

干热岩地应力测量评价方法与前沿挑战

许家鼎¹⁾, 张重远^{1, 2)*}, 缪艳红³⁾, 高万里¹⁾, 何满潮²⁾,
陈群策¹⁾, 秦向辉¹⁾, 李少辉^{1, 2)}, 孙东生¹⁾

1)中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2)中国矿业大学(北京)力学与建筑学院, 北京 100083;

3)中国石油集团测井有限公司地质研究院, 陕西西安 710200

摘要: 可靠的地应力数据能够指导开发干热岩资源。本文针对干热岩深部储层地应力调查存在的困难, 按照基于钻孔、岩芯和地质的三类调查手段, 首先总结提出了适用于干热岩地应力测量与评价的方法, 并指出了其基本原理、测试仪器、应用场景与存在的优缺点。然后, 以我国青海共和干热岩试采工程为例, 提出了干热岩地应力测量与评价模式, 给出了储层地应力特征的主要认识, 并验证其与工程开发结果的一致性。最后, 总结了干热岩地应力测量方法的认识, 指出了干热岩开发中与地应力相关的两大前沿科学问题, 即储层裂缝控制与诱发地震, 并对其发展趋势与挑战进行了展望。

关键词: 干热岩; 地应力测量; 评价方法; 水力压裂; 储层建造; 诱发地震

中图分类号: P314 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.110402

An Overview of the Measurement and Evaluation Methods of In-situ Stress and Its Frontier Challenges in Hot Dry Rock

XU Jia-ding¹⁾, ZHANG Chong-yuan^{1, 2)*}, GOU Yan-hong³⁾, GAO Wan-li¹⁾,
HE Man-chao²⁾, CHEN Qun-ce¹⁾, QIN Xiang-hui¹⁾, LI Shao-hui^{1, 2)}, SUN Dong-sheng¹⁾

1) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081;

2) School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083;

3) Geological Research Institute, China Petroleum Logging Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710200

Abstract: Reliable in-situ stress data can guide the development of hot dry rock (HDR) resources. In view of the difficulties involved in investigation of in-situ stress in deep reservoirs of HDR, this study summarizes and puts forward three types of investigation methods suitable for in-situ stress measurement and evaluation in HDR, based on borehole, core, and geology, and points out their basic principles, test instruments, application scenarios and advantages and disadvantages. Additionally, the HDR in-situ stress measurement and evaluation model is proposed taking the Gonghe HDR project in Qinghai, China, as an example. The main conclusions of the in-situ stress feature are shown, and its consistency with the result of hydraulic fracturing is verified. Subsequently, two frontier scientific issues related to in-situ stress in HDR development, namely reservoir fracture control and induced earthquake, are pointed out. Finally, the understanding of the in-situ stress measurement method of HDR is summarized, and its development trend and challenges are also assessed.

Key words: hot dry rock (HDR); in-situ stress measurement; evaluation method; hydraulic fracturing; reservoir development; induced earthquake

本文由中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20190138; DD20221660)、国家自然科学基金项目(编号: 42177175)和中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费项目(编号: DZLXJK202204)联合资助。

收稿日期: 2022-06-30; 改回日期: 2022-10-31; 网络首发日期: 2022-11-07。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 许家鼎, 男, 1999 年生。硕士研究生。主要从事地应力测量相关研究。E-mail: jdingxu@126.com。

*通讯作者: 张重远, 男, 1987 年生。硕士, 副研究员, 硕士生导师。主要从事地壳应力场、岩石力学与干热岩相关研究。

E-mail: zhchongyuan@126.com。

干热岩是埋藏深度3~10 km, 温度大于150 °C的可再生清洁能源(Moore and Simmons, 2013)。我国已探明干热岩储量巨大, 实现干热岩资源的安全高效开发, 对我国能源结构调整、能源安全以及“双碳”战略目标实现具有深远意义(王贵玲等, 2020)。20世纪70年代以来, 以美国、法国为代表的西方国家相继开展干热岩开发试验研究, 并取得一系列进展(许天福等, 2012; 陆川和王贵玲, 2015; 唐显春等, 2020, 2023)。我国干热岩开发虽然起步较晚, 但近些年来也取得了丰硕的成果(张盛生等, 2019; 李亭昕等, 2020)。

干热岩开发的主要技术途径是利用增强型地热系统(Enhanced Geothermal System, 简称EGS), 即采用水力压裂方式, 向干热岩储层注入高压低温流体, 使储层中的天然裂隙扩展延伸, 从而达到增大储层渗透性和热交换面积的技术或工程(Brown et al., 2012; Olasolo et al., 2016; 许天福等, 2018)(图1)。目前, 干热岩开发还面临着诸多方面的挑战。例如, 干热岩储层建造、诱发地震和多场耦合作用等, 是干热岩开发利用过程中的重点和难点(许天福等, 2018)。其中, 地应力状态控制着热储层的改造和裂隙扩展(Brudy et al., 1997)。低温流体注入后对裂隙岩体力学及变形行为会导致断层失稳、甚至诱发地震(Giardini, 2009; Ellsworth, 2013; Keranen and Weingarten, 2018)。而地应力原位状态的研究, 是解决上述问题的关键所在, 因此, 准确测量和评价地应力状态至关重要。

干热岩高温高压的钻孔环境、取芯成功率低和成本高等客观困难, 给干热岩的地应力测量带来了挑战。目前, 各国学者提出了数十种测量地应力的方法, 但每一种方法都有其局限性(Haimson, 2010)。例如, 传统的水压致裂法因干热岩赋存区特殊的高温环境而难以应用; 同样, 目前国内成像测井探头普遍耐温上限为180 °C, 更高温区域的图像获取相对

困难。因而, 本文除了阐述地应力在干热岩开发中的作用, 还总结推荐了几种适用于干热岩地应力测量中的方法, 并结合青海共和干热岩试采讨论了地应力测量与评价的步骤, 最后讨论了干热岩地应力应用的前沿问题与挑战。本文的研究成果可为我国未来的干热岩地应力测量及其在开发评价中的应用提供参考。

1 地应力在干热岩开发的作用

我国受印度洋板块、菲律宾板块和太平洋板块的挤压作用, 地质构造复杂, 地应力环境也十分复杂。我国干热岩分四种类型, 高热流花岗岩型、沉积盆地型、近代火山型和强烈构造活动型(蔺文静等, 2013; 王贵玲等, 2020)。不同的干热岩类型具有不同的构造成因, 也决定了其储层地应力特征不同。总体上, 我国干热岩的储层以走滑和逆冲型应力为主(唐显春等, 2023), 尤其是西部地区, 地应力水平普遍较高, 开发难度明显大于西方国家的干热岩工程。

依据Anderson经典断层理论模型, 假设垂直应力等于上覆地体重量, 断层类型按照垂直应力(S_V)与水平主应力(S_H 和 S_h)的大小关系, 分为三种基本地应力类型(图2)。在干热岩中, 不同地应力类型, 储层改造时裂隙扩张方式有显著的差异。

(1)通常正断层和走滑断层型应力易于裂隙激发, 而水平应力差较大的逆断层型应力易于激活水平裂隙, 且复合应力类型给EGS裂隙改造带来诸多不确定性。

(2)地应力量值的增大会使破裂压力增大, 影响储层改造效率(赵金洲等, 2013)。地应力的差异也会影晌压裂效果(Mao et al., 2017), 主应力差越小, 裂缝延伸和转向所需的净压力越小, 裂缝网络的复杂度越高(沈聘等, 2020), 进而可以制造足够大的换热面积。

