

引用格式: 张炜, 金显鹏, 王海华, 等. 美国 FORGE 计划犹他州干热岩开发示范项目进展综述[J]. 世界科技研究与发展, 2024, 46(2): 263-276.

美国 FORGE 计划犹他州干热岩开发示范项目进展综述*

张炜^{* ,1,2} 金显鹏³ 王海华^{1,2} 姚树青^{1,2} 邵明娟^{1,2}

(1. 中国地质调查局地质文献中心, 北京 100083; 2. 中国地质图书馆, 北京 100083;
3. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 天津 300309)

摘要: 21 世纪是全球能源获取方式发生重要变化的时代。现有以煤炭、石油、天然气等传统资源为基础的能源正在逐渐被风能、太阳能、生物质能、地热能等环境友好、低排放的绿色能源所取代。干热岩是一种不含原生水(或含少量水但不能流动)的高温地热资源,可通过水力刺激改造形成增强型地热系统储层,从而提取数量相当可观的地热能。本文以美国能源部正在组织实施的 FORGE 计划犹他州干热岩示范项目为研究对象,综述了项目在场地质条件表征、基础设施建设等方面取得的主要进展与成果,总结了项目在高温硬岩钻井、储层建造、微震监测等方面取得的广泛且深入认识,从统筹部署、组织实施、场地表征和设施建设、关键技术装备突破、数据共享等方面提出了值得我国借鉴参考的具体实践。

关键词: 干热岩; 增强型地热系统; 地热能前沿瞭望台研究计划; 刺激改造; 裂隙网络; 诱发地震

DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2023.07.004

Review on Progress of the Utah FORGE Project for Demonstration of Hot Dry Rock Development*

ZHANG Wei^{* ,1,2} JIN Xianpeng³ WANG Haihua^{1,2} YAO Shuqing^{1,2}
SHAO Mingjuan^{1,2}

(1. GEO-Documentation Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China;
2. China Geological Library, Beijing 100083, China; 3. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Tianjin 300309, China)

Abstract: The 21st century is a time of global change in the approach in the field of energy acquisition. The current existing methods of energy production, based on conventional resources such as coal, oil, and natural gas, are gradually being replaced by environmental-friendly, low-emission clean energies, such as wind energy, solar energy, biomass energy, and geothermal energy. Hot dry rock is a high temperature reservoir without connate water or with little water but no flow, which can form an enhanced geothermal system reservoir through hydraulic stimulation, and extract a considerable amount of geothermal

* 中国地质调查局项目“地球科学文献知识服务与决策支撑”“清洁能源情报跟踪与研究”(DD20230139, DD20230602)

** E-mail: zhgwei@mail.cgs.gov.cn

energy. Taking the Utah FORGE project for demonstration of hot dry rock development being organized and implemented by the U. S. Department of Energy as the research object, this paper reviewed the main progress and achievements of the project, such as site geological condition characterization and infrastructure construction. The extensive and in-depth understanding of the project was summarized in terms of high-temperature hard rock drilling, reservoir stimulation, and microseismic monitoring. From the aspects of overall deployment, organization and implementation, site characterization and facility construction, breakthroughs in key technologies and equipment, and data-sharing, specific practices worthy of reference for China were put forward.

Keywords: Hot Dry Rock (HDR); Enhanced Geothermal System (EGS); Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy (FORGE); Stimulation; Fracture Network; Induced Seismicity

地热资源因其具有的清洁性、运行稳定性和空间分布广泛性,已成为世界各国重点关注和勘查开发的新型地质能源,按其赋存条件可分为水热型和干热岩型地热资源^[1,2]。其中,干热岩型地热资源是指赋存于不含原生水或含少量水(但不能流动)的高温(180℃以上)深部岩体内资源潜力巨大的热能^[3]。目前,针对干热岩型地热资源的开发主要采用增强型地热系统(Enhanced Geothermal System, EGS)方法,通过高渗透性人工热储建造实现以注入水为代表的工质流体的循环换热,从而用于发电或供暖等^[4]。

美国是最早提出 EGS 这一地热能开发概念及最早实施示范项目的国家。美国能源部资助麻省理工学院于 2006 年编制形成的《地热能的未来——21 世纪增强型地热系统对美国的影响》报告,初步证实该国赋存有资源潜力巨大的干热岩型地热资源^[2]。此后,美国能源部开始组织实施针对干热岩型地热资源开发的 EGS 技术的研发和示范工作。其中,作为奥巴马政府“全方位能源政策”的一部分,美国能源部于 2014 年宣布启动地热能前沿瞭望台研究计划(Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy, FORGE),旨在建立一个现场实验室来开展 EGS 的前沿研究、钻探和储层建造等技术的研发和示范、以及井间连通性和流动循环等的测试,以形成可降低工业开发风险和促进干热岩型地热资源产业化开发的严谨、

可复制的方法^[5-7]。除了场地建设和技术示范外, FORGE 计划还将致力于数据采集和共享以及成果发布,并将建立一个创新性的合作与管理平台,以通过竞争的方式鼓励更广泛范围的科学和工程机构的参与。

现有研究表明干热岩型地热资源的成功开发主要取决于三方面因素,即温度、在不产生明显漏失和流动短路情况下注入井与生产井之间的水力连通、以及能够产生与热储具有足够接触表面积的裂隙并最终实现对该类区域的可控流动换热。本文将全面梳理美国 FORGE 计划犹他州干热岩示范项目在场地地质条件表征、基础设施(监测井、监测台站、注入井等)建设、储层建造、微震监测等方面取得的主要进展与成果,分析总结项目取得的重要认识,并形成我国干热岩勘查开发工作可借鉴参考的启示。

1 项目背景及场地概况

美国 FORGE 计划的第一步是通过两个阶段筛选最终作为现场实验室进行建设和运营的场地。美国能源部对参与竞争的候选场地的要求主要包括:1)岩石类型为结晶岩(花岗岩);2)体积大于 1 km³;3)温度为 175℃至 225℃;4)深度为 1.5~4 km;5)具有 10⁻¹⁶ m² 量级的适当渗透率,低于可供开发的典型水热型地热系统的上限;6)已知的应力方向和大小;7)诱发地震和地震灾害的

