

增强型地热系统实验模拟装置研发进展

唐佳伟¹, 李井峰^{1*}, 方杰¹, 刘月阳², 郭强¹, 时俊杰¹, 李杰^{1,3}

1. 北京低碳清洁能源研究院煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室, 北京 102211

2. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083

3. 国家能源集团神东煤炭技术研究院, 榆林 719315

摘要 梳理了国内外增强型地热系统(EGS)模拟实验装置研发进展, 归纳了以高温高压反应釜、岩心夹持类渗流模拟系统、岩石三轴电液伺服控制系统和大尺寸真三轴实验系统为代表的4类模拟装置的功能特点, 分析了不同实验模拟装置适用范围及其对于EGS建设关键技术研究的支撑作用。结合国内外在干热岩资源开发利用工程建设中存在的问题, 分析了EGS模拟实验装置的研发方向, 在现有装置平台的基础上提出了建设大型模块化干热岩开发模拟实验平台的设计思路, 论述了平台装置的系统构成和模块化功能特点, 探讨了热储区形成机理和复杂地质条件下多场耦合作用机制。

关键词 干热岩; 增强型地热系统; 模拟装置; 水力压裂; 真三轴

地热资源是世界各国重点研究开发的可再生能源, 高温地热资源主要包括水热型和干热岩型。干热岩(hot-dry-rock, HDR)地热资源是指埋深较浅、温度较高、有开发经济价值的热岩体, 干热岩普遍埋藏于距地表3~10 km的深处, 温度范围在150~650℃。干热岩开发又称增强型地热系统(enhanced geothermal system, EGS), 即通过水力压裂等方式在地下低孔、低渗的高温岩体中形成储层,

并从中开采热能用于发电、取暖、强化石油开采等, 是国际社会公认的高效低碳清洁能源^[1]。因此, 在以“碳达峰、碳中和”为背景, 开发清洁高效、安全环保的干热岩地热资源已成为世界各国重点研究方向。

干热岩热能开发始于20世纪70年代, 至今全球共实施了40余个干热岩开发项目, 主要来自美国、德国、意大利和瑞士等国家^[2]。中国干热岩勘

收稿日期: 2024-03-27; 修回日期: 2024-05-12

基金项目: 国家能源集团科技项目(GJNY-23-84)

作者简介: 唐佳伟, 高级工程师, 研究方向为深部地热能开发与模拟, 电子信箱: 20062356@ceic.com; 李井峰(通信作者), 教授级高级工程师, 研究方向为深部能源开发与利用, 电子信箱: 10000439@ceic.com

引用格式: 唐佳伟, 李井峰, 方杰, 等. 增强型地热系统实验模拟装置研发进展[J]. 科技导报, 2024, 42(15): 69-81;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.03.01204

查开发研究工作起步较晚,1993年,中国国家地震局地壳应力研究所在北京市房山区首次开展干热岩发电的相关实验探究。截至2012年,由吉林大学、中国科学院广州能源研究所等单位承担的国家“863计划”项目“干热岩热能开发与综合利用关键技术研究”,正式开启EGS地热能开发的研究热潮,为中国开展EGS应用研究奠定坚实的工作基础和技术支撑^[3]。目前,EGS应用过程中涉及诸多关键科学技术问题,如地热资源评价方法、压裂技术、地热介质的换热特性、地下高温岩体多场耦合机制及发电系统高效利用等仍需进一步研究完善^[4]。由于EGS建设工程耗时长、投资与风险大,因此,开展实验室EGS模拟开发实验,为示范工程设计提供理论及技术基础尤为必要。美国科罗拉多采矿学院早在1979年便率先开发了一套大尺寸可用于压裂与换热研究的实验装置,可对边长约200 mm立方体样品进行常温条件下的水力压裂实验^[5]。2010年,德国亥姆霍兹(Helmholtz)国家研究中心针对干热岩专门开发了伺服三轴实验机系统,可对岩石试样和混凝土试样进行水力压裂实验以分析致裂效应^[6]。近年来,随着中国能源结构转型与政策导向,众多科研及企事业单位针对地热能开发利用开展大量研究,围绕压裂模拟、换热模拟和裂隙渗流模拟规律等研发多类型的实验模拟装置,取得一系列成果^[7]。

本文阐明EGS地热能模拟开发与利用的研究目标,梳理国内外关于干热岩开发与利用模拟装置的研究现状,总结装置类型、结构特点及服务功能,并针对实际工程面临的主要矛盾提出模拟装置的改进方向与发展建议。

1 研究目标

目前,在干热岩地热能开发技术方面还存在着诸多问题亟待解决,如图1所示。其中,资源靶区定位技术和发电系统高效利用技术与工程实际及发电装备应用优化紧密结合,人工压裂技术、示踪监测技术和地热介质换热特性研究是目前实验研究最为关注的技术难点^[8]。大多数工程及实验探究以水作为热载体进行压裂、提热与利用。在EGS开发中,热储规模及储层渗透性是决定热量提取效率的核心因素^[9]。水力压裂作为裂隙延展与储层扩大的重要手段,往往需要不断加大注水压力和流速来实现,这就需要更高的成本投入和技术水平。此外,水在高温高压下会成为溶解岩石矿物质的强溶剂,与储层岩石发生强烈的溶解和沉淀作用,进而改变储层裂隙的渗透率及流体物化性质,影响换热效率。在EGS开发过程中,裂隙岩体热—流—固—化学(T-H-M-C)的多场耦合作用中水力压裂与剪切机制异常复杂,已成为储层热提取效率提升的关键问题,也是地下工程诱发地震防控的热点和难点问题。针对上述难点问题,许天福等^[10]通过改进的岩石三轴压力实验装置,实现不同压力和温度的三轴压缩实验,可对岩石力学参数进行分析,并建立干热岩的储层水力压裂数值模型,用于分析不同条件下的地热换热特性及效率,同时利用示踪剂对开裂裂隙面发育情况进行示踪研究。窦斌等^[11]以劈裂岩石为研究对象,在实验室开展EGS对流换热及水岩相互影响模拟实验,基于T-H-M-C耦合模拟装置改善国内现有实验设备无法改变温度场及裂

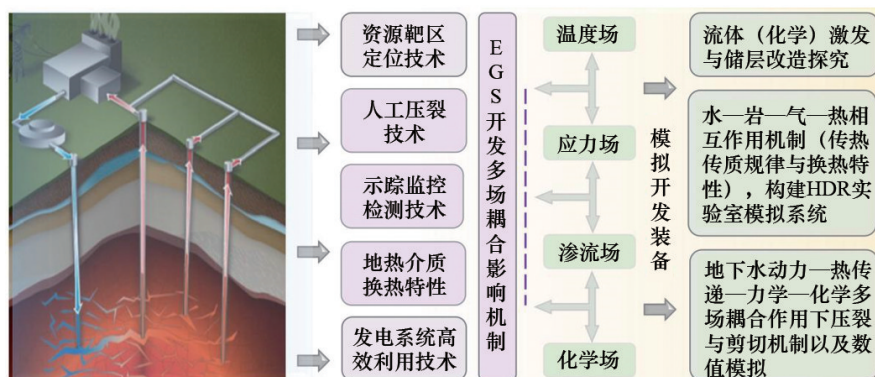


图1 干热岩地热能开发过程关键技术及模拟装置研发目标示意

隙特征的不足。曲占庆等^[12]采用高温水力压裂与渗流模拟实验装置开展室内高温条件下水力压裂实验,明确低温诱导热应力在高温岩石水力压裂中的重要影响与其作用规律,验证温度—渗流—应力—损伤耦合模型的正确性。