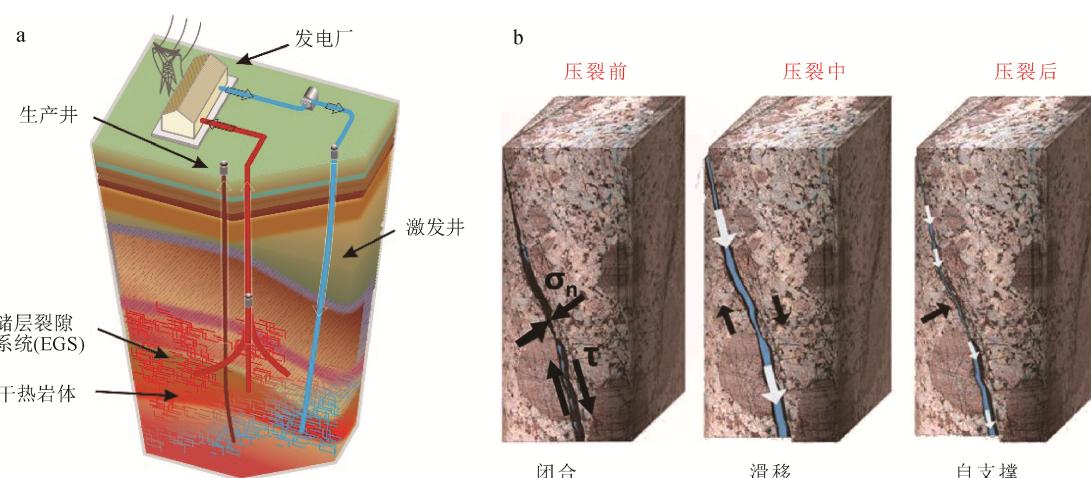


图1 EGS工程模型(a)与EGS典型水力剪切运动模式(b)
Fig. 1 EGS engineering model (a), and EGS typical hydraulic shear motion model (b)

(3)水力压裂中,人工裂隙面一般与最小主应力方向垂直相交,并沿最大主应力方向扩展延伸,当主应力方向与储层中自然裂隙方向夹角位于优势区间内,有利于部署生产井和制造规模更大的裂隙网络。

2 干热岩地应力测量主要方法

地应力测量的方法有多种,但考虑到干热岩特殊的赋存环境和存在技术困难,本文将地应力主要测量方法分为三大类:钻孔类、岩芯类和地质类。

2.1 钻孔类方法

2.1.1 水压致裂法

水压致裂法的基本假设为:岩石材料各向同性、均质弹性、不透水且在地壳深部受三个主应力作用(Hubbert and Willis, 1957; Amadei and Stephansson, 1997)。测试的基本方法是,在钻孔中用封隔器将一段隔离密封,然后对封闭段进行持续注水加压直至孔壁破裂,通过孔壁岩石破裂的压力曲线特征可以确定地应力值。为了获取可靠的水压致裂数据,常常要进行3~5个压裂循环试验以得到压力-时间曲线。该方法最大的优点是最小水平主应力的测量结果较准确(Haimson and Cornet, 2003)。最大水平主应力的方向一般通过印模确定,但对于大深度干热岩钻孔而言,印模定向已不再适用。

水压致裂法在非高温深孔地应力测量的最大深

度已经达到5300 m,但在干热岩钻孔中成功应用的例子非常少。水压致裂法应用在干热岩中最大困难是尚没有安全可靠的耐高温高压封隔器。法国舒尔茨干热岩工程曾采用高延展性的金属铜箔封隔器,但由于其性能不稳定、应用工艺复杂、造价偏高等原因,至今并没有广泛应用。

2.1.2 成像测井法

成像测井方法主要有声波成像和电阻率成像两种技术,其通过岩体对声波阻抗和电阻率的不同响应来获取孔壁岩体和裂隙的差异性图像。一般来说,完整、坚硬的孔壁岩体具有高阻抗和高电阻率,表现为高亮的图像;反之,破碎、松软的岩体(如孔壁破碎、节理裂隙等)表现为灰暗的图像。由于地壳应力的强烈差异性,孔壁上应力集中在泥浆压力和温度冷却应力的共同作用下得到强化,往往表现为过量的压剪应力或拉张应力,进而克服岩石自身力学强度形成孔壁失稳破坏(Zoback, 2007)。通过成像测井图像,能识别出孔壁上的钻孔崩落(BBOs)、诱发裂隙(DIFs)和诱发花瓣线(PCFs)等不同应力导致的失稳破坏情况,进而确定原地应力状态(Zhang et al., 2017; 陈念等, 2021)。BBOs的形成往往与压缩应力状态有关,即最小水平主应力方向上最大有效应力大于岩石的抗压强度(图3)。在垂直或近垂直的钻孔中,BBOs能指示最小水平主应力的方向。DIFs的形成与拉张应力状态有关,即孔壁上最大水平主应力

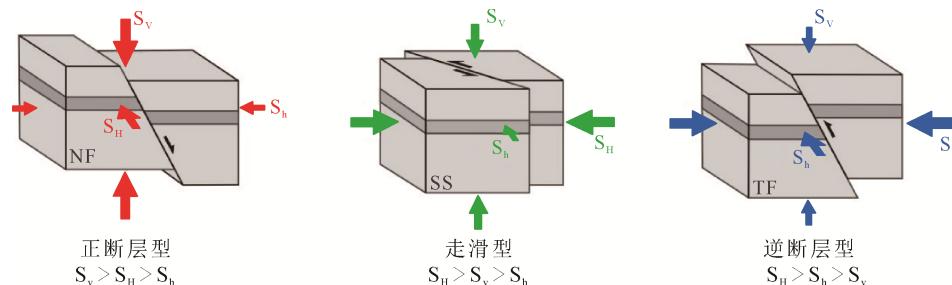


图2 三种基本地应力类型
Fig. 2 Three basic types of in-situ stress

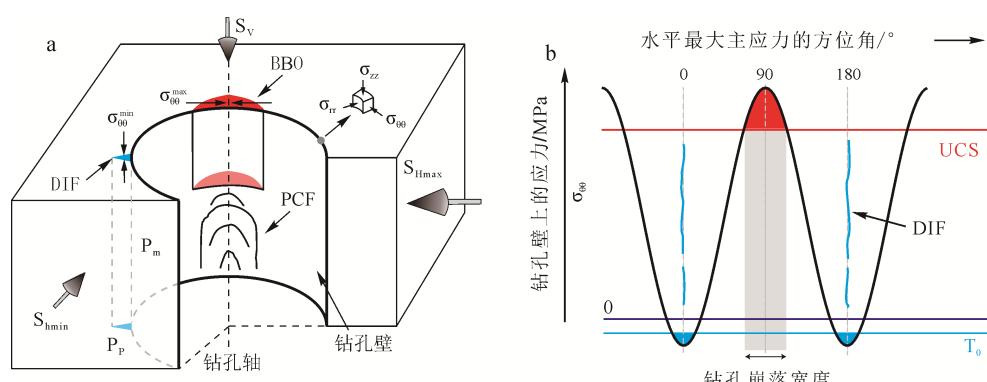


图3 钻孔壁 BBO、DIF 和 PCF 三维示意图(a, 修改自 Jo et al., 2019)
及钻孔壁应力大小和方位关系图(b, 修改自 Talukdar et al., 2022)

Fig. 3 Three-dimensional diagram of BBO, DIF and PCF of borehole wall (a, modified from Jo et al., 2019), and relationship between the magnitude of borehole wall stress and orientation (b, modified from Talukdar et al., 2022)

方向上的最低有效应力高于岩石的抗拉强度。DIFs 能指示最大水平主应力的方向(Bell and Gough, 1979)。PCFs 的花瓣部分沿最小水平主应力方向形成, 中心线沿最大水平主应力形成, 可以选择中心线两侧方位的平均值, 作为最小水平主应力方向(Schoenball and Davatzes, 2017)。

利用成像测井所识别的上述孔壁破坏特征确定原地应力场的方向非常方便、可靠, 但对于地应力的大小, 需要先测定或假设钻孔围岩的强度、崩落的宽度等参数, 才能约束其范围(Brudy et al., 1997; Zoback, 2007; Chang and Jo, 2015)。在地应力测量中, 用成像测井和水压致裂联合约束原地应力的状态, 往往取得较好的结果。当前国内成像测井探头普遍耐温上限为 180 °C, 为了获取干热岩储层更高温度孔段的图像, 通常需要进行充分的泥浆循环降温。