低风险;8)不与已开发的水热型地热系统相连通;9)不具有或具有较低的环境风险;10)具有足够的基础设施来支持研发工作以及储层建造、运营和维护。

美国能源部已完成最终场地的筛选,具体过程包括^[8,9]:1)2015年4月27日,美国能源部宣布资助200万美元由5个团队开展第一阶段工作,分别在加利福尼亚州、爱达荷州、内华达州、俄勒冈州和犹他州选择候选场地,主要进行地质建模以及包含数据发布、利益相关者参与、研发实施、环境管理在内的综合规划的制定;2)2016年8月31日,美国能源部宣布资助2900万美元由桑迪亚国家实验室(内华达州的Fallon场地)和犹他大学(犹他州的Milford场地)开展第二阶段工作,主要进行新数据的获取以及诱发地震缓解计划的制定;3)2018年6月14日,美国能源部宣布资助1.4亿美元由犹他大学自2019年底开展为期5年的第三阶段工作,即选定犹他州Milford附近的候选场地作为FORGE计划的现场实验室,以设计、开发和测试用于储层建造、监测和流动循环测试的创新性技术,提供用于测试高温测井和裂隙成像工具的基础设施,以及向公众、利益相关者等展示EGS技术的可行性及电力和热力供应潜力,从

而成为相关科学研究和科学普及的重要基地。

犹他州项目场地占地约5 km²,位于盐湖城以南350 km和Milford以北16 km处,邻近一座306 MW风力发电厂、一座240 MW太阳能发电厂,以及PacifiCorp公司位于Roosevelt温泉的38 MW Blundell地热发电厂。项目场地下部目标储层是温度高于175 °C的花岗岩体,体积为4.6 km³,主要由花岗岩和闪长岩构成(图1)。从工程开发和储层物性的角度,该储集岩形成了由共生的结晶石英岩和铝硅酸盐矿物构成的相对均质地层单元,具有极低的化学反应性和低可溶性。此外,该储集岩非常致密,具有极低的孔隙度和渗透率,不含有热液流体,并且分布有复杂(裂隙方位多变)且相对密集的裂隙网络。

2 项目实施目标与组织管理

犹他州项目的主要目标是建造具有足够渗透性的裂隙网络,以长期从热岩中提取热能;在不造成储层显著冷却的情况下,实现经济流速(大于 $4 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$);缓解有危害性的诱发地震;证实EGS技术的产业化应用可行性。该项目将为干热岩型地热资源相关技术方法和设备的开发、测试和优化创建一个可控的环境(即现场实验室)。

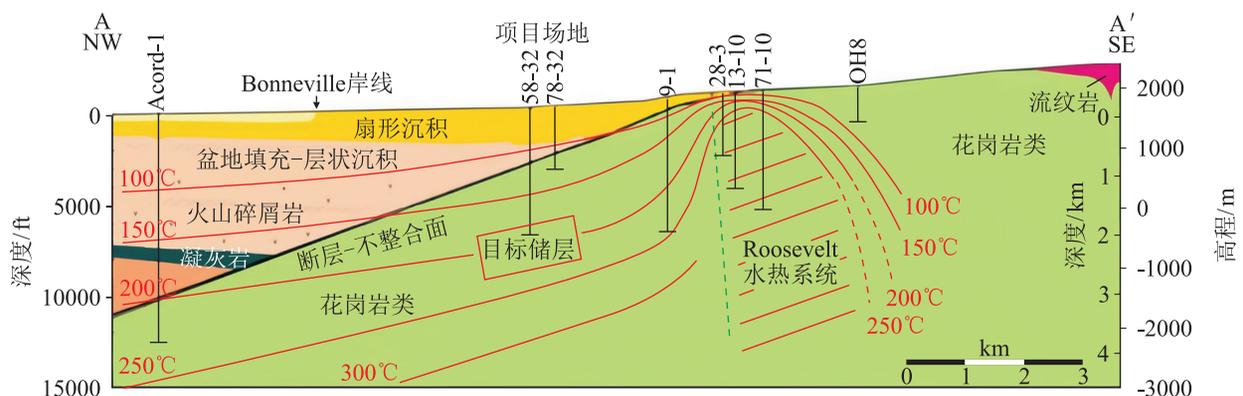


图1 犹他州项目场地的地温与地质特征剖面^[10]

Fig.1 Geothermal and Geological Profile of the Utah FORGE Project Site^[10]

该项目在部署实施过程中形成了包括项目管理团队、技术分析、评估和监督委员会、研发指导委员会、以及科学与技术分析团队在内的组织管理体系^[11]。

犹他大学能源与地球科学研究院牵头组织的项目管理团队还包括来自美国油气和地热行业的企业、高校和国家实验室等众多机构的成员^[12]，负责规划、实施和监督项目的关键技术研发和场地运营以及管理项目的所有财务事宜。技术分析、评估和监督委员会的主要任务是支撑研发课题的制定、协调和效果评价，并对外部研发课题的技术发展进行跟踪。科学与技术分析团队由来自项目所涉及关键技术领域的权威专家组成，具体工作任务包括：1) 参与项目战略方向的制定并提供建议，为项目管理团队提供指导；2) 根据美国能源部地热技术办公室制定的发展路线图和目标，建立技术基准并制定衡量研发是否成功的指标；3) 根据要求向项目管理团队提供有关具体管理和运营问题的建议和意见；4) 评估正在进行的项目研发工作的进展，为年度研发课题征集工作制定主题/方向，并为课题的评选提供指导。研发指导委员会负责与技术分析、评估和监督委员会及科学与技术分析团队共同管理外部研发课题。

3 项目各阶段主要进展与成果

3.1 第一阶段

犹他州项目在第一阶段取得的主要工作进展包括：制定样品和岩心保存计划，但不仅限于岩心和岩屑，也包括流体样品；制定环境、安全和健康计划；制定数据发布和知识产权计划；制定初步的诱发地震缓解计划；制定研发计划。

