许天福^{1*}, 李胜涛^{1,2}, 宋丹¹, 陈明涛¹

(1. 吉林大学 地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130021;

2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

摘要:干热岩是一种没有水(或含有少量水而不流动)的高温($>180\text{ }^{\circ}\text{C}$)岩体,多为变质岩或花岗岩,岩性致密,很少存在孔隙或裂隙,渗透性极差。增强型地热系统(Enhanced Geothermal System, EGS)是利用水力压裂、化学刺激等措施形成人工地热储层,通过注入载热流体从低渗透性干热岩中经济有效地开采出热能的人工地热开采系统,是开发干热岩型地热资源的有效方法。增强型地热系统成功的关键在于可控性良好的储层改造手段,化学刺激即为储层改造常用的方法之一。通过回顾国内外有关增强型地热系统储层改造中化学刺激技术研究的最新成果,总结了实际应用化学刺激技术的增强型地热系统工程经验。结果表明:增强型地热系统中采用的化学刺激剂多数为酸性化学刺激剂,其中螯合酸具有阻垢性、缓速性、催化性、二次沉淀少、腐蚀性弱等优点,能够实现深穿透、低伤害的储层激发;单一的碱性化学刺激剂(NaOH 和 Na_2CO_3)的室内实验结果较为理想,但是场地应用效果并不令人满意,添加了NTA、EDTA等螯合剂的碱性化学刺激剂可减少次生沉淀的生成,从而取得良好的储层改造效果。最后,针对青海共和盆地正在开展的干热岩开发示范工程项目,提出热刺激和碱性化学刺激联合的储层刺激工艺,该工艺有可能在深部高温岩体中产生改造体积更大的地热储层,提高储层改造的效果。

关键词:干热岩;增强型地热系统;化学刺激;储层改造;酸性;碱性;螯合剂;渗透性

中图分类号:P314;TK521

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2019)05-0577-15

Application and Recent Progresses of Chemical Stimulation on Hot Dry Rock Reservoir Modification

FENG Bo¹, XU Jia-nan¹, XU Tian-fu^{1*}, LI Sheng-tao^{1,2}, SONG Dan¹, CHEN Ming-tao¹

(1. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130021, Jilin, China; 2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071051, Hebei, China)

Abstract: Hot dry rock (HDR) is a kind of high temperature ($>180\text{ }^{\circ}\text{C}$) rock without water (or with little water and cannot flow), and with low porosity and permeability, which is mostly composed of metamorphic rock or granite. Enhanced geothermal system (EGS) is an effective

收稿日期:2019-06-04;修回日期:2019-07-14 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1501802);吉林省教育厅项目(JJKH20170807KJ);

中国地质调查局地质调查项目(DD20190127);中国地质科学院基本科研业务费专项资金项目(YK201611)

作者简介:冯波(1982-),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,工学博士, E-mail: fengbo82@126.com.

* 通讯作者:许天福(1962-),男,辽宁东港人,教授,博士研究生导师,工学博士, E-mail: tianfu_xu@jlu.edu.cn.

method for exploiting HDR geothermal resources. Artificial geothermal reservoir has been created to extract economical amounts of heat from low permeability geothermal resources by hydraulic fracturing or chemical stimulation, which is important for the exploitation of geothermal energy. As a consequence, chemical stimulation, in addition to hydraulic and thermal fracturing, is proposed and employed as an important method for the reservoir modification. The latest researches on chemical stimulation technology in EGS reservoir modification were reviewed, and the EGS engineering experience using chemical stimulation technology of practical application was summarized. The results show that most of the chemical stimulation used in EGS are acid chemical stimulation, especially the chelating acid has the advantages of scale inhibition, slowness, catalytic performance, less secondary precipitation, and weak corrosiveness, which can achieve deep penetration and low damage to reservoir excitation; alkaline chemical stimulation (NaOH and Na_2CO_3) laboratory experimental results are good, but the effect of practical application is not good, and the addition of alkaline stimulants, such as NTA, EDTA and other chelating agents, can reduce the formation of secondary precipitation and obtain good reservoir modification effect. Finally, a reservoir modification process combined with thermal stimulation and alkaline chemical stimulation for HDR development demonstration project being carried out in Gonghe Basin of Qinghai was proposed, this process may produce geothermal reservoir with larger volume and improve the effect of reservoir reconstruction.

Key words: hot dry rock; enhanced geothermal system; chemical stimulation; reservoir modification; acid; alkaline; chelating agent; permeability

0 引言

地热能由于清洁、运行稳定和空间分布广泛,已成为世界各国重点研究开发的新能源。按地热储层富水性 and 孔渗条件,地热资源可分为水热型和干热岩型,目前全球主要利用的为水热型资源,但其仅占地热资源的极小部分^[1]。干热岩(Hot Dry Rock, HDR)一般指赋存于地下 3~10 km、没有水(或含少量水而不流动)、温度在 180 ℃ 以上、具有经济开发价值的高温岩体^[2-3],保守估计地壳中干热岩所蕴含的能量相当于全球所有石油、天然气和煤所蕴藏能量的 30 倍^[4-5]。中国地质调查局最新数据显示,中国大陆干热岩资源总量相当于 860×10^{12} t 标准煤,若能开采出 2%,就相当于 2015 年中国一次性能耗总量的 4 000 倍^[6]。可以预见,随着科学技术进步,干热岩资源开发将对中国节能减排和新一轮能源结构调整做出重大贡献。

增强型地热系统(Enhanced Geothermal System, EGS)是采用人工形成地热储层的方法,从低渗透岩体中经济地采出深层热能的人工地热系统,即从干热岩中开发地热的工程^[7-9]。决定增强型地热系统成功的关键技术是干热岩热储层改造,即通过人工方式扩展低渗透岩体中的原有天然裂隙或生成

新的裂隙,从而形成裂隙网络,增大水与岩体的接触面积,增强生产井/注入井和人工地热储层裂隙网络的水力联系,满足产能需求。目前,国际上常用的热储层激发方法主要包括水力压裂法^[10]、热刺激法^[11]以及化学刺激法^[12]。水力压裂法是通过高压水体压裂岩体从而形成新的人工热储裂隙,广泛应用于大体积的热储层改造^[13];热刺激法是由于岩石组成成分热膨胀系数的差异发生热破裂现象使得干热岩岩体产生裂隙^[14];化学刺激法是以低于地层破裂压力的注入压力向井附近热储层裂隙注入化学刺激剂,依靠其化学溶蚀作用使热储层裂隙通道堵塞物溶解来增加井孔附近和远处地层的渗透性^[15]。由于化学刺激法诱发地震风险性低、穿透性能好等优点,逐渐受到重视。

自 1895 年起,化学刺激技术就被广泛应用于增加石油和天然气井的产量,以及解决地热开发后期生产井附近矿物沉淀引起的堵塞问题,效果非常显著^[11],目前该工艺在石油和天然气领域中已经比较成熟。虽然地热开发系统和油气开采系统的储层改造技术具有一定的相似性^[11],但是二者的储层性质明显不同,主要体现在:①增强型地热系统人工地热储层主要为火成岩,矿物组成以石英、碱性长石、斜长石、角闪石、云母为主,石油天然气储层为沉积岩,

矿物组成以方解石、白云石、黏土矿物为主,二者的矿物组成有很大差别,化学刺激剂与岩体矿物间的化学反应机理也明显不同;②增强型地热系统人工地热储层的地层温度明显高于石油天然气储层,温度的升高会加快化学刺激剂与岩体矿物的反应速率,使得化学刺激剂和岩体矿物反应作用过于迅速,甚至会导致化学刺激剂中的有效组分挥发,因此,在石油天然气储层具有良好穿透距离的化学刺激剂不一定仍然能够在增强型地热系统人工地热储层保持良好的有效距离。

本文详细回顾了国内外关于增强型地热系统化学刺激技术的研究成果,分析并总结了常用化学刺激体系的组成及储层改造效果,总结国内外增强型地热系统示范场地化学刺激技术的经验和教训,为中国正在开展的干热岩储层改造提供参考和借鉴。

1 常用化学刺激剂种类及作用机理

1.1 酸性化学刺激剂

1.1.1 土酸

目前,增强型地热系统储层改造所采用的酸性化学刺激剂主要为土酸,一般是由10%~15%盐酸(HCl)和3%~8%氢氟酸(HF)组成。其酸化机理为:HCl溶解干热岩储层裂隙中的碳酸盐矿物,且维持酸液较低的pH值,而HF则溶解石英、钾长石、钠长石等矿物。HF起主要作用的组分为未电离的HF分子,而不是电离的 F^- 和 HF_2 ,未电离的HF分子与矿物晶格键之间产生化学吸附,同时土酸中的 H^+ 可破坏硅铝酸盐晶格和阳离子(Na^+ 和 K^+)的共价键,导致钾长石、钠长石的溶解^[16],改善致密岩体的渗透率。

由于土酸价格低,可有效溶蚀裂隙表面的石英、钾长石、钠长石等多数矿物,被广泛应用于增强型地热系统场地,如法国Soultz、瑞典Fjallbacka等^[17],但无法对深部热储层进行有效穿透^[11],而且HF和岩体矿物发生酸岩反应产生非晶态 SiO_2 、次生沉淀(碱性长石)等不溶物,堵塞裂隙通道。此外,土酸具有较强腐蚀性,会腐蚀设备^[18]。

针对主要矿物组成为石英、长石等的花岗岩体,庄亚芹等采用土酸(10% HCl+3% HF)对其进行化学刺激,认为土酸刺激后花岗岩表面形成了溶蚀裂隙,石英和长石均发生了不同程度的溶蚀^[19];其中长石溶蚀程度强于石英,并伴随正方体状、片状和球状蚀变矿物的生成,根据X射线衍射和能谱分析显示,不同形状的蚀变矿物分别为氟氯酸钾