2.1.3 阵列声波法

近 30 年来, 阵列声波(或交叉偶极声波)技术也成为用于确定地应力大小和方位的一种重要方法(Sinha and Kostek, 1996; 陈浩等, 2009; Zheng et al., 2019)。岩石物理实验分析表明, 显著的水平差应力作用会在岩体中诱导产生各向异性, 其中横波在最大水平主应力方向上传播速度最慢, 因此, 可以利用方位各向异性准确确定最大水平主应力方向(魏周拓等, 2012)。此外, 可通过阵列声波提取的纵波时差、横波时差和岩石密度等测井资料, 改进黄氏模型、组合弹簧模型和葛氏模型等众多模型来计算地应力大小(王生奥等, 2021)。

干热岩体主要为脆性结晶岩, 具有超低孔渗特征, 因此适合用横波各向异性确定地应力状态。但研究表明, 不仅不平衡的地应力可以导致地层各向异性, 而且地层中发育的裂缝等因素也可导致各向异性(印兴耀等, 2018)。因此使用阵列声波法过程中必须首先排除干热岩裂隙集中发育段等非地应力因素。当应力差异性较小时, 应力引起的各向异性较弱而很难被检测出来。总体上, 该方法在干热岩储层地

应力状态分析中具有一定的价值, 但需要更加谨慎。

2.2 岩芯类方法

2.2.1 非弹性应变恢复法

非弹性应变恢复法(ASR), 是通过测量岩芯随时间相关的非弹性应变来确定原地应力大小和方向的一种方法(张重远等, 2012; 王成虎, 2014)。岩芯是一种黏弹性材料, 当从钻孔中取出后, 脱离了原地应力场, 首先会发生弹性应变恢复, 随后逐渐发生非弹性应变恢复, 且各方向的应变恢复量与先前所受应力正相关, 基于此可以确定三维地应力的状态(Teufel, 1983; Matsuki, 1991)(图 4)。ASR 法通过测量岩芯各方向的应变恢复可获得主应变的方向, 也就是主应力的方向。地应力大小的确定, 需要针对不同的岩性, 确定准确的岩石本构模型才行。ASR 测量结果的准确性受残余应变、岩芯采取时间、岩芯各向异性以及岩芯脱水作用等因素的影响(Teufel, 1993; Lin et al., 2006; Zhang et al., 2022)。及时采集充足的应变数据是获得可靠地应力数据的关键, 因此, 普遍在钻井现场就近建立实验室, 并采用高精度应变片和高频应变采集仪进行测量。温度波动和岩芯失水是导致非应力性应变的主要干扰因素, 试验过程中须将岩芯密封包裹并置于恒温水浴箱内。主应力方向可以借助于古地磁定向手段来确定。近年来, ASR 法普遍应用于深部地热及干热岩地应力测量(Zhang et al., 2022), 测量效果十分理想, 未来将在干热岩地应力测量中发挥重要作用。

2.2.2 直径变形分析法

直径变形分析法(DCDA)测量地应力的原理是, 在地应力作用下, 将岩芯从钻孔中取出后, 由于应力的释放, 会产生瞬间的弹性变形(图 5)。理论上, 岩芯在钻取的瞬间为纯圆柱状, 一旦脱离地应力场, 岩芯截面在各向异性应力下将变为椭圆状。根据胡克定律, 取芯前岩芯所受应力的大小与圆柱直径的弹性变形量成正比, 进而表现为椭圆的长短轴。通过高精度平面轮廓扫描仪就可以确定岩芯的最大和

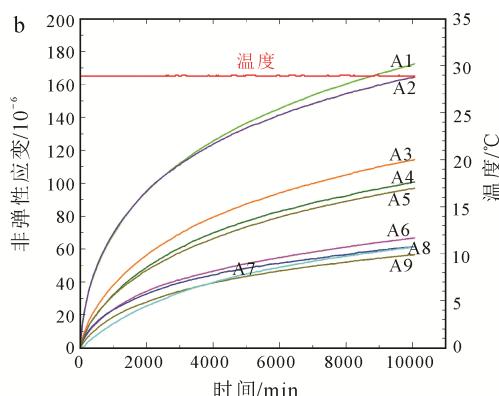
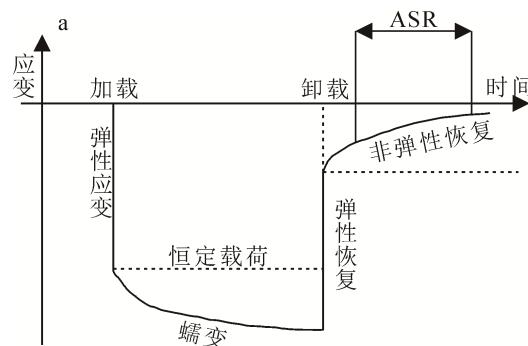


图 4 岩石流变应变-时间图(a)与 ASR 测试中应变-时间曲线(b)

Fig. 4 Rock rheological strain-time diagram (a), and strain-time curve in ASR test (b)

最小直径。对于垂直孔取芯，根据最大和最小应变与水平主应力的关系，计算得到水平主应力差值的大小(Funato and Ito, 2017; 杨跃辉等, 2019)。因此，DCDA 法是一种半定量的地应力测量方法。通常也可以结合其他地应力测量方法综合制约主应力力量值范围。若岩芯是定向的(如采用古地磁方法)，则同时可以获取主应力的方向。和 ASR 法相比，DCDA 法的优点是对岩芯没有时间限制，因此，可以利用任何时期钻取的岩芯开展测量。由于取芯时的弹性变形瞬间完成，DCDA 测量结果中会有一部分非弹性应变，研究表明，非弹性应变与弹性应变相比可以忽略不计。

干热岩储层的高温环境给钻孔类地应力测量带来了挑战。虽然温度会使岩芯直径发生变形，但这种变形是均匀的，对 ASR 和 DCDA 测量带来的误差是可以忽略的，不会影响最终的测量结果。然而，ASR 和 DCDA 都要求岩芯相对完整、表面光滑且没有天然裂隙或钻进诱发的微裂隙；若深部岩体破碎或有先存裂隙，则会影响测量结果(Teufel, 1993)。

2.2.3 岩芯饼化法

岩芯饼化法同样可以用来估算原地应力状态，尤其是高地应力区域。岩体所受的应力越高，在钻进取芯过程中岩芯根部的应力集中程度越高，岩芯越容易发生饼化破坏。有学者通过模拟试验，发现岩芯饼化是由于剪应力集中引起拉张破坏形成的(Jaeger and Cook, 1963)。岩芯饼化的形貌特征一定程度上反映了深部工程的地应力状态。岩饼外沿轮廓的“马鞍状”凹形轴线可以指示最大水平主应力的方向(李彦恒等, 2012)。岩饼的厚度与直径的比值(厚径比)反映了地应力的大小。通过构建岩芯饼化发生的临界地应力状态与岩饼厚径比的经验和理论关系式，可

以估算最大主应力的大小(Lim and Martin, 2010; 张丰收等, 2022)。

干热岩储层的高温高压环境，具有发生岩芯饼化的应力条件。因此，岩芯饼化可以作为一种半定量的地应力评价方法应用于干热岩中。

2.3 地质类方法

2.3.1 震源机制解

地震是因为地壳内部岩体受应力作用，突然发生断裂滑动的结果。在地震活跃的地区，可以从地震震源机制获得应力场的重要信息(Zoback, 2007)。目前，利用震源机制解确定地应力场的方法在国内外得到迅速发展(Zoback, 1992; 赵建涛等, 2002)。该方法的基本假设为，地壳中最大应力差受优势方位断层强度限制(Zoback, 1992)。当断层滑动时，压缩区和膨胀区分别向外发射负极性和正极性的 P 波。定义 P 轴和 T 轴分别平分膨胀区和压缩区，B 轴与 P 和 T 轴垂直。震源机制参数可以反映应力的积累和释放过程，通过大量断层面解的平均 P、B、T 轴就可以推断震区平均地应力场方向(Sheng et al., 2021)。