EGS不同于水热型地热能,其开采处于地层深处的结晶质干热岩内,开展实际工程面临的风险阻力和不确定性极大。本研究开展针对性的实验室EGS开发模拟实验,以分析开采过程中循环流体力学对深部储层的缝网形态及力学、化学特性的影响规律为基础,厘清EGS开发过程局部对流换热规律,阐明地下水动力—热传递—力学—化学多场耦合相互影响机制,从而解决干热岩地热能实际开发中的瓶颈问题。

2 模拟装置概述

2.1 高温高压反应釜模拟系统

EGS开发过程是以注水井、采(抽)水井及连通裂隙带共同实现冷—热水流循环,进而从深部地热储层中提取热量^[13]。当前,国内外针对干热岩与注入水体的研究从热衷于水岩相互作用后岩体的物理及力学性能变化,到目前更加系统的水岩作用数值模拟研究,包括去白云化作用、阳离子交替吸附以及脱硫酸等水文地球化学作用。由于提热流体在裂隙储层中的循环会打破系统的热和化学平衡,与干热岩体作用会引起不同矿物岩石的沉淀/溶解及流体化学成分变化,进而影响地热能提取效率^[14]。对此,吉林大学许天福团队以高温高压反应釜为核心,设计了一套用于模拟EGS开发过程水岩耦合作用机理解析的实验系统(图2)。该系统以

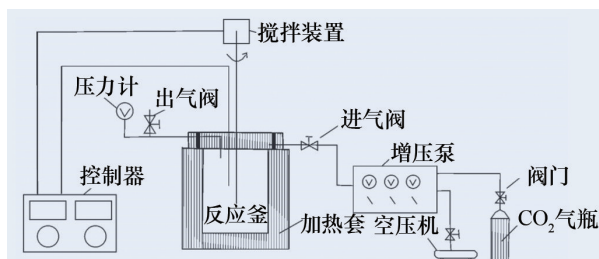


图2 高温高压反应釜模拟EGS开发实验装置

316 L型不锈钢材质的高温高压反应釜为核心,通过加热套和热传感器来控制温度($<150^{\circ}\text{C}$),采用空气加压系统($<8\text{ MPa}$)的方式为岩样提供一个模拟高温高压的环境^[8]。张保健等^[15]以河北马头营区花岗岩型干热岩为研究对象,结合实验室压裂实验及水文地球化学模拟等手段,探究去离子水、海水和地下水作用干热岩后流体的化学组分变化及矿物转移量情况,揭示海水作为循环水体与花岗岩作用时钠长石与钙长石溶解生成大量的高岭石和沸石沉淀,进而降低热储层堵塞的可能性。

流体流动、换热效率和地球化学反应评价是以干热岩为储层的EGS开发与利用过程的重要参数,而正确设计和实施EGS的“储层刺激与改造”措施以提热流体与储层岩体的地球化学反应为基础^[16]。采用超临界 CO_2 代替水作为EGS能源开发的换热工质时不仅能获得地热能,同时由于流动工质在储层内的滤失作用还可实现 CO_2 的地质封存^[17]。自此,以 CO_2 为提热工质的EGS开发利用技术广泛发展。其中,以超临界压力 CO_2 在岩石裂隙和多孔介质内的对流换热规律研究,包括基于超临界 CO_2 -EGS开发模拟实验及场地规模数值模拟是当前研究热点^[18]。二氧化碳羽流地热系统(CO_2 -plume geothermal system, CPGS)通过将超临界 CO_2 注入储层,并与水的驱替过程中被深部高温岩体加热而形成一种空间羽状的分布形态,是一种结合地热能开发与碳存储的有效方式^[19]。日本三菱综合材料公司探究花岗岩闪长岩在高温下与 CO_2 -水的室内化学反应,描述了 CO_2 促进次生碳酸盐矿物的沉淀过程。石岩等^[20]基于反应釜系统(图2)进一步改进,将工作温度和压力提升至 350°C 和 30 MPa ,配备恒温恒压控制系统探究水—岩— CO_2 相互作用机制,并基于多相流、多组分非等温溶质运移反应模拟软件ToughReact建立“超临界 CO_2 -咸水-岩石”三相共存的封闭系统概念模型。结果进一步表明流体中的 CO_2 使深部咸水的pH值降低,导致周围岩体产生溶解和沉淀,从而显著改变系统的提热率。

2.2 岩心夹持器类渗流模拟系统

目前的研究表明,在以水为流体的EGS实施工程中,随着激发与压裂过程的深入,生产井/注入井

与人工地热储层裂隙网络的水力联系会逐步降低, 不仅导致换热效率低, 进而无法满足地面热能需求, 而且会导致 20% 左右的流体(水)损失^[21]。此外, 水作为工作流体时, 受地质地层构造影响较大, 会发生地层矿物溶解、设备腐蚀结垢现象, 这也是目前诸多研究将流体转向以超临界 CO₂ 和液氮为压裂液的原因之一。相较于水, CO₂ 在适宜的温度和压力条件下具备更好的流体力学和热力学特性。然而, CO₂ 的低比热容同样存在着提热效率低的缺点, 采用高温高压反应釜类系统无法开展多参数条件下渗流特性与换热模拟研究。因此, 以岩心夹持器类为核心搭建的 EGS 开发与利用模拟实验系统被广泛研究。

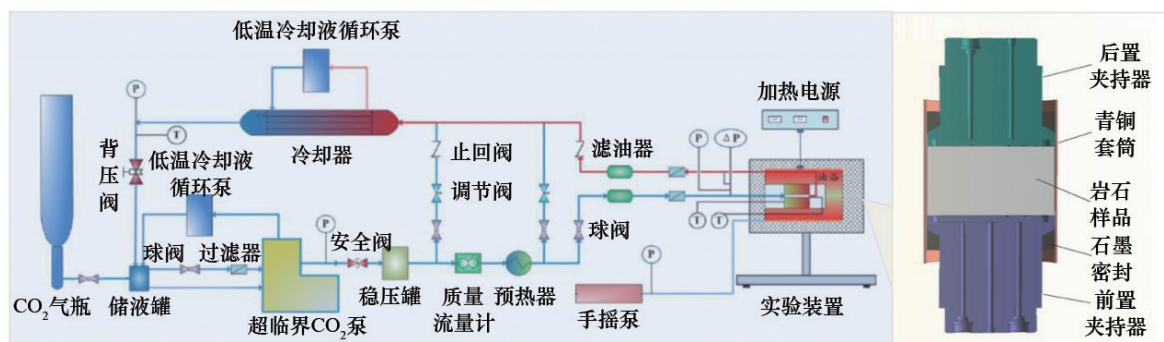
岩心夹持器是实验室测定岩样渗流特性时用来夹持、保护岩样并密封柱面或端面的基本装置, 根据结构可划分为哈斯勒型岩心夹持器、二/三轴向岩心夹持器和带测压孔的岩心夹持器这 3 类^[22-23]。在干热岩模拟开发实验系统中, 辅以渗透压力系统、电动/手动围压系统和数据采集与记录系统组成基本的模拟开发装置, 除了用于探究不同流体注采换热效率、化学刺激对储层改造规律的研究外, 还可用于模拟 EGS 热应力致裂机理及储层裂隙发育规律识别与模拟研究等。腾毅^[24]以岩心夹持器改造的高温高压渗流实验系统为核心, 分别开展高温岩体注 CO₂ 采热模拟实验、高温岩体注水汽采热模拟实验以及干热岩体水汽交替注入采热模拟实验研究。该装置通过配备三轴渗流室、增压泵、预热器、高压储气罐、冷凝器等核心装备, 与数控采