(K_3AlF_6)、氟硅酸钾(K_2SiF_6)和无定形态 SiO_2 ^[18]。但是岩体溶蚀的正面影响远远大于次生沉淀的负面影响,岩体渗透率有了明显提高:150℃条件下,反应时长为12h的花岗岩样品渗透率提高到初始渗透率的11.8倍,且岩体渗透率的提高倍数随着温度的升高和时间的延长而增大^[20]。由于热储层温度过高,土酸和岩体反应速率过快,土酸只能在注入井附近和岩体发生反应,无法深入热储层内部^[11],不利于建立良好的裂隙网络。

余东合等研究表明,向传统土酸中添加有机酸乙酸作为缓速剂,可达到增大酸液有效作用距离的目的,从而进行深部酸化^[21]。此外,其他有机酸(如谷氨酸等)也可作为添加剂与土酸复合作用。基于有机酸的弱电离性,可在地层深部缓慢释放出 H^+ ,与氟化物产生的 F^- 结合生成一定量的HF,从而可以避免过度溶蚀,保持骨架结构的完整及强度,而HCl和HF溶蚀近井地带的碳酸盐和硅酸盐矿物,达到深度穿透的目的,有效地恢复和提高地层的渗透率。

那金等研究表明,酸岩反应可能会破坏岩石骨架,导致破碎或溶蚀的岩石颗粒脱落运移,堵塞裂隙通道,降低岩体渗透率,加入颗粒稳定剂可减缓岩石颗粒脱落的程度^[18]。相比于单纯的土酸,加入颗粒稳定剂的土酸在较低含量(10% HCl+0.5% HF)条件下,即可达到预期的激发效果。这不仅显著提高了岩体的渗透率,使得岩体渗透率增加了6.7倍,低含量的土酸还降低了对井筒设备的腐蚀程度^[18]。

1.1.2 螯合酸

螯合酸化学刺激剂是在土酸的基础上添加螯合剂,其酸液体系主要由HCl、含氟盐、螯合剂组成。其中含氟盐能缓慢释放 F^- , F^- 与酸液中的 H^+ 结合生成HF,从而减缓酸岩反应速率。由于螯合剂对 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 等金属离子具有较强的螯合能力,可以与其结合形成水溶性螯合物,从而阻止了金属离子形成二次沉淀或者次生矿物堵塞储层,对储层造成新的损害^[22];另外,传统土酸对钢材设备腐蚀严重,容易导致井筒整体性失效,而螯合酸对设备的腐蚀较小,有利于保护施工安全和维持长期作业,从而增大热储层产量。由于螯合酸具有一定的催化性能,可使HF溶解石英的速率加快,这使得螯合酸可以更好地改善储层渗透率,达到预想的酸化结果。

刘平礼等针对砂岩储层研制了新型有机螯合酸体系,通过室内实验对这种新型螯合酸的各种性能进行了分析研究,研究表明该螯合酸体系与常规酸液配伍性良好,腐蚀性较低,缓速性较好,岩芯酸化

流动后渗透率提高幅度大;通过扫描电镜观察酸化前和酸化后岩芯端面,结果表明该螯合酸体系具有稳定黏土、溶蚀孔洞的能力,渗透率可大幅提高^[23]。

螯合酸具有阻垢性、缓速性、催化性、二次沉淀少、腐蚀性弱等优点,使得其对热储层的渗透率改善程度较高,能够实现深穿透、低伤害的储层激发^[24]。前人在华北油田开展了一系列螯合酸储层改造应用,结果表明:储层酸化效果较好,酸化后的岩芯渗透率比酸化前增加了两倍^[25]。基于油气领域的成功,螯合酸正在逐步应用于增强型地热系统场地。需要特别指出的是,螯合剂的选择应因地制宜,不同的储层条件需要的螯合剂也不同,相比于土酸而言,不适合普遍推广。而且螯合剂多为有机化合物,无公害处理工艺流程较为复杂,处理不当会污染地下水层,破坏当地水生态环境,对环境效应具有负面影响。

1.1.3 CO₂

CO₂ 化学刺激剂,即 CO₂ 溶于水形成碳酸,碳酸是一种弱酸,对原生的碳酸盐矿物(如方解石)具有良好的溶蚀能力,也可溶蚀长石、石英等矿物^[26]。

侯兆云等开展的花岗岩 CO₂ 化学刺激实验中,石英、钾长石、钠长石和方解石均出现了溶蚀现象,尤其是方解石^[27]。储层孔隙度的增加几乎全部源于原生裂隙通道中方解石的溶解,且并未出现次生碳酸盐矿物的沉淀。在 CO₂ 化学刺激剂注入 20 d 时,渗透率高于初始渗透率 39.2%,有效穿透距离可达到 110 m,其对裂隙孔隙度和渗透率的刺激效果随着温度的增加而减弱,随着压力的增加而增强^[28],但是对钠长石、钾长石等硅铝酸盐矿物的溶蚀能力较弱,并且有微量次生沉淀的生成,如石英、高岭石、伊利石和含碳新矿物^[27]。

相较于传统的酸性化学刺激剂,CO₂ 化学刺激剂在有效溶解原生裂隙中方解石等碳酸盐矿物的同时,不会产生次生的碳酸盐沉淀。由于碳酸属于弱酸,酸性远远小于土酸和螯合酸,所以它与储层矿物的反应较为缓慢,注入热储层后不会被注入井附近的矿物消耗殆尽,可在地层中保持较长的穿透距离,从而对碳酸盐岩储层的人工裂隙通道进行深部穿透,具有良好的刺激效果^[29]。但 CO₂ 密度较低,比热容较小,物理化学性质易受温度影响,随着地层温度的增加,CO₂ 的溶蚀能力降低,并且 CO₂ 化学刺激剂对硅酸盐、硅铝酸盐等矿物的溶蚀性较弱,也会生成石英和次生伊利石沉淀,因此,在实际工程应用中较少^[30]。

1.1.4 转向酸

在对干热岩储层进行酸化改造时,由于渗透率高的储层阻力小,在相同的压力条件下,酸液首先并主要进入高渗透储层,而对于低渗透储层,酸液则很难进入^[31]。转向酸是在酸性系统中(土酸、螯合酸等)添加转向剂,利用化学固体暂堵剂或高黏流体对相对高渗透率的储层进行暂堵转向分流,阻止酸液进入高渗透储层,迫使其进入低渗透储层,从而在储层中形成良好的裂隙网络,达到均匀酸化、改造储层的目的^[32-33]。

目前常用的化学转向方法包括:颗粒转向、泡沫转向、交联聚合物转向和黏弹性表面活性剂自转向^[34]。1936年,Harrison 首先提出了颗粒转向剂,HCl 酸化中的皂类溶液与 CaCl₂ 反应生成皂酸钙^[35];20世纪60年代,HF 被大量使用,使得石蜡、聚合物、烃类树脂、岩盐等固相颗粒开始被作为储层酸化转向剂;而20世纪80年代,油溶性树脂则成为广泛应用的油井酸化转向剂。这些固相颗粒转向剂在酸化过程中可以暂堵高渗透储层,使酸液转向低渗透储层进行储层改造^[33]。

20世纪90年代,泡沫转向技术在油气井开采领域得到了较为系统的研究与应用,并取得了较好的应用效果^[36]。酸液中加入表面活性剂作为起泡剂或者直接通入惰性气体使酸液产生气泡,气泡优先进入含水率相对较高的储层,形成稳定的乳状液,造成压差^[37]。而渗透率较低的油层可溶解气泡,酸液即可进入低渗透油层进行储层酸化,从而实现酸液转向^[38]。泡沫转向技术的优点是处理液返排较为彻底,对储层的伤害较小;缺点是泡沫转向酸化工艺复杂,在深井中应用受到限制且稳定性难以控制,很难实现储层深部的转向酸化^[39-40]。

交联聚合物转向酸液是一种由 pH 值控制的自转向酸,由酸液、交联剂、破胶剂、聚合物以及其他的一些酸液添加剂组成。酸液进入地层后,聚合物随着酸液优先进入高渗透储层,随着酸液的消耗,自转向酸液的 pH 值不断升高,聚合物便自行交联,使得该体系黏度增加,进而对高渗透储层进行封堵迫使酸液转向低渗透储层^[41]。交联聚合物转向技术可以使酸液有效地进行转向,但是这种转向技术对地层损害较大,彻底的破胶、返排也存在困难^[42-43]。

黏弹性表面活性剂自转向技术^[44]即在酸液中加入一定量的黏弹性表面活性剂(Viscoelastic Surfactant, VES),使其作为自转向剂进行储层改造。该酸液注入地层后优先进入高渗透储层,随着酸液

与岩石的反应,黏弹性表面活性剂的胶体结构发生变化,从而使该体系黏度剧增,酸液在高渗透储层的阻力增大,迫使后续的酸液进入低渗透储层,实现自转向^[45]。变黏后的酸液遇到烃类物质后会自动破胶,该体系黏度又会降低到初始状态,返排比较容易^[46]。1997年,Schlumberger公司率先合成了一种黏弹性表面活性剂,并将它运用于水力压裂液中;2002年,Schlumberger公司将黏弹性表面活性剂应用于酸液中,研制出清洁自转向变黏酸,由于其优越的转向性、控滤失性和对储层的无伤害性而成为酸化或酸压领域的研究热点之一^[47]。随后,Halliburton等国外著名公司组织科研力量相继自主开发出黏弹性表面活性剂转向酸。黏弹性表面活性剂转向破胶彻底有利于返排,且体系中不含聚合物,降低了对储层的伤害^[48]。基于这些优点,黏弹性表面活性剂自转向技术正越来越多地应用于现场作业。