利用震源机制解资料估算地应力的量值还存在一定的困难(Zoback, 1992; Plenefisch and Bonjer, 1997)。在干热岩开发前，可以先根据区域历史地震资料评价区域地应力背景，获取地应力的类型和主应力方向等关键信息。在储层改造过程中，水力压裂常常诱发地震，也可以利用诱发较大级别地震(大于 0 级)动态分析场区地应力场的变化。

2.3.2 地质分析法

断层是地壳构造运动最基本的表现形式，也是构造应力在岩石中最直接作用的产物。断层在运动过程中形成的大量断面构造(擦痕、阶步)为反演构造应力场提供了直接载体(王成虎, 2014)。实际工作中，

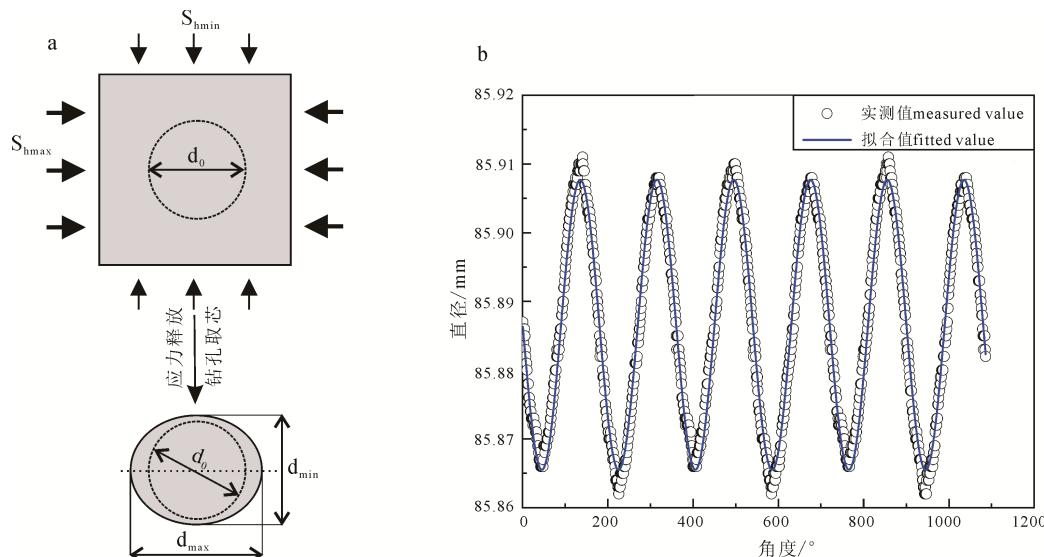


图 5 DCDA 原理图(a, 改自 Funato and Ito, 2017)和 DCDA 测试曲线(b)
Fig. 5 DCDA schematic diagram (a, modified from Funato and Ito, 2017), and DCDA test curve (b)

需要在野外测量擦痕所在的断面产状包括走向、倾向和倾角, 以及滑动矢量包括擦痕的侧伏角、侧伏向和动向, 在测量基础上室内用计算机程序进行数据计算, 分析获取每个点上的古构造应力特征。一个区域构造变形往往是多期次的, 单个野外观测点往往会获得多期次古构造应力场, 在野外调查应仔细鉴别擦痕性质、滑动方向和断层活动期次配套。需要注意的是, 在沉积地层区应用断层判断古构造应力场时要确定活动影响的最新地层然后逐步筛选, 层层剥离。此外, 利用节理重建古构造应力场也是最常用的一种方法(图 6), 例如张裂隙(节理)一般指示了最大主应力方向, 初始共轭节理的夹角平分线一般指示最大主应力方向, 这些多为定性方法。利用共轭节理确定古构造应力场方向是目前应用最广泛的。但有时候多期应力叠加使得共轭节理的分期和配套往往不易判断(陈鹏和施炜, 2015)。

在干热岩应力场调查中, 由于岩体多为中—新生代之前的岩体, 更需要野外判断断层之间的切割关系, 以确定最近一期断层滑动矢量指示的构造应力场, 结合实测数据的判别才能更精确确定某地的地应力状态。还可以对干热岩地区最新可观察到节理(裂隙)地层进行调查, 重点识别张节理延伸方向(代表最大主应力方向), 再确定存在的共轭节理指示的最大主应力方向, 二者互相验证, 即可判断这一区域该套地层沉积之后区域应力场方向, 再结合现今实测应力场结果, 即可判断地壳在某一时段内的地应力状态。

3 干热岩勘查开发地应力评价——以共和干热岩为例

由于干热岩钻孔环境复杂、钻探的难度大、钻探工期长、取芯成功率低等困难, 仅依赖水压致裂法或成像测井法等手段不仅存在技术上的挑战, 也不能及时保证干热岩试验性开发前期的各种物理

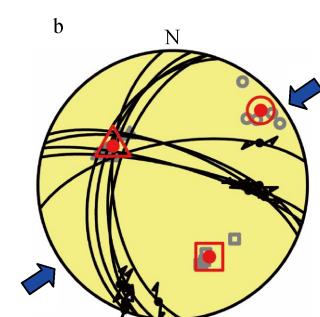
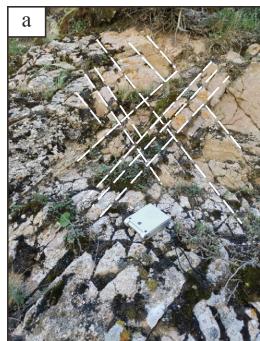


图 6 岩体上发育的共轭剪节理(a)与共轭节理反演的构造应力场(b)

Fig. 6 Conjugate shear joints developed on rock (a), and tectonic stress field inversely calculated for conjugate joints (b)

模拟、数值模拟评价需求。因此, 本文利用不同的地应力评价方法, 多角度测量和约束了共和干热岩开发场区的地应力状态。对于地应力的类型和量值: 首先前期收集了本区域的地震和钻井岩芯, 利用震源机制解法和岩芯饼化法分别评估了地应力类型和水平差应力的大小; 其次, 基于钻井过程中取芯, 利用 ASR 法测量得到了三维主应力的量值, 并利用 DCDA 法、岩芯饼化法进一步约束了水平差应力值和最大水平主应力的量值范围。对于地应力方向, 成像测井数据显示, 共和干热岩的注采井壁上均大量发育了孔壁崩落、诱发张裂隙以及诱发花瓣线等方向信息, 进而准确地获取储层的地应力方向。

基于上述地应力评价模式, 本文获得了共和盆地恰卜恰干热岩储层的地应力状态。统计干热岩场区花岗岩钻孔取芯资料, 发现 3200~3800 m 储层范围内饼化岩芯厚度普遍在 0.2~0.3 范围内。据岩石力学资料(雷治红, 2020), 共和花岗岩的抗拉强度为 11.5~19.9 MPa, 按应力比因子约为 6.5 计算(Lim and Martin, 2010; 张丰收等, 2022), 可推测 $S_H=74.75\sim129.35$ MPa。本文展示了利用 ASR 法开展的 3 个深度地应力实测结果, 得到 $S_H=109.1\sim111.9$ MPa, $S_h=97\sim98.6$ MPa, $S_v=88.2\sim97.1$ MPa。利用 DCDA 法测量了 3884 m 处岩芯的直径变形数据, 计算得到水平应力差(S_H-S_h)为 25.14 MPa, 与 ASR 法实测结果较为一致。由图 7 可知, 三种方法所测地应力结果一致性较好。统计成像测井资料中孔壁崩落、诱发张裂隙及少量的诱发花瓣线信息均表明, S_H 方向为 N35°~39°E, 与区域震源机制解和 GPS 变形结果一致(孟文等, 2022)。

据现场储层改造结果显示(Zhang et al., 2022), 水力压裂触发微地震的震源机制解在浅部多以走滑型事件为主, 而深部多以逆冲型事件为主, 破裂主轴方向以 NE 向为主, 这与地应力测量结果较为