在分析研究场地岩性特征、地质构造条件和地球物理特征等方面取得的主要成果包括^[9,13,14]：

场地区域的钻井资料表明场地下部的主要岩性包括由前寒武纪片麻岩和新近纪深成岩体构成的结晶基岩，新近纪盆地充填沉积由火山岩地层组成，第四纪盆地充填沉积由河流相-湖相沉积地层组成；实验室测试表明，结晶基岩非常坚硬且具有极低的孔隙度和渗透率；场地区域的变形主要是由于两个不同的构造事件，即东西向带中的新近系中期深成作用以及开始于约 17 Ma 从新近纪晚期至近期的东西向盆岭省伸展；场地区域的地震活动性较弱，Roosevelt 温泉附近的地震活动与 Blundell 地热发电厂过去 30 年的生产和注入活动没有明显的相关性；利用场地区域的深井资料对场地地温条件的预测表明，场地下部 2 km 和 4 km 深度处的预计岩石温度范围为 175 ~ 250 °C 以上，其中 4 km 以浅温度超过 175 °C 的结晶基岩的体积超过 100 km³，潜在储集岩的体积约为 5 km³；场地下部浅层未固结盆地充填沉积形成的主要含水层的厚度范围为 30 ~ 150 m 以上，地下水井的测试数据确定含水层的导水系数为 20 ~ 150 m²/d，可用于场地未来储层建造的供水；Opal Mound 断层作为流体流动的侧向屏障，使场地目标储层与 Roosevelt 温泉水热型地热系统完全隔绝。

3.2 第二阶段

犹他州项目在第二阶段取得的主要工作进展包括^[15,16]：完成 5 台地震仪和一个由 150 个地震传感器构成的节点阵列的地面部署，以实现对现有地震仪所获数据的补充；利用 122 个台站采集高精度大地电磁调查资料；利用 417 个新地震台站采集并分析重力调查资料；安装 20 个全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 测量标石，用于第三阶段地面变形监测；开展激光雷达调查和地质填图；开展瞬变电磁调

查;开展二氧化碳和氦同位素土壤气调查;开展地下水取样和流体化学分析;完成58-32直井的钻探(井深2297 m)并开展地球物理测井、用于评估渗透率的脉冲测试、用于测定应力的低流量微水力压裂循环测试、以及诊断性压裂注入测试(Diagnostic Fracture Injection Test, DFIT);开展58-32井的注入测试,以示范建造EGS储层的可行性;完成两口深度分别为1000 m和305 m的深井(78-32井)和浅井(68-32井)的钻探,并利用深井中安装的分布式光纤声波传感器(Distributed Acoustic Sensor, DAS)和12级检波器串以及浅井中安装的检波器和加速度计对58-32井注入测试所产生微震事件进行监测。

在场地表征和基线环境监测方面取得的主要成果包括^[17,18]:进一步的地质和钻探调查表明,场地岩性特征主要分为结晶基岩和上覆盆地充填沉积,基岩以中新世花岗岩为主,盆地充填沉积由一系列固结较差的沉积层组成,在盆地最深处的厚度超过3000 m;以场地为中心的二维和三维地震调查揭示了显示为连续强反射体的基底界面,其走向为西北向并向西倾斜 $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$,并且没有证据显示场地下部存在近垂直断层;二氧化碳和氦同位素土壤气调查证实场地范围内不存在隐伏的热液流体;58-32井的岩屑和岩心分析表明,上部层段由石英和长石组成的沉积岩构成,下部层段由斜长石、钾长石和石英等组成的花岗岩类(即硅质深成火成岩)构成;58-32井的电缆温度测量表明,基底和潜在储层段具有异常高的地温梯度($70^{\circ}\text{C}/\text{km}$),井底测得的最高温度为 199°C ;58-32井的地层微电阻率扫描成像测井分析表明,在968 m深度以下的基底层段中探测到2000多条天然裂隙和356条钻探诱发的近垂直张裂隙组成的相对密集的裂隙网络,以南北向、东西向和北东-南

西向为主,尽管这些裂隙不具有高渗透性和高导流能力,但有助于水力裂隙的产生和扩展以及天然裂隙的活化;58-32井证实早前地温场建模工作的准确性,即对 175°C 所处深度的预测与实际测深仅有数米的差距,78-32井985 m深度处约 108°C 的实测值也证实了钻前预测;水文地质调查表明场地下伏含水层仅位于浅部盆地充填沉积内,来自场地以东3 km以深Roosevelt温泉系统的流入,可作为项目未来注入生产测试的供水来源;对已获合成孔径雷达干涉(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)测量数据的审查表明未探测到场地处毫米级的地层移动。

在注入测试方面取得的主要成果包括^[19-22]:2017年7月至9月进行的58-32井的DFIT测试表明最大水平应力梯度(方位角为 $\text{N}25^{\circ}\text{E}$)约为 $17.42\text{ kPa}/\text{m}$,最小水平应力梯度约为 $14.02\text{ kPa}/\text{m}$,垂直应力梯度约为 $25.56\text{ kPa}/\text{m}$,结合岩心测试表明渗透率范围为 $0.6 \times 10^{-14} \sim 8 \times 10^{-14}\text{ m}^2$;2019年4~5月对58-32井中3个经适当封隔的深部层段(2248~2294 m测深的井底裸眼段、2123~2126 m测深的射孔段、2001~2004 m测深的射孔段)分别进行了9次注入-关井-返排循环测试(最大注入速率为 $3.97 \times 10^{-2}\text{ m}^3/\text{s}$);地层微电阻率扫描成像测井分析表明下部射孔段内存在大量已有裂隙并且处于近临界应力状态(易于发生剪切和膨胀),而上部射孔段含有少量的非临界应力状态裂隙;下部射孔段在第4次循环测试过程中发生了岩石破裂,此时井口压力约为 44.8 MPa ,流速为 $1.32 \times 10^{-2}\text{ m}^3/\text{s}$,而上部射孔段旨在测试岩石破裂所需压力的上限,但封隔器和桥塞的损坏阻止了进一步测试;基于注入测试的应力分析表明最大水平应力梯度约为 $14.70 \sim 19.23\text{ kPa}/\text{m}$,最小水平应力梯度