综上所述,目前转向酸化学刺激剂在油气开采领域应用广泛,且储层酸化效果良好,油气领域的转向酸技术给干热岩储层改造带来了很大的启发。但转向酸化学刺激技术在增强型地热系统领域还处于研究阶段,实际场地应用较少,并且转向酸化学刺激技术工艺较为复杂,酸液体系中的转向剂组分对储层具有一定的伤害,储层改造后的转向酸液如何高效返排也是一道尚未攻克的难关。

1.2 碱性化学刺激剂

1.2.1 NaOH 和 Na₂CO₃

针对干热岩储层天然矿物主要为石英、硅铝酸盐矿物的岩体,一些碱性化学刺激剂具有很好的溶蚀效果。常用的碱性化学刺激剂通常是10% NaOH 或 Na₂CO₃ 溶剂,属强碱性化学刺激剂。相关成果表明,NaOH 和 Na₂CO₃ 碱性化学刺激剂对石英和方解石的溶蚀作用强烈,且溶蚀能力随着地层温度的增加而增强^[49]。相较于酸性化学刺激剂,它和岩体矿物的反应速率较慢,可保持较大的穿透距离。

但是 NaOH 碱性化学刺激剂与岩石样品反应后的部分溶解组分会生成非定形态 SiO₂ 或非定形态铝硅酸盐蚀变矿物,例如 Na 与 Si、Al 结合形成钠长石,这些次生矿物附着在岩石表面,堵塞部分新生裂隙,使岩体渗透率相对降低,影响储层改造效果。储层岩体裂隙中的原生矿物(方解石、角闪石等)溶蚀后释放出 Ca²⁺、Mg²⁺ 等金属离子,会与 Na₂CO₃ 反应产生 CaCO₃、MgCO₃ 沉淀附着在裂隙通道上,不仅会堵塞裂隙通道,还会阻止储层深部的岩体与碱液接触,妨碍碱液的进一步溶蚀。此外,Na₂CO₃

会和石英反应生成硅酸盐,硅酸盐与长石类矿物溶解所产生的金属离子结合,会形成高岭石、钠长石等次生矿物沉淀^[50]。因此,Na₂CO₃ 相比于 NaOH 生成的沉淀种类更多,也更容易生成沉淀。

NaOH 和 Na₂CO₃ 碱性化学刺激剂相对于酸性化学刺激剂而言,溶蚀速率较慢,穿透性好,溶蚀石英、长石、方解石的能力更强,但是也更容易生成次生沉淀。单一的碱性化学刺激剂处理后的岩芯渗透率不仅没有增加,反而降低,表明次生沉淀的负面影响大于矿物溶蚀的正面影响^[51],单一的碱性化学刺激剂无法满足干热岩热储层改造的要求。近年来,国内外应用 NaOH 和 Na₂CO₃ 等单一的化学刺激剂的增强型地热系统场地也越来越少,往往添加螯合剂来减少次生沉淀的生成,提高储层改造效果。

1.2.2 螯合碱

为解决单一的碱性化学刺激剂易生成次生沉淀这一问题,前人提出了螯合碱化学刺激剂^[52-53],即在原有的碱性化学刺激剂(NaOH 或 Na₂CO₃)中添加螯合剂,通过螯合剂和原生矿物溶蚀释放出的金属离子螯合生成稳定的水溶性螯合物,来阻断金属离子参与次生沉淀的生成过程,从而减少次生沉淀的生成。目前使用的螯合剂主要有氨基三乙酸(NTA)和乙二胺四乙酸(EDTA)两种。

Rose 等提出使用 NaOH 和 NTA 组成碱性化学刺激剂^[52]。NaOH 用于溶蚀裂隙通道中的硅酸盐和硅铝酸盐矿物,高 pH 值的 NTA 用于溶解方解石、SiO₂ 和长石等矿物,并和金属离子形成溶于水的螯合物,避免次生沉淀(如方解石)的生成^[54]。与酸性化学刺激剂相比,螯合碱化学刺激剂与岩层矿物的反应速率较慢,在地层中的穿透距离较长,刺激效果更好,并且对金属套管的腐蚀性较弱。另外一种常被用于储层改造的螯合剂为 EDTA^[53],Exler 等用 EDTA 作为化学刺激剂,研究了螯合碱化学刺激剂对于岩中方解石溶解的适用性,结果表明 EDTA 是非常有效的矿物溶解剂,并且溶解能力随着温度增高而增大^[55]。螯合碱化学刺激剂在有效溶蚀原生矿物的同时,可以减少次生矿物的生成,且溶蚀速率缓慢,有利于在干热岩深部形成复杂裂隙网络,逐渐应用于增强型地热系统实际场地。

1.2.3 NH₃

除了 NaOH 和 Na₂CO₃ 这两种常见的强碱性化学刺激剂以外,弱碱性 NH₃ 溶液也可溶解岩石中的石英。王玺研究认为,由于石英中的主要成分为 SiO₂,属酸性氧化物,NH₃ 溶于水形成 NH₃ 溶液,

NH_3 溶液呈现弱碱性,可溶蚀石英,且石英溶解度随着 NH_3 含量的增加而呈指数增长^[56]。随着石英溶解量的增加, NH_3 化学刺激剂的 pH 值逐渐降低, NH_3 化学刺激剂中的 SiO_2 含量逐渐达到饱和,从而聚集成胶体。由于其弱碱性, NH_3 化学刺激剂对石英的溶蚀速率非常慢,能够深部穿透,但是对长石、碳酸盐等矿物的溶蚀效果不明显。此外,由于干热岩储层温度较高, NH_3 含量受温度影响较大,高温条件下极易挥发,造成碱性溶液中 NH_3 含量大大降低,不利于化学刺激的进行^[56],所以在干热岩储层改造过程中应用极少。

2 国外增强型地热系统场地化学刺激技术应用与最新进展

增强型地热系统在国际上已有 40 多年的研究历史。1974 年,美国于 Fenton Hill 建立了首个增强型地热系统工程示范基地,采用了碱性化学刺激剂(Na_2CO_3 、 NaOH)进行储层改造,未取得良好的刺激效果;1986 年,瑞典 Fjallbacka 增强型地热系统工程采用土酸进行储层改造,生产流速增加了 51%,这是最早应用土酸化学刺激剂的增强型地热系统场地;1987 年,法国在 Soultz 开展了增强型地热系统研究,土酸化学刺激剂有效提高了储层的渗透性,增强了井筒之间的水力连通,并在 2009 年建成了装机容量 1.5 MWe 的 ORC 二元电站,首次实现了增强型地热系统的商业发电;2011 年,借鉴 Soultz 项目的成功经验,法国 Rittershoffen 地区启动了以花岗岩基地断层区为目标层位的增强型地热系统项目,其采用有机酸进行储层刺激,效果显著,并于 2016 年建成首个用于工业供热的增强型地热系统工程;2015 年,美国提出地热能前沿瞭望台计划(FORGE 计划),优选犹他州 Milford 为增强型地热系统场地,预计于 2023 年完成储层改造(包括水力压裂、化学刺激等)和流动测试等工作。总结分析国外增强型地热系统场地化学刺激技术的应用与最新进展,可为中国干热岩储层改造提供宝贵的经验,本文选取典型的增强型地热系统场地工程进行详细总结分析。

2.1 美国 Fenton Hill 增强型地热系统工程

美国 Fenton Hill 增强型地热系统工程位于新墨西哥州中北部,是世界上第一个增强型地热系统示范案例。1974 年,美国 Los Alamos 国家实验室在 Fenton Hill 钻了第一眼深井,钻深达 4 500 m,岩体温度为 330 $^{\circ}\text{C}$,热储层岩性主要为前寒武纪变质

岩,原生裂隙中多为石英^[57]。

Sarda 分别用 Na_2CO_3 、 NaOH 碱性化学刺激剂,在实验室温度 100 $^{\circ}\text{C}$ 、压力 100 bar 条件下,对 Fenton Hill 岩芯样品进行化学刺激处理,探讨这些化学刺激剂对结晶基岩渗透率的影响^[58]。结果显示:渗透率的增加主要由于 Na_2CO_3 和 NaOH 碱性化学刺激剂溶解裂隙中的石英,并且溶解量随着 Na_2CO_3 和 NaOH 碱性化学刺激剂的含量及刺激时间增加而增大。鉴于实验室的研究结果,1976 年 11 月,研究人员将 190 m^3 的 Na_2CO_3 碱性化学刺激剂注入到 Fenton Hill 地热储层中,大约有 1 000 kg 的石英被溶解,然而产能效率并没有明显得到提高^[58]。分析主要原因是室内实验采用的样品矿物组成较为均匀,而实际地层中岩性矿物组成较为复杂,而且呈现出非均质特征,碱性化学刺激剂与岩石样品反应后的部分溶解组分生成非定形态 SiO_2 或非定形态铝硅酸盐蚀变矿物,这些次生矿物附着在岩石表面,堵塞部分新生裂隙,使岩体渗透率相对降低,影响储层改造效果。

Fenton Hill 增强型地热系统工程表明,由于实际地层条件的复杂性,实验结果和实际应用存在较大的出入,单一的碱性化学刺激剂无法满足实际场地增强型地热系统热储层改造的要求^[51]。