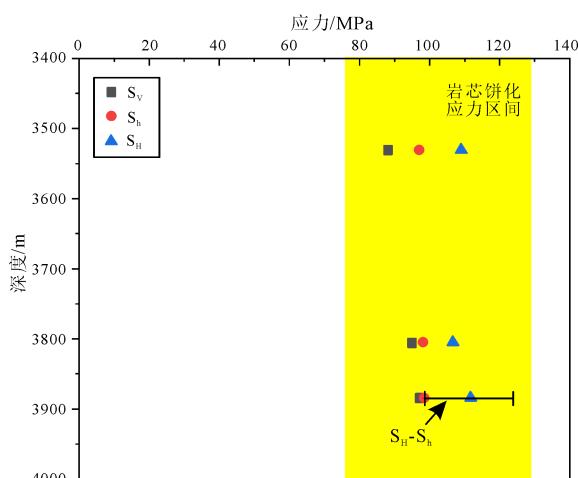


图 7 共和干热岩储层地应力大小图
Fig. 7 In-situ Stress of Gonghe dry Hot Rock Reservoir

一致, 表明本文所提出的干热岩地应力测量评价模式具有较好的可操作性和可靠性。

4 干热岩地应力应用研究前沿

4.1 储层建造与裂隙扩展

高效利用 EGS 开发干热岩资源, 关键是要通过水力压裂制造复杂缝网, 进而提高岩石的渗透率 (Baria et al., 1999)。国际上普遍认为, 理想经济的干热岩商业化储层改造体积应达到 0.1 km^3 , 有效热交换面积应达到 100 万 m^2 (Brown et al., 2012)。目前, 国际上很多 EGS 工程储层改造体积已远超过 0.1 km^3 的目标, 而有效换热面积距离商业化利用还有一定的差距, 主要原因在于储层改造过程中对天然裂隙系统的改造还不够理想(图 8)。

现有干热岩水力压裂开采模式的根本出发点是利用注水激活和联通先存裂隙, 进而提高高温致密

储层的渗透性(图 1 和图 8)。但是, 不同于页岩气水力压裂以制造拉张裂缝为主, 干热岩主要通过水力剪切方式使岩体裂隙和断层发生剪切滑动并利用其自有的粗糙度产生“自支撑”, 进而增加储层渗透率 (Keranen and Weingarten, 2018; 许天福等, 2018)。目前, 对地应力和裂隙的耦合作用关系理解不够, 是制约干热岩开发的难点。一般来说, 裂缝沿着接近或平行于最大主应力的方向发育, 但会在天然裂缝交界处发生转向, 从而形成复杂的网络(Barton et al., 1995; 周舟等, 2019)。此外, Mao et al.(2017)在实验室对花岗岩的水力压裂试验表明, 水平方向上的应力差的量值也会影响裂缝的路径, 水平应力差越大水力裂缝路径的曲率就越大。

因而, 充分理解和安全控制复杂应力场作用下储层裂隙的滑动行为既是干热岩开发的前沿核心科学问题, 也是技术难题。干热岩裂隙处于一个

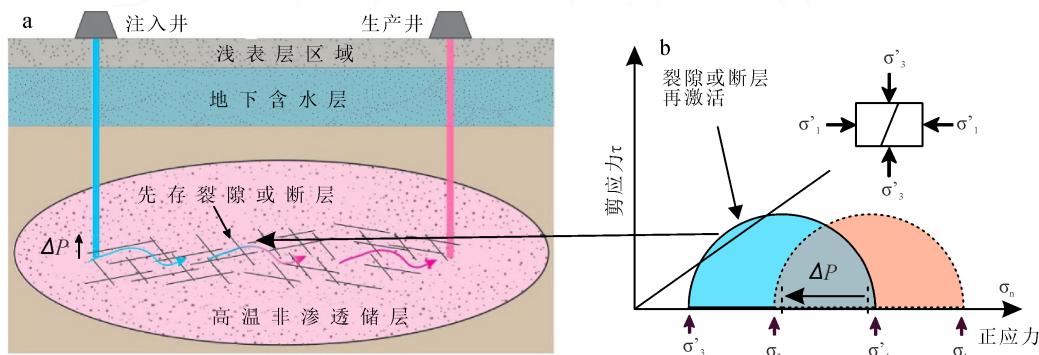


图 8 干热岩水力压裂开采模式(a)及储层裂隙或断层激活模式(b)(改自 Fang et al., 2017)

Fig. 8 Hot dry rock hydraulic fracturing production mode (a) and reservoir fracture or fault activation mode(b)
(modified from Fang et al., 2017)

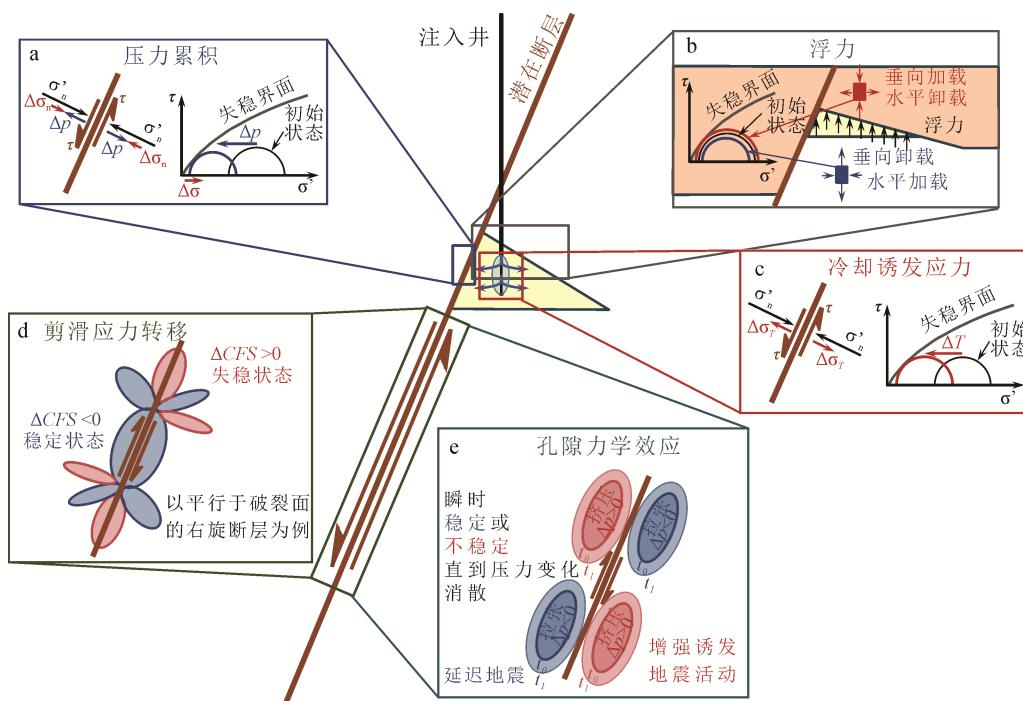


图 9 潜在注水诱发地震机理(改自 Vilarrasa et al., 2022)

Fig. 9 Potential water injection induced seismicity mechanism (modified from Vilarrasa et al., 2022)

高温、高应力和高孔隙压力的复杂地质环境, 其力学行为和常规环境岩体裂隙相比更为复杂(Lee et al., 2019)。在注水所强化的温度-渗流-应力多物理场耦合作用下, 其破坏强度、变形机理、渗透特征等一系列重要的物理和水力学行为难以采用传统的理论来解释。此外, 干热岩在形成和赋存的地质时期中, 都要经过中-高温水热蚀变过程, 这使得储层裂隙乃至断层中存留不同程度的蚀变矿物或断层泥。毫无疑问, 断层泥的存在, 不仅使得干热岩储层裂隙的剪切、摩擦和渗透特征以及彼此的影响行为更加复杂, 还使得场区的地应力评价变得困难。

4.2 注水诱发地震

以水力压裂为主的干热岩开发项目中, 诱发地震是无法回避的风险因素(甘浩男等, 2020)。注水诱发的微地震作为裂隙破裂生长的物理响应, 对于描绘储层裂隙网络和渗透路径具有重要意义。然而, 有感甚至破坏性的诱发地震往往引发社会公众恐慌、危及人们生命财产安全(Häring et al., 2008; Kim et al., 2018)。