集系统相连, 温度最高达 300℃, 充分模拟高温高压环境下不同流体的渗流采热效率。根据实验结果, 相同围压条件下, 注水工况相比注入 CO₂ 的采热效率更高, 而在更高的温度(>250℃)时, 注入 CO₂ 的采热效率才会高于注水实验^[24]。为进一步探究超临界压力 CO₂ 在岩石裂隙和多孔介质内的对流换热效率, 张乐等^[17]改装搭建超临界 CO₂ 在花岗岩岩石裂隙内对流换热实验系统, 系统配有气瓶、储油罐、泵入装置、稳压罐、冷却塔以及高温高压模拟装置(图 3(a))。其中, 夹持器(图 3(b))浸没于油浴内, 可通过旋转夹持器角度实现水平压裂和竖直压裂。油浴(苯甲基硅油)外壁包裹环状加热带(实现最高温度为 280℃), 使其不仅可以作为传热介质, 还可以利用加压泵提供最高 28 MPa 的围压, 以模拟干热岩实际贮存条件。实验不仅获得边界条件下光滑裂隙内超临界 CO₂ 层流流动的局部换热规律, 更是基于此提出干热岩裂隙储热流体与高温岩体的对流换热数学模型, 为局部非热平衡模型的应用提供支撑。

基于岩心夹持器类渗流模拟系统可开展微观损伤力学和渗流模拟等实验, 探究热应力与注入流体的相互作用关系及裂隙发育规律, 揭示裂隙渗流传热机理, 构建温度—渗流—应力—损伤耦合模型, 以探究不同流体注采井网的最佳采热效果^[23]。

2.3 岩石三轴伺服控制实验系统

针对干热岩与增强型地热系统的研究, 岩石力学方面的研究历来都是重点之一。干热岩储层的力学行为无论是在储层改造方面, 还是在后续的地



(a) 实验系统示意

(b) 岩芯夹持器示意

图3 超临界压力 CO₂ 在裂隙内对流换热模拟装置

热系统可持续换热方面都起到决定性的作用。因此,在进行地热系统相关的研究中,明确干热岩储层岩石的力学性质与应力变形行为是得到稳定可靠研究结果的前提,也是开展后续干热岩地热开发的基础^[25-26]。干热岩储层特性和赋存状态具有“高温、高压和高应力”的特征,而岩芯夹持器类实验模拟装置在高应力的精准调控上难以满足条件。随着技术水平的进一步发展,为了研究岩石在发生屈服后的力学行为,在实验设备上普遍配备伺服系统以控制在压缩实验过程中对岩石的破坏。结合干热岩的高温特征,也有很多研究团队在伺服实验系统的基础上添加加热设施,使实验系统可以针对高温条件下的岩石力学行为进行研究,进而为干热岩储层的开发和增强型地热系统的建设提供理论基础和参考依据^[27]。

对于单轴实验系统,在其上的大部分研究都是进行岩石力学参数的测试,实验装置主要是利用轴向的传压杆对样品进行单轴压缩,径向不设置加压设施。单轴压缩实验装置主要是在不同条件下对岩石进行单轴压缩实验和单轴拉伸实验,根据实验结果得到岩石样品的抗压强度和抗拉强度。此外,单轴实验系统也可配合应变监测系统测量应力与应变的关系用于分析岩石的物理力学性质。王帅等^[28]利用 YSW-600 微机控制电液伺服万能实验机对经过酸液处理后尺寸为 50 mm×50 mm×100 mm 的方形花岗岩样品进行单轴压缩、直剪和巴西劈裂实验,研究不同酸液配比和不同浸泡时间对花岗岩力学强度的影响规律。实验根据经过酸液处理花岗岩样品的强度分析结果,确定对花岗岩储层进行酸化压裂有利的酸液成分,为花岗岩储层的化学压裂提供有效的参考。郜保平团队^[29]利用 YAW-1000 型微机控制电液伺服万能实验机对 600℃ 条件下的花岗岩在经过热冲击后的力学性能进行研究。实验中首先将加热到高温的岩石经过 2 h 的保温,在保证样品内外温度均衡后分别用 60℃ 和 10℃ 的水对样品进行热冲击,然后参考国际岩石力学学会 (ISRM) 实验标准对冲击后的岩石样品进行单轴压缩和拉伸实验以测试其抗压和抗拉强度。在测试过程中,利用实验系统配备的静态应变监测

系统和声发射系统同步对岩石样品的应变和声发射数据进行监测。实验通过样品在拉压过程中的应力应变关系、峰值应变、抗拉和抗压强度分析岩石样品的破坏形式以及热刺激对岩石的劣化机制,为水力压裂过程中储层的物性变化与渗透性模型构建提供实验依据^[29-30]。

对于三轴的实验系统,其研究内容比较丰富,但大多是建立在常规三轴系统上的实验。与单轴系统不同的是,常规三轴实验系统不仅可以用于测试岩石的力学参数,同时也可以利用改造后的实验系统对干热岩开发中不同过程(如水力压裂、取热循环过程等)中的岩石力学条件进行模拟研究。靳佩桦等^[31]采用太原理工大学自主研发的多功能高温岩石三轴伺服控制渗透实验机进行花岗岩中单裂隙的渗透性能实验。实验在 500℃ 的高温中,渗透压力和温度对单裂隙花岗岩样品的裂隙开度和渗透率变化规律进行研究。该套系统所需的样品为圆柱形岩石,直径为 50 mm,长度为 100 mm。实验机可以施加 25 MPa 的围压和 25 MPa 的轴压。该系统由液压加载系统、高温三轴压力室、温控加热系统以及渗流测试系统、水温测试系统组成。该套系统经过改装可以对样品在实验过程中进行加热,最高可以在 600℃ 的条件下对样品进行常规三轴压缩,并实时进行渗透测试。该套系统除可进行干热岩的热一流一力学耦合实验,也广泛地应用在高温三轴应力作用下的岩石蠕变和煤的热解等多种实验中。装置结构如图 4 所示。