2.2 美国 Coso 增强型地热系统工程

美国 Coso 地热田是一个大型高温系统,位于加利福尼亚州东部,岩性为浅层热源上方的裂缝型花岗岩^[59],是最早应用 $\text{HCl}+\text{NTA}$ 混合化学刺激剂的项目基地^[60]。通过 3 次注射将 10% NTA 溶液注入 32A-20 井中,注入螯合碱化学刺激剂的总体积为 57 m^3 ,注射速率为 13.5~16.0 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ 。注入 NTA 后,将井关闭约 4 h,使螯合剂和方解石充分反应。开井后,流体由透明转变成乳白色,且 NTA 含量(质量分数,下同)从 $34\,000\times 10^{-6}$ 下降至 $2\,000\times 10^{-6}$,表明存在 Ca-NTA 络合物的生成^[61]。Coso 地热田 30 口井均采用了该方法进行刺激改造,24 口井取得了成功,总产量增加了 53 MW,产能效率提高了 66%^[62]。

Coso 增强型地热系统工程表明,螯合剂的使用对次生沉淀的抑制具有重要意义,NTA 可以螯合 Ca^{2+} ,有助于阻止方解石的二次沉淀,从而促进井筒中方解石的溶解,达到增加储层岩体渗透率的目的,提高产流速率。针对不同的岩性,选择不同的化学刺激剂和螯合剂,可有效改善热储层深部的裂隙网络,提高产能。

2.3 法国 Soultz 增强型地热系统工程

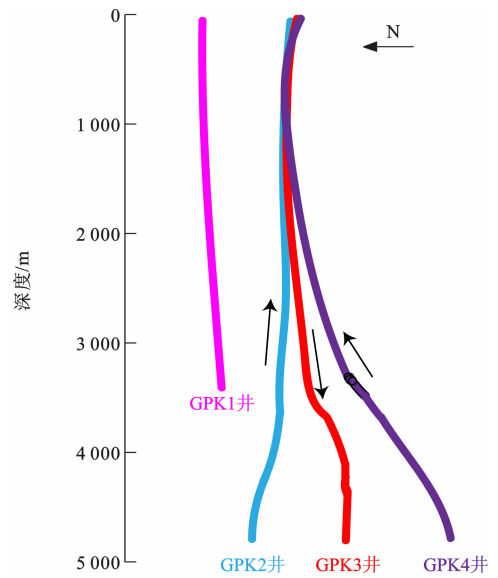
法国 Soultz 地热田是欧洲目前仍在运行的增强型地热系统试验场,位于上莱茵河谷 Soultz-sous-Forêts 和 Kutzenhausen 之间,靠近上莱茵河地堑西缘。该地区内部充填海相和湖相的灰岩、泥灰岩和蒸发岩沉积物,不整合界面之上还覆盖有侏罗纪灰岩和日耳曼三叠纪地层。这些新生代和中生代的沉积物之下是由斑状二长花岗岩和二云母花岗岩组成的古生代基底^[63],其储层裂隙中主要充填有 CaCO_3 和其他可溶矿物。

1987~2005 年间,该地区共钻探 4 口深井,分别为 GPK1(深度为 3 600 m)、GPK2(5 000 m)、GPK3(5 100 m)和 GPK4(5 260 m)(图 1)。GPK2、GPK3、GPK4 井间距为 700 m,5 km 深度处的温度达到 200 ℃。Soultz 增强型地热系统工程利用“两采一注”的开发模式,即从生产井 GPK2、GPK4 中抽出地热水,与地表低温淡水混合后一起被重新注入 GPK3 井,获取地热能。为了提高产能效率,该场地采用了 HCl、土酸(12% HCl + 3% HF)、NTA、有机黏土酸(Organic Clay Acid, OCA)等 4 种化学刺激剂来增强地热井及近井周围渗透率。2003 年 2 月, GPK2 井注入 0.09% 和 0.18% 的 HCl 进行化学刺激,其生产能力提高了 $0.5 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$;同年 6 月, GPK3 井注入了 0.45% HCl,注入能力达到了 $0.35 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ 。2005 年 2 月, GPK4 井注入了 0.2% HCl,生产能力为 $0.2 \sim 0.3 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ 。2006 年 5 月, GPK4 井经过 15% HCl 预冲洗后,注入了土酸(12% HCl + 3% HF),化学刺激注入率增大 35%,效果显著;同年 10 月,该井注入了 19% NTA,虽然井口附近有结垢现象,但是生产能力仍提高了 $0.3 \sim 0.4 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ 。2007 年 2 月和 3 月,分别向 GPK3、GPK4 井注入了有机黏土酸,刺激效果不明显, GPK3 井注入能力仅仅提高了 $0.05 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$, GPK4 井生产能力仅提高了 $0.1 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ ^[64-66]。

Soultz 增强型地热系统工程表明,化学刺激法可有效地进行储层改造,土酸、NTA 可以改善 GPK3 井与 GPK4 井之间的水力连通性,具有较好的储层改造效果。但单一的 NTA 溶液溶蚀能力较弱,不能充分溶蚀裂隙中的堵塞矿物,井口附近反而产生了沉淀,不利于储层的改造,将其作为一种螯合剂和强酸混合使用更为适合。

2.4 法国 Rittershoffen 增强型地热系统工程

Rittershoffen 增强型地热系统工程位于法国东



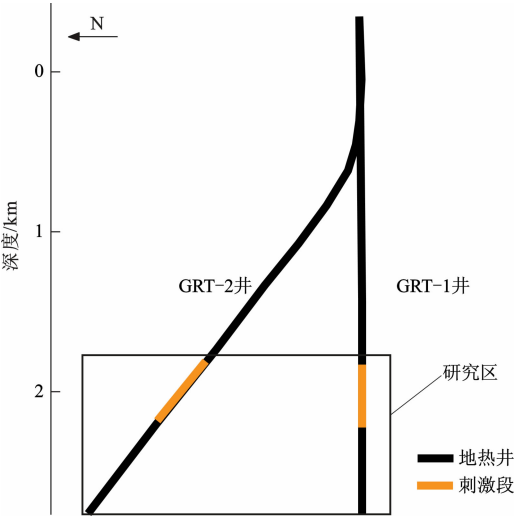
图件引自文献[13]

图 1 Soultz 地热站点井南北向垂直视图

Fig. 1 SN-direction Vertical Schematic View of Wells at the Soultz Geothermal Site

北部阿尔萨斯(Alsace),地处上莱茵河地堑,距离 Soultz 增强型地热系统场地仅 6 km^[67]。该地区地热井裸孔段的岩性主要为石炭系砂岩和三叠系花岗岩,天然裂隙发育^[68-70]。

2012 年, Rittershoffen 增强型地热系统场地完成了 GRT-1 井钻探,深度为 2 580 m(图 2)。2013 年 4 月,向 GRT-1 井注入低温冷流体进行热刺激,总流体体积为 4 230 m³, GRT-1 井注入能力从初始的 $0.6 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ 增加到 $1.3 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$,流速为 $20 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$,但在注入过程中引发了 113 次微震^[71];同年 6 月,运用谷氨酸(有机酸)与土酸由深到浅对该井 3 个不同深度(2 370~2 530、2 300~2 335 和 1 922~2 070 m)的区域进行了化学刺激,在化学刺激过程中并没有监测到地震活动;同年 7 月,对该井进行了水力压裂,最大流速高达 $80 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$,期间诱发了 37 次微地震。对 GRT-1 井在砂岩沉积层底部与花岗岩基底顶部的交界处分别进行热刺激、化学刺激和水力压裂后, GRT-1 井注入能力为 $2.5 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$,注入指数增加了 5 倍, Matthes 等认为 GRT-1 井注入能力的升高主要得益于化学刺激阶段^[72]。2014 年, GRT-1 注入井与 GRT-2 生产井(钻探深度为 3 196 m)形成了产流温度为 168 ℃、产流量为 $70 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ 的地热开采对井(图 2)。2016 年,该项目实现全面运行,为距场地 15 km 处的淀粉制造厂提供 24 MWth 的工业热能,成为首个用于工业供热的增强型地热系统工程^[73]。



图件引自文献[74]

图 2 Rittersshoffen 地热站点井示意图
Fig. 2 Schematic View of Wells at the Rittersshoffen Geothermal Site

Rittersshoffen 增强型地热系统工程表明,化学刺激技术不仅可增强热储层的连通性,提高产能效率,而且可有效避免微地震的诱发。

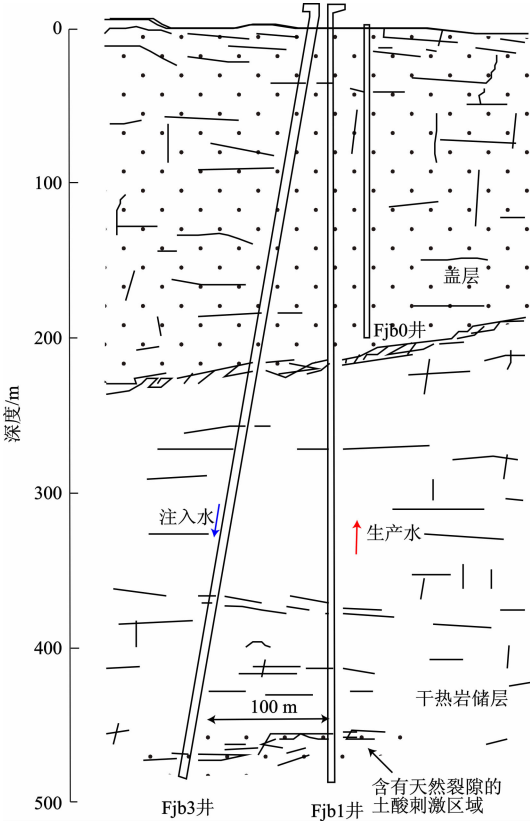
2.5 瑞典 Fjallbacka 增强型地热系统工程

Fjallbacka 增强型地热系统工程位于瑞典西海岸,该地区基底为前寒武纪结晶基岩。Fjallbacka 增强型地热系统场地岩性主要为黑云母二长花岗岩,区内裂缝发育,甚至有轻微的裂缝带,裂缝中填充有方解石、绿泥石和黏土矿物^[75]。该增强型地热系统场地共有两口地热井,分别为 Fjb1 和 Fjb3(图 3)。1986 年,在 Fjb1 井中进行了水力压裂,以 20~30 L·s⁻¹ 的流速注入了黏性凝胶和 400 m³ 水^[76]。1988 年,对 Fjb3 井进行了酸化处理,在 Fjb3 井中注入 2 m³ 土酸以溶解储层岩体裂缝中的堵塞矿物,随后在 Fjb3 井和 Fjb1 井之间以 1.8 L·s⁻¹ 的注入流速开展了时长 40 d 的水力循环测试,当注入水体积达到 5 500 m³ 时,生产流速增加了 51%,达到了 0.9 L·s⁻¹^[77]。这是由于原生裂隙中的方解石发生了溶解,储层岩体渗透率增高,从而增加了生产流速。