研究认为地壳中断层普遍处于临界应力平衡状态, 流体注入后对岩体力学及变形行为的扰动所导致的断层失稳、甚至诱发地震不可避免(Ellsworth, 2013)。四川长宁页岩气开采中, 有学者认为工业注水活动大概率诱发了 $M5.7$ 级和 $M6.0$ 级地震(雷兴林等, 2020)。不同于页岩气储层的软弱岩体, 干热岩储层往往以高温、高应力、高硬度、高脆性的结晶岩体为主, 诱发地震的强度、频率、地表响应都更为显著(Grigoli et al., 2018)。图 9 总结了干热岩应用中, 潜在的地震活动诱发机制, 主要为: 流体注入增大了孔隙压力, 使有效应力降低引起断层失稳破坏; 注入流体加温后密度变小产生的浮力, 破坏了周围断层的稳定性; 注入流体温度低于热储层岩体, 冷却诱发应力降低使断层失稳; 地震滑动和无震蠕滑使周围岩石变形, 导致其余区域不稳定; 滑移分别压缩和延伸滑移区前后的岩石, 使瞬时孔隙压力变化, 影响断层的稳定性(Villarrasa et al., 2022)。

相关研究揭示注水诱发地震需具备以下三个条件: 应力扰动、存在相当尺寸的处于临界应力状态的断层, 以及两者之间存在直接或间接的偶联机制, 即应力扰动可通过某种方式改变断层原有的应力状态。因而, 无论哪种诱发地震机制, 诱发微地震评价的关键在于获得准确且精细的应力场及天然裂隙资料, 以准确评价先存断层或者诱发裂缝的稳定性情况, 进而有效开展干热岩注采诱发微地震防控分析。

5 结论与展望

干热岩地应力测量面临高温高压的钻孔环境、孔深较大、取芯成功率低、成本高等客观挑战, 常规或单一的地应力测量技术和方法难以满足储层地应力评价需求。

(1)可以采用多种测量方法相结合、深部与浅部相结合、定性与定量评价相结合的地应力调查评价模式, 经共和干热岩实践与开采验证, 显示具有较好的可行性。

(2)一般的地应力测量中往往都是在目标范围内选取一段或几段进行测量, 因此容易忽视测量“盲区”的地应力变化。所以, 未来的地应力测量将向精细化方向发展, 才能更好的服务于干热岩资源的开发利用。

(3)虽然人们逐渐认识到地应力对于干热岩开采储层改造的重要性, 但可以采用的方法和测量精度仍然不能满足。因而为了获取丰富原位地质数据, 地应力的精细评价被寄予厚望, 在此基础上探索干热岩水力压裂中裂隙扩展机理与高效控制方式研究。

(4)当前注水(尤其是干热岩)诱发地震研究存在的显著缺陷是: 对储层地质和力学背景缺乏清晰认识, 未知边界条件较多, 导致深部储层裂隙、断层的多场耦合行为及失稳演化过程处于“黑箱”之中。未来的注水诱发地震研究应该基于足够多的微地震监测台站、足够详细的地应力状态数据、足够清晰的深部水文和地质力学资料, 以加强人们对诱发地震机制的理解。

致谢: 感谢审稿专家对本文的建设性建议, 感谢中国地质科学院唐显春教授级高工邀请参与本专辑的撰稿。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. DD20190138 and DD20221660), National Natural Science Foundation of China (No. 42177175), and Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. DZLXJK202204).

参考文献:

- 陈浩, 王秀明, 赵立新. 2009. 交叉偶极子声测井多频率反演地层三阶弹性常数和地应力研究[J]. 地球物理学报, 52(6): 1663-1674.
- 陈念, 王成虎, 陈平志, 陈建林, 周昊. 2021. 利用钻孔崩落数据再认识白鹤滩右岸地应力场特征[J]. 地质力学学报, 27(3): 430-440.
- 陈鹏, 施炜. 2015. 古构造应力场反演的理论与实践——基于断层滑动矢量分析[J]. 地质论评, 61(3): 536-546.

- 甘浩男, 王贵玲, 蔺文静, 张薇, 秦向辉, 张重远. 2020. 增强型地热系统环境地质影响现状研究与对策建议[J]. 地质力学学报, 26(2): 211-220.
- 雷兴林, 苏金蓉, 王志伟. 2020. 四川盆地南部持续增长的地震活动及其与工业注水活动的关联[J]. 中国科学: 地球科学, 50(11): 1505-1532.
- 雷治红. 2020. 青海共和盆地干热岩储层特征及压裂试验模型研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 李亭昕, 蔺文静, 甘浩男, 岳高凡, 张德龙, 王贵玲. 2020. 东南沿海干热岩资源成因模式探讨及勘查进展[J]. 地质力学学报, 26(2): 187-200.
- 李彦恒, 谭可可, 冯利. 2012. 基于岩饼几何形态测量的原地应力测定方法[J]. 岩土力学, 33(S2): 224-228.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 王贵玲. 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 40(1): 312-321.
- 陆川, 王贵玲. 2015. 干热岩研究现状与展望[J]. 科技导报, 33(19): 13-21.
- 孟文, 郭祥云, 李永华, 韩立波, 张重远. 2022. 青藏高原东北缘构造应力场及动力学特征[J]. 地球物理学报, 65(9): 3229-3251.
- 沈骋, 赵金洲, 谢军, 范宇, 宋毅. 2020. 海相页岩缝网可压性靶窗空间分布预测——以川南长宁区块为例[J]. 地质力学学报, 26(6): 881-891.
- 唐显春, 王贵玲, 马岩, 张代磊, 刘忠, 赵旭, 程天君. 2020. 青海共和盆地地热资源热源机制与聚热模式[J]. 地质学报, 94(7): 2052-2065.
- 唐显春, 王贵玲, 张代磊, 马岩. 2023. 青藏高原东北缘活动构造与共和盆地高温热异常形成机制[J]. 地球学报, 44(1): 7-20.
- 王成虎. 2014. 地应力主要测试和估算方法回顾与展望[J]. 地质论评, 60(5): 971-996.
- 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 张薇. 2020. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 27(1): 1-9.
- 王生奥, 韩复兴, 孙章庆, 邝琦, 王丽丽, 许宝寅. 2021. 地应力测量及其对油气运移和断层封堵性影响的发展现状与趋势[J]. 地球物理学进展, 36(2): 675-688.
- 魏周拓, 范宜仁, 陈雪莲. 2012. 横波各向异性在裂缝和应力分析中的应用[J]. 地球物理学进展, 27(1): 217-224.
- 许天福, 胡子旭, 李胜涛, 姜振蛟, 侯兆云, 李凤昱, 梁旭, 冯波. 2018. 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, 92(9): 1936-1947.
- 许天福, 张延军, 曾昭发, 鲍新华. 2012. 增强型地热系统(干热岩)开发技术进展[J]. 科技导报, 30(32): 42-45.
- 杨跃辉, 孙东生, 郑秀华, 林为人, 李阿伟. 2019. 岩芯直径变形分析法及其在松科 2 井深部地应力调查中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 50(12): 3106-3113.
- 印兴耀, 马妮, 马正乾, 宗兆云. 2018. 地应力预测技术的研究现状与进展[J]. 石油物探, 57(4): 488-504.
- 张盛生, 张磊, 田成成, 蔡敬寿, 唐保春. 2019. 青海共和盆地干热岩赋存地质特征及开发潜力[J]. 地质力学学报, 25(4): 501-508.
- 张重远, 吴满路, 陈群策, 廖椿庭, 丰成君. 2012. 地应力测量方法综述[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 31(3): 305-310.
- 张丰收, 李猛利, 张重远, 何满潮, 张盛生, 衡德. 2022. 高地应力下深部岩芯饼化裂隙发展规律及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 41(3): 533-542.
- 赵建涛, 崔效锋, 谢富仁. 2002. 唐山地震震源区构造应力场强度的初步分析[J]. 地震学报, 24(3): 268-276.
- 赵金洲, 任岚, 胡永全. 2013. 页岩储层压裂裂缝成网延伸的受控因素分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 35(1): 1-9.