表 1 总结目前研究中所用的岩石力学实验装置情况,典型设备包括 YSW-600 微机控制电液伺服万能实验机、YAW-1000 微机控制电液伺服万能实验机及 TAW-2000 型伺服控制三轴实验仪等装置。在单/三轴压缩实验、力学实验和渗流模拟等方面开展大量研究,可以发现,基于电液伺服岩石力学实验机在 EGS 模拟开发方面发挥重要的作用。

2.4 大尺寸真三轴实验系统

地下岩石受到覆盖层、三维应力-应变相互作用、构造活动及其他地质过程产生应力的综合影响。这 3 个主应力在岩石的力学行为中十分重要,且一般情况下 3 个主应力不会相等^[36-37]。前文提到

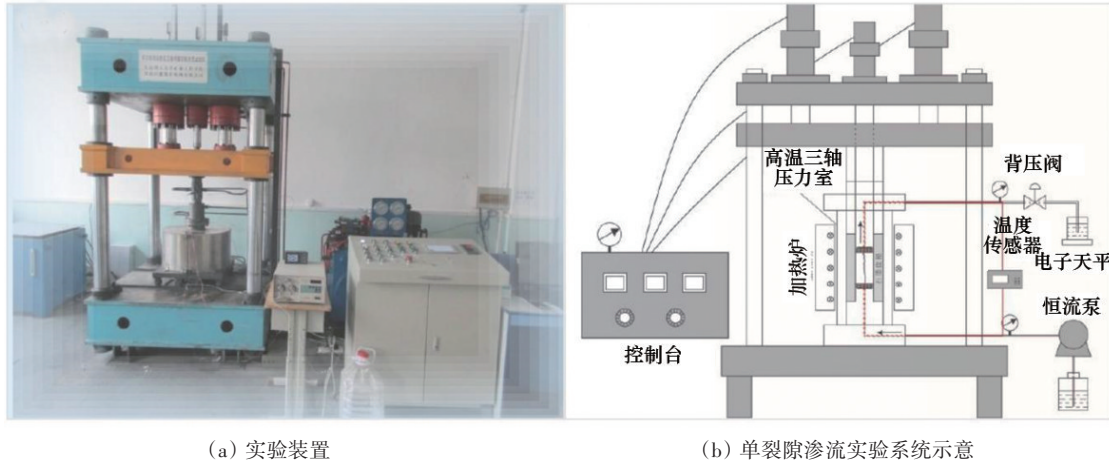


图4 多功能高温岩石三轴伺服控制渗透实验机

表1 不同类型的岩石力学实验装置功能参数对比

名称	试样尺寸	装置参数(荷载/温度)	装置功能
YSW-600 微机控制电液伺服万能试验机 ^[28]	50 mm×50 mm ×100 mm (长方体样品)	最大加载/kN 600	单轴压缩;配合角模的直剪实验
YAW-1000 微机控制电液伺服万能试验机 ^[29]	φ50 mm×100 mm (ISRM 实验标准)	最大加载/kN 1000	单轴压缩、配合角模的直剪实验;配备 CM1A 型静态应变仪,可自动进行数据采集和分析;配备 PCI-2 声发射仪,可对全过程进行声发射监测
微机控制电液伺服试验机 ^[30]	φ50 mm×100 mm (压缩实验)	最大加载/kN 600	单轴压缩;剪切实验;巴西劈裂实验
高温岩石三轴伺服控制渗透实验装置 ^[31]	φ50 mm×100 mm	加热炉功率/kW 5.0 最高加热温度/°C 600 轴压/MPa 25 围压/MPa 25 背压/MPa 5.0	可开展高温单裂隙渗流实验;配备加热系统,可进行高温岩石力学实验;配备三轴压力室渗流系统
20 MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机 ^[32]	φ200 mm×400 mm	轴向压力/MPa 318 最大侧向压力/MPa 250 最高加热温度/°C 600	配备加热系统;配备声发射仪器,可实时采集声发射信号
MTS815 岩石力学测试系统 ^[33]	φ50 mm×100 mm	轴向最大压力/kN 1700 最大围压/MPa 45	配备轴向应变计和径向应变计;配备伺服系统
TAW-2000 型伺服控制三轴实验仪 ^[34]	φ50 mm×100 mm	最大轴向压力/kN 2000 最大围压/MPa 100 最大流体压力/MPa 70	高温裂隙渗流-换热实验;配备 YSZ-50 应变仪测试轴向应变和径向应变;配备 PCI-2 声发射监测系统;配备渗流系统
GCTS RTX-4000 高温高压岩石三轴实验系统 ^[35]	φ50 mm×100 mm	最大轴向压力/kN 4000 最大围压/MPa 140 最大流体压力/MPa 140	配备 LVDT 传感器测量轴向和径向变形;配备 micro-II 型声发射监测设备

的常规三轴实验装置,一般围压所在的2个方向上的主应力是相等的,虽然可以在一定程度上满足三轴应力状态下的岩石力学实验要求,但无法真正模拟地层中真实的三轴应力状态^[38]。因此,需要开发真三轴设备来模拟3个主应力具有不同大小的环境,通过大尺寸真三轴实验装置可以较好地研究水力压裂裂缝起裂与扩展形态发育规律和多场耦合模拟等研究^[39]。

相较于油气储层中的水力压裂,干热岩储层压裂更为复杂。Frash等^[40]开发一种大尺寸真三轴装置(尺寸为300 mm×300 mm×300 mm),由真三轴加热设备、钻孔设备、液压系统和仪器系统组成(图

5(a))。该装置能够实现高温环境下岩石样品的多井钻井和水力压裂的实验室模拟测试,通过此大尺寸真三轴装置模拟完整花岗岩标本中产生的功能二元EGS储层。模拟条件包括储层条件下的钻井、水力压裂、声发射导向生产井眼钻井、储层流动分析、再增产以及水力脉冲增产实验。生成的数据包括压力、流速、温度、声发射、应变和产生的裂缝范围图,同时还测量岩石的补充材料参数,进一步补充完善实验室规模的EGS油藏数据集。Yin等^[41]采用岩石力学试验系统(MTS)通用材料测试仪进行巴西分裂实验。水力压裂实验采用中南大学研制的三轴电液伺服实验系统,实现高温地下真三轴应