Fjallbacka 增强型地热系统工程是最早应用土酸化学刺激剂的实际场地,表明土酸可以作为一种有效的化学刺激剂,增加地热井生产流速,提高地热产能。

3 中国典型干热岩化学刺激技术

目前,中国尚未在实际增强型地热系统场地应用化学刺激技术,相关研究仅停留在典型干热岩的化学刺激机理与实验室分析上。近些年,相关学者



Fjb3 注入井压力最大为 5 MPa;图件引自文献[75]

图 3 Fjallbacka 地热站点井示意图
Fig. 3 Schematic View of Wells at the Fjallbacka Geothermal Site

针对中国具有开发潜力的增强型地热系统场地(松辽盆地、共和盆地)开展了大量研究。

3.1 松辽盆地

松辽盆地位于中国东北地区辽河平原的北段和松嫩平原的南段,总面积约为 26.2×10⁴ km²^[78]。松辽盆地广泛分布着中—新生代的火山岩、火山碎屑岩和沉积岩,基底主要由加里东期、海西期褶皱变质岩系及同期的火山岩组成,是中国陆上石油资源最丰富的大型含油气沉积盆地^[79]。现今松辽盆地北部的平均地温梯度是每百米 4℃,地温超过 150℃的地区总面积为 1 680 km²,多期构造活动使得盆地内形成了有利于地热资源赋存的生储盖组合,同时深层和浅层断裂构造的发育有利于深部地热资源向上传导,具有良好的地热资源形成背景^[80-81]。松辽盆地干热岩潜在开发靶区位于徐家围子断陷(图 4),岩性主要为凝灰岩,主要矿物为石英和长石。

那金等以松辽盆地凝灰岩型干热岩为研究对象,开展了一系列酸性化学刺激剂(15% HCl、7% HCl+1% HF、7.0% HCl+0.5% HF、2% NTA+NaOH)和岩样的反应实验^[51]。结果表明:单一

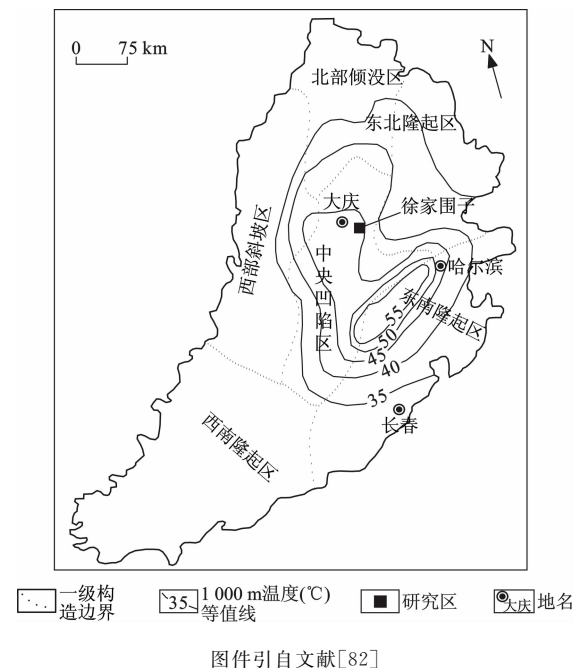


图 4 松辽盆地干热岩潜在开发靶区地理位置
Fig. 4 Location of Potential Exploitation Target
Zone of Hot Dry Rock in Songliao Basin

15% HCl 对岩芯的溶蚀效果不明显;7% HCl+1% HF 溶蚀速率过快,破坏了岩芯骨架;7.0% HCl+0.5% HF 溶蚀效果良好,刺激后溶蚀率增加到初始渗透率的 2.3 倍,但腐蚀性太强;2% NTA+NaOH 刺激效果不明显^[51]。鉴于上述化学刺激剂均不能实现深部穿透、温和刺激的目的,那金等研发了适用于凝灰岩型干热岩的一种新型有机化学刺激剂,该配方由氟硼酸、有机磷酸、缓速剂构成,室内实验结果和传统化学刺激剂土酸相比表明,该配方具有良好的缓速性、缓蚀性和阻垢性,反应后岩芯的渗透率提高5.78倍,并且刺激效果随着注入速率的增加明显增强^[51],为未来松辽盆地干热岩地热资源的开发提供了一定的科学依据和理论基础。

3.2 共和盆地

共和盆地是青海省以共和县为中心的盆地,处于昆仑山脉与秦岭山脉之间,是一个于新近纪初形成的断陷盆地^[83]。共和盆地总面积为 1.38×10^4 km²,侵入岩岩性以花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩和斑状花岗岩为主,盆地热流值高,平均地温梯度大于每百米 5 °C,大地热流值异常明显^[84]。目前,青海共和盆地已经成功施工了 5 眼干热岩勘探孔,孔深为 3 000~3 705 m,井底温度为 180 °C~236 °C(图 5)。其中 GR1 勘探孔孔深为 3 705 m,孔底温度达到 236 °C^[85],这是中国迄今钻获的温度最高的干热岩,实现了中国干热岩勘查的重大突破。共

和盆地潜在干热岩开发靶区位于恰卜恰河谷地区,岩性主要为花岗岩,主要矿物为石英和长石,是典型的花岗岩型干热岩。

庄亚芹以青海共和盆地花岗岩型干热岩为研究对象,开展了酸性(土酸、HCl)和碱性(NaOH)化学刺激室内实验,认为这 3 种化学刺激剂均可提高岩石的渗透率^[20]。土酸刺激效果最明显,当反应温度为 150 °C, HF 含量分别为 0.5%、3.0%、5.0%和 7.0%时,反应 48 h 后,岩样渗透率分别增加了 4.65、50.97、66.04 和 552.14 倍, HF 含量越高,产生的蚀变矿物(氟硅酸钾、氟氯酸钾、SiO₂)越多,当 HF 含量为 3%~5%时,刺激效果最佳,既可有效增加岩石渗透率,又可以避免产生过多的次生矿物,此外,岩石的渗透率随着温度升高和时间延长而增大;HCl 对石英的溶蚀效果最弱,当实验温度为 150 °C 时,岩样渗透率最高可增加 5.16 倍,且升高反应温度和延长反应时间均不可提高岩样渗透率;NaOH 在相同的反应条件下,岩石渗透率可提高 25 倍,且溶蚀效果随着温度的升高而增强,但在反应过程中也生成了蚀变矿物(方沸石、黑云母等)^[20]。

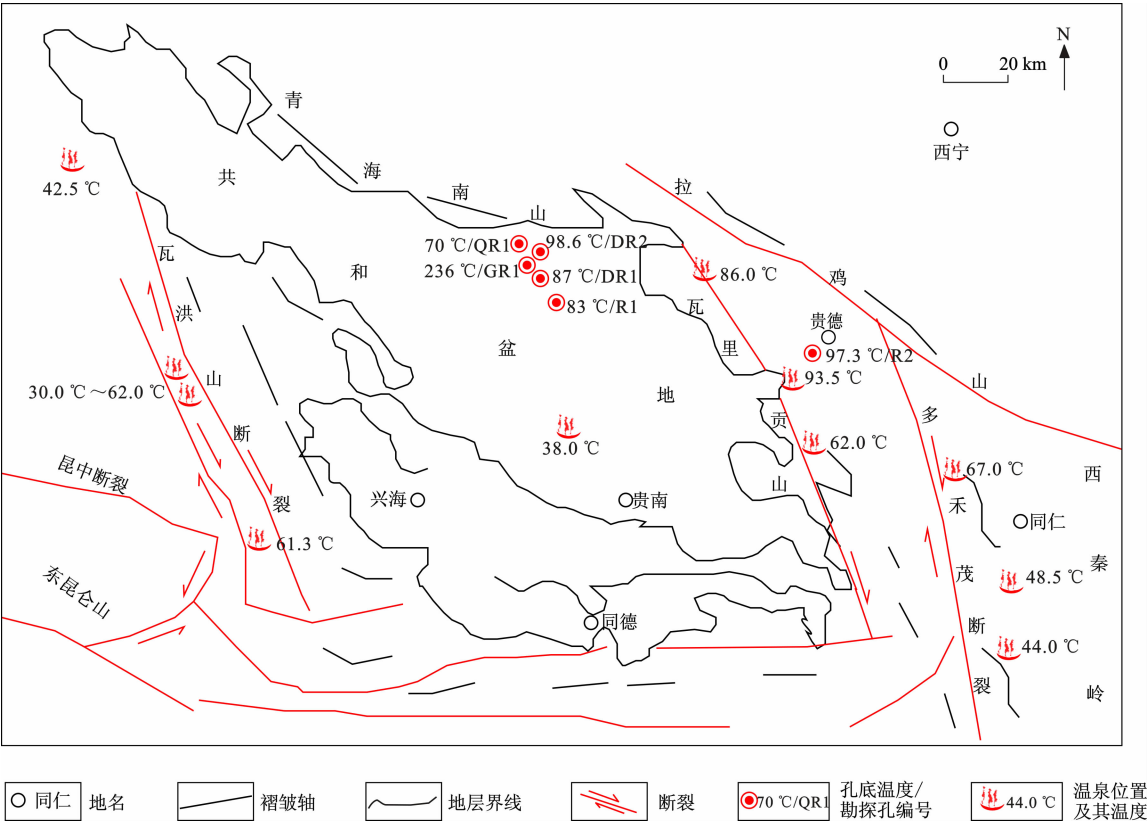
目前,中国地质调查局联合吉林大学正利用共和盆地 GH01 井花岗岩岩芯开展室内高温高压反应釜静态实验和岩芯流动实验,研发新型螯合化学刺激剂配方用于储层改造,具体化学刺激改造效果有待进一步研究。研究成果将有望应用到共和盆地增强型地热系统项目中,这对中国干热岩示范基地的建设具有一定的指导意义。