周舟, 金衍, 曾义金, 张旭东, 周健, 汪文智, 孟翰. 2019. 青海共和盆地干热岩地热储层水力压裂物理模拟和裂缝起裂与扩展形态研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 49(5): 1425-1430.

References:

- AMADEI B, STEPHANSSON O. 1997. Rock stress and its measurement[M]. London: Chapman and Hall.
- BARIA R, BAUMGÄRTNER J, RUMMEL F, PINE R J, SATO Y. 1999. HDR/HWR reservoirs: concepts, understanding and creation[J]. Geothermics, 28(4-5): 533-552.
- BARTON C A, ZOBACK M D, MOOS D. 1995. Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock[J]. Geology, 23(8): 683-686.
- BELL J S, GOUGH D I. 1979. Northeast-southwest compressive stress in Alberta evidence from oil wells[J]. Earth Planetary Science Letters, 45(2): 475-482.
- BROWN D W, DUCHANE D V, HEIKEN G, HRISCU V T. 2012. Mining the earth's heat: Hot dry rock geothermal energy[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- BRUDY M, ZOBACK M D, FUCHS K, RUMMEL F, BAUMGÄRTNER J. 1997. Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: Implications for crustal strength[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102(B8): 18453-18475.
- CHANG Chan-dong, JO Y. 2015. Heterogeneous in situ stress magnitudes due to the presence of weak natural discontinuities in granitic rocks[J]. Tectonophysics, 664: 83-97.
- CHEN Hao, WANG Xiu-ming, ZHAO Li-xin. 2009. Study of inversion for third order elastic constants and in situ stress by multifrequency dispersion of cross dipole sonic logging[J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(6): 1663-1674(in Chinese with English abstract).
- CHEN Nian, WANG Cheng-hu, CHEN Ping-zhi, CHEN Jian-lin, ZHOU Hao. 2021. Re-analyzing the in-situ stress field in the right bank of the Baihetan hydroelectric power plant using the borehole breakout data[J]. Journal of Geomechanics, 27(3): 430-440(in Chinese with English abstract).
- CHEN Peng, SHI Wei. 2015. Theory and practice of paleostress field inversion: Inferred from fault slip vector analysis[J]. Geological Review, 61(3): 536-546(in Chinese with English abstract).
- ELLSWORTH W L. 2013. Injection-induced earthquakes[J]. Science, 341(6142): 1225942.
- FANG Y, ELSWORTH D, WANG C, ISHBASHI T, FITTS J P. 2017. Frictional stability - permeability relationships for fractures in shales[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122: 1760-1776.
- FUNATO A, ITO T. 2017. A new method of diametrical core deformation analysis for in-situ stress measurements[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 91: 112-118.
- GAN Hao-nan, WANG Gui-ling, LIN Wen-jing, ZHANG Wei, QIN Xiang-hui, ZHANG Chong-yuan. 2020. Research on the status quo of environmental geology impact of enhanced geothermal system and countermeasures[J]. Journal of Geomechanics, 26(2): 211-220(in Chinese with English abstract).
- GIARDINI D. 2009. Geothermal quake risks must be faced[J]. Nature, 462(7275): 848-849.
- GRIGOLI F, CESCA S, RINALDI A P, MANCONI A,

- LÓPEZ-COMINO J A, CLINTON J F, WESTAWAY R, CAUZZI C, DAHM T, WIEMER S. 2018. The November 2017 M_w 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea[J]. *Science*, 360(6392): 1003-1006.
- HAIMSON B C. 2010. The effect of lithology, inhomogeneity, topography, and faults, on in situ stress measurements by hydraulic fracturing, and the importance of correct data interpretation and independent evidence in support of results[C]//Proceedings of the 5th International Symposium on In-Situ Rock Stress "Rock stress and earthquake". Leiden, The Netherlands: CRC Press Balkema: 11-14.
- HAIMSON B C, CORNET F H. 2003. ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7-8): 1011-1020.
- HÄRING M O, SCHANZ U, LADNER F, DYER B C. 2008. Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system[J]. *Geothermics*, 37(5): 469-495.
- HUBBERT K M, D G WILLIS. 1957. Mechanics of hydraulic fracturing[J]. *Transactions of the AIME*, 210(1): 153-168.
- JAEGER J C, COOK N G W. 1963. Pinching off and disking of rocks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 68(6): 1759-1765.
- JO Y, CHANG Chan-dong, JI S H, PARK K W. 2019. In situ stress states at KURT, an underground research laboratory in South Korea for the study of high-level radioactive waste disposal[J]. *Engineering Geology*, 259: 105198.
- KERANEN K M, WEINGARTEN M. 2018. Induced seismicity[J]. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 46(1): 149-174.
- KIM K H, REE J H, KIM Y H, KIM S, KANG S Y, SEO W. 2018. Assessing whether the 2017 M_w 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event[J]. *Science*, 360(6392): 1007-1009.
- LEE K K, ELLSWORTH W L, GIARDINI D, TOWNSEND J, GE She-min, SHIMAMOTO T, YEO I W, KANG T S, RHIE J, SHEEN D H, CHANG Chan-dong, WOO J U, LANGENBRUCH C. 2019. Managing injection-induced seismic risks[J]. *Science*, 364(6442): 730-732.
- LEI Xing-lin, SU Jin-rong, WANG Zhi-wei. 2020. Growing seismicity in the Sichuan Basin and its association with industrial activities[J]. *Science China Earth Sciences*, 50(11): 1505-1532(in Chinese with English abstract).
- LEI Zhi-hong. 2020. Study on the characteristics of hot dry rock reservoir and fracturing test model in the Gonghe Basin, Qinghai Province[D]. Changchun: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- LI Ting-xin, LIN Wen-jing, GAN Hao-nan, YUE Gao-fan, ZHANG De-long, WANG Gui-ling. 2020. Research on the genetic model and exploration progress of hot dry rock resources on the southeast coast of China[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(2): 187-200(in Chinese with English abstract).
- LI Yan-heng, TAN Ke-ke, FENG Li. 2012. Estimation of in situ geostress states from measuring shape of disked core[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 33(S2): 224-228(in Chinese with English abstract).
- LIM S S, MARTIN C D. 2010. Core disk and its relationship with stress magnitude for Lac du Bonnet granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(2): 254-264.
- LIN Wei-ren, KWAŚNIEWSKI M, IMAMURA T, MATSUKI K. 2006. Determination of three-dimensional in situ stresses from anelastic strain recovery measurement of cores at great depth[J]. *Tectonophysics*, 426(1-2): 221-238.
- LIN Wen-jing, LIU Zhi-ming, WANG Wan-li, WANG Gui-ling. 2013. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. *Geology in China*, 40(1): 312-321(in Chinese with English abstract).
- LU Chuan, WANG Gui-ling. 2015. Current status and prospect of hot dry rock research[J]. *Science & Technology Review*, 33(19): 13-21(in Chinese with English abstract).
- MAO Rui-biao, FENG Zi-jun, LIU Zheng-he, ZHAO Yang-sheng. 2017. Laboratory hydraulic fracturing test on large-scale pre-cracked granite specimens[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 44: 278-286.
- MATSUKI K. 1991. Three-dimensional in-situ stress measurement with anelastic strain recovery of a rock core[C]//Proceeding of the 7th ISRM International Congress on rock mechanics. Rotterdam: A A Balkema.
- MENG Wen, GUO Xiang-yun, LI Yong-hua, HAN Li-bo, ZHANG Chong-yuan. 2022. Tectonic stress field and dynamic characteristics in the northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(9): 3229-3251(in Chinese with English abstract).
- MOORE J N, SIMMONS S F. 2013. More power from below[J]. *Science*, 340(6135): 933-934.
- OLASOLO P, JUÁREZ M C, MORALES M P, D'AMICO S, LIARTE I A. 2016. Enhanced geothermal systems (EGS): A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56: 133-144.
- PLENEFISCH T, BONJER K P. 1997. The stress field in the Rhine Graben area inferred from earthquake focal mechanisms and estimation of frictional parameters[J]. *Tectonophysics*, 275: 71-97.
- SCHOENBALL M, DAVATZES N C. 2017. Quantifying the heterogeneity of the tectonic stress field using borehole data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(8): 6737-6756.
- SHEN Cheng, ZHAO Jin-zhou, XIE Jun, FAN Yu, SONG Yi. 2020. Target window spatial distribution prediction based on network fracability: A case study of shale gas reservoirs in the Changning Block, southern Sichuan Basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(6): 881-891(in Chinese with English abstract).
- SHENG Shu-zhong, WAN Yong-ge, JIANG Chang-sheng, WANG Xiao-shan, LIANG Shan-shan, XIAO Gen-ru, HU Xiao-hui. 2021. Study on the crustal stress field of the Tengchong volcanic area using composite focal mechanism method[J]. *Applied Geophysics*, 18(2): 239-252.
- SINHA B K, KOSTEK S. 1996. Stress-induced azimuthal anisotropy in borehole flexural waves[J]. *Geophysics*, 61(6): 1899-1907.
- TALUKDAR M, SONE H, KUO Li-wei. 2022. Lithology and fault-related stress variations along the TCDP boreholes: The stress state before and after the 1999 Chi - Chi Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(2): e2021JB023290.
- TANG Xian-chun, WANG Gui-ling, MA Yan, ZHANG Dai-lei, LIU Zhong, ZHAO Xu, CHENG Tian-jun. 2020. Geological model of heat source and accumulation for geothermal anomalies in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 2052-2065(in Chinese)