约为 12.44 ~ 14.93 kPa/m, 垂直应力梯度约为 25.11 ~ 26.01 kPa/m, 与 2017 年 DFIT 测试的测量结果相当。

在地震监测方面取得的主要成果包括^[23,24]: 通过对场地所在区域历史地震活动的重新评估以及项目安装的宽频带地震台阵与附近的犹他州大学地震台的结合对研究区域地震探测水平的提高, 研究认为项目场地范围内没有发生过天然地震活动, 所在区域的地震活动表现为低频率和低震级且震级通常低于 1.5; 在注入测试期间, 78-32 井中覆盖沉积岩-花岗岩接触界面的 12 级检波器串共记录到 423 个微震事件(矩震级从 -1.996 至 -0.519), 固结于地表至 985 m 深度之间 139.7 mm 套管的环空内的 DAS 共记录到 43 个微震事件, 68-32 井中的检波器共记录到 19 个微震事件, 地面节点阵列共记录到 5 个微震事件; 3 个注入测试层段在前三次低流速循环测试中未探测到微震事件, 后者主要发生于较高流速循环测试期间。

在储层模拟方面取得的主要成果包括^[22,25,26]: 刺激改造和循环测试数值模拟证实, 可以以相对低的注入压力激活最佳定向裂隙, 从而在井间形成具有导流能力的相互连通的裂隙系统, 可以通过刺激改造形成多个裂隙组, 有利于测试具有创新性且处于研发阶段的不同方法, 也可以利用水力压裂及天然裂隙的滑移和剪胀选择不同的刺激改造措施; 基于三维地震反射和重力资料的模拟确定场地下部不存在与穿过基底接触带的近垂直断层偏移有关的阶梯状不连续体; 水岩相互作用模拟表明注入-生产测试期间会发生少量至中等程度的矿物沉淀与溶解, 具体程度取决于注入流体的组分。

3.3 第三阶段

犹他州项目在第三阶段取得的主要工作进展

包括^[27-29]: 完成场地主要设施的建设, 包括 3 口深井(注入井 16A(78)-32、监测井 56-32 和 78B-32)、主输电线路及 16A(78)-32 井、58-32 井、78-32 井和 56-32 井所在井垫的分支输电线路、距场地中心 3 km 由地面和井下检波器组成的监测网络、在 78B-32 井中部署的 DAS、以及在 58-32 井、56-32 井和 78B-32 井的储层深度处部署的 8 级三分量数字检波器串; 完成对诱发地震监测计划的更新; 完成第一轮外部研发课题招标并启动第二轮招标; 持续开展重力、GPS、InSAR 和水位测量; 在 16A(78)-32 井的井趾附近的 3 个井段进行刺激改造测试, 并同时开展微震监测、返排水地球化学分析和示踪剂测试; 完成 16B(78)-32 生产井的初步设计, 用于储层建造、流体循环和采热示范。

在场地表征和基线环境监测方面取得的主要成果包括^[30]: 重新分析了 58-32 井的注入测试数据, 证实场地应力特征可实现套管段处诱发裂隙的起裂和扩展以及天然裂隙的活化, 确定返排可作为应力预测的有效方法; 对第二阶段所获大地电磁资料的三维有限元反演分析的结果表明, 场地下方结晶基底内不存在明显的已有裂隙组, 但在 Mineral 山脉东面的相同岩性结晶基底内存在明显的已有裂隙组; 大地电磁资料还证实场地下部目标储层是高温无水花岗岩体, 即没有证据表明其中存在可能有助于热液蚀变或高温流体赋存的低电阻率区, 并表明场地下部不存在向下延伸穿过沉积岩-花岗岩接触界面的断层; 重复的重力、GPS 和 InSAR 测量为监测地下密度变化提供了基线数据, 表明地面变形的垂向位移可能受季节性降雨影响以及 58-32 井在 2019 年注入测试前后的地面变形幅度很小。

在基础设施建设方面取得的主要成果包括^[31-33]:

16A (78)-32 井以近似平行于最小水平主应力的方向钻至 1810 m 真垂深, 然后与竖直方向偏斜 65° 钻进, 最终钻至 3349 m 总测深和 2609 m 真垂深, 井底温度为 220°C , 将作为项目试验性开发的双井系统中的注入井; 针对 16A (78)-32 井的钻探, 采用了数据驱动下基于物理限制因素重新设计的钻井控制流程, 使钻井时间减少了一半以上 (计划用时 136 d, 实际用时 74 d); 新钻进的两口直井 (56-32 井, 井深 2775 m; 78B-32 井, 井深 2896 m) 以及 58-32 井将用于在接近储层深度进行工具测试和地震监测。

在储层建造方面取得的主要成果包括^[31,34]: 2022 年 4 月 14 日至 24 日, 成功完成了 16A (78)-32 井的多阶段 (级) 刺激改造作业, 对约 3000 m 以深的 3 个层段进行了测试, 第 1 阶段针对的是井趾处的裸眼段 (滑溜水最大泵入流速为 $13.25 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{s}$), 第 2 和第 3 阶段针对的是较浅部的套管段 (最大泵入流速均为 $9 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{s}$, 但第 2 阶段泵入的为滑溜水, 第 3 阶段为羧甲基羟丙基胍胶和低浓度微支撑剂), 每个阶段加压注入约 $330 \sim 510 \text{ m}^3$ 水; 在每个阶段, 刺激改造以低至适中的注入速率开始, 并小幅增加以确保作业顺利进行, 在达到峰值压力和注入速率后, 两者都保持不变, 然后小幅逐步降低以了解近井筒摩擦效应。

在地震监测方面取得的主要成果包括: 地震监测分析结果仍表明项目场地所在地区具有低至中度的地震危险性; 尽管在 58-32 井 2019 年注入测试期间发生的地震事件震级小且频率低, 但计算得到的正 b 值 (>1) 表明其具有诱发地震序列的特征; 16A (78)-32 井刺激改造作业期间的微震监测表明每个阶段都产生了大量的微震事件, 尽管井下高温阻碍了最佳探测性能的实现, 但已探

测到具有足够质量的事件位置来了解裂隙刺激改造区, 如相较于裸眼段, 套管段产生的裂隙带垂直于井筒扩展, 更有利于与计划钻进的 16B (78)-32 生产井的相交。