4 结 语

(1)增强型地热系统中采用的化学刺激剂多为酸性化学刺激剂,尤其是土酸。土酸虽可有效溶蚀热储层原生裂隙中的碳酸盐矿物,但是腐蚀性强烈,易腐蚀井套、管柱等设备;与岩石反应速率过快,无法深部穿透热储层,并且会产生钠长石、钾长石、非晶态 SiO₂ 等新的次生矿物。

(2)在土酸的基础上对化学刺激剂配方进行改进,添加了螯合剂形成螯合酸体系。螯合酸具有阻垢性、缓速性、催化性、二次沉淀少、腐蚀性弱等优点,能够实现深穿透、低伤害的储层激发。但螯合酸不适合普遍推广,需要根据储层条件挑选最为合适的螯合剂,且螯合剂多为有机化合物,对当地生态环境具有一定的负面影响。

(3)CO₂ 化学刺激剂相对于土酸而言,酸性较弱,与储层矿物的反应会慢得多,可保持较长的穿透



图件引自文献[81]

图 5 青海共和盆地部分勘探孔和温泉分布

Fig. 5 Distribution of Partial Exploration Holes and Springs in Gonghe Basin of Qinghai

距离,但是 CO_2 密度较低,比热容较小,含量易受温度影响, CO_2 化学刺激机理还需要开展更深层次的研究。

(4)转向酸化学刺激剂绝大部分用于碳酸盐岩油气储层,在增强型地热系统领域,转向酸化学刺激应更加注重其刺激剂化学组成和高效返排技术,避免对储层造成不可逆的危害。

(5)单一的碱性化学刺激剂(NaOH 和 Na_2CO_3)室内实验结果较为理想,但是场地应用效果并不令人满意,这是由于室内实验采用的样品矿物组成较为均匀,而实际地层中岩性矿物组成普遍复杂,且呈现出非均质特征,碱性化学刺激剂在溶解石英等矿物的同时也产生了更多的次生矿物。

(6)添加了 NTA、EDTA 等螯合剂的碱性化学刺激剂可减少次生沉淀的生成,但是螯合剂本身易受温度影响,温度过高可能会使螯合剂挥发,降低了螯合碱化学刺激剂中的有效组分,影响刺激效果,进一步研究螯合碱化学刺激剂与岩石的反应机理具有重要意义。

(7)中国是干热岩资源十分丰富的国家。野外勘探结果显示,青海共和盆地地温梯度高,满足干热

岩资源要求,是中国潜在的干热岩资源开发区^[83]。但与国外典型干热岩岩性不同的是,青海干热岩原生裂隙中石英较多,含量达到 38%。水力压裂是目前储层改造最常用的技术手段,可形成大体积的裂隙网络,但易诱发地震,对当地社会环境造成威胁。因此,建议今后针对青海共和盆地花岗岩型干热岩储层改造开展更为深入的碱性化学刺激研究。热刺激主要运用岩体热破裂这一性质,增加岩体的渗透率,可以作为储层改造的一个辅助方法。热刺激和碱性化学刺激联合的储层刺激工艺有可能在深部高温岩体中产生改造体积更大的地热储层,提高储层改造的效果,增加干热岩能源开发热产出量,满足中国未来干热岩地热开发需求。

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 Ji-yang, HU Sheng-biao, PANG Zhong-he, et al. Estimate of Geothermal Resources Potential for Hot Dry Rock in the Continental Area of China[J]. Science and Technology Review,2012,30(32):25-31.

- [2] NB/T 10097—2018. 地热能术语[S].
NB/T 10097—2018. Terminology of Geothermal Energy[S].
- [3] 杨吉龙,胡克. 干热岩(HDR)资源研究与开发技术综述[J]. 世界地质, 2001, 20(1): 43-51.
YANG Ji-long, HU Ke. A Review of Hot Dry Rock (HDR) Research and Development in the World[J]. World Geology, 2001, 20(1): 43-51.
- [4] 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 Tian-fu, ZHANG Yan-jun, ZENG Zhao-fa, et al. Technology Progress in an Enhanced Geothermal System(Hot Dry Rock)[J]. Science and Technology Review, 2012, 30(32): 42-45.
- [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.
LU Chuan, WANG Gui-ling. Current Status and Prospect of Hot Dry Rock Research[J]. Science and Technology Review, 2015, 33(19): 13-21.
- [6] 王贵玲,蔺文静,马峰. 地热知识点,了解一下[N]. 中国矿业报, 2018-04-21(3).
WANG Gui-ling, LIN Wen-jing, MA Feng. Understanding Geothermal Knowledge [N]. China Mine Newspaper, 2018-04-21(3).
- [7] 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.
XU Tian-fu, YUAN Yi-long, JIANG Zhen-jiao, et al. Hot Dry Rock and Enhanced Geothermal Engineering: International Experience and China Prospect[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(4): 1139-1152.
- [8] 那金,许天福,魏铭聪,等. 增强地热系统热储层-盐水-CO₂ 相互作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(5): 1493-1501.
NA Jin, XU Tian-fu, WEI Ming-cong, et al. Interaction of Rock-brine-supercritical CO₂ in EGS Reservoir [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(5): 1493-1501.
- [9] 许天福,张炜. 增强型地热工程国际发展和我国前景展望[J]. 石油科学通报, 2016, 1(1): 38-44.
XU Tian-fu, ZHANG Wei. Enhanced Geothermal Systems: International Developments and China's Prospects [J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(1): 38-44.
- [10] XIE X, WEISS W W, TONG Z, et al. Improved Oil Recovery from Carbonate Reservoirs by Chemical Stimulation[J]. SPE Journal, 2005, 10(3): 276-285.
- [11] SIRATOVICH P A, VILLENEUVE M C, COLE J W, et al. Saturated Heating and Quenching of Three Crustal Rocks and Implications for Thermal Stimulation of Permeability in Geothermal Reservoirs[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 80: 265-280.
- [12] PORTIER S, VUATAZ F D, NAMI P, et al. Chemical Stimulation Techniques for Geothermal Wells: Experiments on the Three-well EGS System at Soultz-sous-Forêts, France[J]. Geothermics, 2009, 38(4): 349-359.
- [13] 郭亮亮. 增强型地热系统水力压裂和储层损伤演化的试验及模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
GUO Liang-liang. Test and Model Research of Hydraulic Fracturing and Reservoir Damage Evolution in Enhanced Geothermal System [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [14] 冯子军,赵阳升,张渊,等. 热破裂花岗岩渗透率变化的临界温度[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1987-1992.
FENG Zi-jun, ZHAO Yang-sheng, ZHANG Yuan, et al. Critical Temperature of Permeability Change in Thermally Cracked Granite[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1987-1992.
- [15] LUO J, ZHU Y, GUO Q, et al. Chemical Stimulation on the Hydraulic Properties of Artificially Fractured Granite for Enhanced Geothermal System[J]. Energy, 2018, 142: 754-764.
- [16] FOGLER H S, LUND K, MCCUNE C, et al. Kinetics of Dissolution of Sodium and Potassium Feldspar in HF-HCl Acid Mixtures [J]. Chemical Engineering Science, 1975, 30(11): 1325-1332.
- [17] CUENOT N, FAUCHER J P, FRITSCH D, et al. The European EGS Project at Soultz-sous-Forêts: From Extensive Exploration to Power Production [C] // IEEE. 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Pittsburgh: IEEE, 2008: 1-8.
- [18] 那金,许天福,吴永东,等. 增强型地热系统(EGS)土酸化学刺激剂对热储层的改造[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1): 247-254.
NA Jin, XU Tian-fu, WU Yong-dong, et al. Effectiveness of Using Mud Acid as Stimulation Agent for Enhanced Geothermal Systems(EGS) Reservoir [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(1): 247-254.
- [19] 庄亚芹,张灿海,朱明成,等. 土酸化学刺激剂提高花岗岩渗透率的试验研究[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(2): 16-21, 45.
ZHUANG Ya-qin, ZHANG Can-hai, ZHU Ming-cheng,