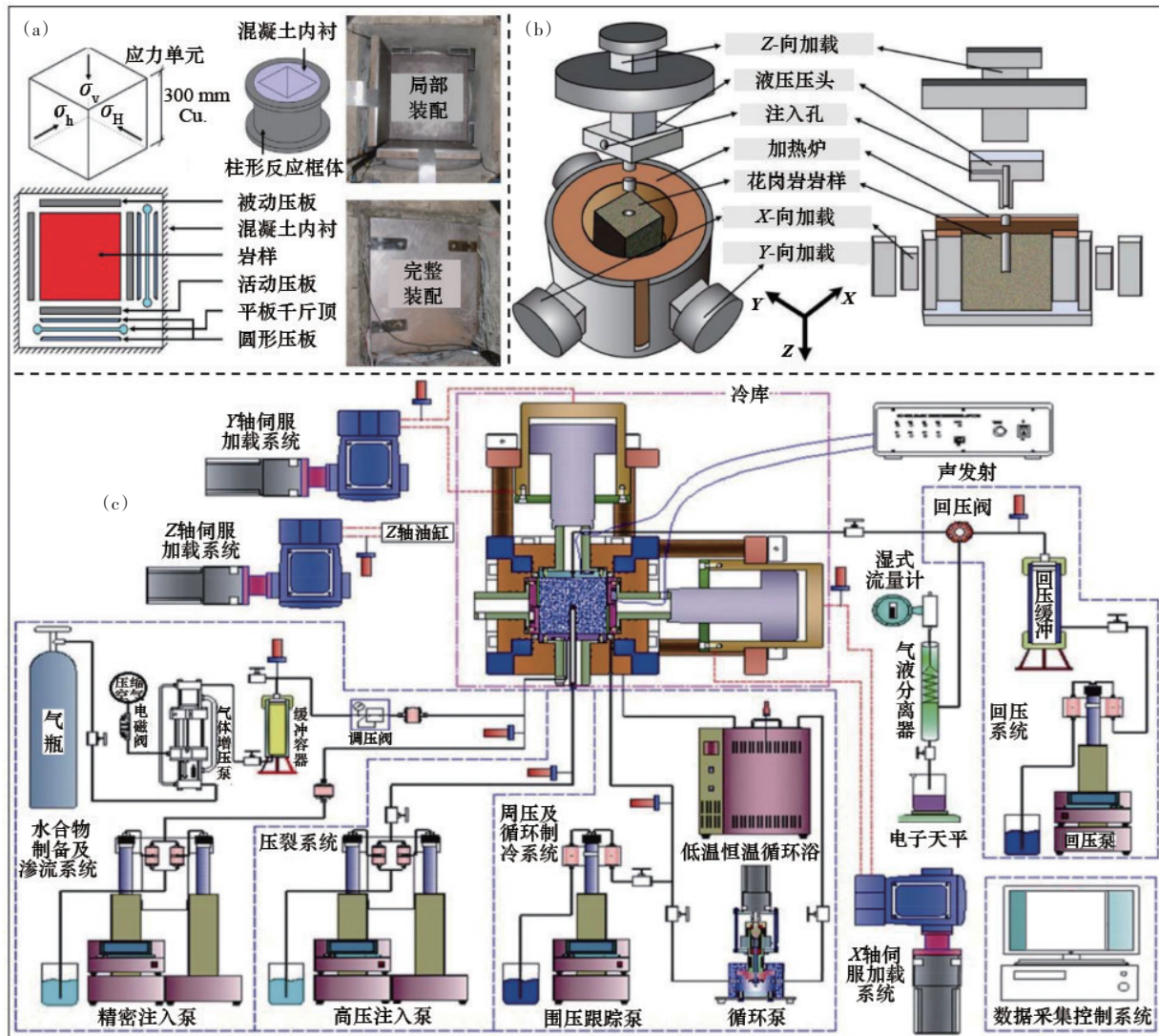


图5 真三轴实验系统内部结构(a)和真三轴应力环境下高温水力压裂实验系统(b), 以及大尺寸真三轴储层改造实验装置结构简图(c)

力环境下的水力压裂实验,从地质和工程角度分析影响HDR水力压裂的温度依赖因素(图5(b))。实验结果表明,在变温度参数条件下,热损伤和热冲击导致储层起爆压力随温度升高而降低。随着温度的升高,软化程度增大。压裂后,HDR初始裂缝在热冲击和残余压力的作用下继续扩展,裂缝扩展规模随着温度的升高而增大。

综合目前研究可获知,国外有代表性的大尺寸真三轴压裂改造模拟实验装置包括:英国斯伦贝谢剑桥研究中心的全尺寸钻井模拟实验装置(轴压:207 MPa;围压:138 MPa;最高温度:315℃)、英国斯伦贝谢剑桥研究中心全尺寸钻井模拟实验装置(轴压:17.9 MPa;围压:103.5 MPa;最高温度:200℃)、日本通产省资源环境技术综合研究所钻井模拟实验装置(轴压:135 MPa;围压:100 MPa;最高温度:150℃)。国内代表团队主要有:东北大学、中国矿业大学、太原理工大学、中国石油大学、中国科学院广州能源研究所及中国科学院武汉岩土力学研究所等^[42]。国内产品基本为自制设备,可根据需求自主设计,售价及后期维护费相对国外产品较低,但当前产品功能及拓展性方面仍有待提高。基于此,Zhang等^[43]设计了多功能大尺寸真三轴储层改造实验装置,创新性地实现针对不同尺寸岩心、不同温度、围压、孔压和不同流量的固液两相泵入,以及不同井筒完井工艺条件下的储层改造及渗流模拟实验,可耐压50 MPa,实现传感器测量范围为35~200℃的精确测量。如图5(c)所示,该套系统配备有地应力加载模块、稳压精控模块、压裂与渗流实验模拟模块,并提供主/被动声波结合的声发射检测、温压场和应力应变场检测及压后激光扫描测量等丰富的评价手段。该装置具备功能丰富、操作简便安全、性价比高的突出特点,有助于构建EGS开发与储层改造技术创新实践平台。

3 不同类型装置平台功能及特点

干热岩热能开发利用涉及多学科多层面的科学技术,围绕压裂储层改造和热流循环示踪监控等关键技术,基于EGS模拟实验室装置开展室内实

验对探究高温高压条件下流体压裂、渗流模拟、裂隙系统监测等研究尤为必要。

目前国内外针对EGS开发与利用建立的实验模拟装置依据形式特点与功能分为4大类(图6),第1类为高温高压反应釜类反应系统。该类装置结构简单,便于操控,所需岩样试样较小,常用于水-岩或水-岩-气多相反应过程热储矿物理化性质的变化规律及储层改造影响等研究。高温高压反应釜系统可实现样品封闭条件下的快速升温升压,在不同储层矿物理化性质分析及数值模拟研究方面提供主要基础理论支撑。第2类主要是以岩心夹持器为核心的EGS开发实验模拟系统。相比于反应釜系统,此类装置更为系统化和模块化,一般会配备恒压恒流泵、鼓风机烘箱、冷凝器。岩样尺寸相较反应釜要更大,通过手摇泵实现X、Y、Z 3个方向的围压,模拟干热岩开发实验情景。由于实验尺寸的增加,该类装置更多地可用于热应力与水力压裂的作用机理研究,以及压裂液对储层改造的研究,包括储层刺激、裂隙渗透效果、裂隙发育规律等。