在诱发地震管控方面取得的主要成果包括: 更新后的诱发地震缓解计划已提交美国能源部审核, 该缓解计划建立了地震动参数的背景值, 确定了已探明断层构造不具有地震活跃性, 以及更新了对项目场地的概率地震危险性评估; 基于地震仪的地震动分析表明, 场地所在区域的较大规模地震动大多由人为噪声和定期的火车交通造成, 而地震动背景值处于极低的水平; 相比于 2018 年进行的概率地震危险性评估, 通过数据资料更新和错误校正, 2020 年重新进行的概率地震危险性评估表明地震风险显著降低。

在外部研发工作部署方面取得的主要成果包括: 2020 年 4 月启动的第一轮招标共资助 17 个外部研发课题, 总经费为 4950 万美元, 受资助者来自企业、国家实验室和高校, 专题领域涉及层间封隔工具、应力参数估算、场地尺度的储层演化表征、储层建造和井配置、以及实验室与模拟的综合研究; 2022 年 8 月启动的第二轮招标预计最多资助 17 个外部研发课题, 总经费为 4400 万美元, 具体研发方向包括自适应诱发地震监测协议、替代性刺激改造方案、用于测量热波及 (吹扫) 效率的场地规模实验、高温支撑剂、以及用于裸眼段作业的多组跨式封隔器。

截至 2023 年 3 月, 犹他州项目的第三阶段工作已基本完成场地表征和基线环境监测、现场实验室基础设施建设、地震监测网络基础设施建设、16A (78)-32 注入井的钻探和刺激改造测试、以及 16B (78)-32 生产井的设计, 将于 2023 年 4 月开始项目试验性开发双井系统中 16B (78)-32 生

产井的钻探作业(图2),并计划在通过短期循环测试确认注入井与生产井之间的水力连通性后在两口井之间进行进一步的储层建造作业。此外,将进一步完善地震监测网络基础设施建设,包括8 km 半径监测网络内的3口井中监测仪器的安装,以及在56-32井、58-32井和78B-32井中安装模拟检波器串直至储层深度。另外,将依托研发课题鼓励工业界和研发机构开发和测试不同的刺激改造技术,可能包括支撑剂、冷水注入、推进剂、磨料射流割缝、以及二氧化碳活化支撑剂等创新方法。

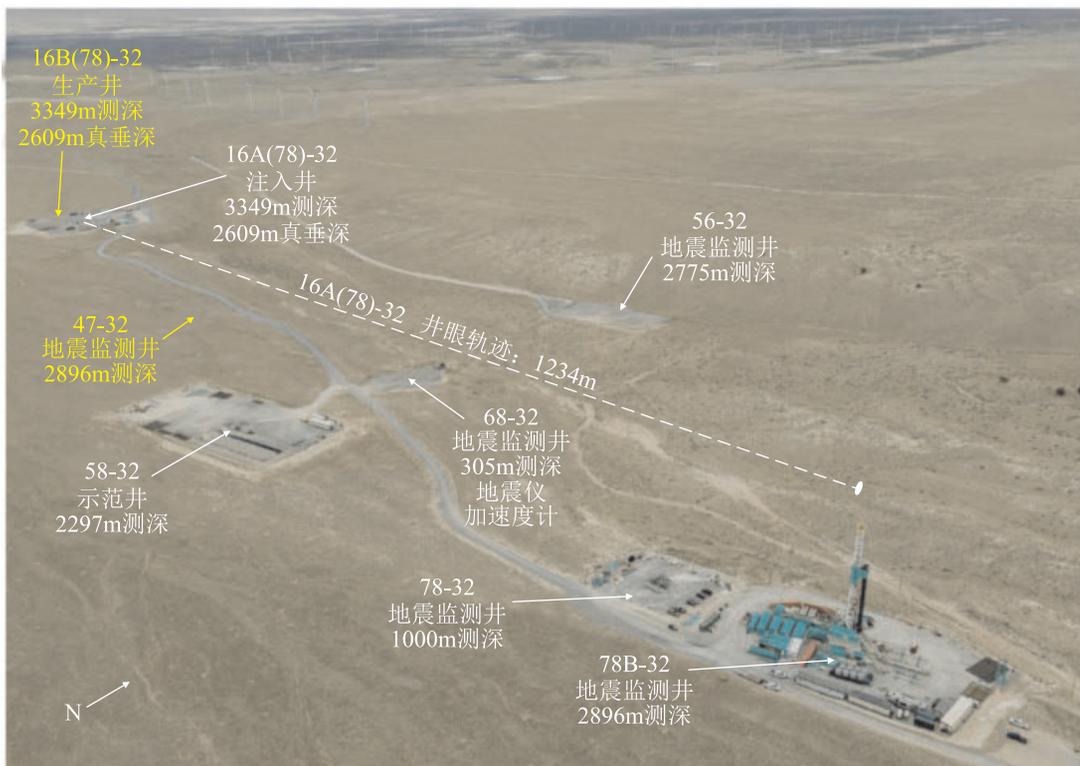
4 总结

4.1 科研工程实践总结

美国 FORGE 计划犹他州项目从科学研究与

技术开发的角度,主要是为了确定控制 EGS 成功建造的关键机理并开展相关研究以深入认识这些机理,通过技术开发和改进建立并维护基岩内相对封闭且具有导流能力的裂隙网络,以及设计和测试可用于建造大规模、具有经济效益且可持续的地下换热系统的可复制模式。截至2023年3月,犹他州项目从已开展的诸多方面工作中获得了广泛且深入的科学研究与工程实践认识,主要体现在以下三个方面。

1) 高温硬岩钻井^[35-37]:利用标准的油气钻井优化技术,例如实时机械比能的地表监测、钻头 etc 井底钻具组合部件的设计改进等,通过对钻井参数(扭矩、钻压、转速等)的优化,有助于提升钻井性能,如提高机械钻速、增加进尺速率、减少无进尺时间;聚晶金刚石复合片钻头具有提高机械钻