- et al. Laboratory Study of Improving Granite Permeability by Using Mud Acid as the Chemical Stimulus[J]. Safety and Environmental Engineering, 2017, 24(2):16-21, 45.
- [20] 庄亚芹. 实施增强型地热系统(EGS)的化学刺激实验研究:以青海共和盆地干热岩为例[D]. 武汉:中国地质大学, 2017.
ZHUANG Ya-qin. Study on the Chemical Stimulation Techniques for Enhanced Geothermal Systems (EGS): Base on Gonghe Basin Hot Dry Rock, Qinghai[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017.
- [21] 余东合, 范秋菊, 修书志, 等. 新型低伤害络合酸体系评价实验[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(6):760-765.
YU Dong-he, FAN Qiu-ju, XIU Shu-zhi, et al. Evaluation Experiment of Low-damage Complex Acid System[J]. Oil Drilling and Production Technology, 2017, 39(6):760-765.
- [22] 费旭博. 刘峁塬区块长 4+5 储层螯合酸酸化机理及影响因素研究[D]. 西安:西安石油大学, 2018.
FEI Xu-bo. Study on Chelate Acidification Mechanism and Influence Factors of Chang-4+5 Reservoir in Liumaoyuan Block[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2018.
- [23] 刘平礼, 孙 庚, 邢希金, 等. 砂岩储层酸化智能复合酸液体体系研究及应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(6):138-143.
LIU Ping-li, SUN Geng, XING Xi-jin, et al. Study and Application of Intelligent Integrated Acid System for Sandstone Stimulation[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science and Technology Edition), 2015, 37(6):138-143.
- [24] 张合文, 丁云宏, 赫安乐, 等. 双分支水平井酸化技术在碳酸盐岩储层中的应用[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(5):84-87.
ZHANG He-wen, DING Yun-hong, HE An-le, et al. Application of Acidizing in Bilateral Horizontal Well in Carbonate Reservoir[J]. Oil Drilling and Production Technology, 2014, 36(5):84-87.
- [25] 范秋菊. 注水井深部解堵新型酸液体体系研究[D]. 成都:西南石油大学, 2017.
FAN Qiu-ju. Research on Deep Solution of a New Acidizing Fluid System on Water Injection Wells[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [26] 曲希玉, 刘 立, 马 瑞, 等. CO₂ 流体对岩屑长石砂岩改造作用的实验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(6):959-964.
QU Xi-yu, LIU Li, MA Rui, et al. Experiment on Debris-arkosic Sandstone Reformation by CO₂ Fluid[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(6):959-964.
- [27] 侯兆云, 许天福, 何 斌, 等. 增强型地热系统中溶解二氧化碳对热储层溶蚀作用的实验研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(1):118-124.
HOU Zhao-yun, XU Tian-fu, HE Bin, et al. Laboratory Experimental Study of Dissolution Using Supercritical CO₂ as a Stimulation Agent for Enhanced Geothermal System (EGS) in Songliao Basin[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(1):118-124.
- [28] 那 金, 冯 波, 兰乘宇, 等. CO₂ 化学刺激剂对增强型地热系统热储层的改造作用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(7):2447-2458.
NA Jin, FENG Bo, LAN Cheng-yu, et al. Effectiveness of Using Supercritical CO₂ as Stimulation Agent for Enhanced Geothermal Systems[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(7):2447-2458.
- [29] 张 炜, 许天福, 吕 鹏, 等. 二氧化碳增强型地热系统的研究进展[J]. 地质科技情报, 2013, 32(3):177-182.
ZHANG Wei, XU Tian-fu, LU Peng, et al. A Review of Carbon Dioxide-based Enhanced Geothermal System[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(3):177-182.
- [30] WAKAHAMA H, MITO S, OHSUMI T, et al. A Concept of CO₂ Georeactor Sequestration at the Ogachi HDR Site, NE Japan[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1):3683-3689.
- [31] VANCE H, LOYD E, MCDANIEL B W. Overview of Stimulation Technology for Horizontal Completions without Cemented Casing in the Lateral[C]// SPE. SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Melbourne: SPE, 2002:21-37.
- [32] 陈颖祎, 潘宝凤, 刘徐慧, 等. 川东北高温碳酸盐岩储层自转向酸研究与应用[J]. 广东化工, 2014, 41(17):55-56.
CHEN Ying-yi, PAN Bao-feng, LIU Xu-hui, et al. High Temperature Carbonate Reservoirs in the Northeastern Sichuan from Turning Sour Research and Application[J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(17):55-56.
- [33] 何春明, 陈红军, 王文耀. 碳酸盐岩储层转向酸化技术现状与最新进展[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(5):121-126.
HE Chun-ming, CHEN Hong-jun, WANG Wen-yao. Diversion Acidizing Used for Carbonate Reservoir: State-of-the-art and New Development[J]. Petroleum

- Drilling Techniques, 2009, 37(5): 121-126.
- [34] 孙铁南. VES自转向酸对致密砂岩储层改造实验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- SUN Tie-nan, Experimental Study on Reconstruction of Tight Sandstone Reservoir Using VES Self-steering Acid[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [35] HARRISON N W. Diverting Agents: History and Application[J]. Journal of Petroleum Technology, 1972, 24(5): 593.
- [36] 关富佳, 姚光庆, 刘建民. 泡沫酸性能影响因素及其应用[J]. 西南石油学院学报, 2004, 26(1): 65-67.
- GUAN Fu-jia, YAO Guang-qing, LIU Jian-min. Performance Influence Factor and Practice of Foamed Acid[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2004, 26(1): 65-67.
- [37] 黄颖辉, 赵立强, 陈冀崧, 等. 泡沫分流酸化模型进展[J]. 西南石油学院学报, 2004, 26(1): 58-60.
- HUANG Ying-hui, ZHAO Li-qiang, CHEN Ji-mei, et al. Development of Foam Diversion Acidizing Model[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2004, 26(1): 58-60.
- [38] 吴信荣, 孙建华, 尚根华, 等. FSH-01 泡沫酸对高温高盐油层适应性动态评价[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(1): 83-85.
- WU Xin-rong, SUN Jian-hua, SHANG Gen-hua, et al. Dynamic Evaluation on the Adaptability of FSH-01 Foamed Acid in High Temperature and High Salt Reservoirs[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(1): 83-85.
- [39] MOHAMED Z. Product and Process for Acid Diversion in the Treatment of Subterranean Formations[J]. Geothermics, 1993, 22(4): 11.
- [40] 冯乐蒙. 川东北碳酸盐岩储层酸压改造复合暂堵技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- FENG Le-meng. Study on Acid Fracturing Modification Compound Temporary Plugging Technology in Carbonate Reservoir of Northeast Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [41] ANDERSON A J. Production Enhancement Through Aggressive Flowback Procedures in the Codell Formation[C]//SPE. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver: SPE, 1996: 10-15.
- [42] BAZIN B, CHARBONNEL P, ONAISI A. Strategy Optimization for Matrix Treatments of Horizontal Drains in Carbonate Reservoirs, Use of Self-gelling Acid Diverter[C]//SPE. Proceedings of the 1999 European Formation Damage Conference. Hague: SPE, 1999: 31.
- [43] TAYLOR K C, NASR-EL-DIN H A. Laboratory Evaluation of *In-situ* Gelled Acids for Carbonate Reservoirs[J]. SPE Journal, 2003, 8(4): 426-434.
- [44] 李小刚, 陈雨松, 杨兆中, 等. 粘弹性表面活性剂在油气藏增产改造领域的研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2017, 39(3): 264-269.
- LI Xiao-gang, CHEN Yu-song, YANG Zhao-zhong, et al. Research Progresses of Viscoelastic Surfactant in Reservoir Stimulation[J]. World Sci-tech R&D, 2017, 39(3): 264-269.
- [45] 曲占庆, 曲冠政, 齐宁, 等. 粘弹性表面活性剂自转向酸液体体系研究进展[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(5): 89-92.
- QU Zhan-qing, QU Guan-zheng, QI Ning, et al. Research Advances of Viscoelastic Surfactant Based Self-diverting Acid System[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(5): 89-92.
- [46] 郑云川, 赵立强, 刘平礼, 等. 粘弹性表面活性剂胶束酸在砂岩储层分流酸化中的应用[J]. 石油学报, 2006, 27(6): 93-95.
- ZHENG Yun-chuan, ZHAO Li-qiang, LIU Ping-li, et al. Sandstone Diversion Acidization Technology of Viscoelastic Surfactant Micelle Fluid[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6): 93-95.
- [47] 曲冠政. 甜菜碱类粘弹性表面活性剂自转向酸化技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2011.
- QU Guan-zheng. Study on Betaine Viscoelastic Surfactant Self-diverting Acid Technology[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2011.
- [48] 詹宁宁. 古潜山储层长井段自转向酸液的研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014.
- ZHAN Ning-ning. Study on Self-diverting Acid of the Long-well Section in Buried Hill Reservoir[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014.
- [49] MELLA M, KOVCA K, XU T, et al. Calcite Dissolution in Geothermal Reservoirs Using Chelants[C]//GRC. Geothermal Resources: Securing Our Energy Future. San Diego: GRC, 2006: 29-40.
- [50] 赵经贵, 刘景茂, 张新, 等. 石英、三氧化二铝、高岭土与纯碱在高温下的反应机理[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 1995, 12(3): 87-91.
- ZHAO Jing-gui, LIU Jing-mao, ZHANG Xin, et al. Mechanism of High Temperature Reaction of Quartz, Alumina, Kaolin and Sodium Carbonate[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 1995, 12(3): 87-91.
- [51] 那金. 化学刺激技术对增强型地热系统(EGS)热储层改造作用研究: 以松辽盆地营城组为例[D]. 长春:

- 吉林大学,2016.
- NA Jin. A Study of Chemical Stimulation on Enhanced Geothermal Systems(EGS) in Yingcheng Formation of Songliao Basin, China[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [52] ROSE P, XU T F, KOVAC K, et al. Chemical Stimulation in Near-wellbore Geothermal Formations; Silica Dissolution in the Presence of Calcite at High Temperature and High pH [C] // Stanford Geothermal Program. Proceedings of Thirty-second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University, 2007: 111-115.
- [53] FRENIER W W, FREED C N, CHANG F. Hydroxyaminocarboxylic Acids Produce Superior Formulations for Matrix Stimulation of Carbonates at High Temperatures [C] // SPE. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans: SPE, 2001: 1-16.
- [54] XU T F, ROSE P, FAYER S, et al. On Modeling of Chemical Stimulation of an Enhanced Geothermal System Using a High pH Solution with Chelating Agent[J]. *Geofluids*, 2009, 9(2): 167-177.
- [55] EXLER V A, CISNEROS F T, QUEVEDO M A. Hybrid Matrix Acidizing Techniques Successfully Stimulate Geothermal Wells in Latin America, Schlumberger [C] // SPE. SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control. Lafayette: SPE, 2014: 37-47.
- [56] 王 玺. 孔雀石、石英、白云石、石灰石及硅孔雀石在 $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ 体系中的溶解度及组元行为 (25 $^\circ\text{C}$) [D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- WANG Xi. Solubilities and Components Evolution for Malachite, Quartz, Dolomites, Calcite and Chrysocolla in $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ Systems at 25 $^\circ\text{C}$ [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [57] 刘明亮, 庄亚芹, 周 超, 等. 化学刺激技术在增强型地热系统中的应用: 理论、实践与展望 [J]. *地球科学与环境学报*, 2016, 38(2): 267-276.
- LIU Ming-liang, ZHUANG Ya-qin, ZHOU Chao, et al. Application of Chemical Stimulation Technology in Enhanced Geothermal System: Theory, Practice and Expectation [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2016, 38(2): 267-276.
- [58] SARDA J P. Chemical Leaching [C] // Institute of Geophysics ETH Zurich. The 2nd NATA-CCMS Information Meeting on Hot Dry Rock Geothermal Energy. Los Alamos: Institute of Geophysics ETH Zurich, 1977: 136-159.
- [59] KOVAC K, MOORE J, MCCULLOCH J, et al. Geology and Mineral Paragenesis Study Within the Coso-Egs Project [C] // Stanford Geothermal Program. Proceedings of Twenty-ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University, 2004: 20-25.
- [60] ROSE P, BARTON C, PETTY S, et al. Creation of an Enhanced Geothermal System through Hydraulic and Thermal Stimulation [C] // GRC. Geothermal Energy: The Baseload Renewable Resource. Reno: GRC, 2002: 1-15.
- [61] ANDRE L, PORTIER S. Review on Chemical Stimulation Techniques in Oil Industry and Applications to Geothermal Systems [J]. *Engine*, 2007, 5: 1-30.
- [62] EVANOFF J, YEAGER V, SPIELMAN P. Stimulation and Damage Removal of Calcium Carbonate Scaling in Geothermal Wells; A Case Study [J]. *Energy Sources*, 1997, 19(1): 2481-2485.
- [63] 王晓星, 吴能友, 苏 正, 等. 增强型地热系统的开发: 以法国苏尔士地热田为例 [J]. *热能动力工程*, 2012, 27(6): 631-636.
- WANG Xiao-xing, WU Neng-you, SU Zheng, et al. Development of Enhanced Geothermal Systems (EGS): With Soultz Geothermal Farm in France Serving as an Example [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2012, 27(6): 631-636.
- [64] PORTIER S, VUATAZ F D. Developing the Ability to Model Acid-rock Interactions and Mineral Dissolution During the RMA Stimulation Test Performed at the Soultz-sous-Forêts EGS Site, France [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2010, 342(7/8): 668-675.
- [65] GERARD A, GENTER A, KOHL T, et al. The Deep EGS (Enhanced Geothermal System) Project at Soultz-sous-Forêts (Alsace, France) [J]. *Geothermics*, 2006, 35(5/6): 473-483.
- [66] GENTER A, EVANS K, CUENOT N, et al. Contribution of the Exploration of Deep Crystalline Fractured Reservoir of Soultz to the Knowledge of Enhanced Geothermal Systems (EGS) [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2010, 342(7/8): 502-516.
- [67] PAUL B, EVA S, JEAN-BERNARD E, et al. Localization of Temperature Anomalies in the Upper Rhine Graben: Insights from Geophysics and Neotectonic Activity [J]. *International Geology Review*, 2013, 55(14): 1744-1762.
- [68] DEZAYES C, GENTER A, VALLEY B. Structure of the Low Permeable Naturally Fractured Geothermal Reservoir at Soultz [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2010, 343(7/8): 517-530.

- [69] BAILLIEUX P, SCHILL E, ABDELFETTAH Y, et al. Possible Natural Fluid Pathways from Gravity Pseudo-tomography in the Geothermal Fields of Northern Alsace(Upper Rhine Graben)[J]. *Geothermal Energy*, 2014, 2: 16.
- [70] COMET F H, BERARD T, BOUROUIS S. How Close to Failure is a Granite Rock Mass at a 5 km Depth[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(1): 47-66.
- [71] MEYER G, BAUJARD C, HEHN R, et al. Analysis and Numerical Modelling of Pressure Drops Observed During Hydraulic Stimulation of GRT-1 Geothermal Well(Rittershoffen, France)[C]// *Stanford Geothermal Program. Proceedings of Forty-second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford: Stanford University, 2017: 791-804.
- [72] MATTHES L, LUMMER N R. Next Generation Acids; New Retarded System for Geothermal Applications[J]. *Oil Gas; European Magazine*, 2014, 40(1): 37-38.
- [73] BAUJARD C, GENTER A, DALMAIS E, et al. Hydrothermal Characterization of Wells GRT-1 and GRT-2 in Rittershoffen, France; Implications on the Understanding of Natural Flow Systems in the Rhine Graben[J]. *Geothermics*, 2017, 65: 255-268.
- [74] XU T F. International Workshop on Hot Dry Rock Resource Exploration and Enhanced Geothermal System Engineering[R]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [75] WALLROTH T, ELIASSON T, SUNDQUIST U. Hot Dry Rock Research Experiments at Fjallbacka, Sweden[J]. *Geothermics*, 1999, 28(4/5): 617-625.
- [76] JUPE A, GREEN A, WALLROTH T. Induced Microseismicity and Reservoir Growth at the Fjallbacka Hot Dry Rocks Project, Sweden[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1992, 29(4): 343-354.
- [77] ELIASSON T, SCHBERG H. U-Pb Dating of the Post-kinematic Sveconorwegian(Grenvillian) Bohus Granite, SW Sweden; Evidence of Restitic Zircon[J]. *Precambrian Research*, 1991, 51(1/2/3/4): 337-350.
- [78] 陈崇阳, 高有峰, 张晓东, 等. 火山地层中的沉积层特征及其地层对比意义: 以松辽盆地营城组为例[J]. *地球科学*, 2018, 43(3): 812-826.
- CHEN Chong-yang, GAO You-feng, ZHANG Xiao-dong, et al. Sedimentary Interlayer in Volcano Strata; Characteristics and Significance of Stratigraphic Correlation; Taking Yingcheng Formation, Songliao Basin as an Example[J]. *Earth Science*, 2018, 43(3): 812-826.
- [79] 云金表, 殷进垠, 金之钧. 松辽盆地深部地质特征及其盆地动力学演化[J]. *地震地质*, 2003, 25(4): 595-608.
- YUN Jin-biao, YIN Jin-yin, JIN Zhi-jun. Deep Geological Feature and Dynamic Evolution of the Songliao Basin[J]. *Seismology and Geology*, 2003, 25(4): 595-608.
- [80] 吴乾蕃. 松辽盆地地热场[J]. *地震研究*, 1991, 14(1): 31-40.
- WU Qian-fan. The Geothermal Field in Songliao Basin[J]. *Journal of Seismological Research*, 1991, 14(1): 31-40.
- [81] 薛建球, 甘斌, 李百祥, 等. 青海共和—贵德盆地增强型地热系统(干热岩)地质-地球物理特征[J]. *物探与化探*, 2013, 37(1): 35-41.
- XUE Jian-qiu, GAN Bin, LI Bai-xiang, et al. Geological-geophysical Characteristics of Enhanced Geothermal Systems(Hot Dry Rocks) in Gonghe-Guide Basin[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2013, 37(1): 35-41.
- [82] 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 Hong-wu, JIN Guang-rong, LI Jia-qi, et al. Coupled Thermal-hydrodynamic Processes 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.
- [83] 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.
- SUN Zhi-xin, LI Bai-xiang, WANG Zhi-lin. Exploration of the Possibility of Hot Dry Rock Occurring in the Qinghai Gonghe Basin[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2011, 38(2): 119-124.
- [84] 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 Wei-de, WANG Yan-xin, GAO Xue-zhong, et al. Distribution and Aggregation Mechanism of Geothermal Energy in Gonghe Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(4): 223-230.
- [85] 张盛生, 张磊, 蔡敬寿, 等. 共和盆地恰卜恰地区干热岩资源量初步估算及评价[J]. *青海大学学报*, 2018, 36(4): 75-78, 85.
- ZHANG Sheng-sheng, ZHANG Lei, CAI Jing-shou, et al. Preliminary Estimation and Evaluation of Hot Dry Rock Resources in Qiabuqia Area of Gonghe Basin[J]. *Journal of Qinghai University*, 2018, 36(4): 75-78, 85.