- with English abstract).
- TANG Xian-chun, WANG Gui-ling, ZHANG Dai-lei, MA Yan. 2023. Coupling Mechanism of Geothermal Accumulation and the Cenozoic Active Tectonics Evolution in Gonghe Basin, Northeastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(1): 7-20(in Chinese with English abstract).
- TEUFEL L W. 1983. Determination of in-situ stress from anelastic strain recovery measurements of oriented core[C]//SPE/DOE Low Permeability Gas Reservoirs Symposium. OnePetro.
- TEUFEL L W. 1993. Determination of in situ stress from parietal anelastic strain recovery measurements of oriented cores from deep boreholes[C]//US Symposium on Rock Mechanics: 34.
- VILARRASA V, DE SIMONE S, CARRERA J, VILLASEÑOR A. 2022. Multiple induced seismicity mechanisms at Castor underground gas storage illustrate the need for thorough monitoring[J]. *Nature Communications*, 13(1): 3447.
- WANG Cheng-hu. 2014. Brief review and outlook of main estimate and measurement methods for in-situ stresses in rock mass[J]. *Geological Review*, 60(5): 971-996(in Chinese with English abstract).
- WANG Gui-ling, LIU Yan-guang, ZHU Xi, ZHANG Wei. 2020. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(1): 1-9(in Chinese with English abstract).
- WANG Sheng-ao, HAN Fu-xing, SUN Zhang-qing, BING Qi, WANG Li-li, XU Bao-yin. 2021. Present situation and the development trend of in-situ stress measurement and its effect on hydrocarbon migration and fault block[J]. *Progress in Geophysics*, 36(2): 675-688(in Chinese with English abstract).
- WEI Zhou-tuo, FAN Yi-ren, CHEN Xue-lian. 2012. Application of shear wave anisotropy in fractures and in-situ stress analysis[J]. *Progress in Geophysics*, 27(1): 217-224(in Chinese with English abstract).
- XU Tian-fu, HU Zi-xu, LI Sheng-tao, JIANG Zhen-jiao, HOU Zhao-yun, LI Feng-yu, LIANG Xu, FENG Bo. 2018. Enhanced geothermal system: International progresses and research status of China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(9): 1936-1947(in Chinese with English abstract).
- XU Tian-fu, ZHANG Yan-jun, ZENG Zhao-fa, BAO Xin-hua. 2012. Technology progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock)[J]. *Science & Technology Review*, 30(32): 42-45(in Chinese with English abstract).
- YANG Yue-hui, SUN Dong-sheng, ZHENG Xiu-hua, LIN Wei-ren, LI A-wei. 2019. A method of diametrical core deformation analysis and its application on stress investigation in SK2 Well[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 50(12): 3106-3113(in Chinese with English abstract).
- YIN Xing-yao, MA Ni, MA Zheng-qian, ZONG Zhao-yun. 2018. Review of in-situ stress prediction technology[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 57(4): 488-504(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Chong-yuan, CHEN Qun-ce, QIN Xiang-hui, HONG Bo, MENG Wen, ZHANG Quan-feng. 2017. In-situ stress and fracture characterization of a candidate repository for spent nuclear fuel in Gansu, northwestern China[J]. *Engineering Geology*, 231: 218-229.
- ZHANG Chong-yuan, LIN Wei-ren, HE Man-chao, TAO Zhi-gang, MENG Wen. 2022. Determining in-situ stress state by anelastic strain recovery method beneath Xiamen: Implications for the coastal region of southeastern China[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55: 5687-5703.
- ZHANG Chong-yuan, WU Man-lu, CHEN Qun-ce, LIAO Chun-ting, FENG Cheng-jun. 2012. Review of in-situ stress measurement methods[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 31(3): 305-310(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Feng-shou, LI Meng-li, ZHANG Chong-yuan, HE Man-chao, ZHANG Sheng-sheng, HENG De. 2022. Study on fracture propagation and formation mechanism of core discing at depth under high in-situ stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(3): 533-542(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Sheng-sheng, ZHANG Lei, TIAN Cheng-cheng, CAI Jing-shou, TANG Bao-chun. 2019. Occurrence geological characteristics and development potential of hot dry rocks in Qinghai Gonghe Basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(4): 501-508(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Er-yong, WEN Dong-guang, WANG Gui-ling, YAN Wei-de, WANG Wen-shi, YE Cheng-ming, LI Xu-feng, WANG Huang, TANG Xian-chun, WENG Wei, LI Kuan, ZHANG Chong-yuan, LIANG Ming-xing, LUO Hong-bao, HU Han-yue, ZHANG Wei, ZHANG Sen-qi, JIN Xian-peng, WU Hai-dong, ZHANG Lin-you, FENG Qing-da, XIE Jing-yu, WANG Dan, HE Yun-chao, WANG Yue-wei, CHEN Zu-bin, CHENG Zheng-pu, LUO Wei-feng, YANG Yi, ZHANG Hao, ZHA En-lai, GONG Yu-lie, ZHENG Yu, JIANG Chang-she, ZHANG Sheng-sheng, NIU Xue, ZHANG Hui, HU Li-sha, ZHU Gui-lin, XU Wen-hao, NIU Zhao-xuan, YANG Li. 2022. The first power generation test of hot dry rock resources exploration and production demonstration project in the Gonghe Basin, Qinghai Province, China[J]. *China Geology*, 5(3): 372-382.
- ZHAO Jian-tao, CUI Xiao-feng, XIE Fu-ren. 2002. Preliminary analysis the tectonic stress intensity in the source region of Tangshan Earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 24(3): 268-276(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Jin-zhou, REN Lan, HU Yong-quan. 2013. Controlling factors of hydraulic fractures extending into network in shale formations[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 35(1): 1-9(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Y B, TANG X M, PATTERSON D J. 2019. Identifying stress-induced anisotropy and stress direction using cross-dipole acoustic logging[R]. SPWLA 50th Annual logging symposium.
- ZHOU Zhou, JIN Yan, ZENG Yi-jin, ZHANG Xu-dong, ZHOU Jian, WANG Wen-zhi, MENG Han. 2019. Experimental study on hydraulic fracturing physics simulation, crack initiation and propagation in hot dry rock geothermal reservoir in Gonghe Basin, Qinghai[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 49(5): 1425-1430(in Chinese with English abstract).
- ZOBACK M D. 2007. *Reservoir Geomechanics*[M]. New York: Cambridge University Press.
- ZOBACK M L. 1992. Stress field constraints on intraplate seismicity in eastern North America[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B8): 11761-11782.