注:已完成钻井用白色文字标记,计划钻井用黄色文字标记,白色虚线表示16A(78)-32井的井眼轨迹。

图2 犹他州项目已完成钻井和计划钻井的分布图

Fig.2 Distribution of Completed and Planned Wells of the Utah FORGE Project

速的潜力,从而可能通过减少起下钻趟数来显著降低钻井成本;通过泥浆冷却系统对井底钻具组合的有效冷却,使成熟可靠的油气钻井工具能够用于高温硬岩的地热井钻进;减磨剂的有效使用可能会减少钻井泥浆添加剂的用量,从而缓解井下设备的磨损以及提高钻井性能,如减小扭矩、提高机械钻速。

2) **储层建造**:以相对较低的压力和流速可活化处于临界应力状态的裂隙;地层微电阻率扫描成像测井对填绘裂隙分布至关重要;用于刺激改造的层段应经过良好的水泥固结;层间封隔工具(如封隔器和桥塞)必须能够承受 200 °C 以上的高温,是需要优先攻关的关键技术;需要新的技术来实现高强度无裂隙岩体的起裂,起裂后的裂隙扩展和连通将变得容易;可实现多组裂隙的水力连通;裂隙网络的形成是剪胀效应对天然裂隙的活化和少量新裂隙的产生的综合作用。

3) **微震监测**^[38]:现有技术足以监测 EGS 储层建造、运营和维护过程中的微震事件;更深的监测井可探测到更低震级的微震事件,但井下温度的升高反过来会限制传感器的安装深度及使用寿命;检波器串比 DAS 具有更灵敏的微震探测能力,但后者可以部署于严苛的温度和压力条件;至少需要一口监测井来定位微震事件,传感器距离注入深度越近越能提高探测精度;来自地面设备的环境噪声会干扰浅井内的检波器数据,必须采用适当的滤波器处理和识别微震事件,并且必须将浅井布置在距离噪声来源更远处;浅井可监测的储层体积大于刺激改造测试所预期的储层体积,从而为识别潜在的未预见流动通道提供信息。

4.2 组织管理经验总结

2017年,青海省水文地质工程地质环境地质调查院在青海共和盆地地下 3705 m 深度处钻获

236 °C 高温干热岩体。2019年,中国地质调查局启动青海共和盆地干热岩勘查试采工程,在干热岩深部热源成因建模、高温硬岩定向钻完井、规模化储层刺激改造、储层表征与产能评价、储层连通和流动循环、热电高效转换、监测、地质风险评估等领域取得重要技术突破,初步建立了干热岩勘查开发全流程技术体系,并于 2021年 11月实现干热岩试采首次试验性发电^[4,39]。尽管如此,相比于法国、美国、德国、日本等国,我国在干热岩勘查开发相关领域的发展仍存在一定差距,建议我国加强对干热岩勘查开发工作的统筹规划和部署,借鉴参考美国能源部在组织该国地热和油气行业相关高校、企业、科研机构等实施 FORGE 计划犹他州项目过程中在部署实施、场地表征和设施建设、关键技术装备突破、数据共享等方面取得的组织管理经验:

1) **统一的规划部署**。2019年 2月,美国科技政策研究所受美国能源部地热技术办公室委托发布了《FORGE 计划技术路线图》,旨在为犹他州项目场地第三阶段为期 5年的研发工作提出建议,即围绕储层建造规划和设计、压裂控制、储层管理三大重点研究领域开展 8个方面的核心研发工作:开发新的井身结构和井场设计,以优化储层建造和运营;开发新的或改进现有的压裂技术和工艺,以适用于 EGS;根据储层条件优化压裂工艺的设计;开发替代性注入实践和工艺;认识不同类型的刺激改造方法对所形成裂隙系统的影响;开发可在高温高压刺激改造过程中成功进行层间封隔的方法;预测和监测整个生命周期内裂隙系统的变化;建立可破坏储层开发的不理想裂隙网络或储层渗透性的其他非预期变化的工程解决方案。

2) **严密的组织管理体系**。随着项目的推进,形成了美国能源部地热技术办公室对总体目标进

行把控,相关领域权威专家组成的科学与技术分析团队为项目目标制定及具体部署实施提供评估、建议和意见,以及犹他大学能源与地球科学研究院及美国油气和地热行业相关企业、高校和国家实验室共同组成的项目管理团队具体规划、推进和监督项目进展等为一体的组织管理模式,既保证项目严格符合美国能源部实现高温干热岩成为美国未来发电可供能源来源的发展目标,也可根据项目实施过程中对重点关注领域的调整和补充引入新的权威专家和机构参与。

3) **深入系统的场地地质条件表征。**对地下岩性、构造、地温、力学、化学和水力学等特征及已有断层和裂隙带的精细刻画,有助于井身结构和井场设计以及刺激改造作业的有效实施。犹他州项目通过地质、地球物理、地球化学、地质力学和钻探调查,进一步明确和提升了项目场地地质特征的认识,并显著降低了与岩性、地温、渗透率、应力大小和方向有关的潜在不确定性。

4) **全面的基础设施建设。**包括道路、钻井平台、监测网络、电力、通信等,推动可用于开发、测试和优化 EGS 技术方法和设备的现场实验室的建设。

5) **持续的环境监测。**地震监测是目前用于分析研究储层建造和循环测试导致的储层演化、裂隙形成和诱发地震的主要手段。为了更全面、更准确地监测天然地震和诱发地震,犹他州项目建立的地震监测网络包括了临时地面地震仪阵列、地面和井下 DAS 电缆、半径为 3 km 的浅井宽频带地震仪网络、以及地面振动传感器。此外,重复的重力、GPS、InSAR 和大地电磁测量可以获取场地的基线数据,以用于评估刺激改造和流动测试产生的空间和时间变化,其中重力测量可用于探测流体抽出或注入引起的岩体质量变化^[40]; GPS 和

InSAR 测量可用于监测地面变形;大地电磁测量可用于测量地质体之间的电导率差异,也可用于监测与流体流入相关的电导率瞬时变化^[41,42]。

6) **先进钻井工具和技术的应用。**犹他州项目的钻井作业结果表明,改进工具和技术对于控制流体流动以及井筒形状、井壁光滑度和钻井偏斜等方面至关重要,应重点关注以下四方面的改进:①优化井底钻具组合的设计和振动测量方法来降低钻头的振动;②采用高温旋转导向系统和固定角泥浆马达控制钻井偏斜;③通过钻头优化设计来提高钻头寿命、加快钻进速度和保持井壁光滑度;④提高岩心层段的取心率。