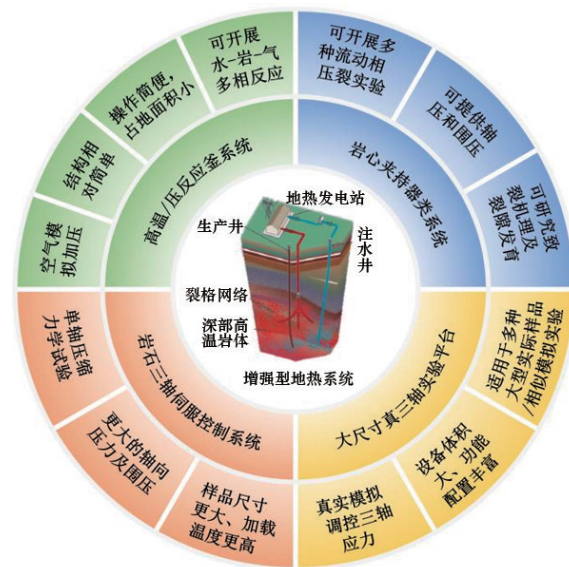


图6 EGS开发实验模拟系统分类及特点

另外2类是以电液伺服三轴控制系统和大尺寸真三轴实验系统为代表的实验模拟系统,也是目前用于研究EGS的功能最全、尺寸最大的大型模拟实验平台。得益于该类装置尺寸较为适宜,配置功能较为齐全,可完全在实验室开展研究,可较为完

整地模拟实现高温岩体注水(气)采热实验,构建高温岩体采热数值模型,以获取最佳的开采模式与参数。装置平台以微机控制电液伺服万能实验机为核心,实现更高的温度和更大试样尺寸的研究。装置配置齐全,具备多功能监测及加载模块,可用于热—流—固—化多场耦合传热特性及储层改造规律研究,相比夹持器类小型反应系统,较大的岩样和高温高压环境可更为贴切地模拟EGS开发过程可能面临的问题,对于实际工程具有鲜明的指导意义。

4 模拟平台拟解决问题及研发方向

随着全球对可再生能源的关注与日俱增,干热岩作为一种清洁、高效、可持续的新能源受到广泛重视。国外研究并实施EGS工程利用较早,早期如美国位于新墨西哥州Fenton Hill的干热岩项目,出现水力联系差,反复压裂无法形成对井系统的问题;英国能源部和欧共体联合资助Camborne矿业学院实施的Rosemanowes项目同样出现水力压裂的裂隙与人工裂缝系统毫不相干的问题^[44-45]。后期包括瑞典的Fjällbacka项目(1984—1994),以及德国的Falkenberg(1978—1983)项目,在吸取美国和英国的经验教训后相继开发较大的EGS项目,诸多的现场实验为干热岩资源开发提供宝贵经验的同时也暴露出目前的主要关键问题,包括:(1)干热岩地质条件复杂,钻井困难,压裂效果差且难以预测;(2)压裂造储过程复杂,裂隙发育受地应力、热应力、流体压力及类型等多因素影响;(3)多场耦合条件下传热效率、储层演变规律及注采参数优化与调控关键方法^[45]。干热岩开发是一个系统工程,上述关键问题涵盖干热岩开发过程其自身的理化特性变化规律以及开采条件与技术的优化与调控2方面,尤其是在压裂造储、储层裂隙缝网发育、流动取热换热机制方面需要深入挖掘,这也是目前国内外科院所致力于解决的科学难点。目前,相关的EGS实验模拟装置在干热岩资源评估及开发利用方面发挥着重要作用。经过长期发展,干热岩实验模拟装置呈现出以下发展趋势。

1) 实验装置不断向大型化方向发展。一方

面,实验样品尺寸的不断增大,以压裂实验为例,更大的试样尺寸可以确保裂缝有较为充足的有效扩展范围,从而增大裂缝扩展的时间和空间尺度,避免注入压力较快地扩散到实验边界从而影响裂缝持续扩展过程。同时,大尺寸的相似试样给几何相似比尺的设定提供更大的空间,能够实现从局部的机理研究扩大到区域化的物理场研究,从而更好地指导实际工程设计。相较于小尺寸试样,大尺寸试样可以布设更多的监测点位来监测岩石变形、流体分布、渗流传热等相关过程,从而在压裂或注采物理模拟过程获得更全面、更精确的实验数据。另一方面,随着研究储层深度的不断增大,实验过程的模拟地应力也需进一步加大,从而更贴近实际热储层条件,这意味着需要更大的加载油缸和反力框架,以使实验装置所需的整体体积空间增大。大型装置同时可以测试更多参数,获得更全面的岩石力学、渗流变形等综合信息。总之,大尺寸真三轴类实验模拟系统可配置高精度、高稳定性的流体注入控制与采集系统,开发能模拟地下非均质特点的相关材料及设备,以深入解析实验过程水—热—力—化耦合作用机制,阐明储层缝网发育规律与流体注采换热效率,这对指导实际工程设计具有重要意义。

2) 实验装置智能化水平不断提升。随着实验样品尺寸的增大,标准样品的制作、加工以及装卸等过程给单一的人工操作带来较大的挑战,必须辅以自动化程度较高的机械化和智能化手段,尤其是近些年计算机算力、传感器监测、智能3D打印等领域的快速发展,越来越多的智能化控制、多数据监测、数字孪生和数据自动处理等手段被用于物理模拟实验,能够提升效率的同时亦可保证实验的可靠性。通过智能化的手段自动收集和处理大量实验数据并输出直观结果,有利于对多物理场耦合作用开展更深入的研究。

3) 实验装置平台向模块化、组合式发展。物理模拟实验平台的大型化必然会带来更高的研发和制作成本,结构固定、功能单一化的实验装置平台在实际使用过程中局限性较大。因此,目前的大型实验平台多采用模块化、组合式的方式,将共性部分进行统一考虑和设计,通过将不同功能的实验

模块集成在一个实验台上,可以灵活组合并进行综合测试。不仅如此,模拟装置模块化设计也会带动专项部件的发展,如便携式的岩石传热参数测定仪、应力测量仪等,均可以直接应用于实际钻井现场,进行井下岩石热物性参数的在线测定,为大型实验平台提供辅助测试或校准核对等帮助。

随着技术进步,干热岩实验模拟装置平台必将向更加精细化、专业化、智能化的方向发展,为中国干热岩资源开发提供更加直接有力的技术支撑。与此同时,除了在装置平台方面挖掘完善之外,开发能模拟地下非均质、非各向同性特点的实验材料对模拟评价干热岩规模化开发同样具有重要意义。由于地层存在裂缝、层间不均质接触等复杂情况,其热传导和渗流行为具有明显的非均质、非各向同性特征。而现有设备多为理想均质各向同性模型,需要研发设置人工界面、裂隙的岩心样品载荷设备,或组装多层不同岩心的堆积实验材料,开发集成热、力、化多功能的新型实验装置,可使实验条件贴近实际复杂地质情况的模拟,进而获得更丰富可靠的实验数据,大幅提升研究支撑工程的能力。

设备不断地向大型化发展,主要面向的是干热岩地热资源开采过程中的钻井建井、压裂造储发育规律和注采换热效率与稳定性的关键科学问题,大型模拟实验平台应聚焦于高温—高应力—高致密性—天然裂缝发育等储层环境的构建、高温钻井—压裂造储—循环注采一体化全流程模拟、布井方位及压裂注采工艺参数的实现、高温高压条件下监测及密封方法4个方面进行研究。基于此,笔者所在团队提出了大型模拟装置平台设计思路及功能特点,如图7所示。以现阶段干热岩开发实验装置/平台研究为基础,