7) **重视场地/储层模拟的重要作用。**犹他州项目模拟研究工作的主要目标包括:①通过场地地质表征,利用三维模型精细刻画特征参数的空间分布和复杂边界条件;②更好地认识应力场空间分布及其对储层建造的可能影响;③建立场地地下特征参数的基线数据,保证模拟结果的一致性和可比较性。项目已开展的相关工作表明,对储层特征和开发性能的预测和验证对确保生产运营的完整性至关重要,不断更新且对外共享的模型参数可有效促进相关机构的参与及场地/储层模拟工作的发展^[43,44]。

8) **经费保障下的外部研发机构汇聚。**根据美国能源部的要求,犹他州项目的一半经费必须用于对外招标的研究课题。犹他州项目分别于 2020 年 4 月和 2022 年 8 月启动了第一轮和第二轮外部研发课题招标,涉及的研究方向均是围绕项目部署实施过程中重点关注的领域设立的,涵盖储层表征、建造和生产可持续性。

9) **积极的数据资料开放共享和成果发布。**据不完全统计,截至 2022 年 7 月,犹他州项目向美国能源部地热数据资料库上传了超过 200 吉字节

的数据资料,下载次数超过 2.7 万次。另外,相关参与机构依托项目工作成果发表论文 40 篇,在相关学术会议上进行报告 80 次。

参考文献

- [1] 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 Tianfu, YUAN Yilong, JIANG Zhenjiao, 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.)
- [2] 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 Tianfu, ZHANG Wei. Enhanced Geothermal Systems: International Developments and China's prospects [J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(1): 38-44.)
- [3] 许天福,胡子旭,李胜涛,等. 增强型地热系统:国际研究进展与我国研究现状[J]. 地质学报, 2018, 92(9): 1936-1947. (XU Tianfu, HU Zixu, LI Shengtao, et al. 2018. Enhanced Geothermal System: International Progresses and Research Status of China [J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(9): 1936-1947.)
- [4] 文冬光,张二勇,王贵玲,等. 干热岩勘查开发进展及展望[J]. 水文地质工程地质,2023, 50(4): 1-13. (WEN Dongguang, ZHANG Eryong, WANG Guiling, et al. Progress and Prospect of Hot Dry Rock Exploration and Development [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 1-13.)
- [5] U.S. Department of Energy. FORGE [EB/OL]. [2023-04-20]. <https://www.energy.gov/eere/geothermal/forge>.
- [6] 亢方超,唐春安,李迎春,等. 增强地热系统研究现状:挑战与机遇[J]. 工程科学学报, 2022, 44(10): 1767-1777. (KANG Fangchao, TANG Chunan, LI Yingchun, et al. Challenges and Opportunities of Enhanced Geothermal Systems: A Review [J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(10): 1767-1777.)
- [7] 解经宇,王丹,李宁,等. 干热岩压裂建造人工热储发展现状及建议[J]. 地质科技通报,2022, 41(3): 321-329. (XIE Jingyu, WANG Dan, LI Ning, et al. Development Status and Suggestions of Hot Dry Rock Hydraulic Fracturing for Building Geothermal Reservoirs [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(3): 321-329.)
- [8] U.S. Department of Energy. FORGE Phases and Sites [EB/OL]. [2023-04-20]. <https://www.energy.gov/eere/geothermal/forge-phases-and-sites>.
- [9] 张森琦,文冬光,许天福,等. 美国干热岩“地热能前沿瞭望台研究计划”与中美典型EGS场地勘查现状对比[J]. 地学前缘,2019, 26(2): 321-334. (ZHANG Senqi, WEN Dongguang, XU Tianfu, et al. The U.S. Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy Project and Comparison of Typical EGS Site Exploration Status in China and U.S [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(2): 321-334.)
- [10] XING P, DAMJANAC B, RADAKOVIC-GUZINAET Z, et al. Numerical Simulation of Hydraulic Fracturing Stimulation Enhanced Geothermal System Well at Utah Forge Site [C]//American Rock Mechanics Association. The Digital Proceedings of 55th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. [S. l.]: OnePetro, 2021: ARMA-2021-1168.
- [11] Utah FORGE. Management Organization [EB/OL]. [2023-04-20]. <https://utahforge.com/rd/management-organization/>.
- [12] Utah FORGE. Partners [EB/OL].[2023-04-20]. <https://utahforge.com/about/partners/>.
- [13] SIMMONS S F, MOORE J, ALLIS R, et al. An

- Updated Geologic Model for FORGE Utah EGS Laboratory [C]//Stanford University. 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2018: 938-945.
- [14] 张超, 胡圣标, 黄荣华, 等. 干热岩地热资源热源机制研究现状及其对成因机制研究的启示 [J]. 地球物理学进展, 2022, 37(5): 1907-1919. (ZHANG Chao, HU ShengBiao, HUANG RongHua, et al. Research Status of Heat Source Mechanism of the Hot Dry Rock Geothermal Resources and Its Implications to the Studies of Genetic Mechanism [J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(5): 1907-1919.)
- [15] BALAMIR O, RIVAS E, RICKARD W M, et al. Utah FORGE Reservoir: Drilling Results of Deep Characterization and Monitoring Well 58-32 [C]//Stanford University. 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2018: 1749-1755.
- [16] MOORE J, MCLENNAN J, ALLIS R, et al. The Utah Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy (FORGE): An International Laboratory for Enhanced Geothermal System Technology Development [C]//Stanford University. 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2019: 544-555.
- [17] SIMMONS S F, KIRBY S, BARTLEY J, et al. Update on the Geoscientific Understanding of the Utah FORGE Site [C]//Stanford University. 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2019: 1-10.
- [18] HU Z, XU T, MOORE J et al. Investigation of the Effect of Different Injection Schemes on Fracture Network Patterns in Hot Dry Rocks-A Numerical Case Study of the FORGE EGS Site in Utah [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 97: 104346.
- [19] XING P, MCLENNAN J, MOORE J. In-situ Stress Measurements at the Utah Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy (FORGE) Site [J]. Energies, 2020, 13 (21): 5842.
- [20] XING P, WINKLER D, RICHKARD B, et al. Interpretation of In-situ Injection Measurements at the FORGE Site [C]//Stanford University. 45th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2020: 585-602.
- [21] XING P, DAMJANAC B, MOORE J, et al. Flowback Test Analyses at the Utah Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy (FORGE) Site [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55: 3023-3040.
- [22] XING P, DAMJANAC B, RADA KOVIC-GUZINA Z, et al. Numerical Simulation of Injection Tests at Utah FORGE Site [C]//Stanford University. 46th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2021: 220-233.
- [23] PANKOW K, MESIMERI M, MCLEANNA J, et al. Seismic Monitoring at the Utah Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy [C]//Stanford University. 45th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2020: 503-511.
- [24] LELLOUCH A, SCHULTZ R, LINDSEY N J et al. Low-magnitude Seismicity with a Downhole Distributed Acoustic Sensing Array-Examples from the FORGE Geothermal Experiment [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2021, 126(1): e2020JB020462.
- [25] KUMAR D, GHASSEMI A. Multistage Hydraulic Fracturing of EGS with Application to FORGE [C]//Stanford University. 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2019: 274-282.
- [26] FINNILA A, PODGORNEY R. Exploring Hydraulic Fracture Stimulation Patterns in the FORGE