聚焦实验平台开发拟解决的关键问题,围绕“高温钻探技术、高温高压模拟材料、深部赋存环境模拟、热储区裂隙演化机理、三场演变精细化监测和实验室内模块化组装及运行”等6个方面,开发大尺寸真三轴的智能化模块化实验平台,实现注采实验、监测分析全过程实验的室内完成。基于上述研究思路,该平台设计功能由5个子系统构成,包括深地相似模拟系统、高温高压压裂系统、热储区采热系统、注水采热模拟系统和数据监测分析系统。以大尺寸岩样相似模拟材料为基础,模拟不同地层条件,开展智能钻井技术创新研究,模拟深地高温高

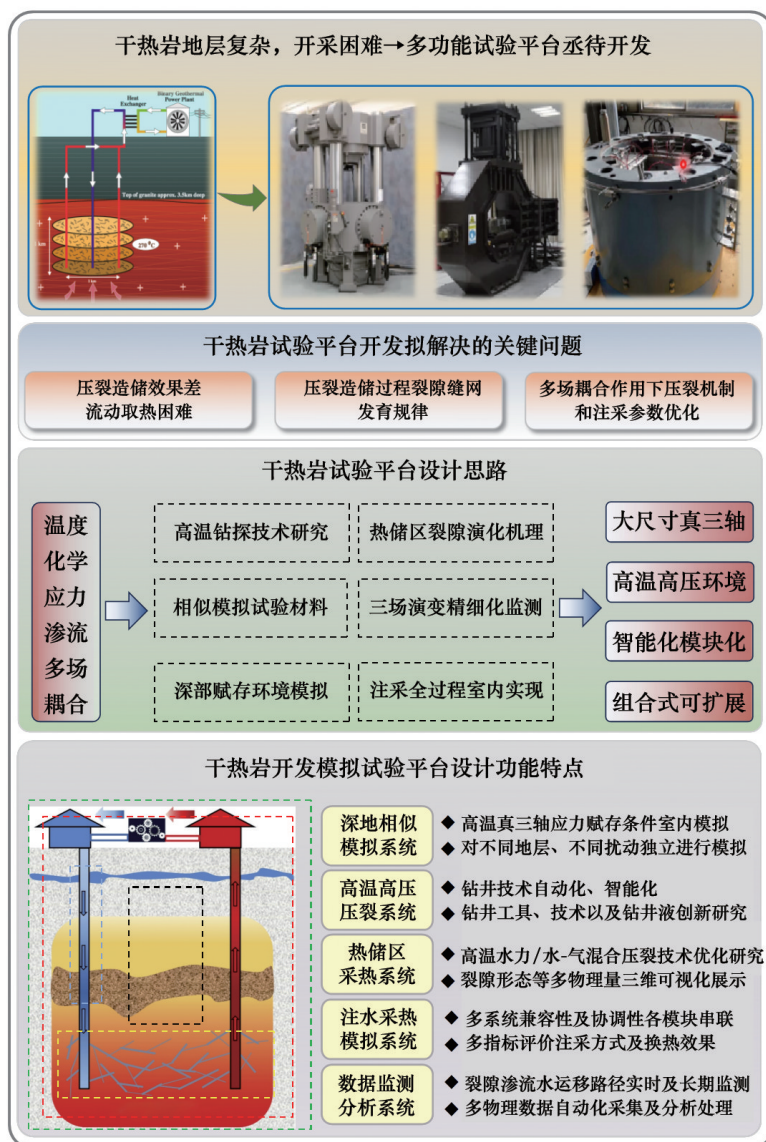


图7 干热岩开发实验模拟平台设计思路

压环境,开展不同压裂液的压裂造储、缝网发育规律研究,基于多传感器构建注采换热的三维可视化展示系统,结合数据自动采集分析系统,获取更详细的力学、热学和水化学等实验数据,从而更加详细地研究热储区形成机理和复杂的热—力—化耦合作用机制。

综上所述,建立一套大尺寸真三轴的模块化、智能化干热岩开发模拟实验平台,除了在提升能量利用效率和降低开发成本等方面进行改造提升,在功能方面,也应该考虑计算流体力学预测热流动规律、声波—电磁测井联合解析技术和人工智能数据分析方面,进而全面创新复杂地热过程干热岩开发利用模式。

5 结论

虽然目前中国干热岩开发工程进展较世界前沿还有一定差距,但中国陆区干热岩资源储量丰富,具有广阔的开发应用前景。复杂的地质条件导致的开发过程压裂造储困难、缝网发育差和注采换热效率低等关键技术问题仍未有效解决。因此,围绕干热岩资源的开发与高效利用开展大平台物理模拟实验,获取干热岩开采最优工艺参数,实现理论与技术的突破,不仅可以为干热岩地热高效开采提供理论和方法,促进干热岩综合利用的工程示范与应用推广,更是对助力国家“双碳”目标实现和绿色低碳高质量发展,具有重要的意义。

参考文献(References)

- [1] Zhao X Y, Zeng Z F, Wu Y G, et al. Interpretation of gravity and magnetic data on the hot dry rocks (HDR) delineation for the enhanced geothermal system (EGS) in Gonghe Town, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(16): 390.
- [2] 许天福, 张延军, 于子望, 等. 干热岩水力压裂实验室模拟研究[J]. *科技导报*, 2015, 33(19): 35-39.
- [3] Cheng Y X, Zhang Y J, Yu Z W, et al. An investigation on hydraulic fracturing characteristics in granite geothermal reservoir[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 237: 107252.
- [4] Moska R, Labus K, Kasza P, et al. Geothermal potential of hot dry rock in south-east Baltic Basin countries: A review[J]. *Energies*, 2023, 16(4): 1662.
- [5] Liu Y Z, Liu L J, Jin G, et al. Simulation-based evaluation of the effectiveness of fiber-optic sensing in monitoring and optimizing water circulation in next-generation enhanced geothermal systems[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 221: 211378.
- [6] Liu Z B, Wang C, Zhang M S, et al. Cracking property and brittleness evaluation of granite under high-temperature true triaxial compression in geothermal systems[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9(1): 99.
- [7] Zhang W, Qu Z Q, Guo T K, et al. Study of the enhanced geothermal system (EGS) heat mining from variably fractured hot dry rock under thermal stress[J]. *Renewable Energy*, 2019, 143: 855-871.
- [8] Li P F, Sun Q, Gao Q, et al. Size effect of failure mode of thermally damaged torus granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 163: 105331.
- [9] 张洪伟, 万志军, 赵毅鑫, 等. 深层地热储层水力剪切增透机制研究进展[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(10): 3172-3185.
- [10] 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.
- [11] 窦斌, 肖鹏, 郑君, 等. 二氧化碳爆破致裂激发干热岩储层作用效果[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(5): 150-159.
- [12] 曲占庆, 林强, 郭天魁, 等. 顺北油田碳酸盐岩酸蚀裂缝导流能力实验研究[J]. *断块油气田*, 2019, 26(4): 533-536.
- [13] Zhao K, Wang X Y, Song W J, et al. Evaluation methods and influence factors of heat extraction performance in hot dry rock reservoir under multi-field coupling[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2023, 41(4): 1457-1483.
- [14] Wang D B, Zhou F J, Dong Y C, et al. Experimental investigation of thermal effect on fracability index of geothermal reservoirs[J]. *Natural Resources Research*, 2021,

- 30(1): 273–288.
- [15] 张保建, 李燕燕, 高俊, 等. 河北省马头营干热岩的成因机制及其示范意义[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 2036–2051.
- [16] Singh M, Chaudhuri A. Evaluation of low- to moderate-enthalpy shallow sedimentary reservoirs for CCS-CPG systems[M]//Enhanced Geothermal Systems(EGS). London: CRC Press, 2023: 1–16.
- [17] 张乐, 胥蕊娜, 姜培学. 花岗岩平滑裂隙内超临界CO₂对流换热实验研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(7): 1500–1505.
- [18] Liao J X, Hu K, Mehmood F, et al. Embedded discrete fracture network method for numerical estimation of long-term performance of CO₂-EGS under THM coupled framework[J]. Energy, 2023, 285: 128734.
- [19] 李静岩, 刘中良, 周宇, 等. CO₂羽流地热系统热开采过程热流固耦合模型及数值模拟研究[J]. 化工学报, 2019, 70(1): 72–82.
- [20] 石岩, 冯波, 许天福, 等. 二氧化碳羽流地热系统水-岩-气相互作用: 以松辽盆地泉头组为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(6): 1980–1987.
- [21] Singh A, Zoback M, Neupane G, et al. Slip tendency analysis of fracture networks to determine suitability of candidate testbeds for the EGS collab hydroshear experiment[J]. Geothermal Resources Council Transactions, 2019(43): 405–424.
- [22] Kang F C, Li Y C, Tang C A, et al. Competition between cooling contraction and fluid overpressure on aperture evolution in a geothermal system[J]. Renewable Energy, 2022, 186: 704–716.
- [23] Wang Q Y, Wang D B, Fu W, et al. Effects of saturated fluids on petrophysical properties of hot dry rock at high temperatures: An experimental study[J]. Geothermics, 2024, 121: 103048.
- [24] 滕毅. 干热岩水-气注入时渗流特性及采热效率研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [25] Meng N, Li T L, Wang J Q, et al. Structural improvement and thermodynamic optimization of a novel supercritical CO₂ cycle driven by hot dry rock for power generation[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 235: 114014.
- [26] Rohit R V, Vipin Raj R, Kiplangat D C, et al. Tracing the evolution and charting the future of geothermal energy research and development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 184: 113531.
- [27] Xiong F, Zhu C, Feng G, et al. A three-dimensional coupled thermo-hydro model for geothermal development in discrete fracture networks of hot dry rock reservoirs[J]. Gondwana Research, 2023, 122: 331–347.
- [28] 王帅, 赵国贞, 刘超. 坚硬顶板下近距离煤层群切顶卸压技术研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(9): 75–80.
- [29] 李广林, 邵保平, 崔继明. 不同地应力下水压裂隙扩展演化数值模拟分析[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(10): 86–88.
- [30] 邵保平, 赵阳升. 600℃内高温状态花岗岩遇水冷却后力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 892–898.
- [31] 靳佩桦, 胡耀青, 邵继喜, 等. 高温花岗岩遇水冷却后孔隙结构及渗透性研究[J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(4): 478–484.
- [32] 武晋文, 赵阳升, 万志军, 等. 高温均匀压力花岗岩热破裂声发射特性实验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(7): 1111–1117.
- [33] Meng Q B, Liu J F, Ren L, et al. Experimental study on rock strength and deformation characteristics under triaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(2): 777–797.
- [34] Wang Y Y, Yu H L, Wu S C, et al. Progress on heat transfer in fractures of hot dry rock enhanced geothermal system[J]. Energy Engineering, 2021, 118(4): 797–823.
- [35] 刘汉青, 胡才博, 赵桂萍. 增强地热系统停止运行后温度恢复过程的数值模拟[J]. 中国科学院大学学报, 2024, 41(2): 222–230.
- [36] Yang S Q, Tian W L, Elsworth D, et al. An experimental study of effect of high temperature on the permeability evolution and failure response of granite under triaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(10): 4403–4427.
- [37] Yang S Q, Ranjith P G, Jing H W, et al. An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite after exposure to different high temperature treatments[J]. Geothermics, 2017, 65: 180–197.
- [38] Wu X T, Li Y C, Li T J, et al. Hot dry rock preconditioning by two-stage fracturing in excavation-enhanced

- geothermal system[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 229: 212078.
- [39] 苏广宁. 煤岩复合体水力压裂裂缝穿层扩展实验研究[J]. *矿业安全与环保*, 2024, 51(2): 18–24.
- [40] Frash L P, Gutierrez M, Hampton J. True-triaxial apparatus for simulation of hydraulically fractured multi-borehole hot dry rock reservoirs[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 70: 496–506.
- [41] Yin W T, Zhao Y S, Feng Z J. Experimental research on the permeability of fractured-subsequently-filled granite under high temperature-high pressure and the application to HDR geothermal mining[J]. *Renewable Energy*, 2020, 153: 499–508.
- [42] Wang C Y, Zhang D M, Yu B C, et al. Deformation and seepage characteristics of coal under true triaxial loading-unloading[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(4): 2673–2695.
- [43] Zhang W, Guo T K, Qu Z Q, et al. Research of fracture initiation and propagation in HDR fracturing under thermal stress from meso-damage perspective[J]. *Energy*, 2019, 178: 508–521.
- [44] 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.
- [45] Wang K X, Liu Z B, Wu M, et al. Experimental study of mechanical properties of hot dry granite under thermal-mechanical couplings[J]. *Geothermics*, 2024, 119: 102974.

On the development status and future direction of enhanced geothermal system experimental simulation equipment

TANG Jiawei¹, LI Jingfeng^{1*}, FANG Jie¹, LIU Yueyang², GUO Qiang¹, SHI Junjie¹, LI Jie^{1,3}

1. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, National Institute of Low Carbon and Clean Energy, Beijing 102211, China
2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences-Beijing, Beijing 100083, China
3. Technology Research Institute, CHN Energy Shandong Coal Group Co., Ltd., Yulin 719315, China

Abstract The research and development progress of enhanced geothermal system(EGS) simulation experimental devices at home and abroad is reviewed in this paper. The functional characteristics of four types of simulation devices, including high-temperature and high-pressure reaction vessels, rock core clamping seepage simulation systems, rock triaxial electro-hydraulic servo control systems, and large-scale true triaxial experimental systems are summarized. Then, the applicability of different experimental simulation devices and their supporting roles in key technologies research for EGS construction are compared and analyzed. Based on the problems existing both domestically and internationally in the development and utilization of dry hot rock resources, the research and development direction of EGS simulation experimental equipment are elaborated. A design idea of building a large-scale modular dry hot rock development simulation experimental platform is proposed on the basis of existing equipment platform. The system composition and modular functional characteristics of the new platform device are explained for the study of formation mechanism of thermal storage areas and the coupling mechanism under complex geological conditions, which provides important data support for the engineering practice of dry hot rock development and utilization.

Keywords dry hot rock; enhanced geothermal system; simulation device; hydraulic fracturing; true triaxial ●



(责任编辑 赵庆圆)