- Reservoir Using Multiple Stochastic DFN Realizations and Variable Stress Conditions [C] // Stanford University. 45th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2020: 433-444.
- [27] KAMALI A, GHASSEMI A, MCLENNAN J, et al. Analysis of FORGE DFIT Considering Hydraulic and Natural Fracture Interactions [C] // Stanford University. 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2019: 489-498.
- [28] FINNILA A, FORBES B, PODGORNEY R. Building and Utilizing a Discrete Fracture Network Model of the FORGE Utah Site [C] // Stanford University. 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2019: 461-472.
- [29] RUTLEDGE J, DYER B, BETHMANN F, et al. Downhole Microseismic Monitoring of Injection Stimulations at the Utah FORGE EGS Site [C] // American Rock Mechanics Association. The Digital Proceedings of 56th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium. [S.l.]: OnePetro. 2022: ARMA-2022-0582.
- [30] WANNAMAKER P E, SIMMONS S F, MILLER J J, et al. Geophysical Activities over the Utah FORGE Site at the Outset of Project Phase 3 [C] // Stanford University. 45th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2020: 556-569.
- [31] U.S. Department of Energy. Geothermal Technologies Office Fiscal Year 2022-2026 Multi-Year Program Plan [EB/OL]. [2023-04-20]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/GTO%20Multi-Year%20Program%20Plan%20FY%202022-2026.pdf>.
- [32] DUPRIEST F, NOYNAERT S. Drilling Practices and Workflows for Geothermal Operations [C] // IADC/SPE. The IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition, Galveston: OnePetro, 2022: SPE-208798-MS.
- [33] MCLENNAN J, ENGLAND K, ROSE P, et al. Stimulation of a High-temperature Granitic Reservoir at the Utah FORGE Site [C] // Society of Petroleum Engineers. The SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition. Woodlands: OnePetro, 2023: SPE-212346-MS.
- [34] Utah FOEGE. Utah Forge Wraps Up a 3-stage Hydraulic Stimulation of Well 16A(78)-32 [EB/OL]. (2022-04-27) [2023-04-20]. <https://utahforge.com/2022/04/27/utah-forge-wraps-up-a-3-stage-hydraulic-stimulation-of-well-16a78-32/>.
- [35] RICKARD W M, MCLEANNAN J, ISLAM N, et al. Mechanical Specific Energy Analysis of the FORGE Utah Well [C] // Stanford University. 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2019: 590-597.
- [36] SUGIURA J, LOPEZ R, BORJAS F, et al. Oil and Gas Optimization Technologies Applied Successfully to Unconventional Geothermal Well Drilling [C] // Society of Petroleum Engineers. The SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dubai: OnePetro, 2021: SPE-205965-MS.
- [37] SAMUEL A, RICKARD W M, BIVAS E, et al. Improvement in Rate of Penetration in FORGE Drilling through Real Time MSE Analysis and Improved PDC Technology [C] // Stanford University. 47th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2022: 1089-1096.
- [38] LELLOUCH A, LINDSEY N J, ELLSWORTH W L, et al. Comparison between Distributed Acoustic Sensing and Geophones: Downhole Microseismic Monitoring of the FORGE Geothermal

- Experiment [J]. *Seismological Research Letters*, 2020, 91(6): 3256-3268.
- [39] ZHANG E, WEN D, WANG G, et al. The First Power Generation Test of Hot Dry Rock Resources Exploration and Production Demonstration Project in the Gonghe Basin, Qinghai Province [J]. *China Geology*, 2022, 5(3): 372-382.
- [40] SOFYAN Y, DAUD Y, KAMAH Y, et al. Microgravity Method to Model Mass Balance in the Kamojang Geothermal Field [J]. *Current Applied Physics*, 2010, 10(2): S108-S112.
- [41] PEACOCK J R, THIEL S, REID P, et al. Magnetotelluric Monitoring of a Fluid Injection: Example from an Enhanced Geothermal System [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L18403.
- [42] PEACOCK J R, THIEL S, GRAHAM S, et al. Time-lapse Magnetotelluric Monitoring of an Enhanced Geothermal System [J]. *Geophysics*, 2013, 78(3): B121-B130.
- [43] PODGORNEY R K, FINNILA A, MCLENNAN J, et al. A Framework for Modeling and Simulation of the Utah FORGE Site [C] // Stanford University. 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2019: 583-589.
- [44] LEE S H, GHASSEMI A. Numerical Simulation of Fluid Circulation in Hydraulically Fractured Utah FORGE Wells [C] // Stanford University. 47th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2022: 268-283.

作者贡献说明

张 炜: 设计研究框架、收集整理资料、撰写文章初稿;

金显鹏: 审阅修改文章;

王海华: 审阅修改文章;

姚树青: 辅助设计研究框架;

邵明娟: 辅助收集整理资料。